

Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого

Институт металлургии, машиностроения и транспорта

Кафедра «Машиноведение и основы конструирования»

Е.А. Тарасенко

Лекция

ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ (ЗП)
ЦИЛИНДРИЧЕСКИЕ ЗУБЧАТЫЕ ПЕРЕДАЧИ

Детали машин

Слайды видеолекций для бакалавров технических направлений

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

2015

Преимущества:

- 1. Малые габариты;
- 2. Высокая нагрузочная способность;
- 3. Высокий КПД ($\eta = 0,97...0,98$);
- 4. Высокая надежность;
- 5. Постоянство передаточного отношения;
- 6. Широкий диапазон передаваемых моментов и мощностей (от сотых долей до десятков тысяч кВт);
- 7. Широкий диапазон передаточных отношений (чисел);

Недостатки:

- 1. Повышенный шум при работе при высоких оборотах и недостаточной точности;
- 2. Относительная сложность изготовления (необходимость специализированного оборудования);

Классификация ЗП

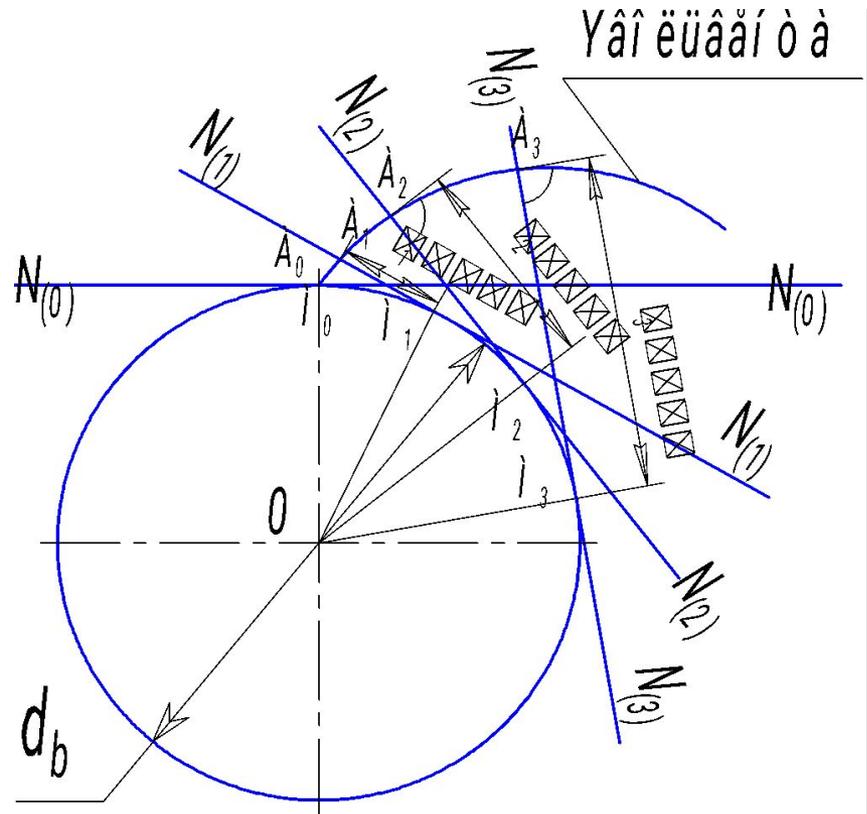
- **1. По расположению осей:**
 - - с параллельными осями;
 - - с пересекающимися осями (конические передачи);
 - - с перекрещивающимися осями (винтовые и гипоидные передачи);
- **2. По направлению линии наклона зубьев:**
 - - прямозубые ($\beta = 0$);
 - - косозубые (β_0 : $80 < \beta < 200$);
 - - шевронные ($200 < \beta < 400$);
- **3. По степени подвижности осей:**
 - - с неподвижными осями;
 - - с подвижными осями (планетарные);

- **4. Внешнего и внутреннего зацепления.**
- **5. По виду кривых, очерчивающих боковой профиль зуба:**
 - - ЭВольвентные;
 - - циклоидные (в часовой промышленности);
 - - круговые (зацепление Новикова);
- **6. По конструктивному исполнению:**
 - - закрытые (в корпусах);
 - - открытые;
- **7. По величине окружных скоростей:**
 - - тихоходные – $V < 3$ м/с;
 - - среднескоростные – $V = 3 \dots 15$ м/с;
 - - тихоходные $V > 15$ м/с;

- **Эвольвента** - траектория точки на производящей прямой N-N, которая обкатывается вокруг окружности диаметра db (**основной окружности, эволюты**) без скольжения.
- Точка M (на основной окружности) занимает ряд последовательных положений: $M(0)$, $M(1)$, $M(2)$, $M(3)$... Точка A (на производящей прямой) занимает ряд последовательных положений: $A(0)$, $A(1)$, $A(2)$, $A(3)$...;

ЭВОЛЬВЕНТА И ЕЕ СВОЙСТВА

- **Достоинства** эвольвентного зацепления:
- **1. Технологичность** (относительная несложность изготовления с обеспечением высокой точности, высокая производительность);
- **2. Нечувствительность** к изменению межосевого расстояния без нарушения зацепления (при неточности изготовления, монтажа и т.);

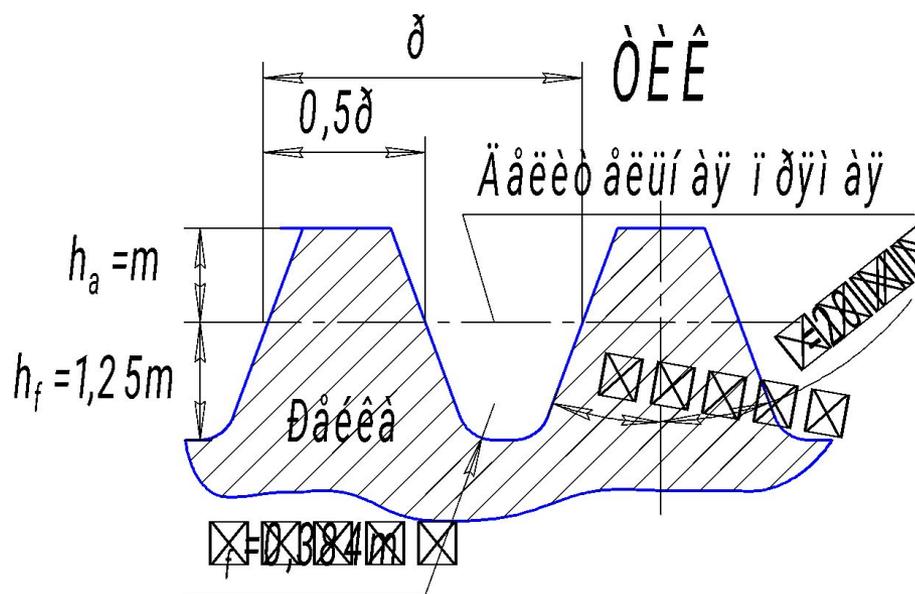


Свойства эвольвенты

- 1. Производящая прямая N-N является одновременно **касательной** к основной окружности (эволюте) и **нормалью** ко всем производимым эвольвентам;
- 2. Радиус кривизны эвольвенты ρ_i равен длине соответствующей дуги основной окружности $A_1 M_1 = M_0 M_1$; $A_2 M_2 = M_0 M_2$; $A_3 M_3 = M_0 M_3$ и т.д. (т.к. скольжение отсутствует);
- 3. С увеличением радиуса основной окружности эвольвента выполаживается, а при эвольвента вырождается в прямую линию.
- 4. Две эвольвенты одной и той же основной окружности – **эквидистантны**;

Изложенный принцип положен в основу технологии изготовления зубчатых колес **методом обкатки**, когда зубья эвольвентных колес нарезаются специальным инструментом – **рейкой**.

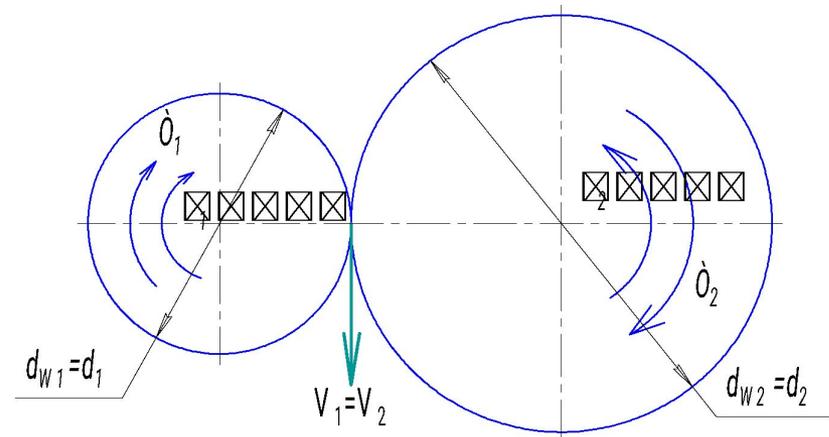
- Рейка представляет собой колесо бесконечного радиуса.
- Одним и тем же инструментом можно нарезать колеса с разным числом зубьев.



Начальным диаметром d_w называется диаметр окружностей, которые при работе передачи перекатываются друг по другу без скольжения. Понятие начальных окружностей применимо только для зацепления пары колес.

