

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»  
Институт машиностроения  
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»  
(наименование кафедры)

15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных  
производств

(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения

(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Повышение долговечности первичного вала коробки переключения  
передач с помощью упрочнения ультразвуковой дробеструйной обработки

Студент	<u>Ю.Ю. Лысенко</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>Н.Ю. Логинов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>В.Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., доцент Н.М. Бобровский \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия ) (личная подпись)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Н.Ю. Логинов \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия ) (личная подпись)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_\_ г.

Тольятти 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	2
ВВЕДЕНИЕ.....	3
<b>1. Методы обработки поверхностным пластическим деформированием и результаты их исследования.....</b>	<b>5</b>
1.1. Анализ методов обработки поверхностным пластическим деформированием.....	5
1.2. Повышение эксплуатационных свойств деталей, обработанных поверхностным пластическим деформированием.....	18
1.3. Обработка ППД без применения СОТС.....	22
1.4. Многоинструментальная обработка ППД.....	23
1.5. Выводы.....	24
<b>2. Освоение технологии ультразвукового дробеструйного упрочнения и разработка специальной рабочей камеры.....</b>	<b>25</b>
2.1. Основы дробеструйного упрочнения.....	25
2.2. Возможности ультразвукового дробеструйного упрочнения по сравнению с простым дробеструйным упрочнением.....	31
2.3. Преимущества ультразвукового дробеструйного упрочнения.....	39
2.4. Нанокристаллизация при ультразвуковой дробеструйной обработке.....	42
2.5. Применение эффективных шариков для упрочнения детали.....	44
2.6. Требования к ультразвуковому дробеструйному оборудованию.....	53
2.7. Правила безопасности ультразвуковых установок.....	55
<b>3. Анализ материала для применяемой детали.....</b>	<b>57</b>
3.1. Общие сведения о применяемой детали.....	57
3.2. Используемый материал детали.....	59
3.3. Анализ влияния материала на прочностные характеристики.....	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	69
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	70
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	76

## ВВЕДЕНИЕ

С безопасностью и качественной работой машин связан именно качественный поверхностный слой деталей, который воздействует на их работоспособность и обладает физико-механическими и геометрическими параметрами. При использовании, детали машин находятся в контакте между собою или с окружением.

Существуют эксплуатационные свойства такие как, сопротивление усталости, износостойкость, коррозионная стойкость, сопротивление контактной усталости и другого, от них зависит качественный поверхностный слой. Отношение характеристик качества поверхностного слоя с эксплуатационными свойствами деталей, говорит о том, что идеальной поверхности нужно быть достаточной мере твердой, у которой должна быть мелкодисперсная структура, сжимающие остаточные напряжения, сглаженная форма микронеровностей с большой площадью опорной поверхности.

Для повышения существенного качества поверхностного слоя деталей можно достигнуть, применив упрочняющие методы обработки. Методы поверхностного пластического деформирования (ППД) получили массовое распространение в промышленности.

Именно данная технология получила большое развитие в период 1950-1980 гг. и основная задача ППД это не формоизменение, а повышение качества поверхностного слоя, поэтому пластическая деформация захватывает не весь объем детали, а только поверхностный слой. Для этого применяется последовательной локальное деформирование металла, при котором объем очага деформации имеет размеры порядка нескольких миллиметров или десятых долей миллиметра.

Методы поверхностного пластического деформирования позволяют в несколько раз при сравнительно низких производственных затратах упрочнить поверхностный слой детали, повысить износостойкость, сопротивление усталости, коррозионную стойкость и тем самым увеличить ресурс работы детали

в десятки раз. Простота и легкость метода позволяет применять поверхностное пластическое деформирование во всех предприятиях, связанных с машиностроением, а также и в автомастерских.

Поверхностное пластическое деформирование применяется для обработки деталей разной твердости, изготовленных из той же, стали, цветного металла, сплава или чугуна, при этом детали могут иметь различные размеры начиная от нескольких миллиметров и заканчивая несколькими метрами.

Научная новизна работы состоит в проведении анализа методов поверхностного пластического деформирования, определить и показать результат отличия ультразвуковой дробеструйной обработки от обычной дробеструйной обработки, отметить преимущества предлагаемого метода, выполнить анализ влияния применяемого материала на прочностные характеристики и проанализировать выбор эффективной дроби для упрочнения детали.

Практическая ценность работы основывается на разработке ультразвуковой дробеструйной установки, проведению анализа по выбору эффективной дроби для упрочнения детали.

Таким образом, целью работы является использование ультразвуковой дробеструйной обработки для повышения долговечности первичного вала коробки переключения передач.

# 1. Методы обработки поверхностным пластическим деформированием и результаты их исследования

## 1.1. Анализ методов обработки поверхностным пластическим деформированием

Геометрические и физико-механические параметры характеризуются с качеством поверхности детали. При использовании, детали машин друг с другом контактируют или окружением. Качество поверхностей детали зависит от эксплуатационных свойств: сопротивления усталости, износостойкости, коррозионной стойкости, сопротивления контактной усталости и др.

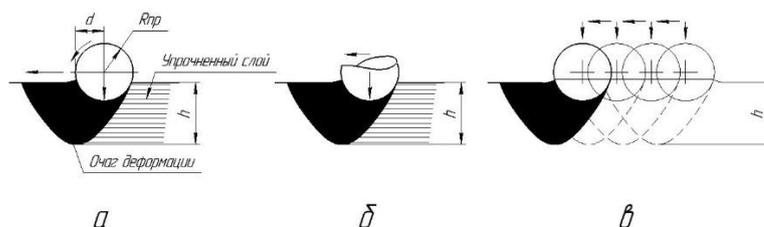
Ввиду с ростом эксплуатационных процессов, увеличению скорости перемещения рабочих органов, поднятию температуры и давления, увеличивается значительна роль качества поверхности, поэтому необходимо установить связь эксплуатационных свойств деталей с характеристиками качества поверхности.

Оптимальной поверхности нужно быть непосредственно твердой, у которой должна быть мелкодисперсная структура, иметь сжимающие остаточные напряжения, а также округлой, сглаженной формой микронеровностей с крупной опорной поверхностью [4].

Среди методов упрочняющей технологии в производстве эффективными считаются методы поверхностного пластического деформирования, которые применяют для того чтобы повысить сопротивление усталости и твердости поверхностных слоев металла, а также сформировать в данном слое направленные внутренние напряжения для образования регламентированного рельефа микронеровностей на поверхности.

Процесс обработки поверхностным пластическим деформированием (ППД) осуществляется силовым контактным воздействием деформирующего инструмента, рабочие элементы которых (ролики, шарики или тела других конфигураций) взаимодействуют на поверхность самой заготовки в условиях относительного их движения (Рисунок 1).

Осуществление обработки поверхностей выглаживанием осуществляется интенсивно, в процессе которого возникает повышение прочности поверхностного слоя (улучшая микротвердость и создавая благоприятные сжимающие напряжения); так же обработанные поверхности детали абразивными частицами исключают шаржирование.



а - качение; б - скольжение; в – внедрение

Рисунок 1 - Взаимодействие деформирующего инструмента на обрабатываемую поверхность

Отталкиваясь от схемы, на которой изображен процесс обработки поверхностей детали силовым воздействием деформирующего инструмента, в согласии с ГОСТ 18296– 72, были вынесены основные способы упрочнения ППД (Рисунок 2).

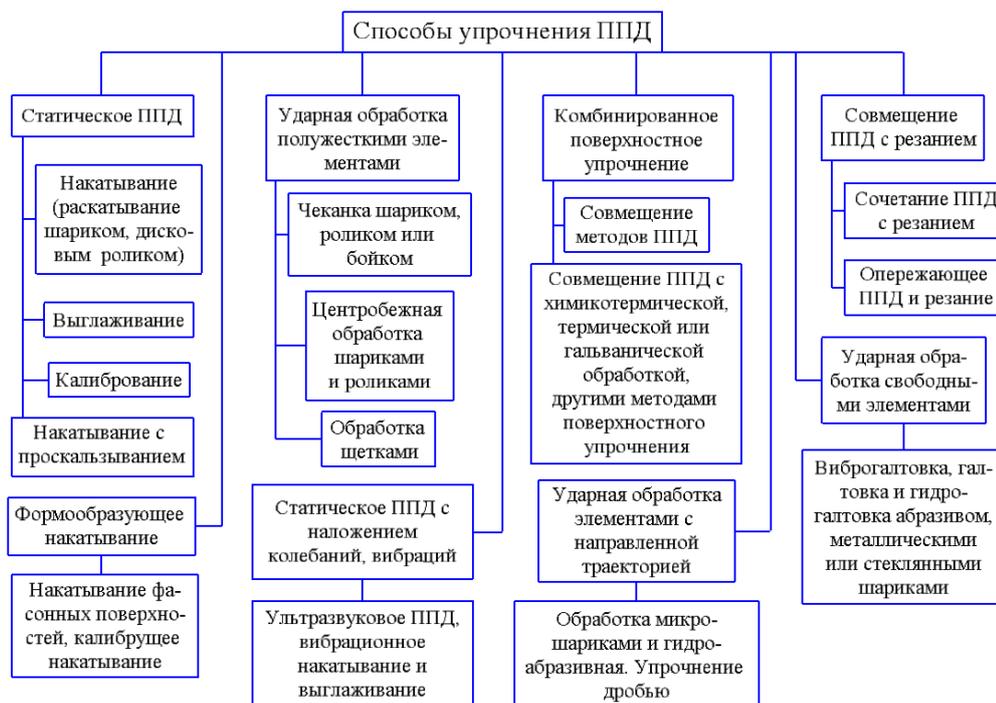


Рисунок 2 - Способы поверхностного пластического деформирования [10]

Значительный вклад в развитие процесса обработки ППД внесли следующие ученые: Барац Я.И.[1], Бабичев А.П.[21], Блюменштейн В.Ю.[22], Грановский Э.Г. [23], Одинцов Л. Г.[4], Смелянский В. М.[24], Проскуряков Ю.Г.[25], Торбило В.М.[12], Яценко В.К.[26], Шнейдер Ю.Г.[27], Петросов В.В. [6].

В поверхностном пластическом деформировании были обнаружены методы, которые имеют наиболее массовое распространение среди других методов, за счет того, что они просты в реализации и в стабильном развитии процесса обработки, присутствуют в них способы обкатывания, дорнования и выглаживания, в который активно производится постоянное контактное давление взаимодействие инструмента с заготовкой в процессе их совместного перемещения, ими являются статистические методы.

Существуют широко используемые методы финишной обработки (шлифование, хонингование, доводка), которые создают нужную форму детали с заданной точностью, очень часто не выполняется оптимальное качество поверхности. Вследствие этого применяют методы ППД, лишь из некоторых является алмазное выглаживание и вибровыглаживание [4].

Основными преимуществами по сравнению с другими методами обладает алмазное выглаживание, обусловлено физико-механическими свойствами алмаза. Алмаз - является самым твердым веществом в природе, поверхность которого полируется по сфере до  $Ra = 0,025-0,063$  мкм радиусом 0,6 - 4,0 мм, так же имеет низкий коэффициент трения по металлу и высокую теплопроводность [4].

Алмазное выглаживание аналогично точению, только за место резца используется алмазный выглаживатель (т.е. наконечник с кристаллом природного или искусственного алмаза), в процессе которого происходит внедрение алмаза в поверхностный слой обрабатываемой детали и перемещается, пластически деформируя.

Все микронеровности, которые возникли на операциях предыдущих обработок, который позволяет эффективно обрабатывать практически все металлы, как мягкие, так и закаленные металла до твердости 65 HRC, кроме

циркония, титана и ниобия, т.к. они прилипают на рабочую часть используемого инструмента (Рисунок 3) [40].



Рисунок 3 - Обработка алмазным выглаживателем наружной цилиндрической поверхности заготовки на токарном станке

А также повышает прочность на 25...60%; увеличивается глубина упрочненного слоя от 0,15 мм до 0,4 мм; создает остаточные сжимающие напряжения, достигая 800...1100 Мпа. Вместе с этим происходит изменение параметров микрогеометрии поверхности: идет уменьшение высоты неровностей профиля в 5 раз и более ( $R_a$ , мкм), а также, в результате изменения их формы, относительная длина профиля возрастает ( $t_p$ , %) [41].

В работе [41] был проведен эксперимент по выглаживанию ступенчатых валиков алмазным наконечником при радиусе 3,5 мм со скоростью 48 м/мин. На основе выполненного эксперимента было обнаружено, что детали из мягких низкоуглеродистых сталей, с относительно высокой шероховатостью исходной поверхности ( $R_a \geq 4,0$  мкм) желательно эффективно выглаживать алмазом. В итоге высота микронеровностей уменьшится в 8...9 раз.

В зависимости от различных технологических условий, данный метод позволяет достичь точности 6 - 7 квалитета и шероховатости  $R_a = 0,16 - 0,025$  мкм. К примеру, поршневые пальцы обработанные алмазным выглаживанием, которые прошли более 43000 км пробега, их износ был на 60...93% меньше необработанных образцов [41].

Для повышения производительности методов ППД, существуют несколько направлений (Рисунок 4).

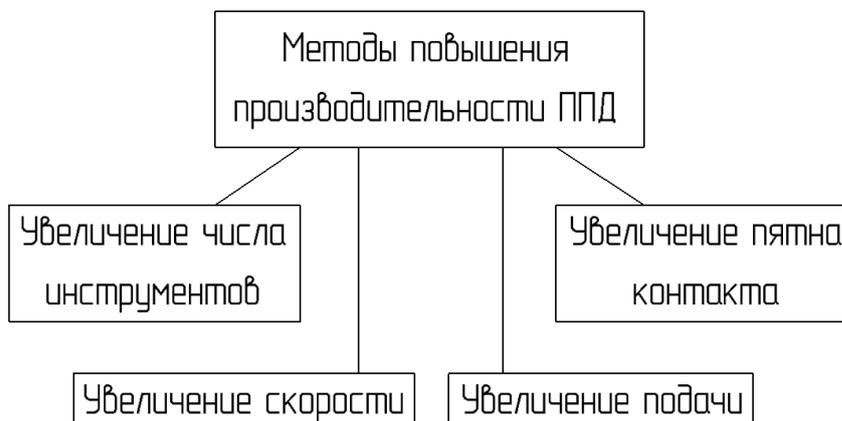


Рисунок 4 - Пути повышения производительности ППД

Производительный метод алмазного выглаживания зависит от режимов обработки - скорости и подачи.

В ППД присутствуют такие процессы, которые проводят упрочнение поверхностей деталей добавляя в процесс колебательное движение с частотой 900 – 300 двойных ходов в минуту и амплитудой до 4 мм – это вибровыглаживание и вибронакатывание, которые отличаются от процесса раскатывания, обкатывания или алмазного выглаживания. Такие процессы лучше всего считать статистическими методами ППД. Сам процесс к примеру, вибровыглаживания представлен (Рисунок 5), где шарикун сообщается еще колебательное движение  $S$  по направлению подачи.

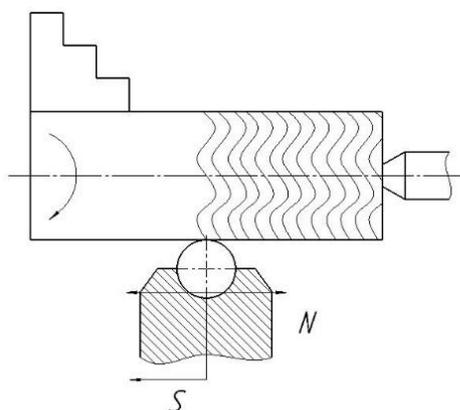


Рисунок 5 - Схема вибровыглаживания шариком

Чтобы получить требуемый рельеф на поверхности нужно менять перед обработкой скорость, продольную подачу, амплитуду, а также скорректировать частоту колебаний. Так же при нанесении канавок одновременно упрочняется поверхность детали (на 10...17% микротвердость поверхностей наплывов и канавок будет больше твердости исходного металла).

При вибровыглаживании в поверхностном слое деталей создаются полезные эксплуатационные свойства сжимающих остаточных напряжений, которые в 1,3...1,7 раза больше, чем при выглаживании без вибрации.

Образование системы канавок при вибронакатывании на точность обработки можно сказать не оказывает никакого воздействия. На рисунке 6 представлены различные рельефы при вибронакатывании или вибровыглаживании.

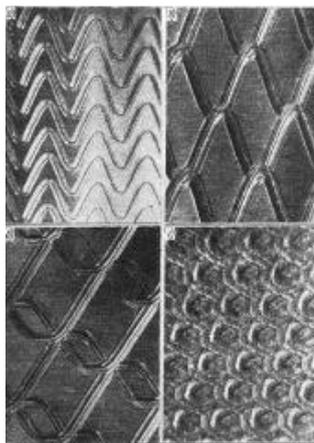


Рисунок 6 - Примеры микрорельефа, полученного вибровыглаживанием или вибронакатыванием

Процесс вибронакатывания имеет способность обрабатывать материалы, у которых твердость не высока. А вибровыглаживание тоже имеет способность обработать мягкие материалы, но материалы, которые обладают повышенной твердостью до 65 HRC тут только можно использовать процесс вибровыглаживания.

В таком процессе как вибровыглаживание можно обработать углубление шириной от 4 мм и даже больше, а для достижения такой ширины используется инструмент как наконечник, на котором может присутствовать материал

природного алмаза, так и искусственного соответствующего размера. Также особенностью является обработка поверхности от края углубления или от торца изделия. Делая вывод, по эффективности процесс вибронакатывания проигрывает вибровыглаживанию, но вибровыглаживание больше всего имеет применение в массовых технологических средах [40].

Также большой эффективностью (в 5 – 10 раз) отличается процесс поверхностного деформационного упрочнения наклепом (ПДУ), являющимся одним из наиболее экономичных и эффективных методов упрочнения деталей машин, который приводит к уменьшению шероховатости накатанной поверхности до  $Ra = 0,32 - 0,08$  мкм, упрочнению металла на глубину до 20 мм, повышению усталостной прочности в 2 - 5 раз [42].

ПДУ в ряде случаев сопровождается упрочнением поверхностного (наплавленного) слоя, в результате которого понижается пластичность, увеличивается и выравнивается твердость металла, а также за счет распада остаточного аустенита уменьшается структурная неоднородность обрабатываемой поверхности.

Успешно проведенные работы (П. И. Алексеев, М. А. Балтер, В. М. Браславский и др.) в последнее десятилетие способствовали широкому промышленному распространению отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей накаткой их роликами или шариками. Исследованиям же ПДУ в области наплавленных (сварных) деталей посвящен крайне мало работ [42].

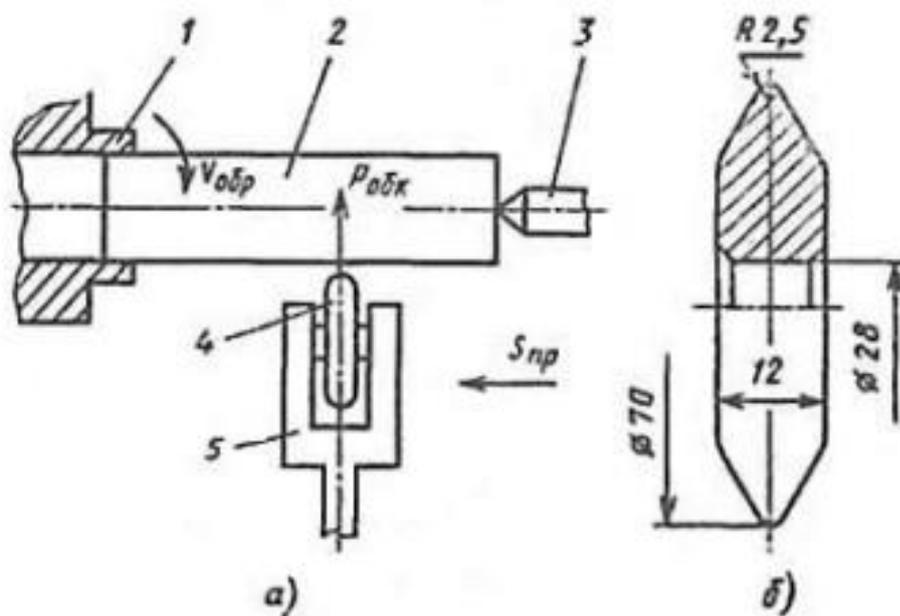
Накатку цилиндрических деталей производят в основном на специальных или металлорежущих станках токарного типа. Обрабатываемую деталь зажимают в центрах станка, накатное устройство (с шариками или роликами) устанавливают на суппорте. Задачу осуществляют с помощью механизма подачи станка.