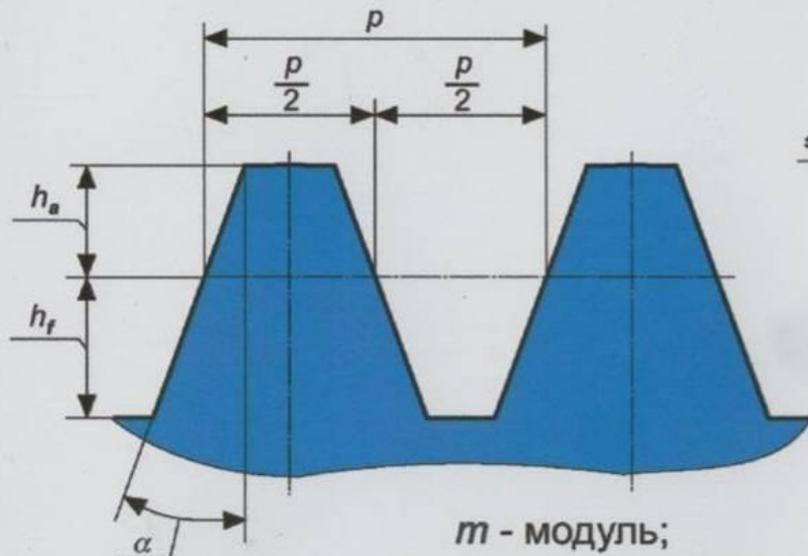
- Точка контакта НО носит название полюса зацепления.
- Начальный диаметр колеса в реечном зацеплении (перекатывается по делительной окружности) носит название **делительного диаметра**.
- В процессе нарезания НО колеса делится шагом рейки на Z равных частей. На делительном диаметре колес ширина зуба равна ширине впадины, а шаг и угол зацепления равны шагу и углу профиля α рейки.
- **Делительная окружность принадлежит отдельно взятому колесу.**

В зубчатом зацеплении два колеса: 1-шестерня; 2 – зубчатое колесо



ИСХОДНЫЙ И ПРОИЗВОДЯЩИЙ КОНТУРЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Исходный контур по ГОСТ 13755-81

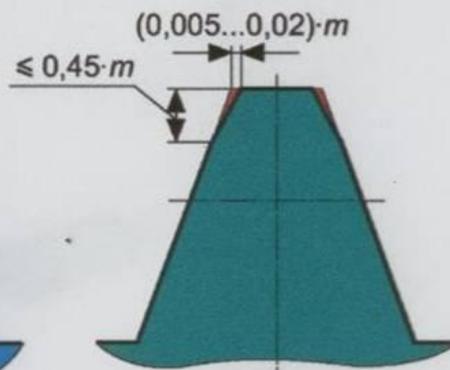


m - модуль;

$p = \pi \cdot m$ - шаг;

$\alpha = 20^\circ$ - угол главного профиля.

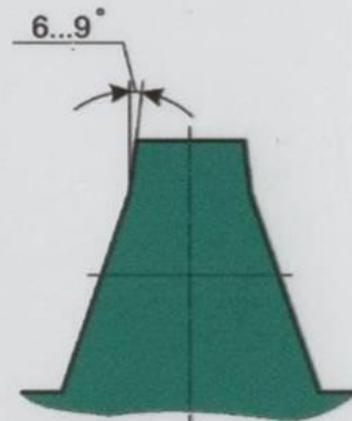
Исходный контур с модификацией
профиля головки зуба
(фланкирование зубьев)



$h_a = m$ - высота головки;

$h_f = 1,25 \cdot m$ - высота ножки;

Производящий реечный контур с
протуберанцем

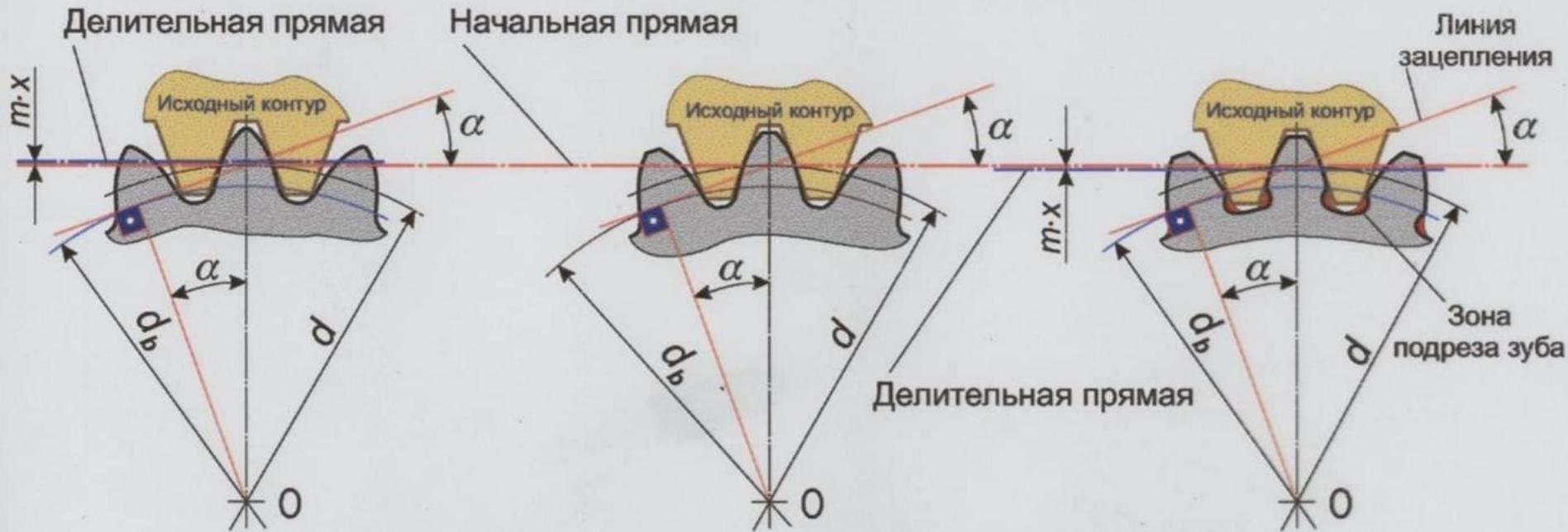


ЗУБЧАТЫЕ КОЛЕСА СО СМЕЩЕНИЕМ ИСХОДНОГО КОНТУРА

Смещение положительное:
 $x > 0$

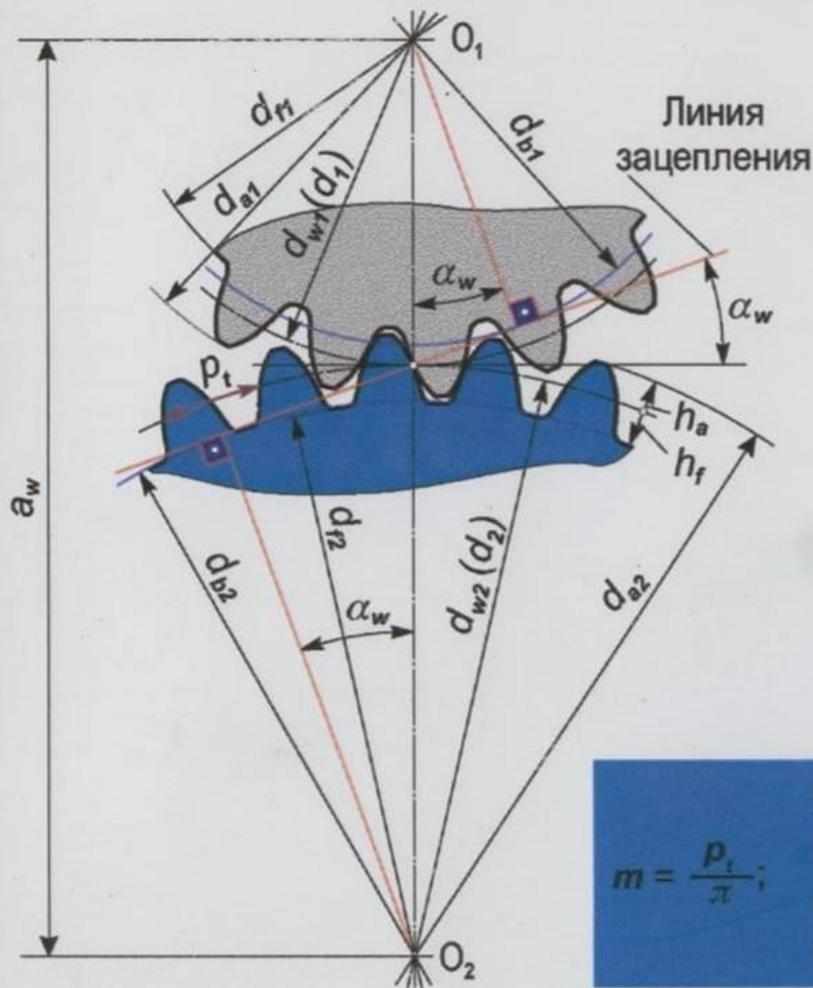
Смещение отсутствует:
 $x = 0$

Смещение отрицательное:
 $x < 0$



m - модуль;
 x - коэффициент смещения исходного контура;
 d - делительный диаметр зубчатого колеса;
 d_b - основной диаметр зубчатого колеса;
 α - угол профиля исходного контура.

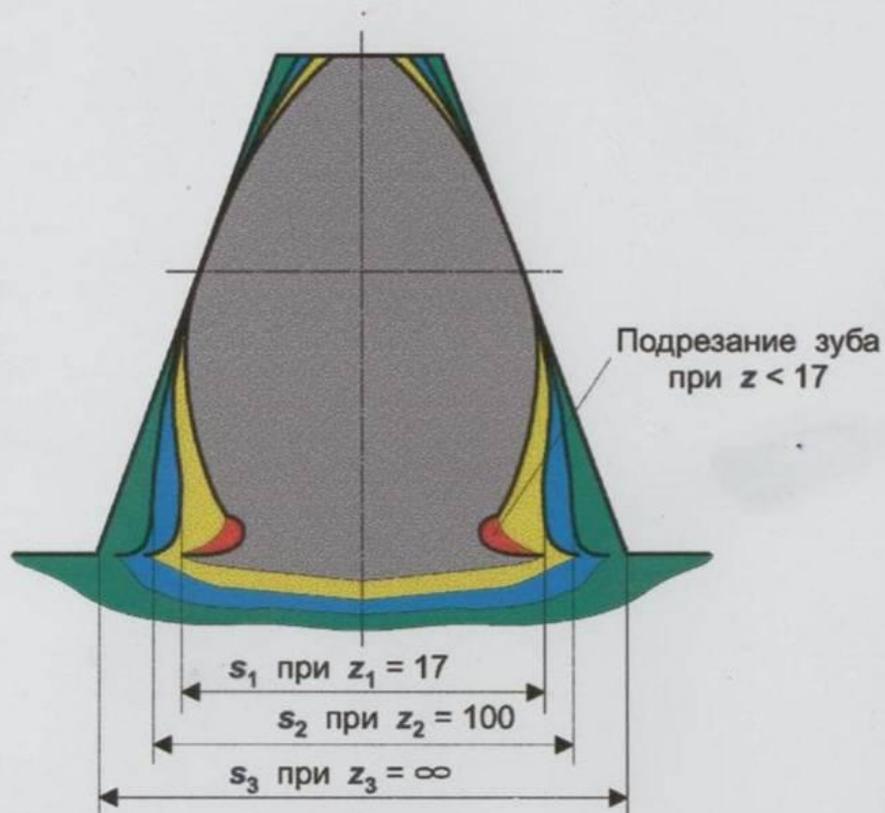
ГЕОМЕТРИЯ ЭВОЛЬВЕНТНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПРЯМОЗУБОЙ ПЕРЕДАЧИ С ИСХОДНЫМ КОНТУРОМ ПО ГОСТ 13755-81 БЕЗ СМЕЩЕНИЯ



- m - модуль зацепления, мм;
- p_t - окружной шаг зубьев, мм;
- z_1, z_2 - числа зубьев шестерни и колеса;
- d_1, d_2 - делительные диаметры шестерни и колеса, мм;
- d_{w1}, d_{w2} - начальные диаметры шестерни и колеса, мм;
- d_{a1}, d_{a2} - диаметры вершин зубьев шестерни и колеса, мм;
- d_{f1}, d_{f2} - диаметры впадин зубьев шестерни и колеса, мм;
- d_{b1}, d_{b2} - диаметры основных окружностей шестерни и колеса, мм;
- h_a - высота головки зуба, мм;
- h_f - высота ножки зуба, мм;
- h - высота зуба, мм;
- α_w - угол зацепления, градус;
- a_w - межосевое расстояние, мм.

$m = \frac{p_t}{\pi};$	$d_1 = m \cdot z_1;$	$d_{w1} = d_1;$	$d_{a1} = d_1 + 2 \cdot h_a;$	$h = h_a + h_f;$
	$d_2 = m \cdot z_2;$	$d_{w2} = d_2;$	$d_{a2} = d_2 + 2 \cdot h_a;$	$h_a = m;$
	$d_{b1} = d_1 \cdot \cos \alpha_w;$	$d_{f1} = d_1 - 2 \cdot h_f;$	$h_f = 1,25 \cdot m;$	
	$d_{b2} = d_2 \cdot \cos \alpha_w;$	$d_{f2} = d_2 - 2 \cdot h_f;$	$a_w = 0,5 \cdot (d_{w1} + d_{w2}).$	

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ЗУБЬЕВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ЗУБЧАТОГО КОЛЕСА НА ИХ ФОРМУ И ПРОЧНОСТЬ



Толщина зуба у корня:

$$s_1 < s_2 < s_3$$

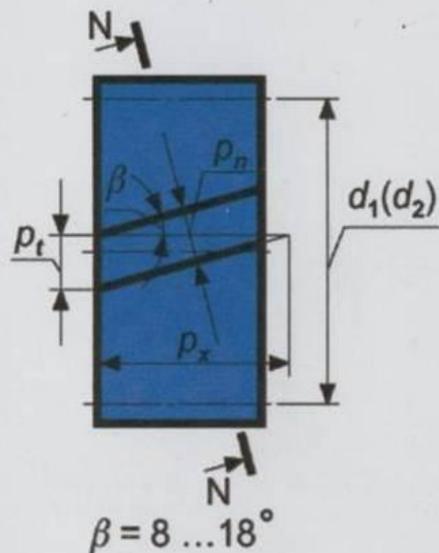
Менее прочен зуб шестерни, имеющей меньшее число зубьев: $z_1 < z_2$.

В расчетах на изгибную прочность вводится коэффициент Y_{FS} , учитывающий форму зуба и определяемый отдельно для шестерни и колеса.

Для обеспечения изгибной равнопрочности зубьев шестерни и колеса рекомендуется шестерню выполнять из более прочного материала.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОМЕТРИИ КОСОЗУБЫХ И ШЕВРОННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

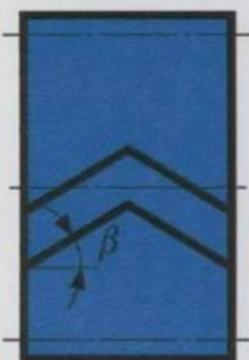
Зуб косой



$\beta = 8 \dots 18^\circ$

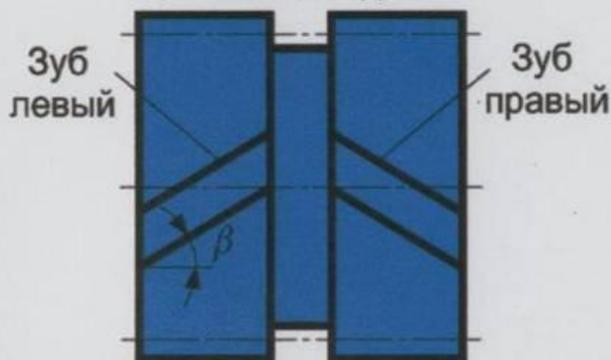
Зуб шевронный

а) без канавки



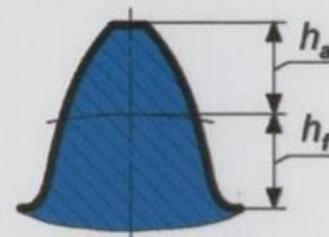
$\beta = 25 \dots 40^\circ$

б) с канавкой для выхода фрезы



$\beta = 25 \dots 40^\circ$

N - N ⊙ (Увеличено)



h_a - высота головки зуба;

h_f - высота ножки зуба;

p_n, p_t, p_x - шаги нормальный, торцовый, осевой;
 β - угол наклона зубьев;

m_n, m_t, m_x - модули нормальный, торцовый, осевой;
 z_1, z_2 - числа зубьев шестерни и колеса;

d_1, d_2 - делительные диаметры шестерни и колеса;

$$p_t = \frac{p_n}{\cos \beta};$$

$$p_x = \frac{p_n}{\sin \beta};$$

$$m_n = \frac{p_n}{\pi};$$

$$m_t = \frac{p_t}{\pi};$$

$$m_x = \frac{p_x}{\pi};$$

$$d_1 = m_t \cdot z_1 = \frac{m_n \cdot z_1}{\cos \beta};$$

$$d_2 = m_t \cdot z_2 = \frac{m_n \cdot z_2}{\cos \beta};$$

$$h_a = m_n;$$

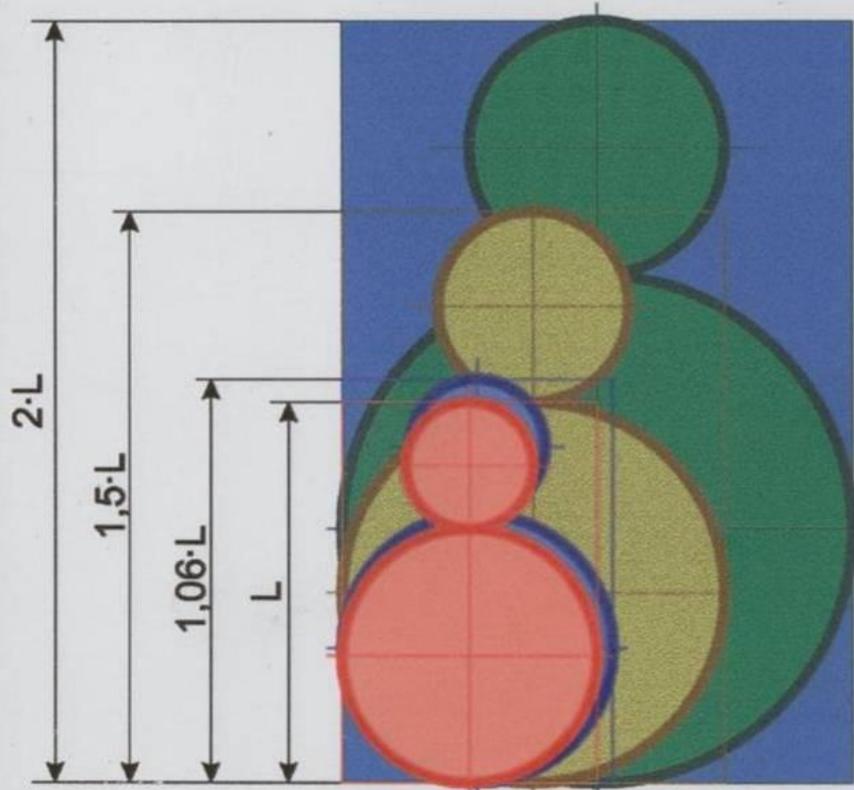
$$h_f = 1,25 \cdot m_n;$$

МАТЕРИАЛЫ И ТЕРМООБРАБОТКА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Марки сталей	Вид термообработки	Область применения
<p>Стали легированные конструкционные 15Х, 20Х, 18ХГТ, 12ХНЗА, 20Х2Н4А, 38ХМЮА и др. по ГОСТ 4543-71</p>	<p>Химико - термическое упрочнение с закалкой до твердости $H = 56...63 \text{ HRC}$</p>	<p>Высоконагруженные зубчатые передачи</p>
<p>Стали легированные конструкционные 40Х, 45Х, 40ХН, и др. по ГОСТ 4543-71</p>	<p>Поверхностная закалка с нагревом ТВЧ до твердости $H = 50...55 \text{ HRC}$</p>	<p>Средненагруженные зубчатые передачи</p>
	<p>Улучшение до твердости $H = 230...280 \text{ HB}$</p>	<p>Зубчатые передачи при отсутствии жестких требований к габаритам</p>
<p>Литейные стали 50Л, 55Л и др. по ГОСТ 977-88</p>	<p>Нормализация до твердости $H = 190...220 \text{ HB}$</p>	<p>Крупногабаритные зубчатые передачи</p>

ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРОВ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ ОТ ВИДА ТЕРМООБРАБОТКИ ЗУБЬЕВ