Ролики изготавливают из высокопрочной стали марок X12, X12M, XBГ, 5XHM, ШX15, У10, У12 и др. и закаливают на твердость HRC 58 – 65. В зависимости от способа создания усилия на ролик все приспособления для

накатки роликом можно разделить на 3 группы: механических, пневматических и гидравлических групп.

Наибольшие распространения получили механические приспособления, нагрузка на ролик которых создается с помощью пружины, т. к. они обеспечивают более равномерное упрочнение всей обрабатываемой поверхности. Беспружинные «жесткие» накатники не нашли широкого применения [42].

На рисунке 7а, показана схема для накатки цилиндрических поверхностей, а на рисунке 7б приведен чертеж конструкции ролика.



1 - зажимной патрон токарного станка; 2 - обрабатываемая деталь; 3 - центр задней бабки; 4 - накатной ролик; 5 - державка; (а) - токарный станок; (б) - эскиз накатного ролика

Рисунок 7 - Схема накатки детали, материал сталь ШХ15, HRC 62-63

Применяя процесс обкатки роликом, происходит охват поверхностного слоя металла пластической деформацией, толщина которого определяется давлением, механическими свойствами и структурой металла. От размера контактной площади зависит глубина наклепа, которую можно вывести по формуле С. Г. Хейфеца:

$$h_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{2\sigma_{\text{T}}} \quad (1)$$

где  $P_{\text{н}}$  – усилие накатки;  $\sigma_{\text{T}}$  – предел текучести обрабатываемого материала.

Даже при относительно небольших рабочих усилиях толщина деформированного слоя металла измеряется миллиметрами, т. е. во много раз превосходит высоту поверхностных микронеровностей.

Из формулы (1) следует, что толщина наклепанного слоя металла зависит от величины  $P_{\text{н}} = F_{\text{к}} P$ , поэтому при накатке глубину распространения пластической деформации можно регулировать изменением формы и размеров ролика.

В результатах исследования показано, что при максимальном поверхностно-пластическом деформировании, упрочнение у каждого материала достигается под определенным давлением: у мягкого и пластичного материала будет давление меньше, а у твердого и более пластичного будет наоборот давление больше. Если для детали требуется максимальная твердость, то достигнуть этого предела можно обкатыванием при высоком давлении от требуемого, но будет происходить снижение самой твердости детали, а также перенаклеп.

Используя давления, которые достигают критических значений, возникает шелушение, то есть у детали идет разрушение поверхностей. От величины давления зависит химический состав, свойство и структура металла, при котором происходит достижение максимальной поверхностной твердости у легированных сталей [42].

Мухановым И. И. в 1964 году был предложен впервые метод ППД с использованием ультразвукового инструмента [9]. Метод ППД ультразвуковым инструментом отличался от обычного выглаживания тем, что инструмент реализует колебания с ультразвуковой частотой (Рисунок 8).

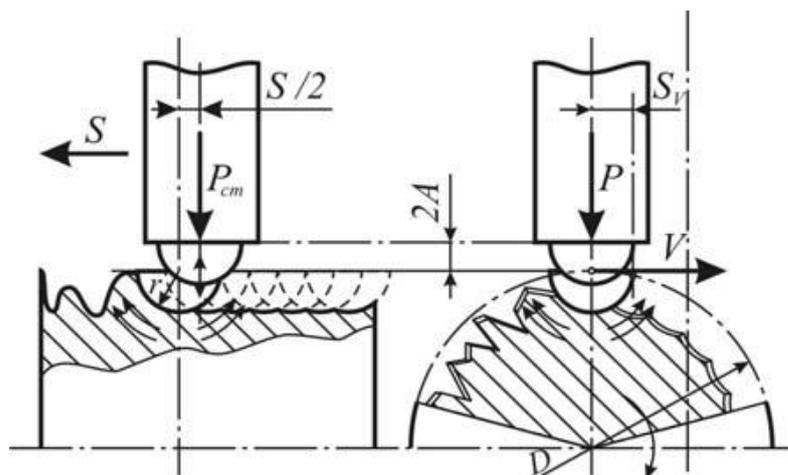


Рисунок 8 - Ультразвуковая упрочняющая обработка (метод ППД)

Одним из передовых методов поверхностного пластического деформирования является ультразвуковая обработка, сам метод основывается на передаче ультразвуковых колебаний инструменту с определённой частотой 18-24 кГц и соответственно 15 – 30 мкм амплитудой. Такие параметры задаются в случае использования статистических методов ППД при алмазном выглаживании или обкатыванием шариков и т.д, и за счет этого они становятся ударными методами (как ультразвуковое выглаживание или обкатывание и т.п.).

Исследования показали, что величина  $R_a$ , которая характеризует шероховатость поверхности, при увеличении амплитуды колебаний или усилия прижима приходит к снижению шероховатости. Так, например, для той же стали 12X18H9T шероховатость поверхности в результате УЗО была уменьшена с  $R_a = 2,5$  до  $R_a = 0,66$  мкм. При этом на поверхности был сформирован полностью новый регулярный микрорельеф [14], [15].

В работе [39] предлагают использование одновременного влияния ультразвукового инструмента (ЛУЗО), лазерного луча, а также комбинированного (Л+УЗО) воздействия. В виду влияния Л+УЗО и ЛУЗО происходит увеличение микротвердости поверхностных слоев стальных деталей в 5-6 раз, изменение шероховатости поверхностей на 0,63 - 0,25 мкм ( $R_a$ ), и соответственно создается остаточное микронапряжение сжатия в поверхностном слое.

Одним из комбинированных методов ППД, который наиболее производительный, экономичный и без проблем реализуемый в производстве, в

состав которого входят достоинства динамических и статистических способов ППД, является статико-импульсная обработка.

В результате исследований установлено, глубина упрочнения при статико-импульсной обработке достигла 7 - 10 мм исходя от применяемой марки стали. Повысилась на 25% и более глубина упрочнённого слоя, сравнивая со статическим методом накатыванием в 1,7 ... 2,5 раза, а глубина упрочненного слоя равна 10 % и более – в 1,8 ... 2,1 раза.

Выявлено, что скорость изнашивания образцов, упрочненных СИО, меньше на 25...30%, чем термообработанных и на 20% в сравнении с образцами, упрочненными взрывом [16].

В работе [5] методом подвижной обработки ППД служит обработка поверхностей механическими щетками. Данный метод поверхностного пластического деформирования повышает работоспособность сварных конструкций и деталей машин. Поверхностный упрочненный слой достигает толщины 0,05-0,1 мм. Идет повышение микротвердости на 20-50% и шероховатость поверхности снижается в 1,1-2 раза. Применяя в обработке вращающиеся металлические щетки, оснащенными упругими элементами, при равном количестве очистки, качество самой очистки на самом деле в значительной степени (7-45 раз) выше, чем при использовании дробеструйной обработки.

Среди динамических методов, в которые входит отделочно-упрочняющая обработка присутствует центробежно-ротационная обработка (ЦРО) со стальными шариками, которая занимает достойное место находясь в составе самых значимых методов обработки по ППД деталей. ЦРО обеспечивает высокую производительность процесса обработки, во много раз превышает производительность по сравнению с другими методами. Исходя от обработки конкретного материала ЦРО можно получить шероховатость поверхности до 0.8 мкм (Ra), сжимающие остаточные напряжения будут составлять 100...130 Мпа, глубина залегания 0.5...1 мм, повышается усталостная долговечность в 1.5...1.6 раз и повышается степень упрочнения до 20% [7].

Метод обработки дробью – это эффективный и распространенный технологический метод повышения выносливости и износостойкости ПИД деталей, определяющих надежность работы изделий. Работы по этому методу проводил Петросов В.В. [17]. Главной особенностью этого метода является универсальность. Обработка дробью повышает износостойчивость детали и создает возможность повысить ресурс всего изделия, или при таком же ресурсе можно повысить несущую способность (выносливость) в 1,5 и более раз. К примеру, при гидродробеструйной обработке рабочих поверхностей штампов повышается износостойкость штампов в 2 раза, улучшается также микрогеометрия обрабатываемых поверхностей и возникает создание остаточных напряжений сжатия [18].

Детали, которые находятся в условиях тяжелой эксплуатации, для них применяется метод центробежной обработки, чтобы повысить сопротивление усталости. Если правильно назначены условия и режимы упрочнения, то благодаря этому методу у обработанных деталей повысится сопротивление усталости в 1,5 - 5 раз [4].

Существуют сведения по замораживанию образцов сталей, для повышения эффективного процесса выглаживания. Для того чтобы повысить силу выглаживания, при котором будет исключаться случай перенаклепа и улучшатся распределения напряжений в поверхностном слое, будет произведена заморозка детали перед обработкой до температуры равной  $-70^{\circ}\text{C}$  [4].

Существуют варианты по обработке ПИД в средах сильного холода, такое как выглаживание заготовок в условиях атмосферного воздуха, которые прежде всего охладили до азотных температур, также при выглаживании в условиях жидкого азота и выглаживании в низкотемпературных парах азота, все это рассматривалось в работе [19]. Выбирая сравниваемые показатели процесса трения, было предусмотрено не только способность отразить особенность каждого варианта, а также низкотемпературной обработки в общем.

Как критерии были взяты - критерий перехода к микрорезанию, критерий упругого оттеснения и коэффициент трения. Была предусмотрена одинаковая

температура охлаждения заготовок равная  $-190^{\circ}\text{C}$ . Для упрочнения, деталей, которые состоят из аустенитных нержавеющей сталей, данный способ оказывается эффективным, при этом на поверхности обрабатываемой детали из-за конденсации влажности в воздухе происходит формирование особого микрорельефа.

Для того чтобы увеличить скорость обработки, нужно снизить температуру в зоне контакта заготовки и инструмента, для этого потребуется охлаждение инструмента с помощью радиатора-насадки. Используя радиатор, температура снижается на 30 ... 45% и за счет этого увеличивается скорость выглаживания в 2,1 ... 3 раза, за счет такого охлаждения повышается стойкость к коррозии, физико-механические свойства металла и контактная прочность повышаются, также идет увеличение динамической стойкости все это возникает из-за структурного превращения при выглаживании, в поверхностном слое которого уменьшается остаточный аустенит. В работах Торбило В.М. [12], Евсина Е.А[11], были рассмотрены вопросы по уменьшению температуры инструмента в зоне контакта с заготовкой.

## 1.2. Улучшение эксплуатационных свойств поверхностей деталей, обработанных ППД.

Одним из важнейших факторов детали является качество поверхности, которое обеспечивает высокие эксплуатационные свойства деталей машин, само качество поверхности зависит от различных факторов, как износостойкость, макрогеометрия, поверхностная прочность, микронеровности и др.

Поверхностный слой детали при эксплуатации подвергается большим нагрузкам не зависимо от вида нагружения и для увеличения стойкости поверхностного слоя существует такой процесс как поверхностное пластическое деформирование, которое является наиболее удачным методом по упрочнению поверхностных слоев деталей.

Одинцов Л.Г [1] проводил тесты автомобильных компрессоров. Было произведено выглаживание коленчатых валов и поршневых пальцев вместе с сальниковой шейкой, которые далее были зафиксированы для дальнейшего проведения тестов. По заводской технологии проводилось выглаживание после завершения окончательной технологии.

Для того чтобы сравнить, по заводской технологии проводилась обработка коленчатых валов и поршневых колец шлифованием и после, было проведено испытание. Установка выглаженных и серийных поршневых пальцев проводилась в одном компрессоре, для того чтобы исключить воздействия побочных факторов. Поршневые пальцы обработанные алмазным выглаживанием, которые прошли более 43000 км пробега, их износ был на 60...93% меньше необработанных образцов.

Была предложена идея Барацем Я.И [1] увеличить эксплуатационные свойства трущейся пары поршень-корпус за счет нанесения постоянного микрорельефа. Проводилась проверка самого процесса на герметичность сопряжения с разными параметрами и режимами обработки. Его коллега Шнейдер Ю.Г выдал такое мнение, что для применяемой детали самым точным

микрорельефов в конечном итоге является частичный или постоянный микрорельеф с касающимися канавками.

Проводилось исследование [13] на влияние технологического состояния алмазного выглаживания (силы выглаживания) на универсальном токарно-фрезерном центре инструментом с устройством динамической стабилизации на формирование топографии поверхности, микротвердости, структуры, напряженного состояния и других микромеханических свойств поверхностных слоев высокохромистой стали 20X13, в которой в результате упрочняющей термической обработки была сформирована высокопрочная структура низкоотпущенного мартенсита.

В результате, применение инструмента с узлом динамической стабилизации на современных токарно-фрезерных центрах обеспечивает 12-кратное уменьшение шероховатости (до  $Ra=0,09$  мкм) поверхности термоупрочненной (закалкой с низким отпуском при  $150\text{ C}$ )<sup>о</sup> коррозионностойкой стали 20X13 при однопроходном алмазном выглаживании с силой, достаточной для формирования нового рельефа поверхности.

В одной работе, проводился анализ Титана VT1-1 на износ и приработку Гороховым В.А. [3] после прохождения процесса обкатывания, виброобкатывания, точения, шлифования. Материал обладает достаточной легкостью, плотность является высокой, а также способен сопротивляться коррозии с небольшим изменением коэффициента теплового расширения. По результатам анализа было выявлено, что, обработав поверхности Титана VT1-1 поверхностным пластическим деформированием, износ сократился в 2 раза. Исходя из результатов можно сделать вывод, что благодаря оптимизации геометрических параметров износостойкость титановых сплавов улучшается на 55%, а при физических параметрах на 45%.

В автомобилестроении существуют такие изделия как резинометаллические пары, их задача — это работать на трение, большому износу подвергаются шейки валов, которые находятся в контакте с манжетными уплотнителями. Было проведено тестирование стали 40X (в качестве образца) в машине трения с целью

того чтобы определить износостойкость поверхностей, применяя при этом всевозможные процессы обработки поверхностей детали (алмазное выглаживание, шлифование, полирование). В ходе тестирования было установлено, что, проведя обработку алмазным выглаживателем, износ поверхностей оказался меньше 1,5- 2 раз по сравнению с полированием, а также оказался меньше в 5 раз, чем после шлифования [7].

Барац Я.И в своей работе [1] осуществлял эксперимент деталей, работающих на трение с целью повышения их долговечности. Суть процесса основывалась на том, чтобы методом фрикционного переноса нанести назначенный микрорельеф антифрикционным композитом на обработанную поверхность. Такое покрытие достигало термостойкости до температуры 870 К.

Применялись стали 38ХНЗМА, 40Х, 40, 20Х, 12ХНЗА которые показали определенные результаты и самым совершенным процессом оказалась отделочно-упрочняющая обработка шариком по незакаленному валу, для втулок выяснилось растачивание с дальнейшей роликовой раскаткой методом ППД.

Для повышения износоустойчивости детали Папшев Д.Д [8] применил оптимальные режимы для закаленных, легированных сталей, а также сплавов, за счет которых были получены в конечном итоге положительные результаты. В целях применения оптимальных режимов, за основу как был взят титановый сплав ПТ-3В ( $\sigma_B = 635...885$  МПа), была проведена обработка поверхностей детали ультразвуковым упрочением, механическими вращающимися щетками и шариком. Исходя от проведенных обработок результатом является повышение твердости на 15-30%, а упроченный слой достигал 0,1-0,3мм. Были проведены анализы по обработке щетками микропрофиля шлифованных поверхностей, которые привели к снижению микропрофиля в 1,3-1,5 раза.

Выполнялось исследование закаленных сталей, при котором произошло изменения износа поверхностей и повысилась микротвердость на 10 - 30 %, снизившись на 30 – 40 % по сравнению со шлифованием, повлияло также увеличение износостойкости в результате уменьшения времени прикатывания в

1,5 – 2,2 раза. Кроме того, было выявлено, что повысилась усталостная прочность ступенчатых валов за счет наклепа, материалом являлась сталь 40, 40Х, 40ХН.

Инженерно-экономический институт обработал точением образцы из сплава титана ВКЗ-1, которые подвергли пластическим деформированием методом обкатывания и провели оценку качества поверхностных слоев на усталостную прочность. Увеличивая усилие во время обработки шариками, происходило увеличение усталостной прочности, также увеличилась прочность на 51-52 кГ/мм при обработке роликами с усилием 50 и 100 кГ, добавив еще 150-200 кГ усталостная прочность возросла на 35-40 кГ/мм.

В дальнейшем после проведенной обкатки титана ВКЗ-1 было выявлено, что при обработке по поверхностям титана ВКЗ-1 поверхностной пластической деформацией образовались в поверхностном слое высокие различные структуры, которые повлияли на усталостную прочность [20].

### 1.3. Обработка ППД без применения СОТС

На ПАО «АВТОВАЗ» в механосборочном производстве работает 355 единиц оборудования по металлообработке, которое применяет пожароопасные масляные СОТС почти 2 тысячи тонн в год. Из них безвозвратные потери составляют 60 %. Эти жидкости обладают малой температурой вспышки, ухудшаются условия труда, создается опасность при возгорании, появляются заболевания, а также происходит вред для окружающей среды.

В главном производстве ПАО «АВТОВАЗ» была произведена разработка гиперпроизводительного способа обработки ППД выглаживанием используя широкий самоустанавливающийся инструмент и в обработке будет отсутствовать пожароопасные СОТС.

Принцип работы технологии заключается в том, что вокруг заготовки будет поворачиваться инструмент применяя покачивание вокруг нормали к обрабатываемой поверхности, который будет проходить через центральное пятно контакта заготовки с инструментом, где отсутствует продольная подача, путем расширения очага деформации в сторону направления продольной подачи. Для достижения наибольшей эффективности, длина обрабатываемой поверхности должна быть равна длине очага деформации.

По сравнению с другими процессами механической обработки, обработка ППД без применения СОТС обладает особенностями. Не содержится интенсивное тепловыделение и стружкообразование, как при обработке резанием или шлифованием. Изучая воздействие изнашивания выглаживающего инструмента на шероховатость поверхностей обработанной детали, можно обеспечить стабильность технологии при выглаживании не применяя СОТС в массовом производстве [28].

Перед классическими методами ППД в данной технологии присутствуют 2 преимущества:

- Повышение производительности.
- Отсутствие СОТС при обработке.

#### 1.4. Многоинструментальная обработка ППД

Разработан упруго силовой метод комбинированной обработки резанием и ППД, позволяющий использовать упругие свойства технологической системы для повышения точности формообразования. В развитие методов совмещая обработку резанием и ППД высокий вклад внесли работы П. С. Чистосердова, А. М. Кузнецова, Г. М. Азаревича, В. М. Смелянского, Ю. Г. Шнейдера, а также и их ученики [45].

Одним из эффективных методов комбинированной обработки является совмещенная обработка резанием и поверхностным пластическим деформированием (ППД), позволяющая в 2–3 раза повысить производительность механической обработки, улучшить усталостную прочность, контактную выносливость и износостойкость упрочненных деталей. При котором обеспечивается шероховатость поверхности  $Ra\ 0,63\dots 0,10\ \mu\text{m}$ , упрочнение поверхностного слоя до 12 мм глубины, в поверхностном слое детали формируются положительные напряжения сжатия [29-31].

При реализации метода на станках токарной группы обеспечиваются 6–7 квалитеты размерной и 7–8 квалитеты геометрической точности формообразования цилиндрических поверхностей.

Состояние пластической деформации улучшается, используя одновременную обработку двумя разнорadiusными инструментами. В итоге качество обработанных изделий и производительность обработки повышается. При обработке, в которой одновременно применяется два и более инструмента, которые установлены в плоскости и перпендикулярны оси вращения заготовки, дает возможность увеличить подачу пропорционально количеству инструментов.