Нормализация
H = 170...220 HB



Химико-термические
упрочнения
H = 55...63 HRC



Закалка
с нагревом ТВЧ
H = 48...58 HRC



Улучшение
H = 240...320 HB



ВИДЫ ОТКАЗОВ ЗП

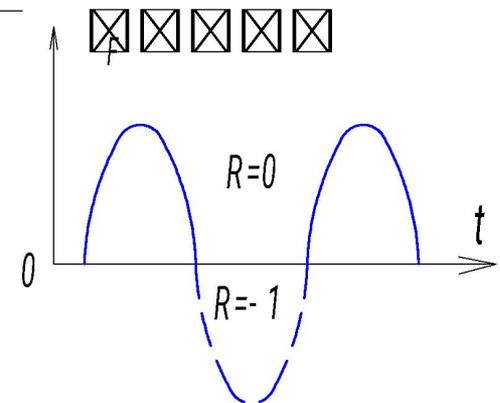
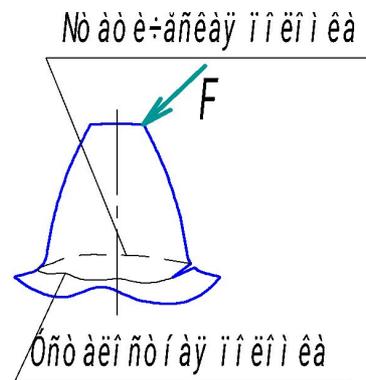
Причиной отказов ЗП является **поверхностной и объемное разрушение зубьев.**

ОБЪЕМНОЕ РАЗРУШЕНИЕ:

- **поломка** зуба. Причина поломки – циклические и статические напряжения изгиба, превышающие в процессе работы опасные (предельные) напряжения.
- **Усталостная поломка:** обусловлена накоплением усталостных повреждения при многократном циклическом ($R=0$ или $R=-1$) нагружении зубьев в условиях **длительной работы передач.** Критерий работоспособности – **изгибная выносливость** зубьев. При усталостной поломке линия отлома – **вогнутая.**

Условие изгибной выносливости:

$$\sigma_F \leq [\sigma_F];$$



- - **Статическая поломка:** характерна при кратковременных перегрузках передач. **Критерий** работоспособности – статическая **изгибная прочность** зубьев. При статической поломке **линия отлома – выпуклая.**

Условие статической изгибной прочности:
$$\sigma_{Fmax} \leq [\sigma_{Fmax}];$$

Меры предупреждения поломок зубьев:

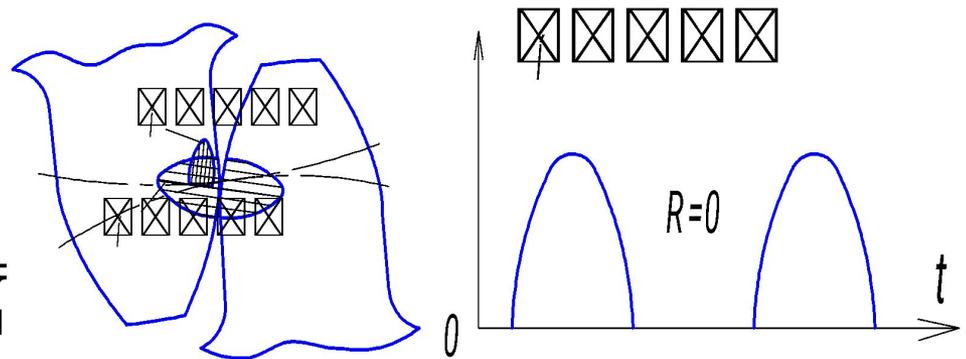
- Увеличение модуля зацепления;
- Нарезание с положительным смещением инструмента ($X\Sigma > 0$), обеспечивающим усиление основания зуба;
- Применение упрочняющих технологий;

ПОВЕРХНОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ЗУБЬЕВ:

- - усталостное выкрашивания активной поверхности зубьев;
- - пластическое обмятие зубьев;
- - абразивное изнашивание зубьев;
- - схватывание (ведущее к заеданию);

Усталостное выкрашивание зубьев (pitting):

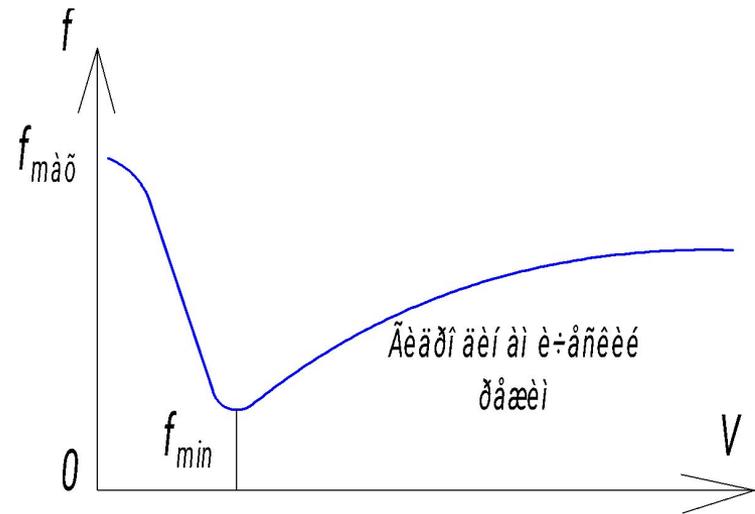
- Характерно для закрытых передач, в нормальных условиях: по нагрузке и смазке, **при длительной работе;**
- Под действием циклических напряжений меняется поверхностная структура материала с образованием оспин, раковин усталостного характера.
- Вызывает усиление вибро-акустической активности механизмов, повышение уровня уменьшению площади несущей поверхности, возникновению интенсивного износа.
- На начальном этапе эксплуатации характерно **ограниченное выкрашивание**, которое при значении критерия может перерасти в **прогрессирующее.**



- Помимо нормальных контактных напряжений σ_H , под поверхностью возникают **касательные контактные напряжения τ_H** , которые обуславливают **глубинную усталость** материала, с выходом усталостных трещин на поверхность. Это явление наиболее характерно для зубьев с высокой твердостью и связано с отслоением упрочненного слоя.

Усталостное выкрашивание проявляется в околополюсной зоне и на ножке зуба колеса.

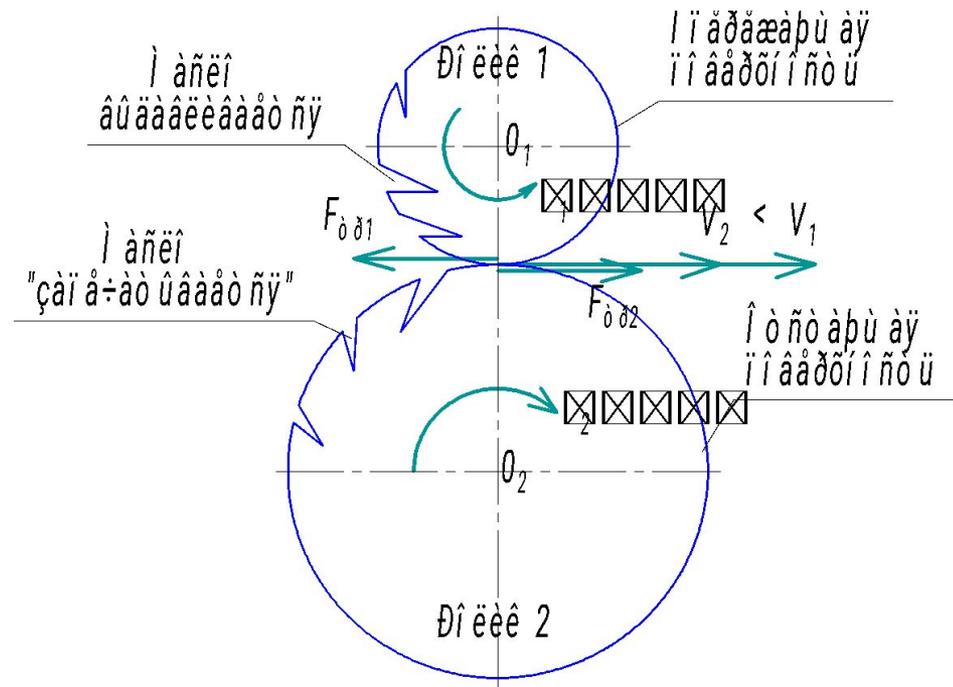
- В полюсе, при отсутствии скольжения зубьев, возникает наибольшее трение (коэффициент трения μ_{\max}).
- Кроме того, при переходе полюса силы трения меняют свое направление, что приводит к "расшатыванию" структуры поверхности.



Развитию усталостного выкрашивания способствует смазка. Попадая в усталостные раковины, при контакте двух зубьев происходит "запечатывание" полости, внутри которой возникает значительное гидростатическое давление. Под его действием происходит "вырывание" частиц материала, и размеры усталостной раковины - увеличиваются.

В зоне контакта на **опережающей** поверхности (модель головки зуба) смазка **выдавливается** из раковин. На отстающей поверхности – смазка "запечатывается" в раковине;. с возрастанием г.ст. давления размера раковины – возрастают.

- **Опережающая поверхность** (модель головки) имеет повышенное сопротивление выкрашиванию.
- Силы трения на поверхностях роликов направлены таким образом, чтобы уменьшить скольжение (разность скоростей): сила трения на ведущем ролике 1 направлена против вращения, сила трения на ведомом ролике 2 направлена по направлению его вращения.