Содержатся сведения по улучшению качества поверхностей деталей применяя обработку двух и более инструментов, которые расположены в приспособлении так, что один из которых, перемещаясь по поверхности детали, обгоняет другие [36]. Выглаживание многоэлементными алмазными

инструментами является как одно направление по увеличению производительности обработки [4], [37], [38].

По результатам проведенных тестов данная обработка, в которой используется особый инструмент, увеличивает микротвердость поверхностного слоя в 1,5 раза и уменьшает высоту неровностей в 2,4...3 раза.

Выглаживание осуществляется за счет большого количества сверхтвердых элементов, которые контактируют с обрабатываемой поверхностью в процесс обработки и располагаются на поверхности инструмента.

### 1.5. Выводы

Проведен анализ результатов, исследований основных процессов поверхностного пластического деформирования, который позволяет сделать следующие выводы: что достоинством методов поверхностного пластического деформирования является воздействие на физико-механические свойства и структуру поверхностного слоя детали, с целью повышения его свойств.

Исследовано и разработано достаточное количество статистических и динамических методов ППД с влиянием на обрабатываемую поверхность деталей.

Методы ППД наиболее эффективно применяются в машиностроении, в мелкосерийном производстве и при обработке важных деталей, для которым требуется коррозионная стойкость, износостойкость и др.

Но существует еще один более эффективный метод повышения эксплуатационных характеристик изделия, способный улучшить показатель изделия по прочности  $\sigma_B$ , износостойкости, усталостной прочности и коррозионной стойкости в 2-3 раза, а также идеально подходит для обработки выбранной детали в данной работе. Этим методом является - ультразвуковое дробеструйное упрочнение, особенности, преимущества, качество обработанной поверхности, экологичность метода, описано в следующей главе.

## 2. Освоение технологии ультразвукового дробеструйного упрочнения и разработка специальной рабочей камеры

### 2.1. Основы дробеструйного упрочнения

Дробеструйное упрочнение в автомобильной промышленности применяется десятилетиями, с целью повышения характеристик детали на отказ. Это необходимо для увеличения удельной мощности двигателя на единицу массы и повышению усталостных характеристик узлов, снизить как производственные, так и энергетические затраты.

J. Almen открыл дробеструйное упрочнение во время работы в General Motors в 1930-х годах. Само дробеструйное упрочнение — это процесс холодной обработки, который может значительно увеличить эксплуатационный ресурс комплектующих узлов, которые испытывают интенсивные нагрузки, за счет создания благоприятного сжимающего слоя остаточного напряжения и изменения механических свойств металла.

Различные производственные процессы, используемые в авиационно-космической, авиационной, автомобильной, энергетической и тяжелой промышленности, могут создавать растягивающие напряжения на поверхностях деталей. Эти процессы включают фрезерование, сверление, токарная обработка, сварка, термическая обработка. Напряжение при растяжении оставленное на поверхности обеспечивает идеальную среду для образования трещин или коррозии под напряжением, которые начинают формироваться и соответственно снижается срок службы деталей.

Основным преимуществом дробеструйного упрочнения является сжимающее напряжение, которое помогает предотвратить развитие трещин, вызванных циклическим напряжением, вибрацией, истиранием и коррозией, поскольку трещины не смогут образовываться в среде сжатия, после упрочнения.

В данном процессе маленькие (металлические, стеклянные или керамические) шарики на высокой скорости ударяются о поверхность металлической детали с достаточной силой для создания пластической

деформации (вмятины) глубиной менее 0,6 мм. Под действием ударов поверхностный слой детали упрочняется, снимаются остаточные напряжения и дефекты механической обработки (заусенцы, полосы от фрезы и другие механические дефекты поверхности).

В момент, когда происходит удар по поверхности, образуется небольшая вмятина, материал пытается вернуть поверхностный слой в исходное состояние, образуя всю поверхность вмятины в область сжимающего напряжения. Это заменяет растягивающее напряжение в поверхности сжимающим слоем. (Рисунок 9).

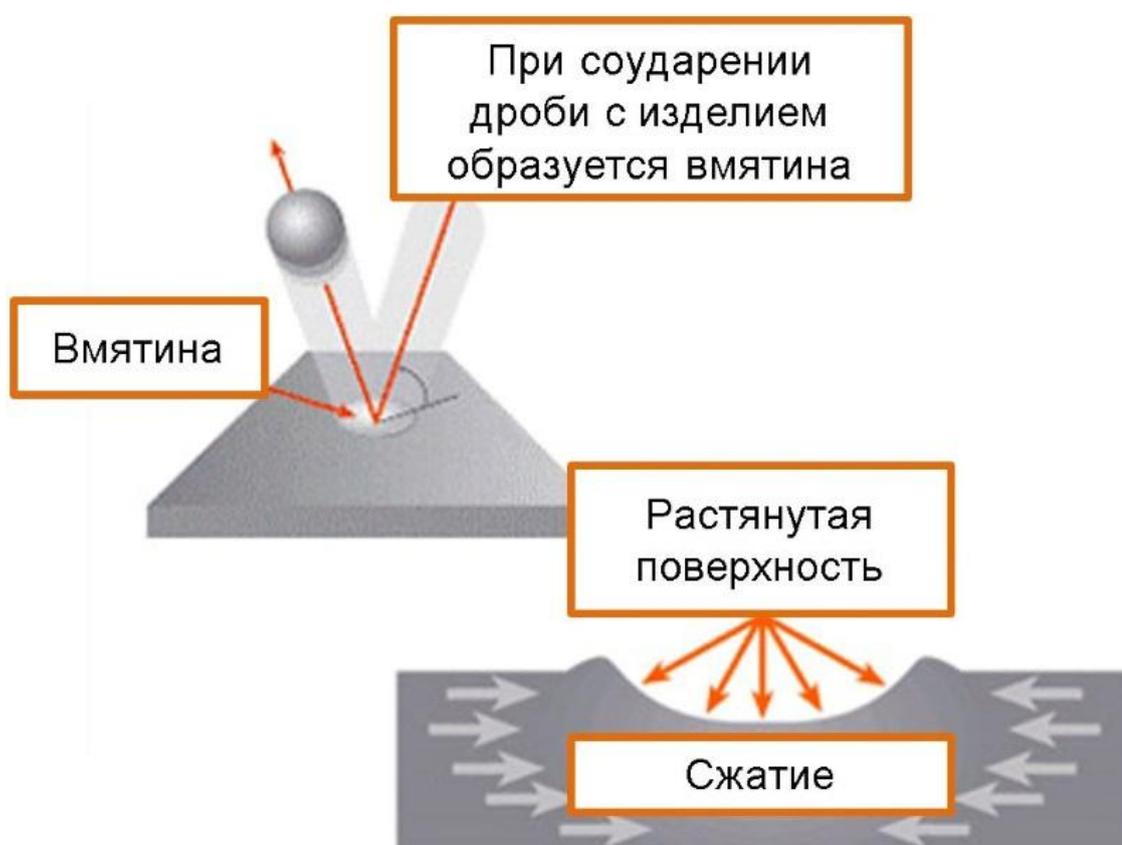


Рисунок 9 - Процесс образования вмятин на поверхностях при дробеструйной обработке

В конечном итоге на детали образуется слой сжимающих напряжений, благодаря которым продлевается срок службы детали. Реалистичный процесс упрочнения поверхностей представлен на рисунке 10.

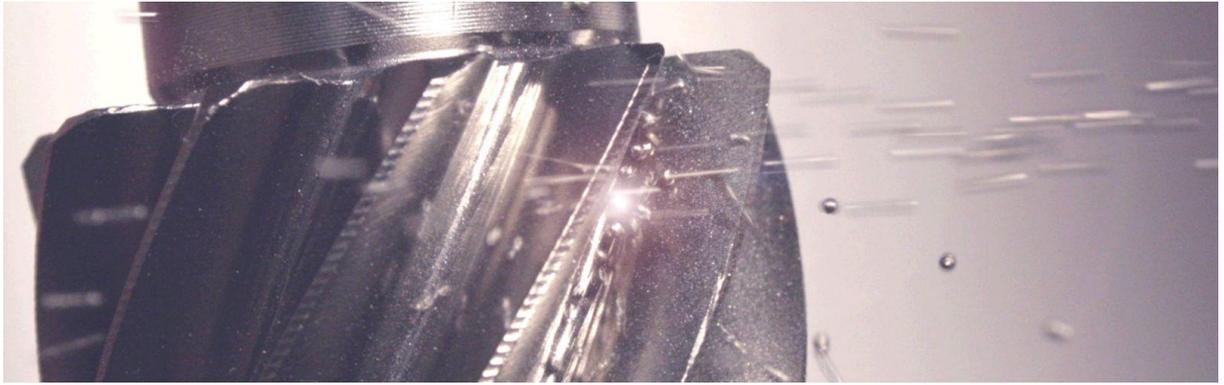


Рисунок 10 - Процесс упрочнения поверхностей детали

Преимущества этого процесса хорошо зарекомендовали себя, с деталями, работающими как в сильно нагруженных, так и в плохих условиях эксплуатации, такими как в гоночных автомобилях «Formula 1».

В 1945 году J. Almen был выпущен патент на метод измерения интенсивности дробеструйной обработки. Многие считают, что J. Almen является создателем современной дробеструйной обработки. Тест основан на применении стандартизированной измерительной пластины, изготовленной из листовой, стали. В его патенте используется тонкая металлическая пластина, называемая пластиной «Almen» (Рисунок 11) для измерения сжимающих напряжений на пластине.

Эта измерительная пластина «Almena» устанавливается на плоский блок с 4 винтами (Рисунок 12), а затем помещается в «Ervin Test», где обрабатывается дробью с использованием счетчика циклов.



Рисунок 11 - Пластина Almen Strips

Ervin Test - это машина, которая имитирует процесс обработки дробью, который происходит в производстве, и оснащена счетчиком для подсчета циклов.

После обработки дробью, измерительная пластина Almena извлекается, и образует дугу, потому что тонкое поперечное сечение не выдерживает напряжения, которое образовалось на поверхности пластины, замеры изгиба производятся устройством «Almen Gage» (Рисунок 14) для установления значения напряжения от ударов по поверхности детали.

Отклонение, вызванное обработкой, используется в качестве стандарта для расчета интенсивности обработки. Таким образом могут быть проверены новая дробь, а также «рабочая смесь» дроби. Так как интенсивность абразивной обработки часто меняется с возрастанием количества циклов обработки, интенсивность «Almen теста» дана в отношении к числу циклов обработки, пройденных в Ervin Test машине.

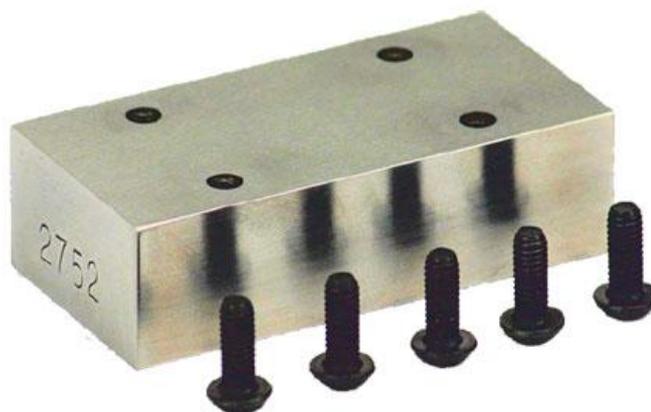


Рисунок 12 - Блок J442 Almen Strip Holders

Когда пластина подвергается дробеструйной обработке, на поверхности пластины образуются сжимающие напряжения (Рисунок 13).



Рисунок 13 - Образование дуги после дробеструйной обработки

Измерение пластины производится устройством «Almen Gage» (Рисунок 14).



Рисунок 14 - Устройство «Almen Gage»

Almen Gage это точное устройство, используемое для измерения величины изгиба металлического образца, называемого тестовой пластиной Альмена (Almen Strip). Он оснащен откалиброванным высокоточным цифровым индикатором с пружиной низкой силы, для обеспечения очень точных и многократных измерений.

Высота дуги пластины Almen зависит от скорости и массы ударов, то есть от количества энергии передаваемой потоком выстрела и поглощаемой пластиной. По мере того, как пластина достигает 10% деформации, пластину Almen повторно обрабатывают дробью с той же интенсивностью, но в два раза больше по времени. Если пластина деформируется еще на 10%, то получается интенсивность потока взрыва. Этот процесс показан на рисунке 15.



Рисунок 15 - Процесс контроля обработки

Цель теста Almen:

- Проверить и зафиксировать интенсивность, перед выполнением первой обработки детали;
- Проверяет, что дробеструйная установка настроена и работает в соответствии с утвержденными проектными параметрами;
- Предотвращает повреждение дорогих деталей перед обработкой.

## 2.2. Возможности ультразвукового дробеструйного упрочнения по сравнению с простым дробеструйным упрочнением

Для повышения надежности деталей и увеличения их срока службы, помимо дробеструйного упрочнения, существует такой метод как – ультразвуковое дробеструйное упрочнение.

Ультразвуковая дробеструйная обработка похожа на обычную дробеструйную холодную обработку поверхности детали. Оба процесса используют ударное воздействие на поверхность детали, создают слой остаточных напряжений сжатия и тем самым улучшают механические свойства материала. Они повышают долговечность и коррозионную стойкость детали под напряжением.

Но отличается ультразвуковая дробеструйная обработка от обычной дробеструйной обработки тем, что вместо использования постоянных воздушных потоков, гравитации (силы тяжести) или высокоскоростного вращения турбины, удар по поверхностям детали обеспечивается кинетической энергией. А если быть точнее, то ультразвуковая дробеструйная обработка использует вибрационное ускорение, устройством называемое Волновод (Рисунок 16).

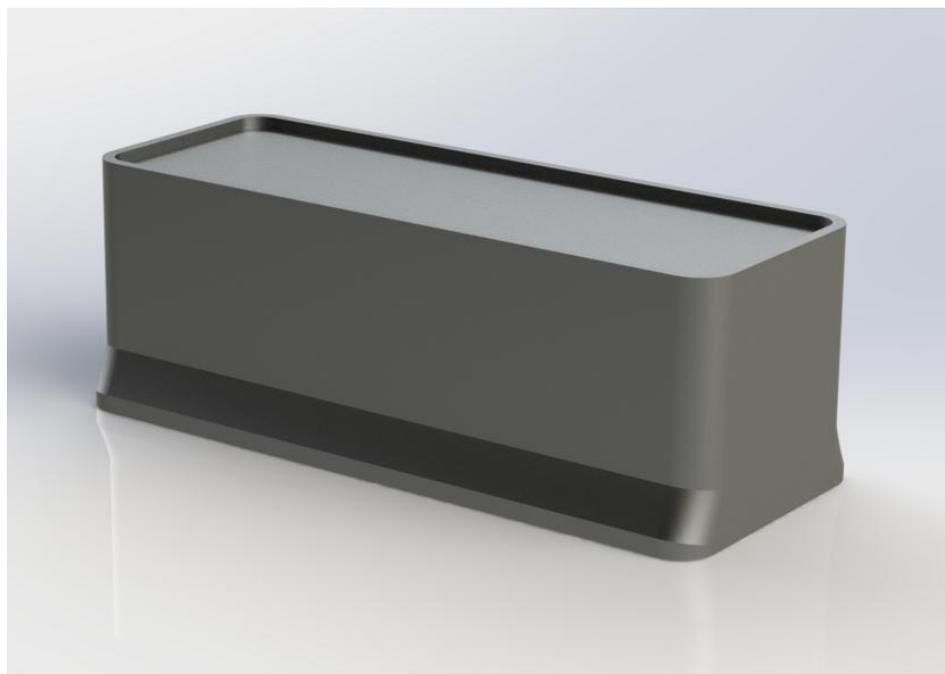


Рисунок 16 - Устройство волновод

Ультразвук, как некоторые из нас могут знать, это звуковая волна с частотой выше предела человеческого слуха. Частоту вибраций ультразвуковых волн которую создает волновод находится в диапазоне 20 кГц и выше, что объясняет наименование применяемого процесса (Рисунок 17). С помощью такой технологии можно обрабатывать компрессорные колеса, валы, подшипники, крыльчатки турбин.

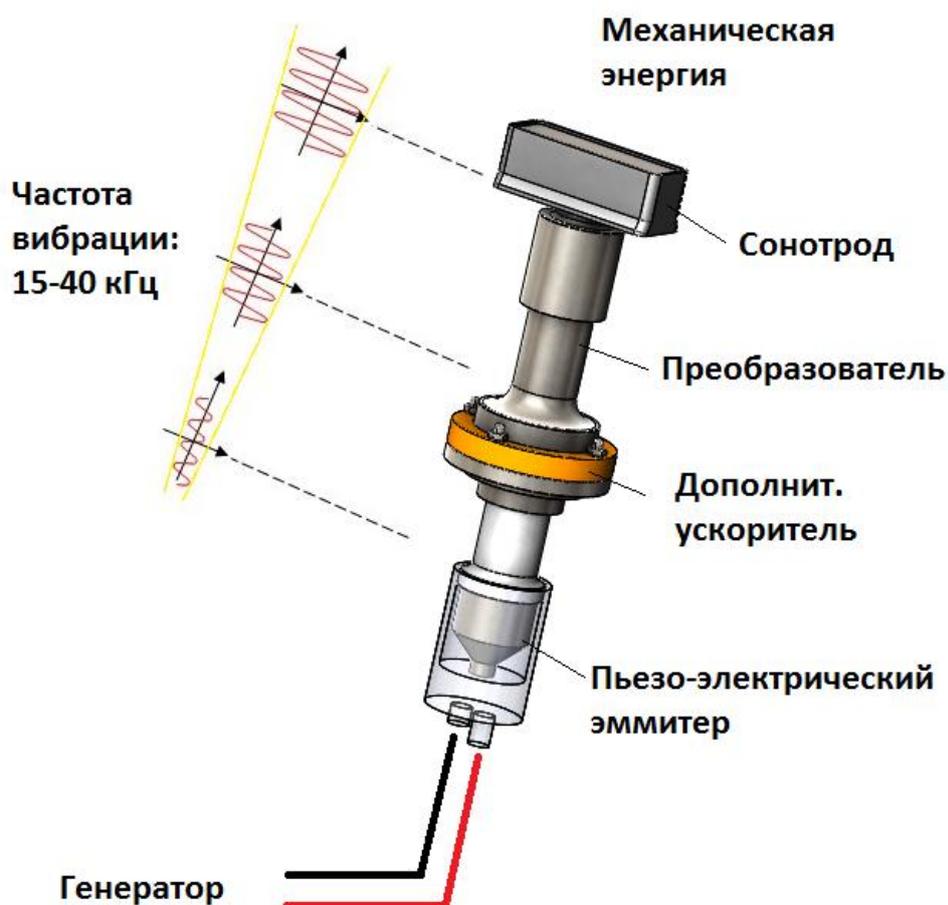


Рисунок 17 - Общий вид оборудования

В отличие от системы для дробеструйной обработки, где обработка деталей происходит вокруг них, а в процессе ультразвуковой дробеструйной обработки представляет собой герметичную камеру, предназначенную для плотного обтекания контура детали, подвергнутой воздействию дроби. В обычных система для дробеструйной обработки имеется доступ к деталям и присутствует свободное пространство для обслуживания. Корпус в таких системах строиться с

рабочими дверями, смотровыми окнами, наличием блокировки при открытии двери во время обработки. Список продолжается в соответствии с запросами производителя или конечного пользователя. Производство и обслуживание приспособлений является трудоемкой связанной с обычными системами дробеструйной обработки. Ультразвуковая дробеструйная обработка устраняет необходимость всех вышеперечисленных небольшой камерой, которая охватывает деталь.

Чтобы реализовать установленную обработку, была разработана специальная установка для первичного вала (Рисунок 18).

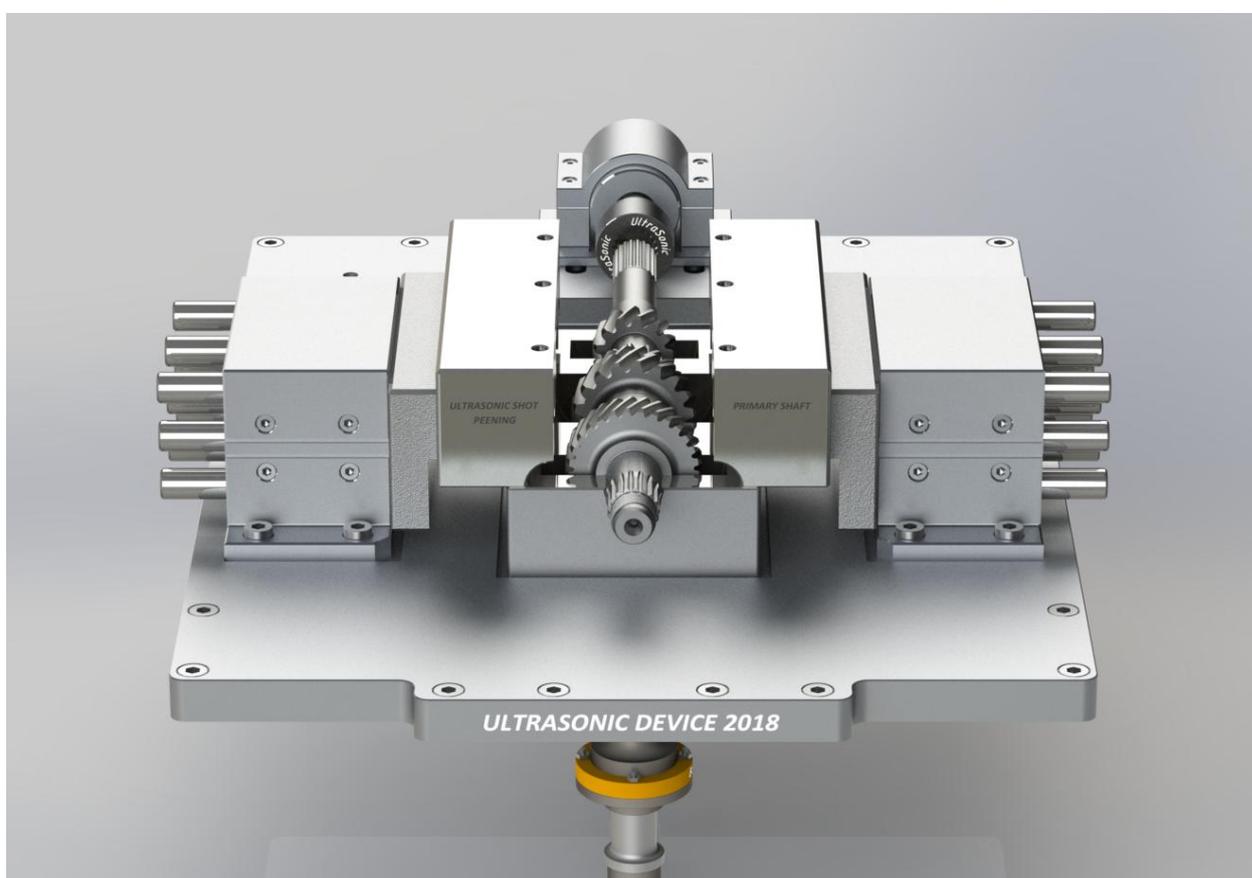


Рисунок 18 - Первичный вал в ультразвуковой дробеструйной установке

Принцип таков, между тремя закрепленными волноводами и зоной обработки детали, подлежащей ультразвуковому дробеструйному упрочнению, располагается герметичная камера. Таким образом, определенная часть детали содержится в обрабатываемом объеме (Рисунок 19).

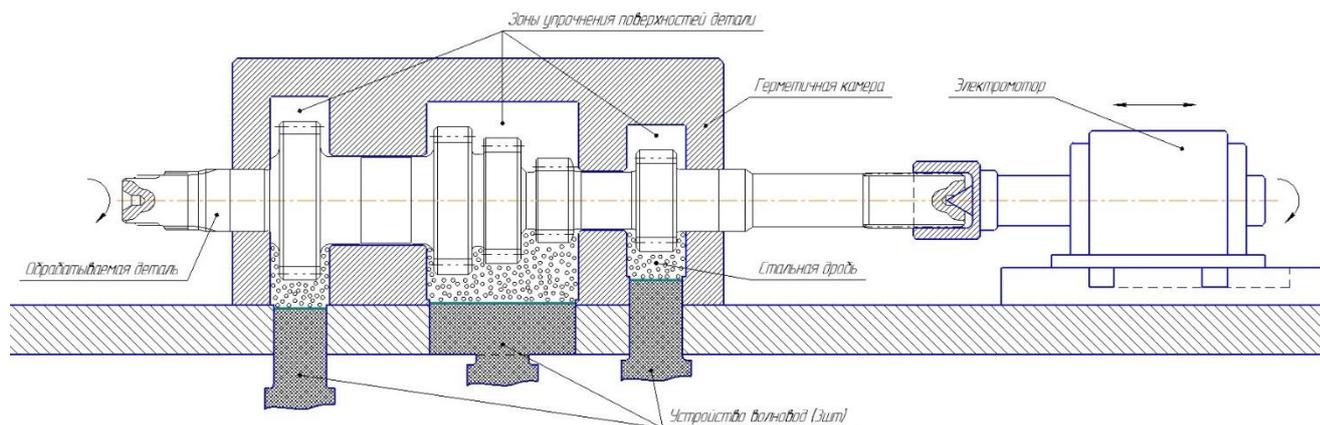


Рисунок 19 - Схематичный принцип ультразвуковой дробеструйной обработки

Продольные колебания поверхности волновода случайным образом разгоняют (приводятся в движение) стальные шарики в зоне. Это хаотичное движение шариков приводит к однородной обработке всех поверхностей, которые находятся в зоне обработки (Рисунок 20).

Далее присутствуют две пневматические установки, которые будут герметично закрывать деталь, чтобы при процессе обработки детали дробью, эта дробь не покидала пределы этой камеры, так как при потере дробы будет все сказываться на финансах положения, на установке находится так же электродвигатель, с целью того чтобы передавать свое вращение валу для равномерной обработки всех поверхностей тремя волноводами.

Применяемая установка улучшит эксплуатационные характеристики и качество поверхностного слоя детали за счет одновременной обработки изделия по тяжело нагруженным поверхностям и создаст высокие остаточные напряжения сжатия.

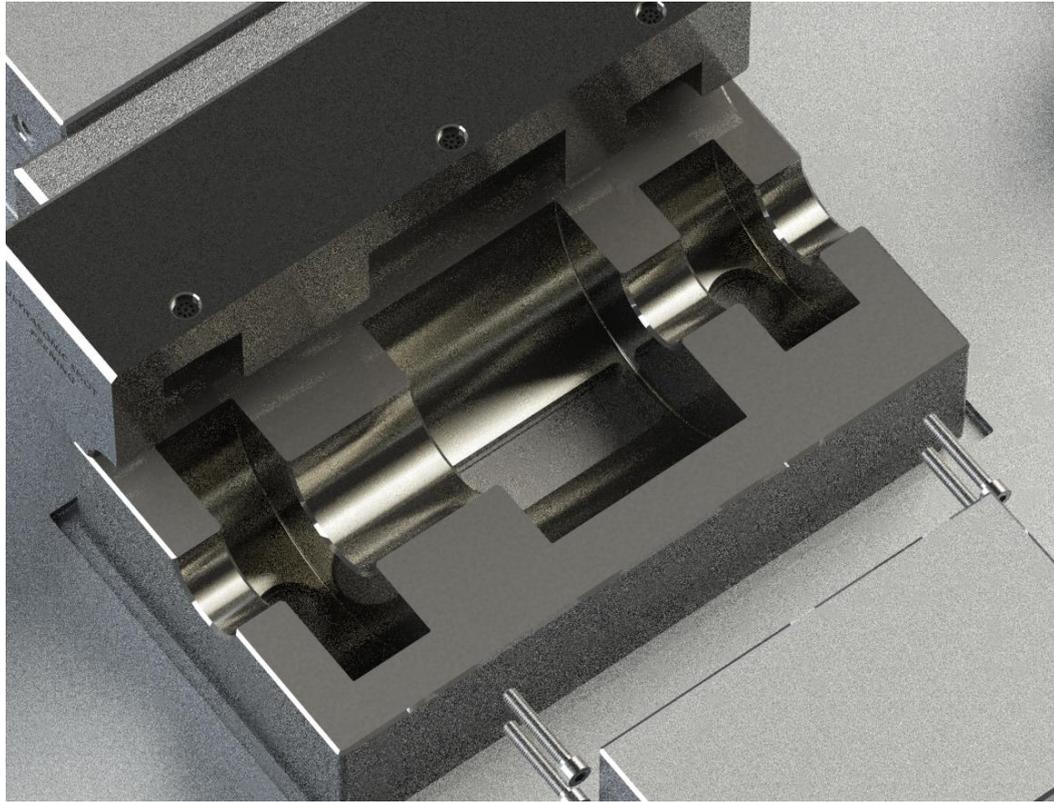


Рисунок 20 - Зоны обработки поверхностей детали дробью

В критических моментах, где требуется глубокие сжимающие остаточные напряжения и минимальная шероховатость поверхностей, ультразвуковая дробеструйная обработка может быть жизнеспособным вариантом решения таких задач, по сравнению с обычными методами дробеструйного упрочнения.

Из-за герметичной обработки, величина шариков уменьшена до нескольких грамм (или размеров), и ультразвуковая дробеструйная обработка может таким образом использовать высококачественные материалы, таких как дробинки с высоким качеством сферичности, которые не ухудшают поверхность детали.

Дробинки с большим диаметром могут использоваться для достижения высокой интенсивности, которые вызовут глубокие сжимающие напряжения и более низкую шероховатость поверхности.

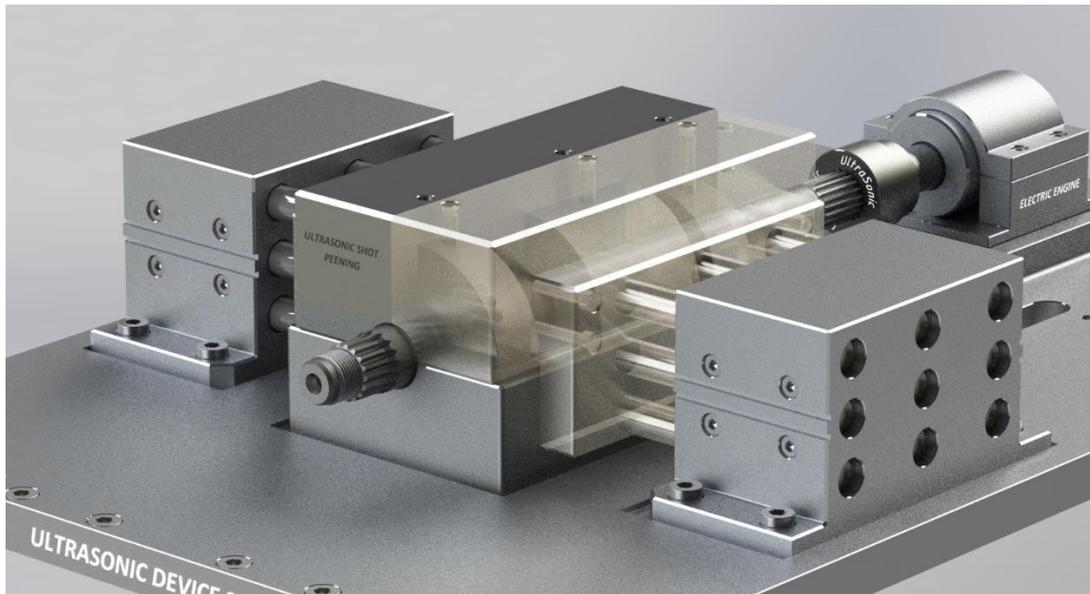


Рисунок 21 - Ультразвуковое дробеструйное упрочнение динамической обработки  
первичного вала

Принцип работы ультразвукового дробеструйного оборудования:

Генератор – сам генератор находится внутри центрального блока и в цифровом виде генерирует электрическую синусоидальную волну с частотой ультразвука.

Центральный блок – пьезоэлектрический эмиттер преобразует сигнал, который исходит от генератора в механическое смещение, которое затем усиливается благодаря ускорителю и волноводу.

Далее идет накопление кинетической энергии от вибрации сонотрода и передается на деталь, которая подлежит обработке внутри герметичной камеры.

Благодаря случайному (случайному) перемещению стальных шариков внутри камеры по обрабатываемой детали, обеспечивается равномерное формирование поверхностных слоев детали.

Средний цикл требует менее 500 ватт для создания вибрации, которая активизирует усиливающую среду для охлаждения. Ультразвуковая дробеструйная обработка может работать более эффективно и экономично.

При производстве автомобильных механизмов должна поддерживаться высокая производительность для обеспечения эффективного и повторного процесса обработки ответственных деталей трансмиссии.

Для того чтобы запустить процесс ультразвукового дробеструйного упрочнения потребуется автоматизированный 4-станционный станок для обработки первичного вала (Рисунок 23).



Рисунок 23 - Автоматизированный 4-станционный станок

В частности, в станциях для ультразвуковой дробеструйной обработки, обработка выполняется в динамическом режиме для достижения определенного времени. Например, за 35 – секундное время на станции с 4-я установками, производительность будет составлять около 400 000 деталей в год.

Станки по ультразвуковой дробеструйной обработке имеют автоматизированные функции:

- Непосредственно роботизированная обработка из предыдущего процесса операции

- Подсчет шариков (в количествах или в граммах)
- Sonotrodes и их мониторинг по износу
- Предупреждение оператора при достижении срока службы
- Автоматическая загрузка и выгрузка шариков для каждого рабочего места.

Для всех видов деталей основным преимуществом USP является то, что машина, имеющая небольшую площадь (например, 4-станционный станок для первичных валов: 2.40м x 4м x 2.5м), может быть непосредственно встроена в глобальную производственную линию.

Как мы впервые объяснили, упрочнение проводится в герметичной камере; нам не нужно выполнять операции маскировки. Кроме того, используемые снимки представляют собой абсолютно сферические шарикоподшипниковые дробы, которые не разрушают поверхность, поэтому вам не нужно обеззараживать или очищать деталь после ультразвуковых операций по дробеструйной обработке. Это часто сокращает глобальное время цикла.

Оптимизирована потребляемая энергия (электричество и сжатый воздух), он действительно очень низкий: 400 В.

### 2.3. Преимущества ультразвуковой дробеструйной обработки

Способ ультразвуковой дробеструйной обработки достаточно универсален и имеет существенные преимущества по сравнению с традиционными способами ППД.

Более глубокая обработка поверхности обеспечивается благодаря большей скорости, развиваемой стальными шариками, кроме того, обработанные ультразвуком поверхности отличаются меньшей шероховатостью, и для обработки требуется значительно меньшее количество шариков. Он позволяет со значительно меньшими затратами и более высоким качеством выполнять операцию ППД на деталях различной жесткости и сложной пространственной конфигурации.

Какими все же преимуществами обладает ультразвуковая дробеструйная обработка:

1. Портативный способ, который не требует демонтажа, чтобы поднять компонент, так как он является целой сборкой.
2. Приспосабливается к любой детали путем изменения оснастки, камеры или приспособления.
3. Значения остаточного напряжения достигает диапазона 1400 МПа, до глубины 1 мм. Для сравнения, обычно сгенерированные значения сжимающего напряжения при обычной дробеструйной обработке составляют около 900 МПа с гораздо меньшей глубиной в диапазоне 0,25 мм.
4. Шероховатость поверхности при обычной обработке зависит от размера и силы удара. При такой же силе мелкий удар создает более глубокую вмятину, чем материалы большего размера, что приводит к более грубой поверхности.
5. Ультразвуковая дробеструйная обработка предлагает такой же объем управления процессом, как и обычная дробеструйная обработка, включая мониторинг и контроль в реальном времени.

6. Образование нанокристаллов. Нанокристалл представляет собой материальную частицу, имеющую по меньшей мере один размер менее 100 нанометров (наночастицы) и состоящий из атомов в одно- или поликристаллическом устройстве. Ультразвуковая дробеструйная обработка генерирует при применении конкретных условий серьезную пластическую деформацию поверхности заготовки. Эта пластическая деформация создает нанокристаллизованный поверхностный слой без изменения микроструктуры ядра. (Обычная дробеструйная обработка также создает нанокристаллы, но в меньшей степени.)
7. Помимо повышенной прочности, полученной, как в случае обычной дробеструйной обработки, еще одно преимущество, связанное с ультразвуком это то что можно применять термическую обработку при более низких температурах и за меньшее время.
8. Обработанная поверхность становится лучше, чем при обычном дробеструйном упрочнении.
9. Эффективное упрочнение сложных геометрических поверхностей (например, отверстие, ласточкин хвост).
10. Низкое энергопотребление (используется дробь, энергия и сжатый воздух) что является экологическим процессом обработки.
11. Используются различные типы дробей (размер и материал)

Контроль:

- Адаптивный инструмент для различных процессов и задач (геометрией, мощностью и амплитудой)
- Контроль параметров в режиме реального времени
- Возможность повторного упрочнения
- Система, обеспечивает отсутствие потерь шариков
- Безопасный процесс для обрабатываемой детали

- Благодаря точным сжимающим напряжениям на поверхностях деталей сложной формы, возникновение и рост трещин может быть значительно снижен.
- Низкое потребление энергии (воздух и электричество) и потребность в малогабаритных расходных материалах ниже, чем при обычной дробеструйной обработке, что приведет к значительному снижению затрат.
- Надежный, чистый, безопасный, и энергосберегающий процесс ведет к правильному (дружелюбному) оборудованию. Минимальные отходы, чистая работа и проектирование для бережливого производства улучшит свои экологические показатели.
- Удаление поверхностных растягивающих напряжений под критическим уровнем уменьшит значительное появление коррозии.
- Изменение свойств поверхностей детали (твердость, шероховатость, сопротивление...) приведет к значительному уменьшению износа деталей и увеличению их срока службы.