Критерий работоспособности: **контактная выносливость.**

- **Условие контактной выносливости** $\sigma_H \leq [\sigma_H]$;
- **Меры по предупреждению усталостного выкрашивания:**
 - 1. Правильность определения расчетных размеров ЗП;
 - 2. Повышение твердости зубьев;
 - 3. Применение масел с присадками, способствующих незатеканию смазки в раковины;
 - 4. Нарезание с положительным смещением инструмента ($X_\Sigma > 0$);

- - **Пластическое обмятие зубьев**: может происходить при **кратковременных перегрузках** передачи и невысокой твердости зубьев. Вследствие нарушения эвольвентного профиля возможно появление динамических нагрузок, повышается шумность в процессе работы.
- **Критерий** работоспособности: **контактная прочность**.
- Условие контактной прочности: σ_{Hmax}
[σ_{Hmax}];
- Меры по предупреждению пластического обмятия:
- - Повышение твердости зубьев

- **Абразивное изнашивание зубьев:** характерно для открытых передач, а также в условиях работы при ограниченной и загрязненной смазке, при плохом уплотнении: возможности попадания абразива. Ведет к изменению размеров и формы зуба: утончается основание зуба, что может привести к его поломке.
- **Критерий** работоспособности: **износостойкость**;
- Методик по расчету износостойкости в настоящее время не существует. Для ограничения износа формально используют условие: σ_H [σ_H];
- Меры, направленные на повышение износостойкости:
 - 1. Повышение качества уплотнений;
 - 2. Повышение твердости зубьев;
 - 3. Обеспечение подвода смазки;

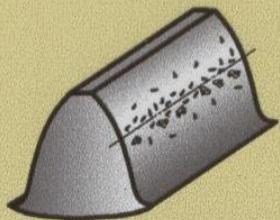
- - **Схватывание**: характерно для передач, работающих в условиях высокой нагрузки, больших скоростях, и нагреве, приводит к заеданию. При повышенных температурах в зоне контакта происходит разрыв масляной пленки и сварка ювенильных поверхностей на диффузионном уровне. Заедание проявляется в виде глубоких борозд, вырывов, наростов, рисок, оплавлений.
- Существует ряд критериальных методов прогнозирования условий возникновения заедания, например: $t_{мгн} [t]$; где $t_{мгн}$ – мгновенная температура контакта;
- **Меры, направленные на предотвращение заедания:**
 - 1. Повышение твердости зубьев;
 - 2. Применение противозадирных присадок к маслам;

КРИТЕРИИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Виды разрушения зубьев

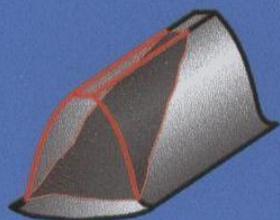
Условия работы

Выкрашивание поверхностных слоев зубьев



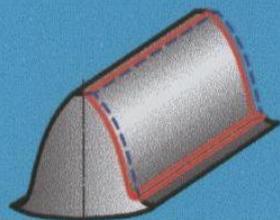
Закрытые хорошо смазываемые передачи. При циклическом нагружении на поверхности зубьев у полюсной линии разрастаются микротрещины, что приводит к образованию оспинок, переходящих в раковины. Выкрашивание может быть ограниченным или прогрессирующим.

Поломка зубьев



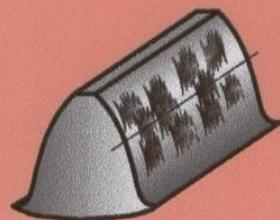
Высоконагруженные мелкомодульные передачи. Поломка зубьев может носить усталостный характер или являться следствием значительных перегрузок. При циклическом нагружении микротрещины у корня зуба разрастаются, что приводит к излому по сечению у основания зуба прямозубых колес или по косому сечению - косозубых или шевронных колес.

Абразивный износ



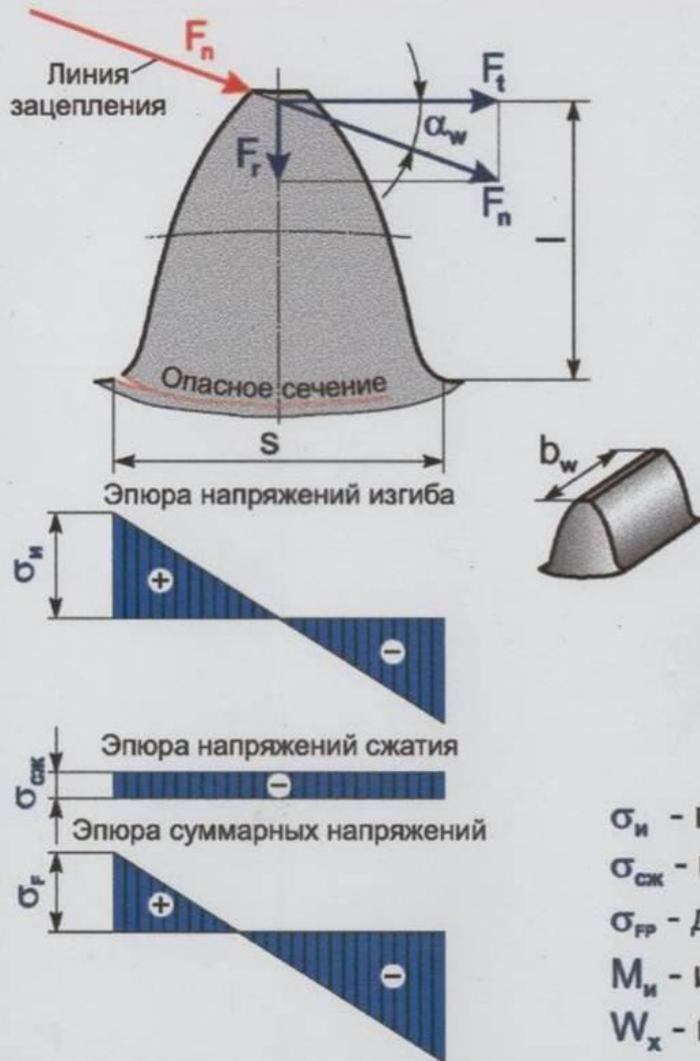
Открытые передачи, а также закрытые, работающие при скудной смазке и наличии абразивов.

Заедание



Высоконагруженные передачи. При высокой удельной нагрузке происходит разрыв масляной пленки, нагрев и схватывание сопряженных поверхностей с образованием следов задира в направлении скольжения зубьев.

СХЕМА К РАСЧЕТУ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЕРЕДАЧИ НА ИЗГИБ ЗУБЬЕВ



Приняты допущения:

1. Вся нагрузка F_n передается одной парой зубьев, приложена к вершине зуба и действует по линии зацепления.
2. Зуб рассматривается как консольная балка прямоугольного сечения с размерами s и b_w у основания.
3. Возникновение усталостных трещин и разрушение начинаются на растянутой стороне зуба.

Напряжения в опасном сечении

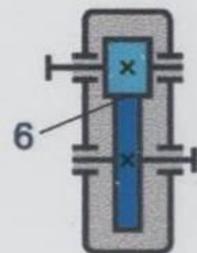
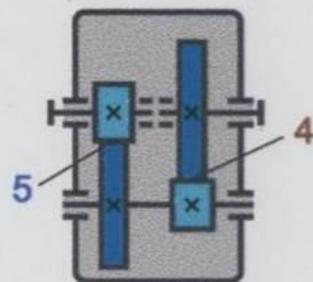
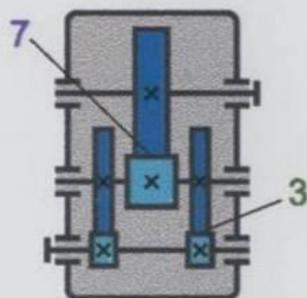
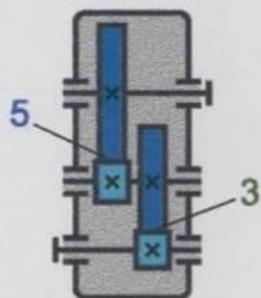
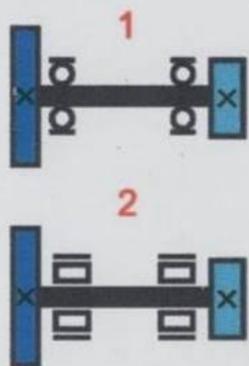
$$\sigma_F = \sigma_n - \sigma_{сж} \leq \sigma_{FP};$$

$$\sigma_n = \frac{M_n}{W_x}; \quad \sigma_{сж} = \frac{F_r}{s \cdot b_w}; \quad M_n = F_t \cdot l; \quad W_x = \frac{b_w \cdot s^2}{6}$$

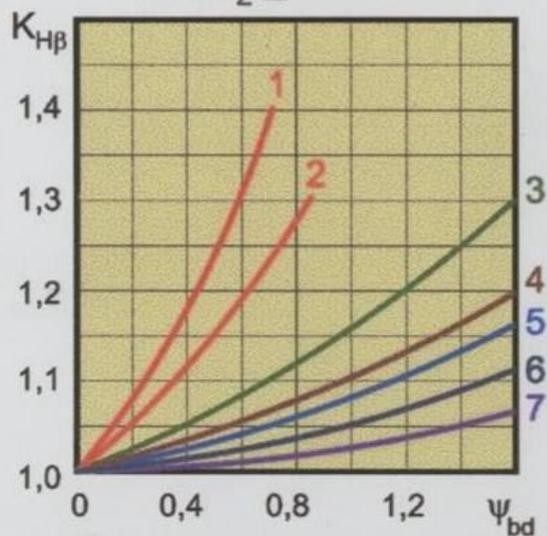
В формулах:

- σ_n - напряжения изгиба в опасном сечении;
- $\sigma_{сж}$ - напряжения сжатия в опасном сечении;
- σ_{FP} - допускаемые напряжения;
- M_n - изгибающий момент;
- W_x - момент сопротивления изгибу.

КОЭФФИЦИЕНТ $K_{H\beta}$ ПРИ РАСЧЕТАХ НА КОНТАКТНУЮ ПРОЧНОСТЬ



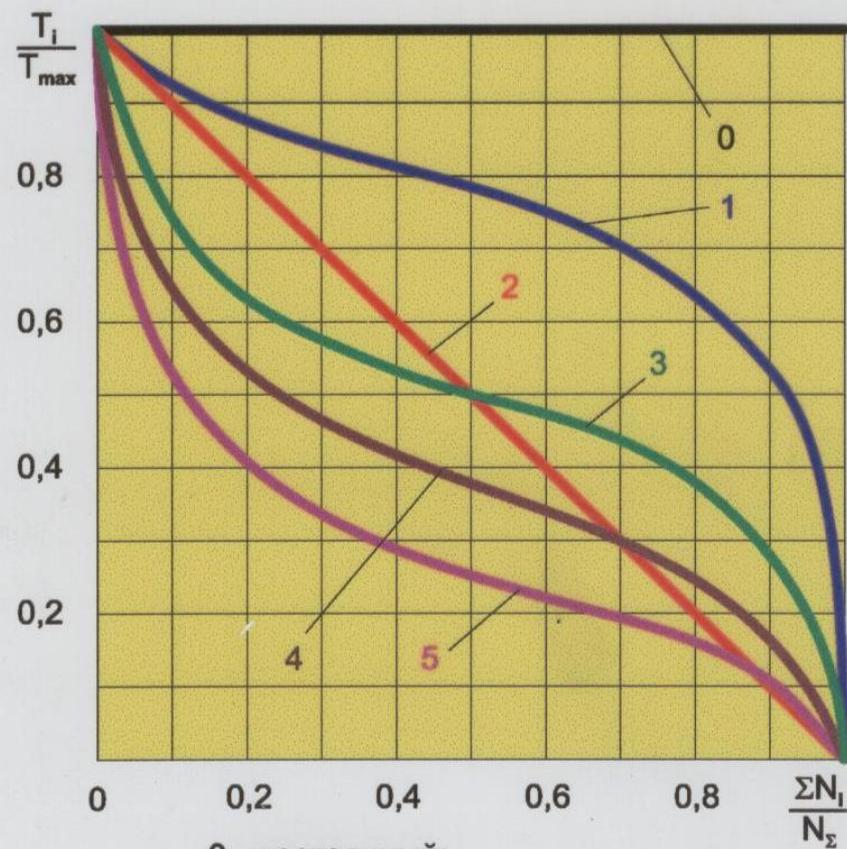
При $H_1 \leq 350$ HV
или $H_2 \leq 350$ HV



При $H_1 > 350$ HV
и $H_2 > 350$ HV



ТИПОВЫЕ РЕЖИМЫ НАГРУЖЕНИЯ МАШИН



- 0 - постоянный;
- 1 - тяжелый;
- 2 - средний равновероятный;
- 3 - средний нормальный;
- 4 - легкий;
- 5 - особо легкий.