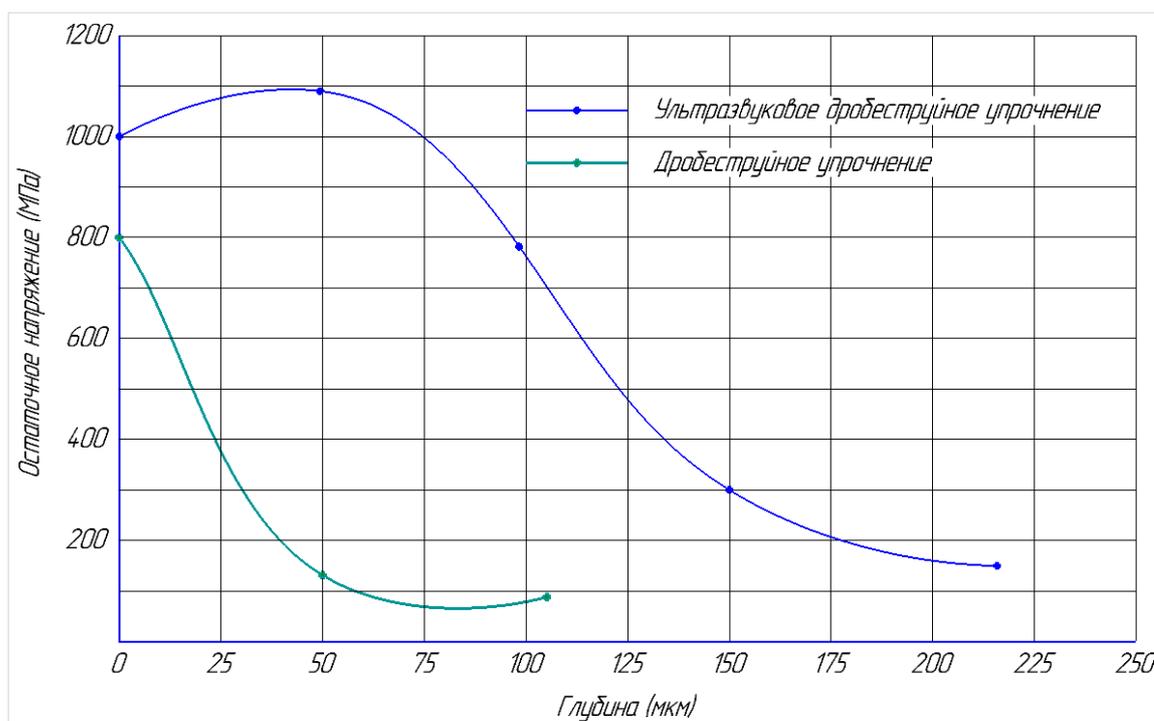
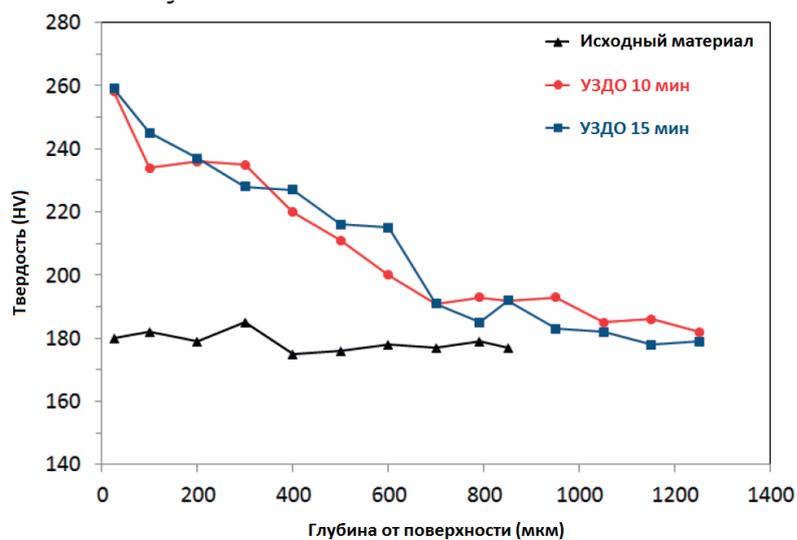


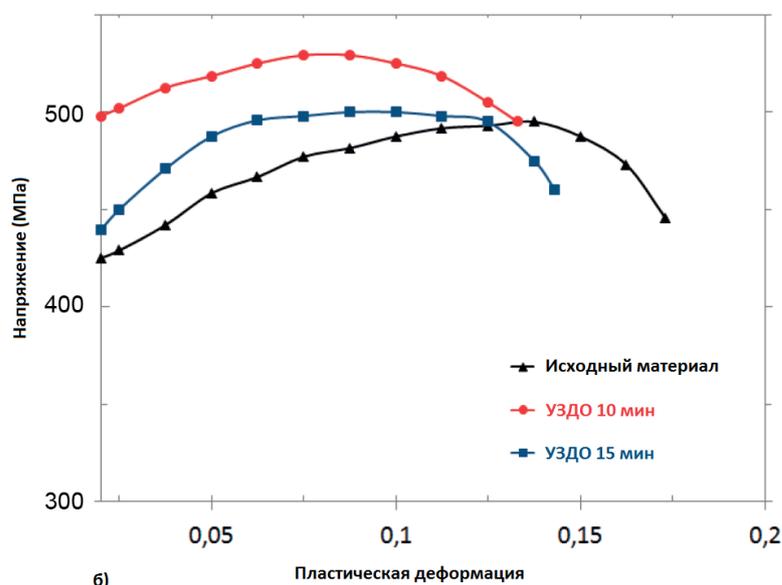
Рисунок 24 - Пример остаточного напряжения автомобильной трансмиссии (Используется сталь)

## 2.4. Нанокристаллизация при ультразвуковой дробеструйной обработке

Основные положительные эффекты в процессе ультразвуковой дробеструйной обработки вызваны пластической деформацией поверхности. Когда параметры обработки более тяжелые, например, когда время обработки поверхности увеличивается, в процессе образуется нанокристаллизационный слой, микроструктура сердцевины остается неизменной.



а)



б)

а) – изменение твердости в глубине; б) – предельная прочность  
Рисунок 25 - Механическое влияние процесса нанокристаллизации  
ультразвуковой дробеструйной обработки

Глубина нанокристаллизационного слоя зависит от параметров ультразвуковой дробеструйной обработки, но обычно составляет от 10 мкм до 50 мкм.

Нанокристаллизация образуемая при процессе ультразвукового дробеструйного упрочнения позволяет улучшить:

- Предел усталости
- Твердость поверхности
- Предельную прочность
- Износостойкость
- Шероховатость поверхности

Среди основных применений нанокристаллизации, в частности, улучшается скорость диффузии атомов, таких как азот (например, для обработки азотированием). Действительно, обработка азотированием широко используется в промышленности для улучшения поверхностной твердости работы

Однако для улучшения кинетики диффузии азота эта обработка проводится при высоких температурах (550 - 600 ° C) в течение значительного времени, что может ухудшить микроструктуру и свойства металла. Тогда процесс нанокристаллизации ультразвуковой дробеструйной обработки заключается в оптимизации (уменьшение времени или температуры) обработки азотированием. Дополнительное увеличение твердости также наблюдается путем сочетания обеих обработок.

В качестве предварительной обработки процесс нанокристаллизации может быть эффективным при оптимизации термохимических обработок, таких как азотирование, хромирование и цементация.

UltraSonic Shot Peening – это новая технология со многими возможностями, которые все еще открыты для дальнейших исследований, особенно при переходе от лабораторных к коммерческим испытаниям.

## 2.5. Применение эффективной дроби для упрочнения детали

Дробеструйная обработка дробью является обычной процедурой в обработке поверхности с широкой областью применения, она используется, в частности, в литейных цехах для ремонта, удаления окалины и ржавчины.

Дробь также используется для увеличения твердости поверхности "упрочнение дробью", при которой кинетическая энергия дроби сжимает точку поверхности, которую обработали и, следовательно, увеличивает ее твердость.

Решающими критериями качества дроби являются износостойкость (которая определяется путем испытания на прочность) и интенсивность, т.е. влияние дроби на обрабатываемую поверхность.

Износостойкость дроби, а также интенсивность значительно зависят от характеристики твердости дроби. В свою очередь, твердость дроби зависит от ее химического анализа (значителен фактор содержания С-углерода) и термообработки, которую возможно дробь прошла при производстве. На рынке можно найти дробь с высоким содержанием углерода, низкоуглеродистую дробь и реже дробь со средним содержанием углерода. Данные типы дроби имеют отличия в процессе их производства, а также обладают различными преимуществами и недостатками.

Содержание углерода в высокоуглеродистой дроби составляет 0,8% - 1,2%, а содержание углерода в низкоуглеродистой дроби - от 0,1% до 0,2 %. Другие факторы, определяющиеся в железе, такие как кремний или марганец, имеют меньше влияние на твердость стали. Благодаря указанным различиям в их химических составах, можно наблюдать качественные различия в выносливости и интенсивности.

Для того чтобы применить конкретную дробь в ультразвуковой дробеструйной обработке, будет проведен анализ различных дробей для упрочнения поверхностей.

Область применения данного метода очень обширна. Чтобы получить требуемый результат, важно в каждом конкретном случае правильно подобрать

дробь для дробеструйной обработки. Она, в зависимости от способа и материала изготовления, имеет следующие виды:

- Колотая чугунная – методом расплавления производят из белого чугуна с последующим гранулированием. Полученные сферические изделия охлаждают, затем раскалывают и отжигают. Перед нанесением специальных покрытий дробь способна достичь требуемой шероховатости. Кроме этого, ее используют для матирования, удаления нагара и ржавчины.
- Стальная литая – производится низкоуглеродистая, с средним и высоким содержанием углерода. Каждый вид дроби отличается химическим составом и технологией изготовления, определяющим их недостатки и преимущества. Перед тем как нанести защитное или декоративное покрытие, применяется стальная литая дробь для обработки отливок из стали и чугуна, металлоконструкций, проката. Общий вид представлен (Рисунок 26).



Рисунок 26 - Общий вид стальной и чугунной дроби

- Стальная рубленая – способна достичь требуемых параметров шероховатости поверхности за счет качественной очистки и упрочнению поверхности. Такую дробь применяется для выполнения более сложных задач, так как обладает редкими геометрическими

параметрами и высокой стойкостью частиц. Изготавливают цилиндрическую (методом нарезания стальной проволоки) и сферическую (получают обкаткой цилиндрической рубленной), а также из нержавеющей стали (изготавливают как сферическую).

- Стальная колотая – дробь является однородной и изготавливают ее из стального сплава, в составе которого должна содержать структуру мартенсита. Выпускается, в зависимости от твердости, трех видов: G, GH и GL. Применяется для очистки нагара, окалины, ржавчины; получение требуемой шероховатости, подготовка обрабатываемой поверхности к нанесению резиновых и полимерных покрытий, эмалей и красок.
- Алюминиевая дробь – ее используют для алюминиевых литья, деталей из цветных сплавов, подходит для финишной обработки (выглаживает и дает требуемую шероховатость), а также применяется для упрочнения изделий, после которых становится чистой и светлой (Рисунок 27).



Рисунок 27 - Алюминиевая дробь

- Керамическая дробь – повышает усталостную стойкость поверхности и осуществляет качественное упрочнение за счет того, что при обработке дробь почти не раскалывается и характеризуется отсутствием загрязнений. По интенсивности обработки керамическая дробь находится на промежуточном месте между стальной и стеклянными шариками.
- Стеклянные шарики – являются наиболее популярными абразивами, такая дробь имеет высокую прочность, при обработке оказывает равномерное воздействие на поверхность, не загрязняет и не образует заусенцев, за счет этого является очень экономичной (Рисунок 28).



Рисунок 28 - Стеклянная дробь

- Пластиковая дробь – производится в основном из поликарбоната, полиамида, меламиновых и аминоальдегидных смол, цилиндрической или кубической формы. Такая дробь способна максимально бережно очистить поверхность, при этом после обработки отсутствуют какие-либо отпечатки на блестящих поверхностях, не образует пыли и не токсична, предъявляются только высокие требования по геометрии и допускам шероховатости (удаление различных декоративных

покрытий с деталей автомобилей, воздушных судов, спортивных лодок, очистка пресс-форм и тому подобное) (Рисунок 29).



Рисунок 29 - Пластиковая дробь

- Электрокорунд – это такой абразив, который имеет три вида: нормальный, белый, розовый и не вызывает намагничивания во влажных или сухих система очистки. Применяется для очищения сильно загрязненных поверхностей, устраняет ржавчины и заусенцы.

Воздействие струей дроби на металл является процессом его холодной обработки. Это одна из самых популярных и эффективных механических технологий, которая используется для решения широкого круга задач, а применяемое оборудование обеспечивает отличное качество и высокую производительность выполнения работ. Наиболее часто дробеструйная обработка металла используется для удаления с его поверхности ржавчины в максимально сжатые сроки и с минимальными затратами.

Помимо очистки от ненужных элементов металлу придается совершенно иной вид – его можно сделать матовым или шероховатым, сгладить поверхностные неровности. Основная область применения дробеструйной технологии:

- удаление следов коррозии;
- удаление окалины, которая осталась после металлообработки;
- очистка от старых защитных и декоративных покрытий;
- полировка и матирование поверхности металла;

- придание поверхности необходимой шероховатости перед нанесением покрытий;
- удаление оксидных пленок с металла перед сварочными работами.

Но главный эффект, который дает струйное воздействие дробью – это защита от коррозионно-механических и усталостных повреждений. Как известно, практически все они зарождаются на поверхности металла. В то же время, доказано, что развитие или появление трещин не будет происходить в зоне, где есть сжимающие напряжения. В процессе обработки каждая дробь воздействует на материал, как маленький молоточек, и, ударяясь, образует на его поверхности небольшие перекрывающиеся углубления или отпечатки – то есть деформирует металл.

Под такой поверхностью материал стремится вернуть свое исходное состояние, в результате чего под полученной полусферой деформированного металла образуется слой с сжимающими напряжениями. Возникающие после обработки дробеструйной машиной перекрывающиеся углубления формируют на поверхности материала равномерный слой с высокими напряжениями сжатия, что значительно повышает прочность, надежность, долговечность как деталей, так и оборудования, устройств из них в целом.



Рисунок 30 – Вид поверхности после обработки ультразвуком

Это достигается за счет того, что сжимающие напряжения повышают фрикционную стойкость, сопротивление металла коррозионному и усталостному разрушению и растрескиванию, эрозии и фреттингу, вызванных кавитацией.

Дополнительные применения включают упрочнение поверхности с целью закрытия пористости, улучшения трибологических параметров, повышения стойкости межкристаллитной коррозии, текстурирования поверхности, выравнивания деформированных изделий, испытания адгезии различных покрытий.

Таким образом, для нашего процесса обработки изделия подходит стальная дробь, но существуют различные типы стальной дроби, поэтому проведем сравнение на износостойкость образцов, благодаря чему можно достичь оптимального результата при правильном выборе стальной дроби (Рисунок 31).

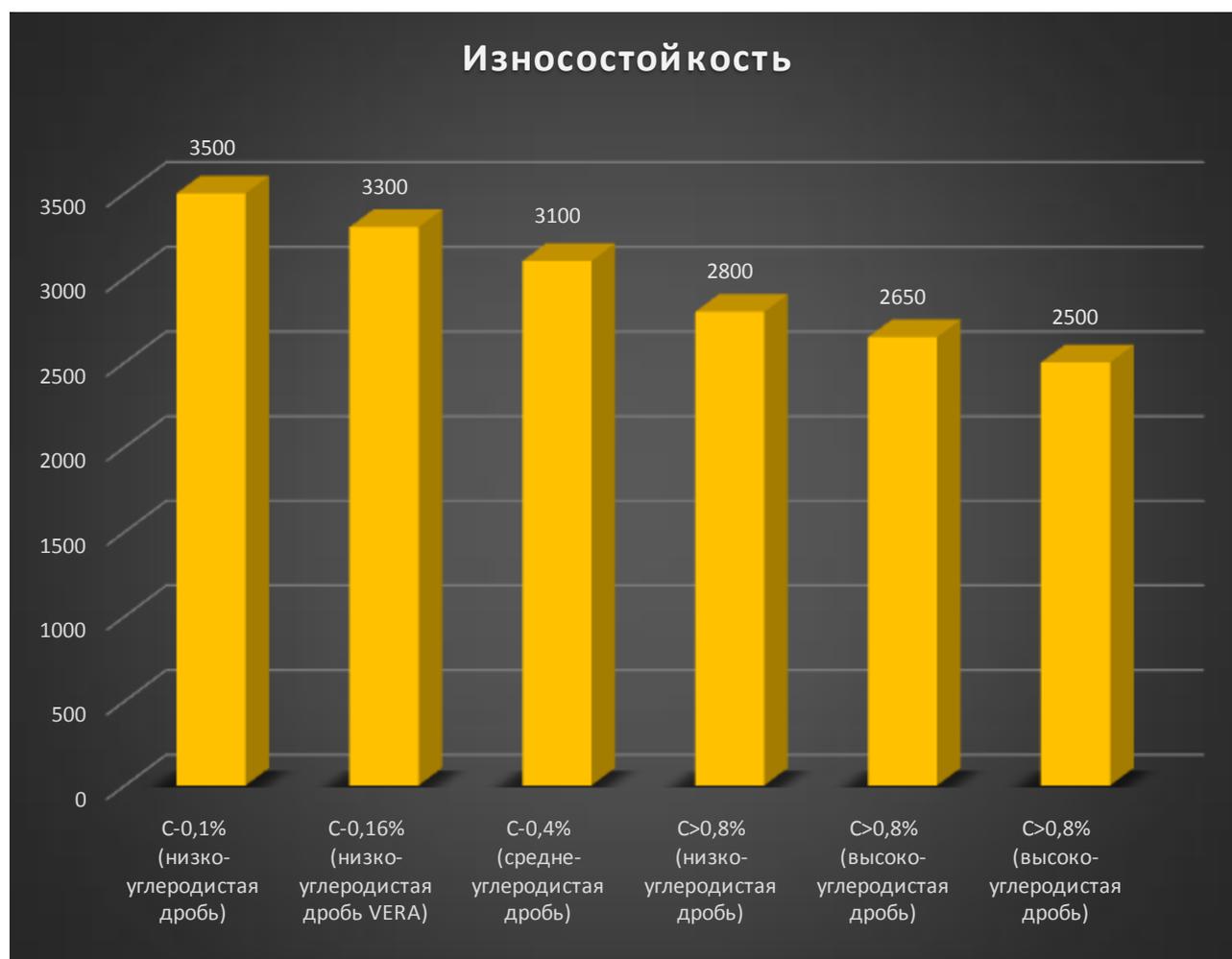


Рисунок 31 - Сравнение износостойкости дроби

Значения износостойкости были определены при сопоставимых условиях с использованием образцов новой стальной литой дроби (1,0 до 1,6 мм), которая обычно применяется в литейном производстве. Сравнение износостойкости на диаграмме 4 показывает, что износ (расход) стальной литой дроби увеличивается с увеличением содержания углерода в химическом составе дроби. При этом образцы низкоуглеродистой дроби указанного размера проходят около 3500 циклов до истирания, тогда как образцы высокоуглеродистой дроби показывают значения ниже 2900 циклов. Таким образом, низкоуглеродистая дробь имеет преимущество в износостойкости более 20%, что играет важную роль в экономии затрат.

Проведены были еще сравнения стальных типов дроби на износостойкость и интенсивность (по Almen) на рисунке 32.



Рисунок 32 - Износостойкость и интенсивность (по Almen)

Показания износостойкости и интенсивности противоречат друг другу. Чем больше содержание углерода в дроби, тем лучше показатели интенсивности, но износостойкость, однако, значительно снижается. Оптимальное решение заключается в нахождении компромисса между продолжительной износостойкостью и высокой интенсивностью.

Проведен расчет показателей интенсивности Almen-теста после 2000 циклов), по которому можно сделать вывод, что низкоуглеродистая стальная литая дробь с содержанием углерода около 0,16% показывает лучшую производительность после учета всех показателей, при твердости новой дроби от 420 до 480 HV.

В процессе ультразвукового дробеструйного упрочнения, используется преимущественно низкоуглеродистая стальной литая дробь - в упрочнении отдельных дробинок в смеси во время обработки поверхности, в результате показатели интенсивности стальной дроби приближаются к показателям интенсивности высокоуглеродистой дроби, размер дроби варьируется от 0,6 до 5 мм

Благодаря процессу производства дроби из стали с низким содержанием углерода (С – 0,16%) получается бейнитные структура, которая не меняется, несмотря на упрочнение (закалку) стали. На практике это означает, что стальная литая дробь является оптимальным выбором. Это технически эффективно и экономически выгодно, так как количество носителей очень низкое.

Качество обработанной поверхности до и после ультразвукового дробеструйного упрочнения (Рисунок 33 - 34).



Рисунок 33 - Шероховатость обычной дробеструйной обработки



Рисунок 34 - Шероховатость ультразвуковой дробеструйной обработки

Все эти показатели дают большой потенциал для решения многих задач, для улучшения результатов и эффективности обработки, а также дают возможность достижения значительного совершенствования процесса при относительно низкой стоимости.

## 2.6. Требования к ультразвуковому дробеструйному оборудованию

Основными требованиями к современным различным дробеструйным оборудованьям относятся следующие особенности:

- Мониторинг параметров в режиме реального времени;
- Самодиагностируемое техобслуживание, контролирующее износ;
- Легкий доступ ко всем узлам с целью техобслуживания;
- Принципы эксплуатации, легко адаптируемые к специальным требованиям заказчика;
- Полностью программное управление;
- Устойчивая удельная площадь покрытия;
- Постоянные, воспроизводимые результаты;
- Низкий уровень шума и выброса пыли.

Важен строгий контроль и мониторинг следующих параметров дробеструйной обработки:

- угол воздействия дроби;
- продолжительность дробеструйной обработки;
- скорость движения сопла (сопло для дробеструйной обработки);
- скорость колеса (центробежное колесо для дробеструйной обработки);
- вращение детали или скорость перемещения;
- размер и форма дроби;
- интенсивность подачи дроби;
- скорость подачи дроби.

Высокотехнологичное оборудование для дробеструйной обработки имеет следующие преимущества:

- программное управление всех параметров дробеструйной обработки;
- точный контроль и мониторинг потока и уровня дробы;
- четкое координирование заданного положения;
- полный контроль движения сопла и скорости движения колеса;
- автоматическое обеспечение безотказной работы оборудования.