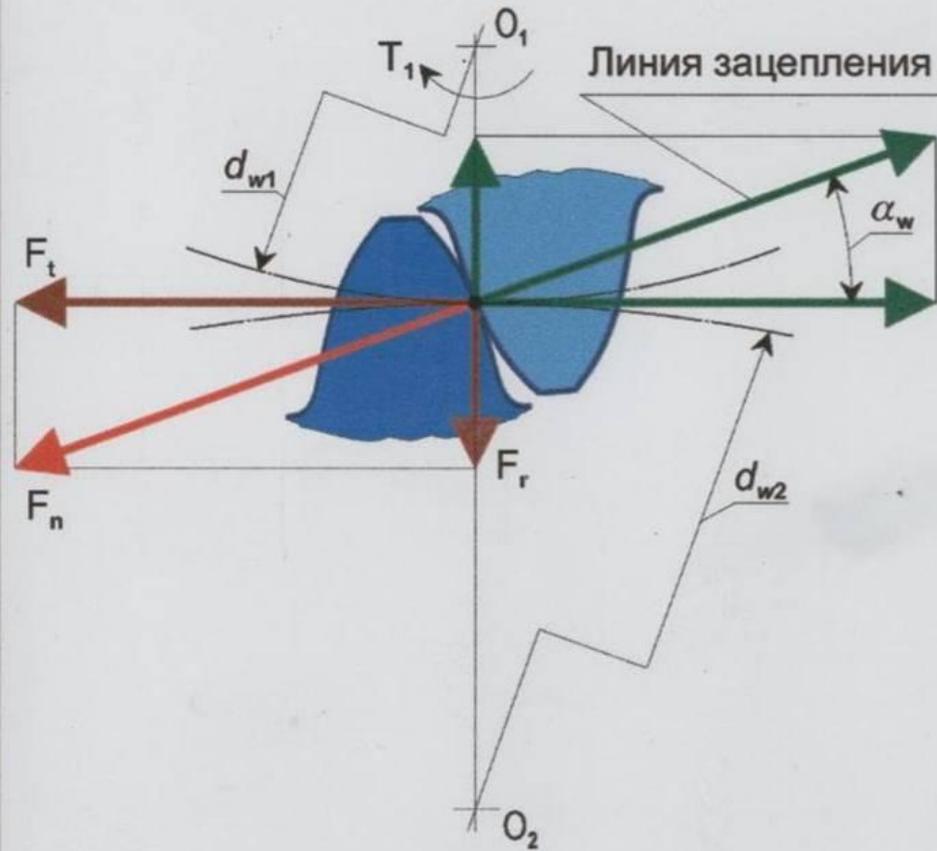
T_i - текущая нагрузка;

T_{max} - наибольшая длительно действующая нагрузка;

ΣN_i - суммарное число циклов при i -ом нагружении;

N_{Σ} - суммарное число циклов нагружений всех уровней.

СИЛЫ В ПРЯМОЗУБОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕ



d_{w1} - начальный диаметр шестерни, мм;

d_{w2} - начальный диаметр колеса, мм;

F_n - нормальная сила, действующая по линии зацепления, Н;

F_t - окружная сила, действующая по касательной к начальным окружностям, Н;

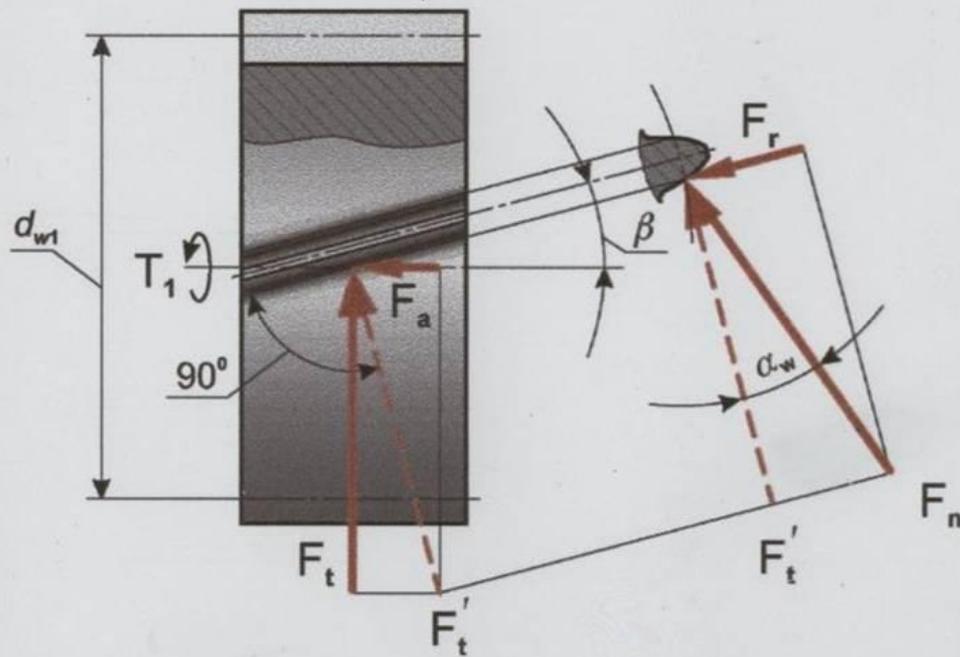
F_r - радиальная сила, действующая по радиусу к центру, Н;

T_1 - вращающий момент на шестерне, Н-м;

α_w - угол зацепления, градус;

$$F_t = \frac{2000 T_1}{d_{w1}} ; \quad F_r = F_t \cdot \operatorname{tg} \alpha_w ; \quad F_n = \sqrt{F_t^2 + F_r^2} .$$

СИЛЫ В КОСОЗУБОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПЕРЕДАЧЕ



d_{w1} - начальный диаметр шестерни, мм;

F_n - нормальная сила, действующая в полюсе зацепления по нормали к сопряженным поверхностям, Н;

F_t - окружная сила, действующая по касательной к начальным окружностям, Н;

F_r - радиальная сила, действующая по радиусу к центру, Н;

F_a - осевая сила, параллельная осям зубчатых колес, Н;

T_1 - вращающий момент на шестерне, Н·м;

α_w - угол зацепления в нормальном сечении;

β - угол наклона зуба;

$$F_t = \frac{2000 \cdot T_1}{d_{w1}} ; \quad F_r = \frac{F_t \cdot \operatorname{tg} \alpha_w}{\cos \beta} ;$$

$$F_a = F_t \cdot \operatorname{tg} \beta ; \quad F_n = \sqrt{F_t'^2 + F_r^2 + F_a'^2} .$$

В шевронной передаче осевые силы на полушевронах замыкаются на зубчатых колесах и на валы и опоры не передаются.

МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

- Основными материалами для изготовления колес являются – **стали**.
- По степени твердости (или технологии термообработки) зубчатые колеса подразделяются на 2 группы:
- **1. Колеса с твердостью \leq HB 350**; В этом случае обработка колес, в том числе и чистовая, осуществляется после термообработки;
- ТО – нормализация, улучшение; → твердость по Бринеллю
- Стали: Сталь 40, 50; 45Г; 40ХН;
- **Достоинство колес 1-й группы:**
- - получение высокой точности без применения дорогостоящих отделочных операций (шлифовки, притирки и др.);
- - колеса хорошо прирабатываются и не подвержены хрупкому разрушению при динамических воздействиях; для обеспечения приработки рекомендуется твердость шестерни брать больше (min на 20...30 HB) по сравнению с колесом;
- Применение: в условиях индивидуального и мелкосерийного производства, в мало- и средненагруженных передачах, а также в передачах с колесами больших размеров, термообработка которых затруднена;

- **2. Колеса с твердостью \geq НВ 350**; Обработка осуществляется в 2 этапа:
- 1. - нормализация \rightarrow черновая обработка зубьев (нарезание);
- 2. - поверхностное упрочнение (размеры зубьев – меняются); чистовая обработка зубьев;
- **Достоинства 2-й группы:**
- - уменьшение размеров колес и габаритов передачи в целом;
- - позволяет увеличить допускаемые напряжения до двух раз, при этом нагрузочная способность передачи увеличивается до 4-х раз;
- - возрастает износостойкость и стойкость против заедания;

ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОГО И ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ КОЛЕС

- **Объемная закалка** + низкий отпуск (прокаливается и сердцевина детали)
- Твердость **40...55 HRC**;
- Стали: **Сталь 40, Сталь 45; Сталь 40ХН;**
- Недостатки метода:
 - - значительное коробление зубьев и необходимость отделочных операций;
 - - снижение изгибной прочности (с возможностью хрупкого разрушения при ударных нагрузках);
 - - ограничение по размерам колес, связанное со скоростью охлаждения. При малой скорости охлаждения происходит мягкая закалка с пониженной твердостью;

Поверхностная закалка ТВЧ

- Твердость 48...54 HRC;
- Стали: Сталь 40X, 45; 40ХН;
- Метод хорошо себя зарекомендовал для относительно крупных зубьев ($m \geq 5$)/ При мелких модулях возникает опасность сквозного прокаливания, с охрупчиванием и короблением зуба. При относительно тонком закаливании зуб искажается мало. Достигаемая точность – не выше 8-й. Требуется специального оборудования (кондуктора – соленоида) и строгого соблюдения режимов обработки. При увеличении размеров колес стоимость ТВЧ – значительно возрастает.

- **Цементация** (насыщение поверхностного слоя углеродом с применением различных технологий, с последующей закалкой) – процесс весьма длительный и дорогостоящий.
- Твердость **58...63 HRC**;
- Стали: **Сталь 15, 15X, 18XГ, 20; 20X; 12ХН3А** и др.
- Применение легированных сталей повышает прокаливаемость, а также обеспечивает повышенную прочность сердцевины, что предохраняет продавливание хрупкого поверхностного слоя в условиях перегрузок.
- Обеспечивает хорошее сочетание высокой контактной и изгибной прочности.
- Высокая твердость позволяет снижать габариты и массу колес.
- Требуется применения отделочных операций, т.к. при закалке после цементации имеет место искажение формы зуба.
- Глубина цементированного слоя: составляет 0,1...0,15 от толщины зуба, не более 1,5...2,00 мм ($h_{\text{цем}} \leq 1,5...2,00$ мм);
- Газовая цементация – основной процесс в массовом производстве; цементация в твердом карбюризаторе используется в мелкосерийном производстве.
- Закалка после цементации кроме упрочнения поверхностного слоя исправляет структуру перегрева, возникающую из-за многочасовой выдержки стали, при температуре цементации.
- Остаточные напряжения после процесса цементации, достигающие 400...500МПа, повышают предел выносливости детали.

- **Цианирование и нитроцементация** (процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали углеродом и азотом **в расплавленной цианистой соли – цианирование; в газовой среде - нитроцементация**).

- Твердость **59...61 HRC**;

- Стали: **25ХГМ, 25ХГТ** и др.

- Толщина слоя при нитроцементации $h_{\text{нитроцем}} \approx 0,3...0,8\text{мм}$;

- По сравнению с газовой цементацией нитроцементация имеет следующие **достоинства**:

- - ниже температура процесса (меньше рост зерна);

- - выше износостойкость;

- - малое коробление (не требует отделочных операций);

- - отсутствуют ядовитые среды;

- - процесс более дешевый;

- При этом толщина упрочняемого слоя – меньше, необходим строгий контроль среды;

- **Азотирование** (процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом);
- **Твердость 60...65 HRC (до HV 12000 МПа);**
- **Стали:** молибденовые стали **38ХМЮА, 38ХВФЮА, 38ХЮА** и др. В легированных среднеуглеродистых сталях азот образует с алюминием, хромом, ванадием и др. дисперсные легированные нитриды, обеспечивающие высокую твердость упрочненного слоя.
- Малая толщина слоя **h_{азот} ≈ 0,1...0,6мм** обуславливает высокую чувствительность зубьев к перегрузкам и динамическому воздействию (с хрупким отслоением слоя) и непригодными для работы в условиях абразивного изнашивания.
- Время операции азотирования: от 24 до 60 часов;
- Обладает малой степенью коробления, поэтому этот метод целесообразно применять в тех случаях, шлифование затруднено (например, для колес с внутренними зубьями).
- Для работы в отсутствии абразивного изнашивания применяется **мягкое азотирование** на глубину **h_{азот} ≈ 10...15 мкм (0,010...0,015 мм)**.
- Оно технологически проще, обеспечивает **минимальное коробление**, позволяет получать зубья 7-й степени точности без отделочных операций.
- Применяются улучшенные хромистые стали: **40Х, 40ХФ, 40Х2НМФ**

ЗАГОТОВКИ КОЛЕС

- - **литые**: имеют пониженную прочность вследствие неоднородной структуры; используются для слабонагруженных, низкоскоростных передач, невысокой степени точности, а также для колес больших габаритов;
- - **кованные** (лучшее качество);
- - **штампованные**;
- - **круглого проката**;
- Выбор в зависимости от размеров и серийности производства.
- Кроме сталей, при изготовлении зубчатых колес используются:

ЧУГУНЫ

- Применяются для изготовления крупногабаритных, тихоходных колес, в том числе открытых передач;
- Обладают удовлетворительной контактной прочностью, хорошими антифрикционными свойствами, относительно дешевы, хорошо обрабатываются, однако имеют низкую прочность на изгиб;
- Применяются серые чугуны (СЧ) и модифицированный чугун с шаровидным графитом;

ПЛАСТМАССЫ

- Для изготовления колес используются, главным образом, текстолит и полиамиды (капрон, капролон);
- В зацеплении обычно – одно из колес – металлическое (стальное), другое – пластмассовое;
- Применяются в ненагруженных и кинематических (приборных) передачах;
- Их применение целесообразно при нежестких корпусах, т.к. они малочувствительны к неточностям сборки;

ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОЛЕС

- 1. **Накатка зубьев** – высокопроизводительный метод, применяемый в условиях массового производства. Применяется горячее накатывание: нагрев заготовки ТВЧ до 1200С и обкатка колесами-накатниками – происходит выдавливание зубьев. Для повышения точности производится механическая обработка или калибровка (холодное обкатывание: для $m \leq 1\text{мм}$). Для данного технологического способа характерны малые отходы металла.

- 2. **Нарезание зубьев**
- а) **Метод копирования** – прорезание впадин зубьев фрезой
 - - дисковой;
 - - пальцевой;
 - Поворот заготовки после прорезания - на один шаг;
 - Метод малопродуктивный, как правило, применяется в ремонтной практике;
- б) **Метод обкатки**, основанный на воспроизведении зацепления зубчатой пары, является наиболее распространенным и традиционным методом изготовления колес.
- **Применяемые инструменты:**
 - - червячная фреза: для нарезания внешних зубьев прямозубых и косозубых колес;
 - - дисковый долбяк: для нарезания внутренних зубьев;
 - - реечный долбяк (инструментальная рейка, гребенка);

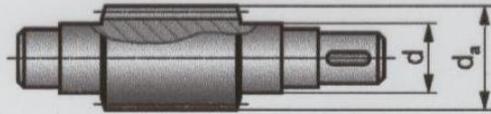
ОТДЕЛКА ЗУБЬЕВ

(доводочные операции)

- Для колес с низкой твердостью ($\leq 350\text{HV}$):
- - **Шевингование** зубьев: тонкая обработка при помощи **шевера**: колеса с канавками на поверхности зубьев, которые снабжены режущими кромками, снимающих тонкую стружку;
- - **Обкатка** – сглаживание шероховатостей на поверхности зубьев при помощи эталонного колеса, имеющего большую твердость, чем обрабатываемое;
- Для колес с высокой твердостью ($>350\text{HV}$):
- - **Шлифование**: тонкая обработка колес на зубошлифовальных станках, при помощи шлифовальных кругов;
- - **Притирка**: доводочная обработка колес с помощью притиров – чугунного, "точного" колеса с применением абразивной пасты

КОНСТРУКЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

Шестерня, выполненная заодно с валом (вал-шестерня)
прокат при $d_a \leq 200$ мм и $d_a \leq 2 \cdot d$



Насадные колеса

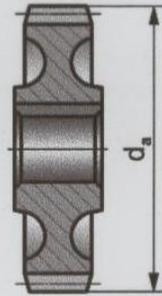
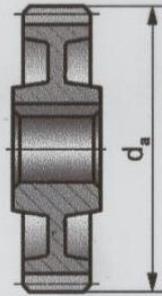
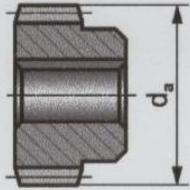
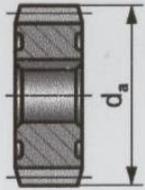
кованные или штампованные

$d_a = 150 \dots 250$ мм

$d_a = 250 \dots 600$ мм

$H \leq 350$ HB

$H > 350$ HB



литые

бандажированное

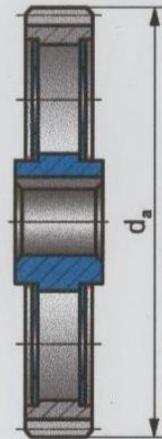
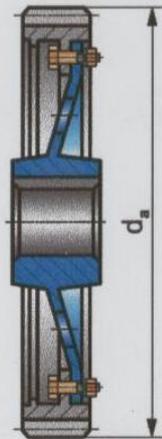
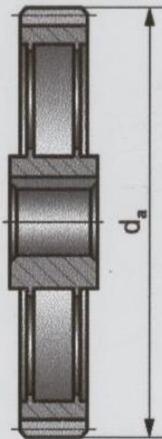
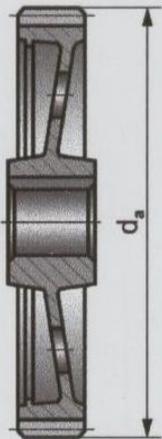
сварное