Один из наиболее важных факторов в дробеструйной обработке - это контроль потока дробы. Для того чтобы этого добиться, существует специальный дозирующий клапан или механическая система, позволяющая как контролировать, так и регулировать поток дробы. Можно заложить информацию о потоке дробы и других параметрах процесса дробеструйной обработки, обеспечив контроль качества или статистическое управление процессом.

#### Износостойкость

Все оборудование для дробеструйной обработки рассчитано на длительную эксплуатацию с минимальным износом. Те детали, которые подвержены частичному износу в результате постоянного трения, легко заменимы. Это такие детали как резиновый или фанеровочный материал из сплавов с высокой степенью износостойкости.

#### Низкий уровень шума и пыли

Для того, чтобы снизить уровень шумов, в оборудовании использованы специальные звукопоглощающие материалы, шумовые барьеры или глушители. Оборудование соответствует последним требованиям уровней выброса пыли.

## 2.7. Правила безопасности ультразвуковых установок

К электротехнологическим установкам относится ультразвуковое оборудование, в составе которого находится генератор, ультразвуковая установка, в процессе работы применяется электрический ток, пневматическое механическое движение элементов, химические вещества, абразивная смесь. Работа на ультразвуковых установках создает шум, который может быть слышен, а может и нет.

Ультразвуковые установки могут оказывать вредное и опасное воздействие на здоровье человека, для избегания таких воздействий следует соблюдать специальные правила по безопасности.

Применяя правила по технике безопасности, исключается возможность получения травмы и заболевания работника, который работает на ультразвуковом оборудовании.

Для этого следует обязательно проводить инструктаж правил техники безопасности всем работникам, которые работают на данном ультразвуковом оборудовании.

Следует изучить руководство по эксплуатации оборудования, с целью того чтобы получить допуск для работы на ультразвуковой установке. В руководстве описаны все правила безопасности для используемого оборудования, изучив эти правила и соблюдая правильную эксплуатацию установки, исключается возможность получения травмы в процессе работы.

В ультразвуковых установках присутствуют генераторы мощностью до 900 В. И чтобы проводить ремонт или наладку, работники обязаны проходить инструктаж и сдавать экзамены по безопасному ремонту электротехнического оборудования.

При работе с ультразвуком, следует всегда избегать контакта. Рекомендуется применять правила безопасности при использовании ультразвукового оборудования:

1. Приступать к работе только после изучения процесса работы оборудования, которые описаны в руководстве ультразвукового оборудования.

2. Только операторы имеют право использовать мощное ультразвуковое оборудование в пределах контролируемой зоны, находятся под строгим контролем пока оборудование работает.

3. Работник, использующий ультразвуковое оборудование должен быть осведомлен о возможных вредных последствиях ультразвука и правилах безопасности труда.

4. Просмотреть надежно ли закреплены щитки, шкафы. В случае их не исправности, следует не приступать к работе.

5. Следует проверить в силовых щитках положения рубильников, а также исправность проводов, генератора и заземления, если что-то не исправно, нужно вызвать работника по ремонту электрооборудования.

6. Следует размещать у входа в любую область где находится ультразвуковое оборудование предупреждающие знаки. Также должно быть описание с указанием мер предосторожности, которые должны быть приняты во время работы на ультразвуковом оборудовании.

7. Проверить присутствует ли на рабочем месте диэлектрический резиновый коврик, при его отсутствии работать запрещается.

8. Запрещается в процессе работы ультразвукового оборудования прикосновение к инструменту.

9. Во время работы на ультразвуковом оборудовании запрещается подпускать посторонних лиц.

10. В случае неисправной работы ультразвукового оборудования, следует вызвать специалиста по ремонту, которые имеет специальный доступ к ремонту электротехнических установок.

### 3. Анализ материала для применяемой детали

#### 3.1. Общие сведения о применяемой детали

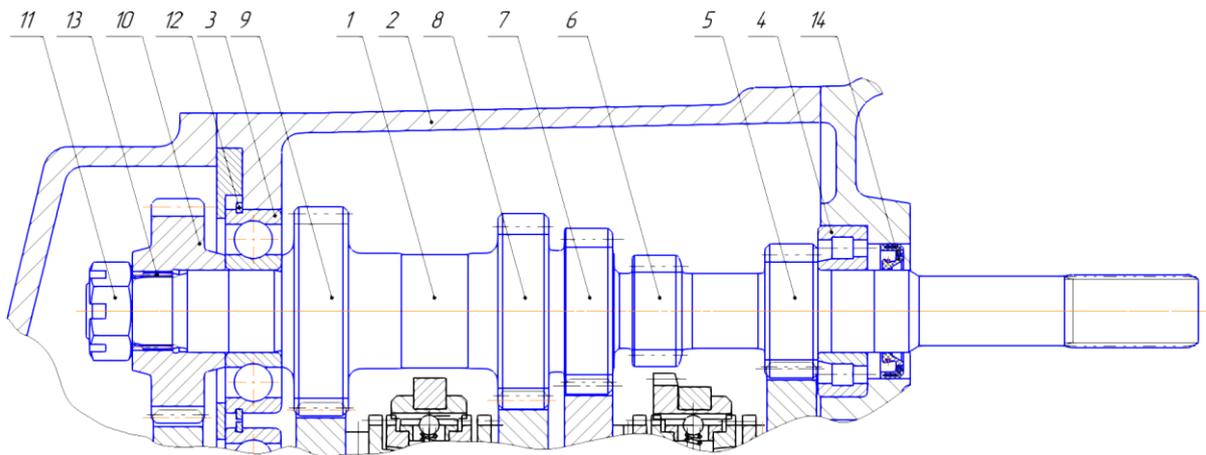
На сегодняшний день, для машиностроительных компаний при производстве продукции, наиболее главным показателем является качество – машин, агрегатов, узлов и отдельных деталей, определяющих мощность производственной научной базы и развития. Теоретические исследования и производственный опыт последних лет привели к пониманию того, что работоспособность отдельных деталей и агрегатов в целом, в большой степени зависит и от качества поверхностного слоя деталей, который формируется при их изготовлении.

Данная деталь является первичным валом, устанавливается в коробке переключения передач автомобиля и предназначена для ступенчатого изменения передаточного отношения, в которой выбор передачи осуществляется водителем вручную, состоит вал из ведущих шестерен, которые находятся в постоянном зацеплении с ведомыми шестернями всех передач переднего хода.

На рисунке 34, изображен узел первичного вала в коробке переключения передач, в котором применяется данная деталь. Разберем расположение всех элементов, которые входят в состав вала:

На рисунке 35 вал 1 располагается в корпусе 2 на который запрессовываются подшипники 3 и 4. Подшипник 3 упирается в бурт 4-й передачи 9 и крепится распорное кольцо 12. Между подшипниками 3 и 4 находятся зубчатые венцы 5, 6, 7, 8, 9. На шлицы 13 устанавливается шестерня 5-й передачи 10, которая фиксируется гайкой 11. Перед подшипником 4 устанавливается сальник 14.

Также изготавливаются валы с различными передаточными числами для того, чтобы менять скорость выходного вала.



1 – первичный вал; 2 – корпус; 3,4 – подшипники; 5,6,7,8,9 – зубчатые венцы; 10 – шестерня пятой передачи; 11 – гайка; 12 – распорное кольцо; 13 – шлицы;

Рисунок 35 - Место расположения первичного вала в коробке передач

В предыдущей своей бакалаврской работе была поставлена цель усовершенствовать технологический процесс изготовления "первичного вала", путем сокращения количества операций заменив токарный и фрезерный станки на один интегрированный токарно-фрезерный станок DMG NTX 2-ого поколения, а также был применен трех кулачковый самоцентрирующий патрон с торце-приводом SMW W215 который является одним из самых востребованных патронов.

### 3.2. Используемый материал детали

В машиностроении для изготовления деталей машин применяются различные материалы, называемые конструкционными. При правильном выборе конструкционного материала зависит качество, экономичность, надежность, а также долговечность деталей в целом.

Основными физико-механическими характеристиками конструкционных материалов являются: твердость, прочность, износостойкость, вязкость и др. В зависимости от условий работы конструкторских материалы бывают износо-, коррозионно-, маслостойкими, жаропрочными.

При выбранной детали, которая испытывает серьезные нагрузки и имеет высокий уровень износа, будет применяться материал – сталь конструкционная легированная 20Х (ГОСТ 4543-71). Будет проведен анализ данного материала. На рисунках 36-37 представлены физико-механические и химические свойства стали.

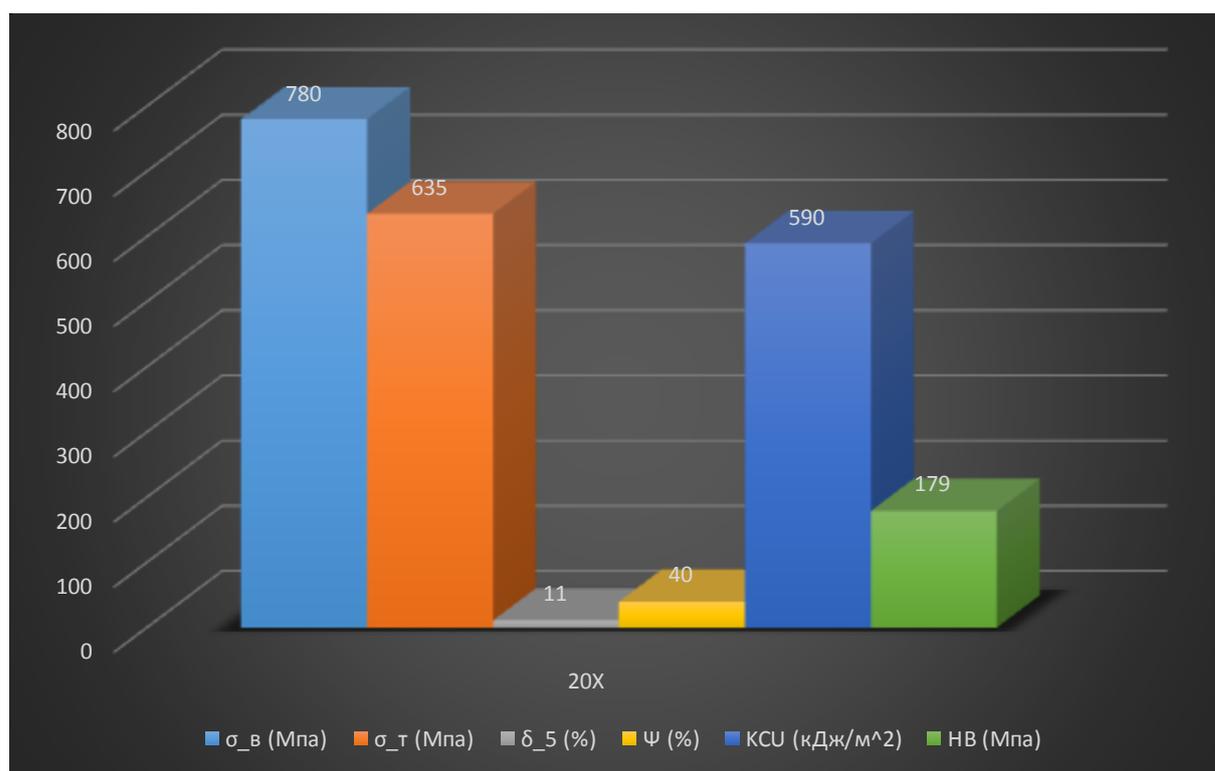


Рисунок 36 - Физико-механический состав стали 20Х

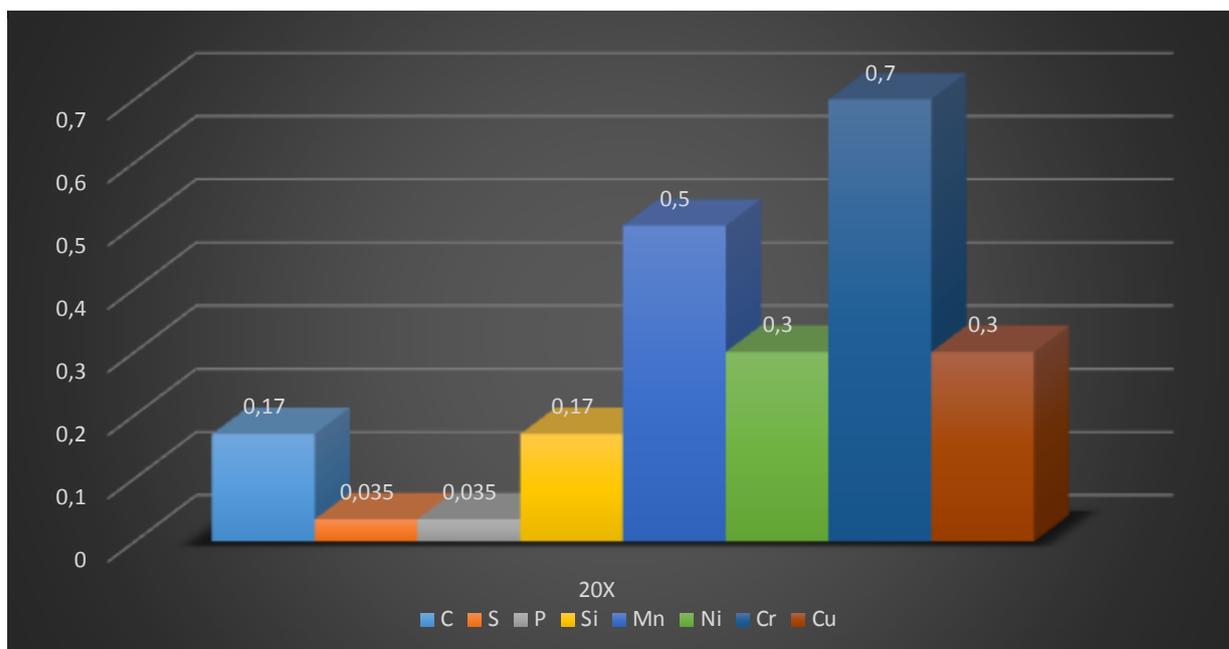


Рисунок 37 - Химический состав стали 20X

$\sigma_T$  - предел пропорциональности (предел текучести для остаточной деформации), [МПа];

$\sigma_B$  - предел кратковременной прочности, МПа;

$\delta_5$  - относительное удлинение при разрыве, %

$\Psi$  - относительное сужение, %

KCU - ударная вязкость, Дж/см<sup>2</sup>;

НВ - твердость по Бринеллю.

Отталкиваясь от свойств, сталь 20X обладает высокой прочностью, увеличенной пластичностью позволяет применять ее для изготовления втулок шестерен, валов, болтов, от которых требуется высокая поверхностная прочность, с невысокой прочностью сердцевины, детали, работающей в условиях износа на трение. Глубина ее прокаливаемости выше, чем у стали углеродистой стали.

### 3.3. Анализ влияния материала на прочностные характеристики

Для проведения анализа влияния материала вала на его собственные частоты и прочностные характеристики, была выбрана конструкционно легированная сталь, основные характеристики которой представлены в таблице 1

Таблица 1 - Характеристики исследуемой стали

Свойства	20Х
Плотность, $\frac{кг}{м^3}$	7810
Модуль упругости, Па	2,13e11
Коэффициент Пуассона	0,3
Предел текучести, МПа	635

Общий вид модели вала и диаграмма, отражающая качество элементов, представлено на рисунке 38.

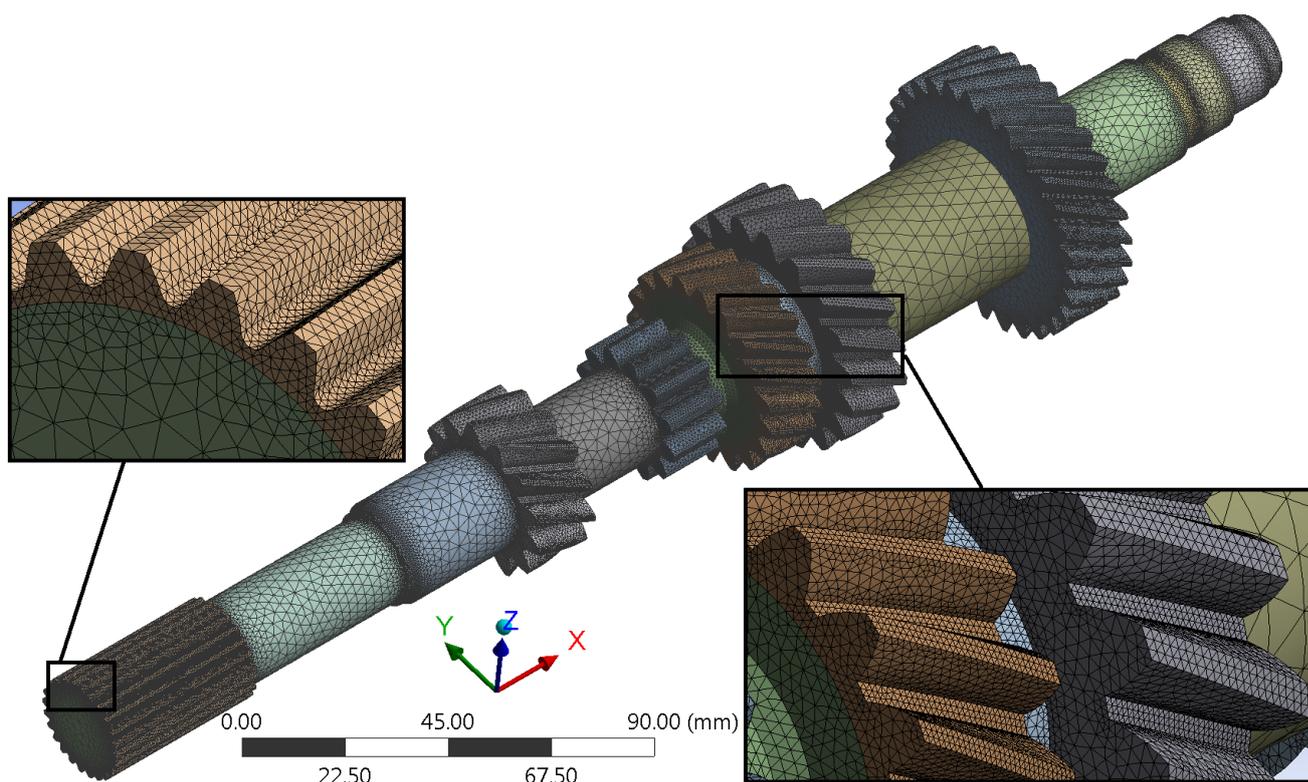
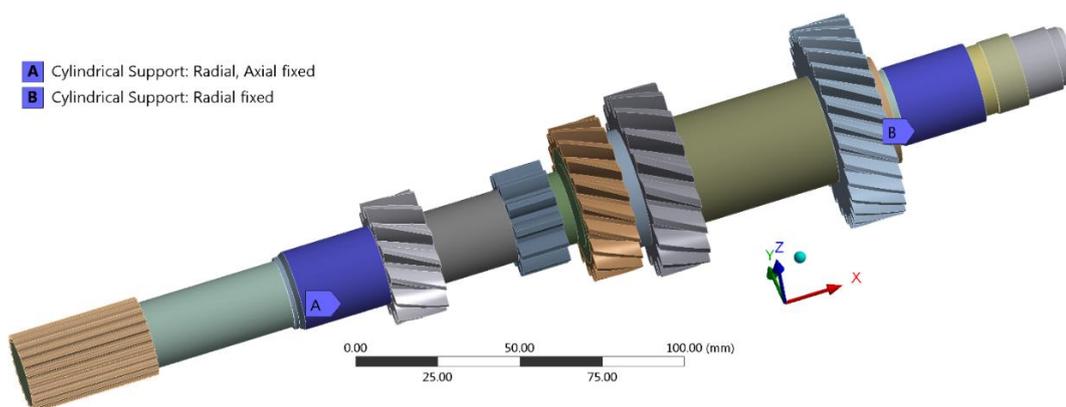


Рисунок 38 - Диаграмма качества элементов и общий вид КЭ модели вала.

В рамках данной работы вал базируется на подшипниках. Общий вид граничных условий представлен на рисунке 39.



А - отсутствие перемещений в радиальном и осевом направлениях; В - отсутствие перемещений в радиальном направлении

Рисунок 39 - Граничные условия

Для моделирования граничных условий данного типа в ANSYS предлагается использовать цилиндрические опоры (Cylindrical Supports) с установкой ограничений по перемещениям в требуемых направлениях, в частности, на опоре А установлено отсутствие перемещений в радиальном и осевом направлениях, а на опоре В – только в радиальном.

В результате проведенных исследований были получены первые собственные частоты и формы исследуемого вала при использовании материалов. Полученные собственные частоты сведены в таблицу 2.

Внешний вид форм колебаний вала при использовании исследуемых материалов остается полностью аналогичным. Полученные формы собственных колебаний вала представлены на рисунках 39 – 42, на примере стали 20Х.

Первая полученная собственная частота и связанная с ней форма колебаний, в виду приложенных граничных условий, связана со свободным вращением вала вокруг продольной оси и приводиться в отчете не будет.

Вторая и третья собственные частоты связаны с колебанием левой оконечности вала в различных плоскостях, при этом значение собственной частоты остается практически неизменным. Далее будем принимать колебания в

разных плоскостях за варианты колебаний на второй собственной частоте (Рисунок 40).

Аналогичную картину с вариантами колебаний в различных плоскостях видим и на третьей собственной частоте (Рисунок 41).

Четвертая и шестая собственные частоты соответствуют формам колебаний, связанным с различными вариантами скручивания вала (Рисунок 42а и 42б), соответственно). Пятая собственная частота отражает форму осевых колебаний вала (Рисунок 42).

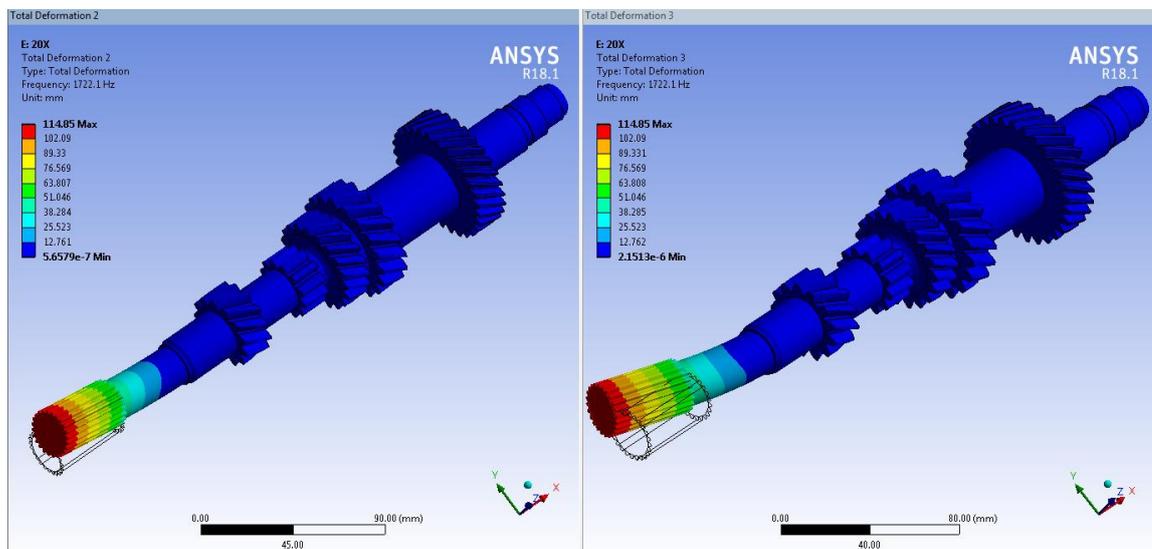


Рисунок 40 - Варианты вида формы колебаний вала на второй собственной частоте

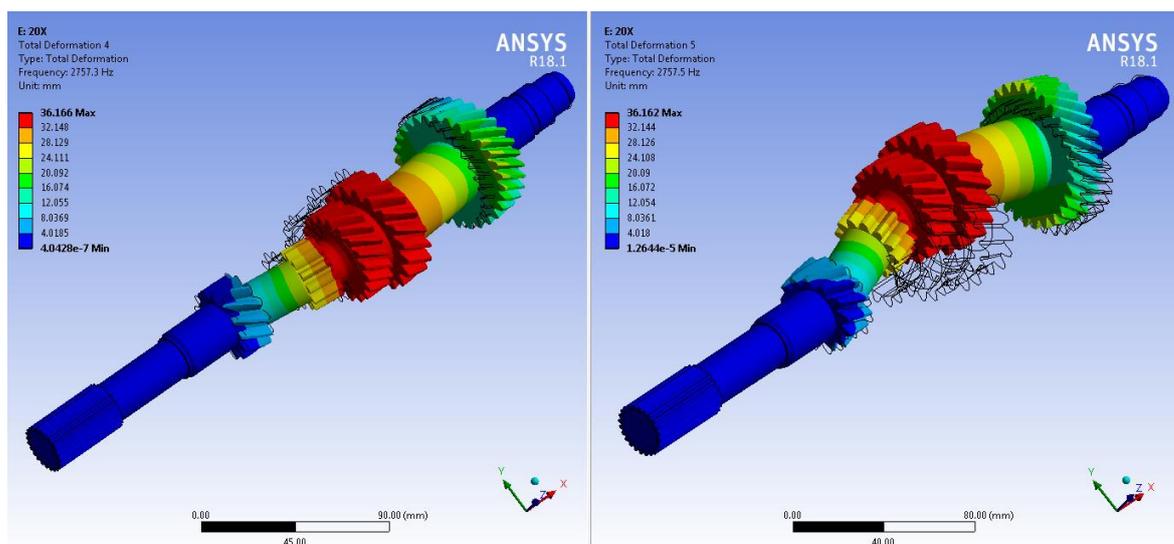
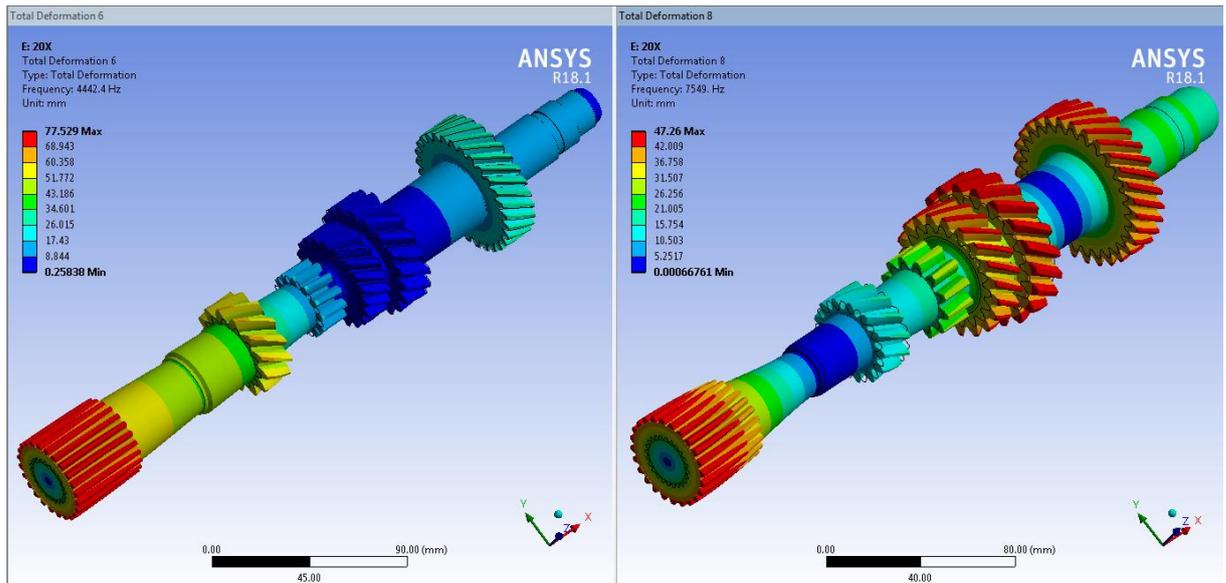


Рисунок 41 - Варианты вида формы колебаний вала на третьей собственной частоте



а) – четвертая собственная частота, б) – шестая собственная частота  
 Рисунок 42 – Формы колебаний вала

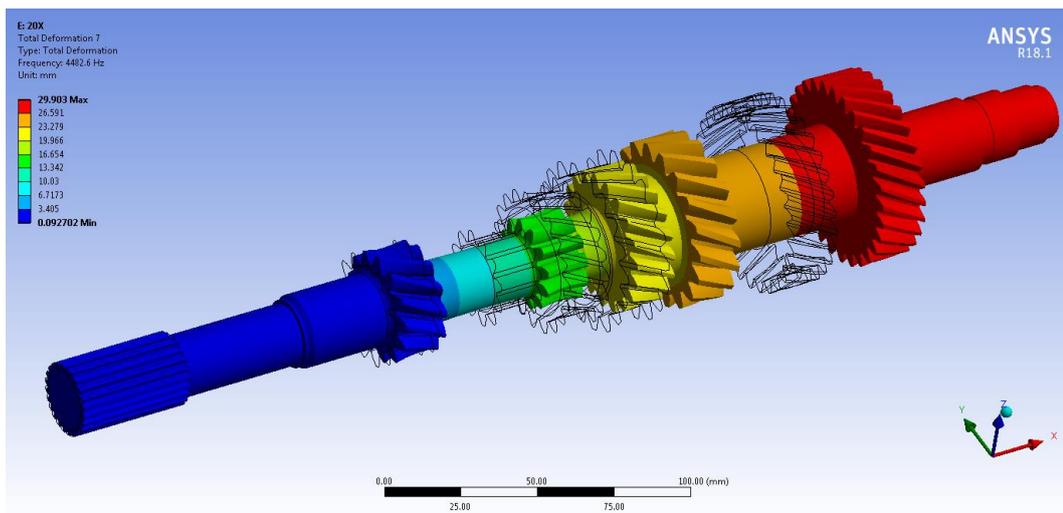


Рисунок 43 - Форма колебаний вала на пятой собственной частоте

Таблица 2 - Результаты расчета

Материал		20X
Собственная частота, Гц	2	1722,1
	3	2757,3
	4	4442,4
	5	4482,6
	6	7549,0

Так же был проведен анализ влияния материала вала на прочностные характеристики, одного из его зубчатых венцов. Общий вид исследуемого венца представлен на рисунке 44.

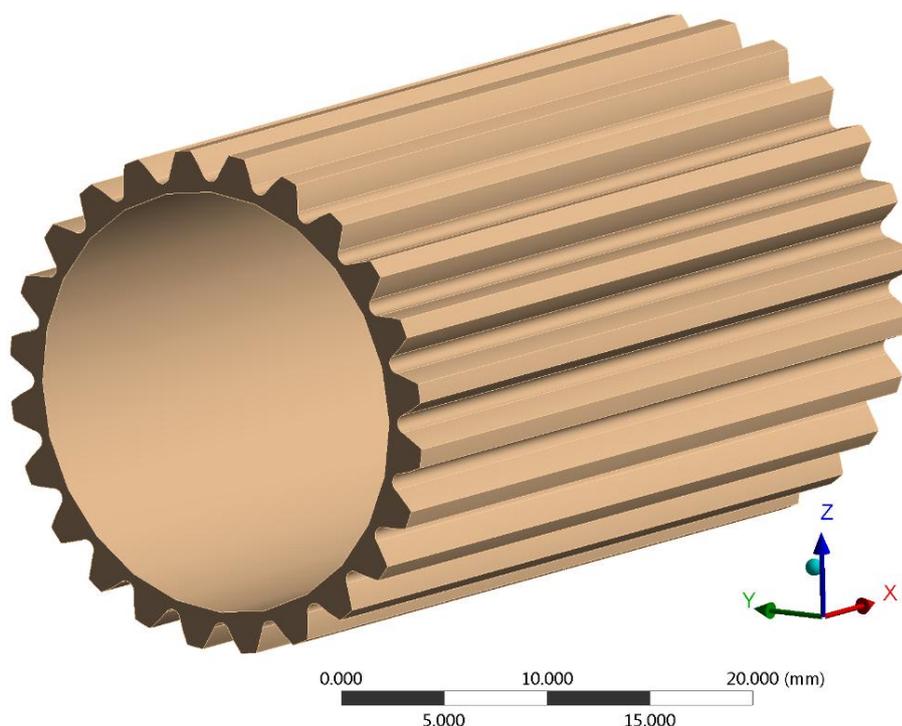


Рисунок 44 - Общий вид исследуемого венца

Для проведения анализа влияния материала вала на прочностные характеристики была выбрана конструкционно легированная сталь, основные характеристики которой представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Характеристики исследуемой стали

Свойства	20X
Плотность, $\frac{кг}{м^3}$	7810
Модуль упругости, Па	2,13e11
Коэффициент Пуассона	0,3
Предел текучести, МПа	635

Общий вид модели венца представлен на рисунке 45

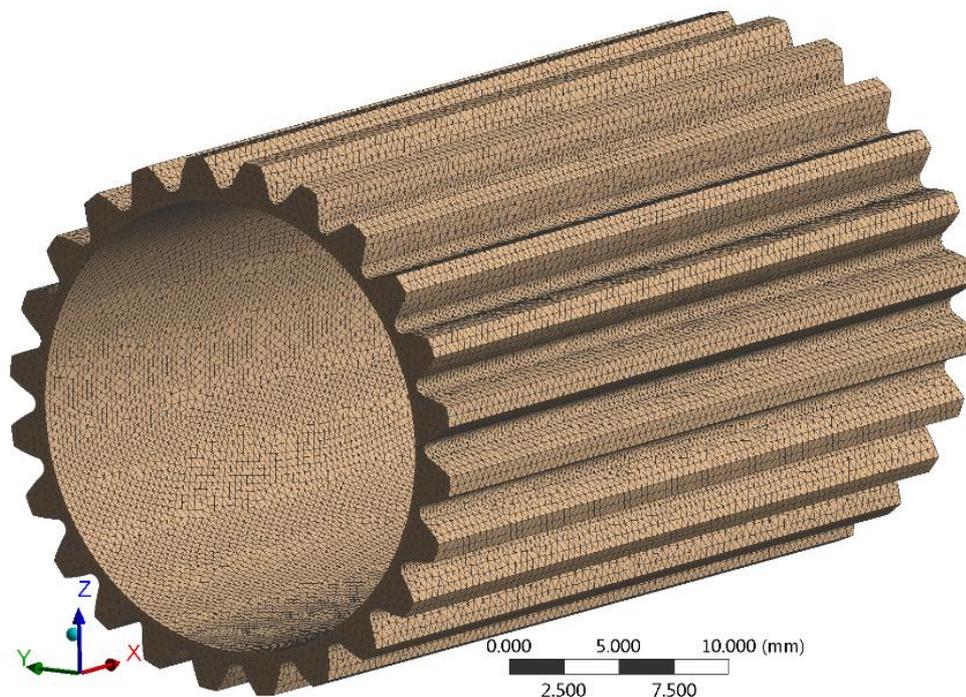
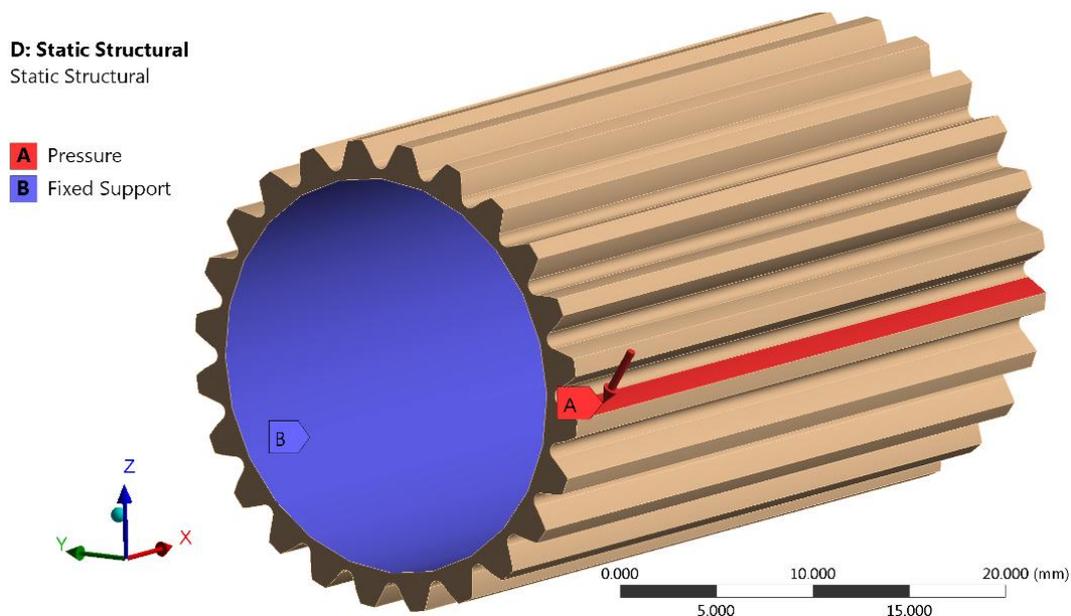


Рисунок 45 - Диаграмма качества элементов и общий вид КЭ модели вала

Моделируется заклинивание вала с определением максимального допускаемого давления на один из зубьев венца. Общий вид граничных условий и условий нагружения представлен на рисунке 46.



A - давление на зуб; B - заклинивание вала

Рисунок 46 - Граничные условия и условия нагружения

В результате проведенных исследований были получены распределения эквивалентных напряжений по исследуемой конструкции. Максимальная нагрузка определялась по известному пределу текучести (без запаса прочности).

Распределение эквивалентных напряжений по зубчатому венцу изготовленному из стали 20Х при действии максимальных нагрузок представлено на рисунке 47, соответственно. Значения максимальных нагрузок сведены в таблицу 4.

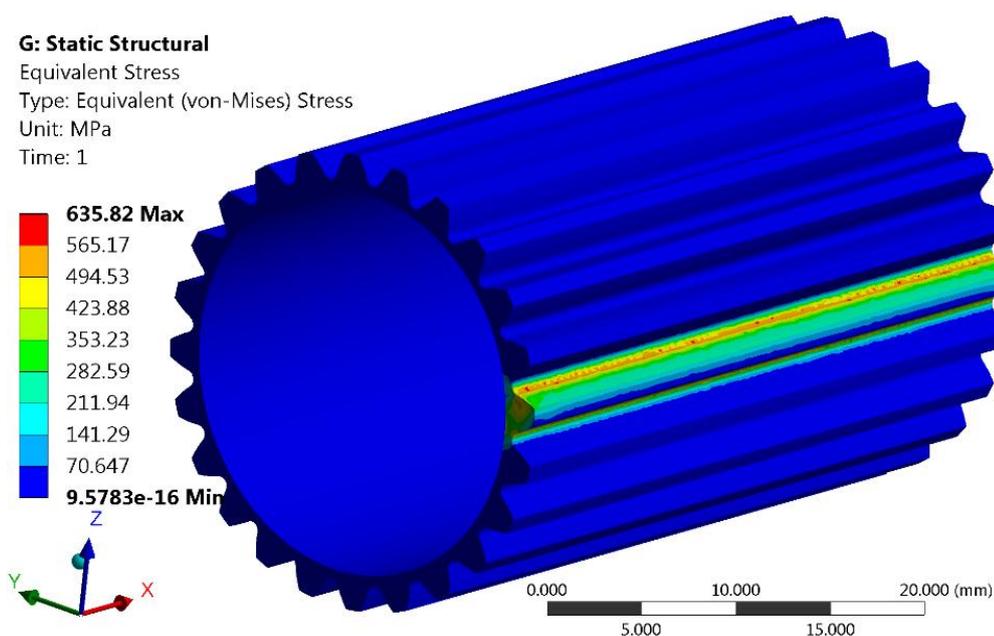


Рисунок 47 - Распределение эквивалентного напряжения по зубчатому венцу, изготовленному из стали 20Х при действии давления в 390 МПа

Таблица 4 - Результаты расчета

Материал	20Х
Максимальное давление, МПа	390

По результатам видно, какое максимальное давление приходит на зуб венца из стали 20Х.

Применяя данный метод для обработки детали из стали 20Х возможно повышение твердости обрабатываемых поверхностей детали по Виккерсу на 780HV, а по Роквеллу на 62 HRC.

Микротвердость измерялась по методу Виккерса на поверхности и в сердцевине образцов. Степень наклепа вычислялась по формуле:

$$CH = \frac{HV_{\text{пов.}} - HV_{\text{серд.}}}{HV_{\text{пов.}}} \times 100\% \quad (2)$$

где,  $HV_{\text{пов.}}$  – микротвердость на поверхности (по Виккерсу);

$HV_{\text{серд.}}$  – микротвердость в сердцевине.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В выпускной квалификационной работе была поставлена цель повысить долговечность первичного вала применив упрочняющий метод поверхностного пластического деформирования (ППД) для повышения износостойкости, качества поверхностного слоя, сопротивления усталости, коррозионной стойкости и тем самым увеличивая ресурс работы детали в десятки раз.

Отталкиваясь от проведенного анализа по методам поверхностного пластического деформирования, был установлен для применяемой детали эффективный, производительный и экономичный метод по упрочнению поверхностного слоя – это метод ультразвукового дробеструйного упрочнения.

Было описано и показано как происходит процесс дробеструйного упрочнения. После которого рассказывалось о возможностях ультразвукового дробеструйного упрочнения по сравнению с простым дробеструйным упрочнением, также было установлено, какой лучше всего дробью обрабатывать поверхность применяя выбранный процесс, вынесены основные преимущества ультразвуковой дробеструйной обработки и какие соблюдаются требования к ультразвуковому дробеструйному оборудованию.

Выполнены анализы влияния материала стали 20Х на прочностные характеристики и на собственные частоты.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Барац Я.И. Оптимальное сочетание методов ППД при финишной обработке сопрягаемых поверхностей, работающих в условиях трения скольжения // Надежность механических систем: науч. конференция. – 1995. – С. 19–20.
2. Бобровский Н.М. Повышение долговечности наружных поверхностей валов методом выглаживания широким самоустанавливающимся инструментом: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.02.08. – М., 1999. – 16 с.
3. Горохов В.А. Чистовая обработка титановых сплавов. – М.: Машиностроение, 1975. – 107 с.
4. Одинцов Л.Г. Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. – М.: Машиностроение, 1981. – 160 с.
5. Евдокимов В.Д., Клименко Л.П., Евдокимова А.Н. Технология упрочнения машиностроительных материалов. - М.: Машиностроение, 2005. – 352 с.
6. Петросов В.В. Основы теории обработки дробью / В. В. Петросов // Областная научн.техн.конференция: интенсификация производства и повышения качества изделий ППД. - 1989. - С. 28-29.
7. Тамаркин М.А, Тищенко Э.Э, Лебеденько В.Г. Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах // Вестник ДГТУ, 2009. Т9. №3(42)
8. Папшев Д.Д. Упрочнение деталей обкаткой шариком. – М.: Машиностроение, 1968. – 131 с.
9. Муханов, И.И. Упрочнение стальных деталей шариком, вибрирующим с ультразвуковой частотой / И.И. Муханов, Ю.М. Голубев // Вестник машиностроения. – 1966. – № 11. – С. 52–53.

10. Ежелев А.В., Бобровский И.Н., Лукьянов А.А Анализ способов обработки поверхностным пластическим деформированием // Фундаментальные исследования. – 2012. - № 6 (часть 3). – С. 642 – 646.
11. Евсин Е.А. Исследование возможности оптимизации инструмента для алмазного выглаживания / Е.А. Евсин // Совершенствование процесса абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении: сб. ст. Пермь: Перм. политехн. ин-т, 1983. С. 63-70.
12. Торбило В.М. Алмазное выглаживание. М.: Машиностроение, 1972. 104с.
13. Кузнецов В.П. Имитационное моделирование влияния параметров технологической системы на виброустойчивость выглаживания поверхностей деталей // Металлообработка. –2010. – № 1. – С. 7-16.
14. Повышение прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием/Под.ред. И. В. Кудрявцева.
15. Бафаев Д. Х. Эффективный способ упрочнения обработки поверхностного слоя деталей машин // Молодой ученый. — 2016. — №20. — С. 121-124.
16. Кокорева О.Г. Результаты исследования тяжело нагруженных поверхностей, упрочнённых статико-импульсным методом // Вестник машиностроения, 2010, №3.
17. Петросов В.В. Основы теории обработки дробью / В. В. Петросов // Областная научн.техн.конференция: интенсификация производства и повышения качества изделий ППД. - 1989. - С. 28-29.
18. Пислегин В.В. Гидродробеструйное упрочнение штампов / В. В. Пислегин, А. В. Воробьев // Областная научн. техн. конференция: интенсификация производства и повышения качества изделий ППД. - 1989. - С. 29-30.

19. Комаров В.В. Выбор варианта проведения процесса низкотемпературного алмазного выглаживания / В. В. Комаров // Сб.научн.трудов: Процессы и оборудование абразивно-алмазной обработки. - 1979. - №3. - С. 50-55.
20. Бобровский И.Н., Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2012. 5с
21. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей машин / А. П. Бабичев. - М.: Машиностроение, 1974. - 136 с
22. Блюменштейн В.Ю. Механика технологического наследования как научная основа проектирования процессов упрочнения деталей машин поверхностным пластическим деформированием: диссертация ... доктора технических наук: 05.02.08 / В. Ю. Блюменштейн. - Москва, 2002.
23. Грановский Э.Г. Исследование износостойкости алмазных инструментов для выглаживания / Э. Г. Грановский // Алмазы. - 1966. - №1. - С. 100.
24. Смелянский В.М. Механика упрочнения поверхностного слоя деталей машин в технологических процессах поверхностного пластического деформирования / В. М. Смелянский. - М.: "МАШМИР", 1992.
25. Проскуряков Ю. Г. Дорнование цилиндрических отверстий с большими натягами / Ю. Г. Проскуряков, Г. И. Шельвинский. - Ростов Н/Д: Издательство Рост, ун-та, 1982.
26. Яценко В. К. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием / В. К. Яценко. - М.: Машиностроение, 1985.
27. Шнейдер Ю. Г. Холодная бесштампованная обработка металлов давлением/ Ю. Г. Шнейдер. - Л.: Машиностроение, 1967.
28. Бобровский Н. М. Разработка научных основ процесса обработки деталей поверхностно-пластическим деформированием без применения смазочно-

охлаждающих жидкостей. – Тольятти: Тольяттинский гос. университет, 2008. – 170с.

29. Чистосердов, П. С. Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П. С. Чистосердов. – Минск: Беларусь, 1977. – 124 с.

30. Чистосердов, П. С. Комбинированные инструменты для совмещения процессов резания и поверхностного пластического деформирования / П. С. Чистосердов. – Минск: НИИмаш, 1975. – 45 с.

31. Чистосердов, П. С. Комбинированные инструменты для обработки поверхностей пластическим деформированием / П. С. Чистосердов, Г. С. Жуковец. – М. :ЦНИИТЭ строймаш, 1973. – 75 с.

32. Смелянский, В. М. Особенности размерообразования при совмещенном обкатывании / В. М. Смелянский, В. А. Васильев // Автомобильная промышленность. – 1982. – № 3. – С. 28–30.

33. Чистосердов, П. С. Управление точностью обработки при совмещении процессов резания и ППД / П. С. Чистосердов // Вестн. машиностроения. – 1985. – № 11. – С. 17–18.

34. Близнюк, С. Н. Малооперационные технологии изготовления валов с применением совмещенной обработки резанием и ППД / С. Н. Близнюк, А. М. Довгалева // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус. - Рос. ун-т, 2008. – С. 70.

35. Довгалева, А. М. Управление колебаниями при упругосиловом методе комбинированной обработки / А. М. Довгалева, С. Н. Близнюк // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. – Могилев: Белорус. - Рос. ун-т, 2008. – С. 89.

36. Торбило В.М. Силовое выглаживание / В. М. Торбило. // Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей технологии в машиностроении. - Пермь, 1983 - С. 57-60.
37. Пислегин В.В. Гидродробеструйное упрочнение штампов / В. В. Пислегин, А. В. Воробьев // Областная научн. техн. конференция: интенсификация производства и повышения качества изделий ППД. - 1989. - С. 29-30.
38. Плотников А.А. Выглаживание многоэлементным алмазным элементом / А. А. Плотников, В. М. Торбило // Межвуз.сб.научн.трудов: Совершенствование процессов абразивно-алмазной и упрочняющей обработки в машиностроении. - 1986. - С. 116-120.
39. Сергеев Ю.А. Выглаживание деталей из сплава меди / Ю. А. Сергеев,
40. Попова В. В. Поверхностное пластическое деформирование и физико-химическая обработка - М.: Машиностроение, 2013. – 99 с.
41. Федоров В.А Антонюк Ф. И.1, Калмыков В. В.1, \*, Влияние шероховатости исходной поверхности на силу алмазного выглаживания.
42. Семиколенных М. Н., Пегашкина Е. В. Электрохимико-механическая обработка труднообрабатываемых материалов – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ – 179 с
43. Canadian Specialty Equipment. Применение дробеструйного упрочнения - М.: Машиностроение, 2006. – 13с.
44. Influence of Ultrasonic Burnishing Technique on Surface Quality and Change in the Dimensions of Metal Shafts  
<https://www.hindawi.com/journals/je/2014/124247/>
45. Study on Effect of Ultrasonic Vibration on Grinding Force and Surface Quality in Ultrasonic Assisted Micro End Grinding of Silica Glass

<https://www.hindawi.com/journals/sv/2014/418059>

46. TRANSMISSION, OR GEARBOX?

[http://www.carbibles.com/transmission\\_bible.html](http://www.carbibles.com/transmission_bible.html)

47. Condition Monitoring Method for Automatic Transmission Clutches,  
[http://www.phmsociety.org/sites/phmsociety.org/files/phm\\_submission/2014/ijPHM\\_12\\_003.pdf](http://www.phmsociety.org/sites/phmsociety.org/files/phm_submission/2014/ijPHM_12_003.pdf)

48. Floating Shaft Load Sharing Method for Face Gear Split Torque Transmission System, <http://maxwellsci.com/print/rjaset/v5-3386-3392.pdf>

49. Induction Hardening and Microstructure Analysis of Micro-Alloyed Steel Roller Shaft of an under Carriage, [http://www.ijer.in/ijer/publication/v4s7/IJER\\_2015\\_705.pdf](http://www.ijer.in/ijer/publication/v4s7/IJER_2015_705.pdf)

## ПРИЛОЖЕНИЕ

# ПРИЛОЖЕНИЕ А

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

## **ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА И ИНФОРМАТИКА: СОВРЕМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК**

*Материалы  
IV научно-практической международной конференции  
(школы-семинара) молодых ученых*

*В двух частях*

**ЧАСТЬ 2**



Тольятти  
2018

Рисунок А.1 – Титульная страница сборника

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ МАТЕРИАЛА ПЕРВИЧНОГО ВАЛА НА  
ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗУБЧАТОГО ВЕНЦА В  
ПРОГРАММЕ ANSYS**

*Научный руководитель: Бобровский Н.М, д.т.н, профессор*

Тольяттинский государственный университет

(Россия, г. Тольятти)

### 1. Цель и объект исследования

В рамках данной работы проводится анализ влияния материала вала на прочностные характеристики одного из его зубчатых венцов.

Для проведения данной работы будет сформирована геометрическая модель исследуемого вала в модуле прямого геометрического моделирования ANSYS SpaceClaim.

Общий вид и основные размеры исследуемого вала представлены на рисунке 1. Вид исследуемого венца представлен на рисунке 2.

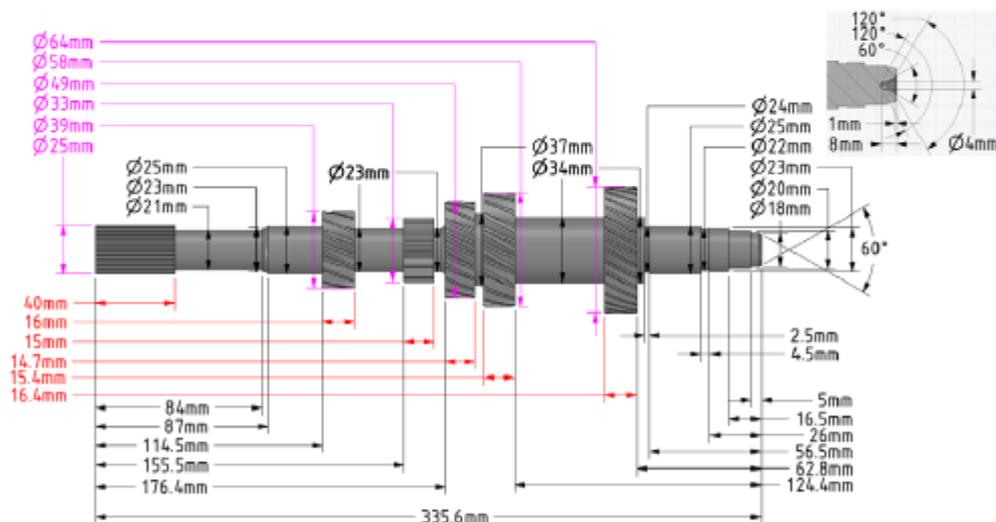


Рис. 1. Общий вид исследуемого вала

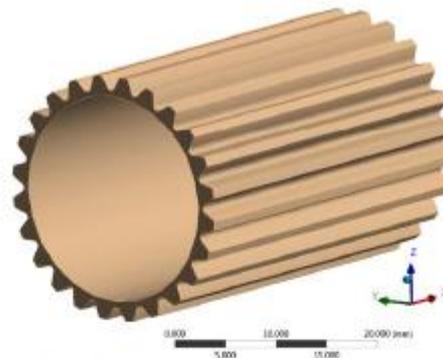


Рис.2. Общий вид исследуемого венца

## 2. Исследуемые материалы

Для проведения анализа влияния материала вала на прочностные характеристики были выбраны две конструкционные легированные стали, основные характеристики которых представлены в таблице 1

Таблица 1

	20Х	20ХН3А
Плотность, $\frac{кг}{м^3}$	7810	7830
Модуль упругости, Па	2,13e11	2,04e11
Коэффициент Пуассона	0,3	0,3
Предел текучести, МПа	635	735

Общий вид модели венца представлен на рисунке 3.

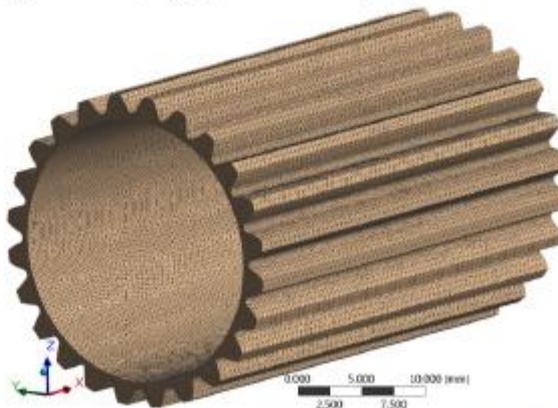


Рис. 3. Диаграмма качества элементов и общий вид КЭ модели вала

### 3. Граничные условия и условия нагружения

В рамках данной работы моделируется заклинивание вала с определением максимального допустимого давления на один из зубьев венца. Общий вид граничных условий и условий нагружения представлен на рисунке 4.

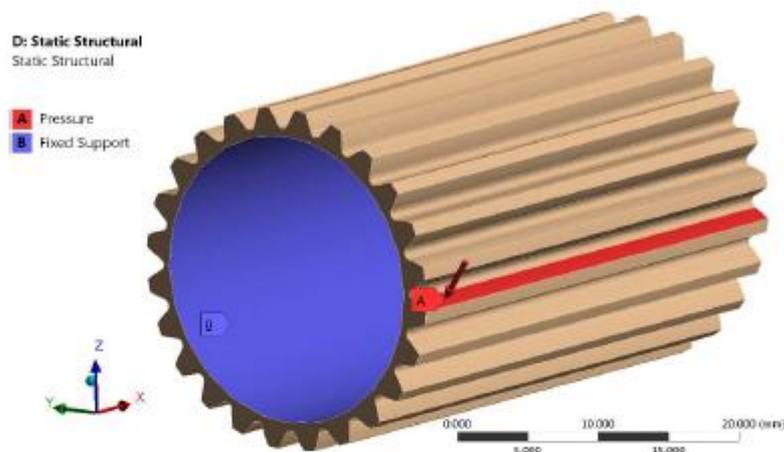


Рис. 4. Граничные условия и условия нагружения

Для моделирования заклинивания вала в ANSYS предлагается использовать жесткую опору (Fixed Supports). При этом устанавливается ограничение всех линейных и угловых перемещений. Давление прикладывается в зоне А.

### 4. Результаты расчетов

В результате проведенных исследований были получены распределения эквивалентных напряжений по исследуемой конструкции. Максимальное напряжение определялось по известному пределу текучести (без запаса прочности).

Распределение эквивалентных напряжений по зубчатому венцу изготовленному из сталей 20Х и 20ХН3А при действии максимальных нагрузок представлены на рисунках 5 и 6, соответственно.

Значения максимальных нагрузок сведены в таблицу 2.

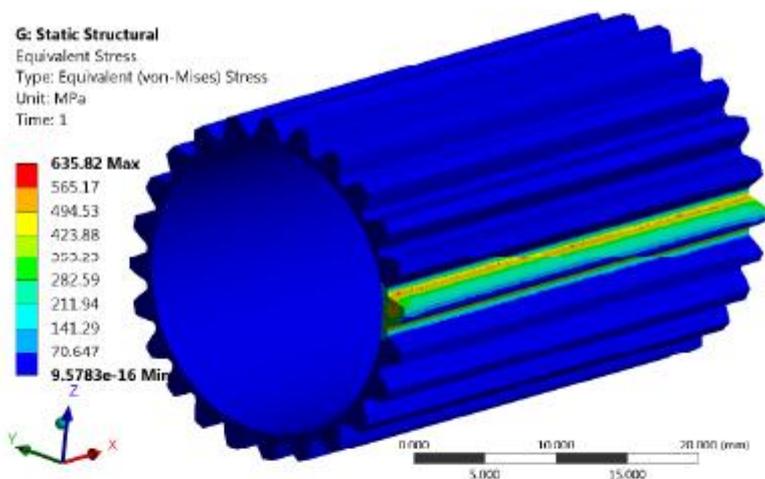


Рис. 5. Распределение эквивалентного напряжения по зубчатому венцу, изготовленному из стали 20X при действии давления в 390 МПа

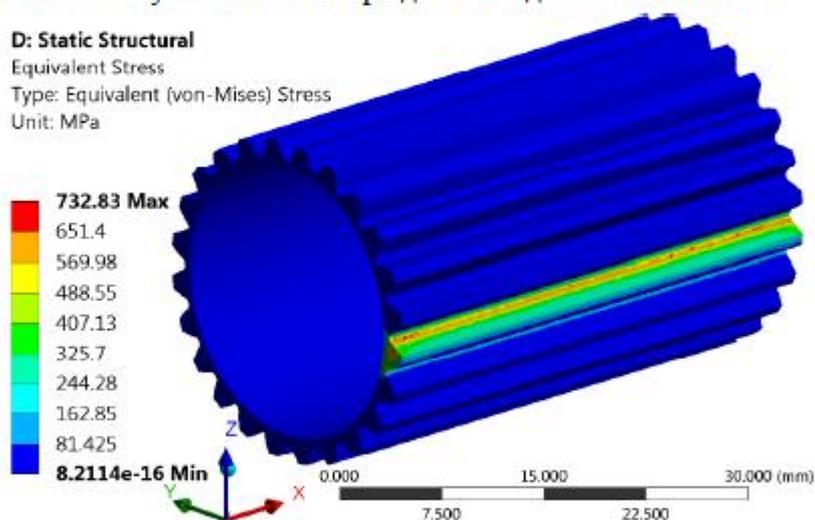


Рис. 6. Распределение эквивалентного напряжения по зубчатому венцу, изготовленному из стали 20ХН3А при действии давления в 457 МПа

Таблица 2

Материал	20X	20ХН3А
Максимальное давление, МПа	390	457