$d_a = 600 \dots 900$ мм

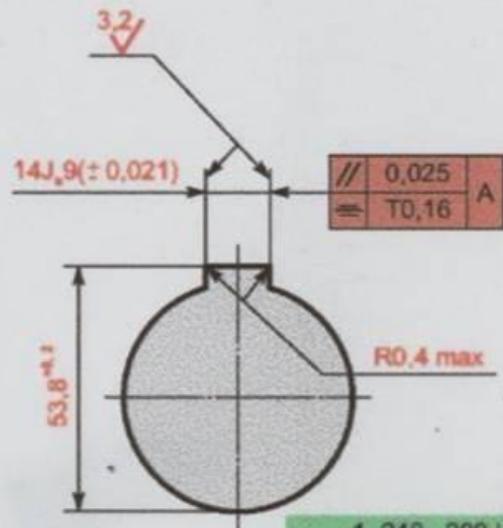
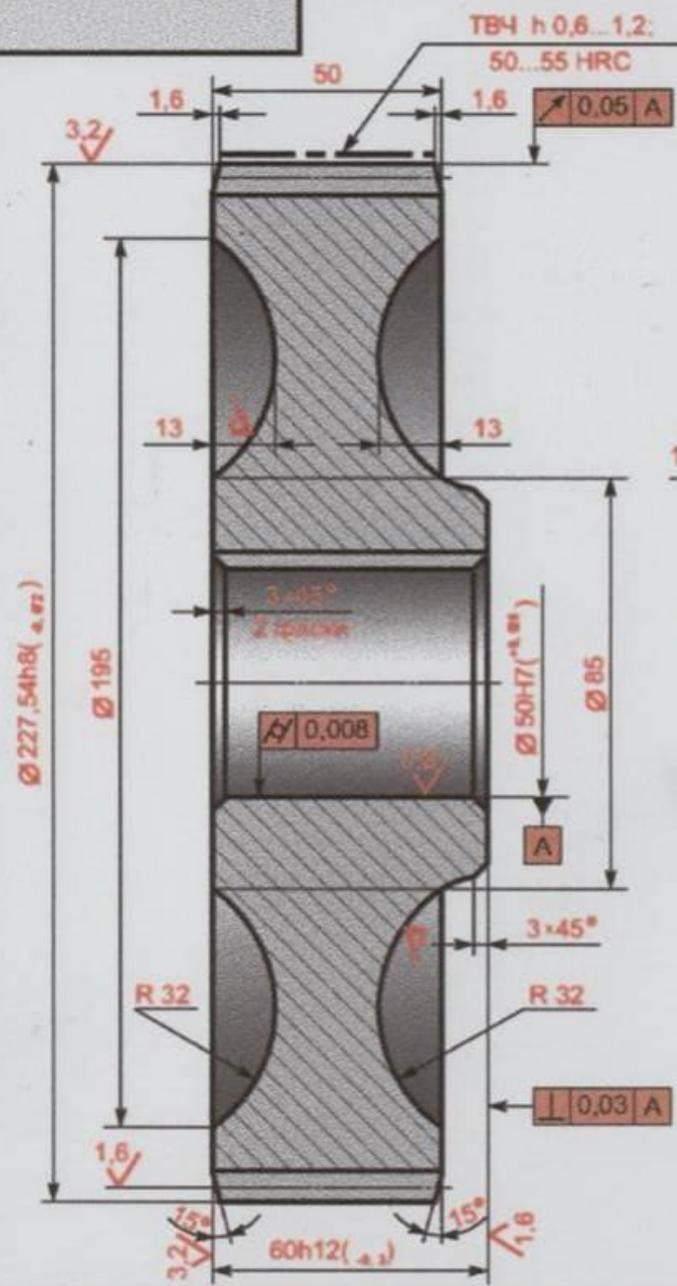
$d_a \geq 900$ мм

$d_a \geq 600$ мм

$d_a \geq 600$ мм



6,3
√(√)



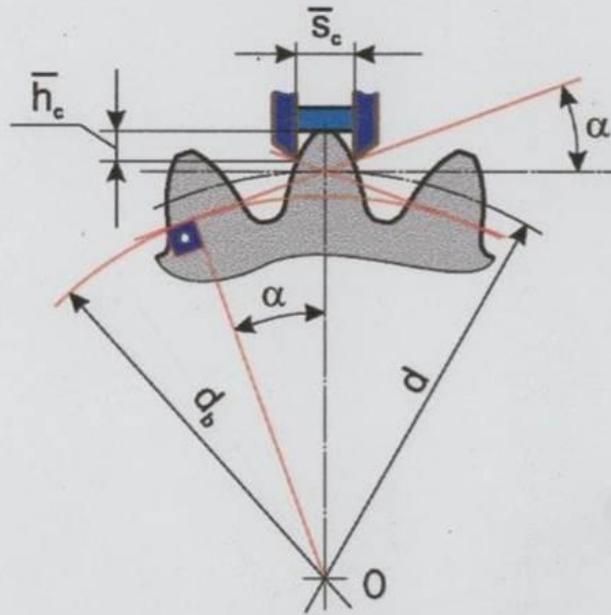
Модуль	m	3
Число зубьев	z	72
Угол наклона	β	12° 50' 20"
Направление линии зуба		Правое
Нормальный исходный контур		ГОСТ 13758-81
Коэффициент смещения	x	0
Степень точности по ГОСТ 1643-81		8-8-7-B
Постоянная хорда зуба	s_a	4,161 ^{+0,100} _{-0,200}
Высота до постоянной хорды	F_a	2,243
Делительный диаметр	d	221,54
Основной диаметр	d_o	207,55
Высота зуба	h	6,75
Обозначение чертежа сопряженного зубчатого колеса		

1. 240...280 НВ кроме места, обозначенного особо.
2. Закаленный слой повторяет очертания впадины между зубьями.
3. Радиусы скруглений 3 мм max.
4. Уклоны штамповочные 7°.
5. -IT14, +IT14, ± 1/2.

Исполн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Колесо зубчатое	Лист	Масса	Масштаб
Рисов.						К	5,3	1:1
Проф.						Лист	Листов 1	
Т. констр.						Сталь 40Х ГОСТ 4543-71		
Н. констр.								
Утв.								

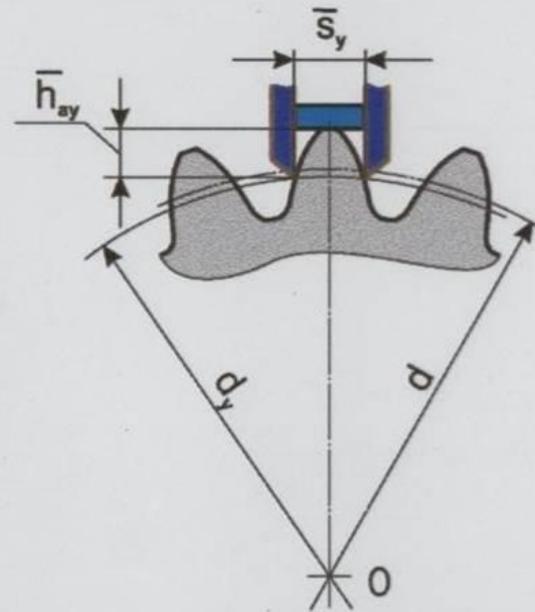
КОНТРОЛЬ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС

По постоянной хорде



α - угол профиля исходного контура;
 d - делительный диаметр зубчатого колеса;
 d_b - основной диаметр зубчатого колеса;
 \bar{s}_c - постоянная хорда;
 \bar{h}_c - высота до постоянной хорды;

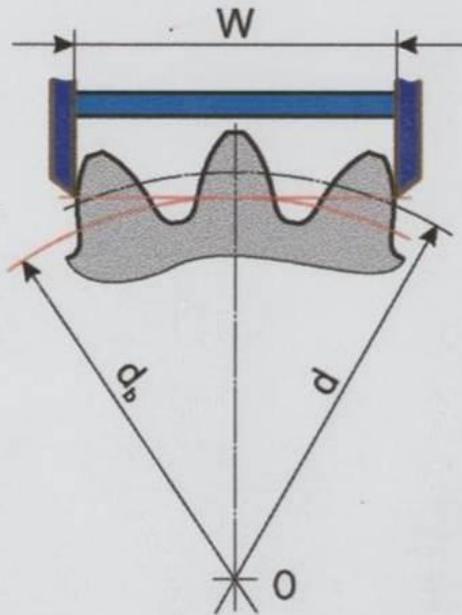
По хорде на заданном диаметре



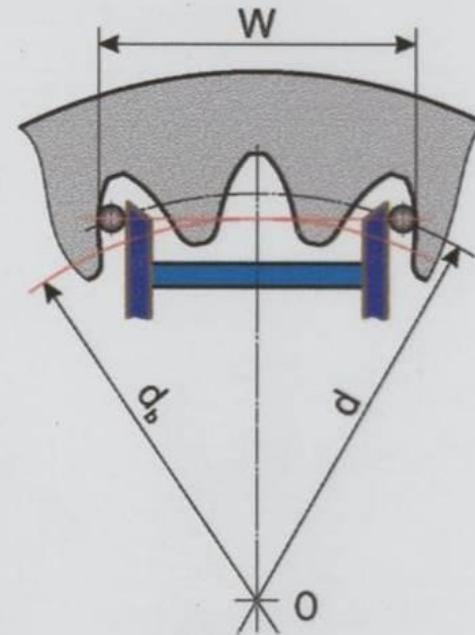
d_y - диаметр замера хорды зуба;
 \bar{s}_y - толщина по хорде;
 \bar{h}_{ay} - высота до хорды.

КОНТРОЛЬ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПО ДЛИНЕ ОБЩЕЙ НОРМАЛИ

Зубчатые колеса с внешними зубьями



Зубчатые колеса с внутренними зубьями



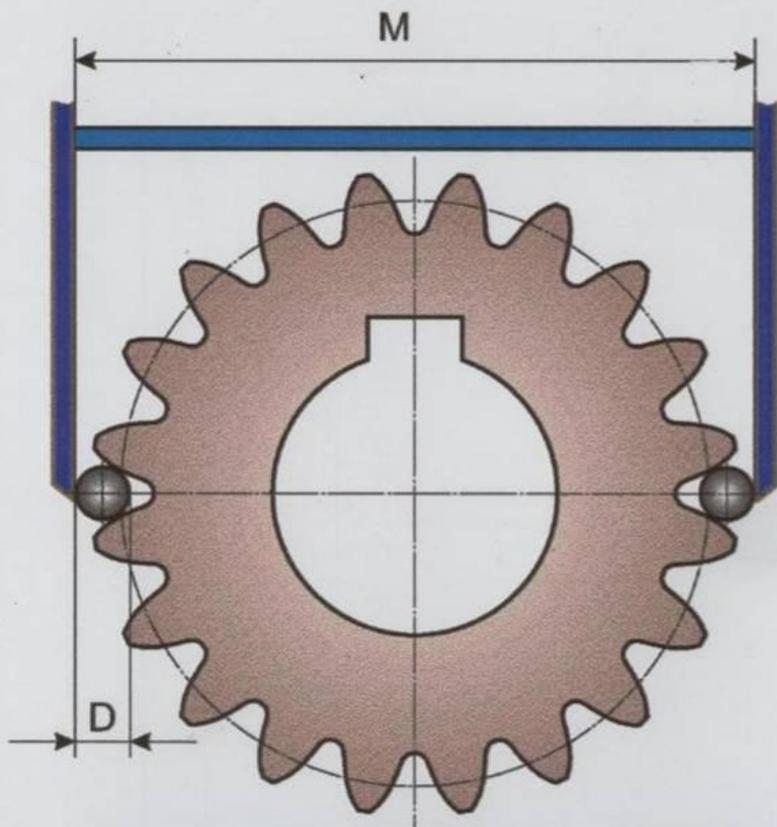
d - делительный диаметр зубчатого колеса;

d_b - основной диаметр зубчатого колеса;

W - длина общей нормали.

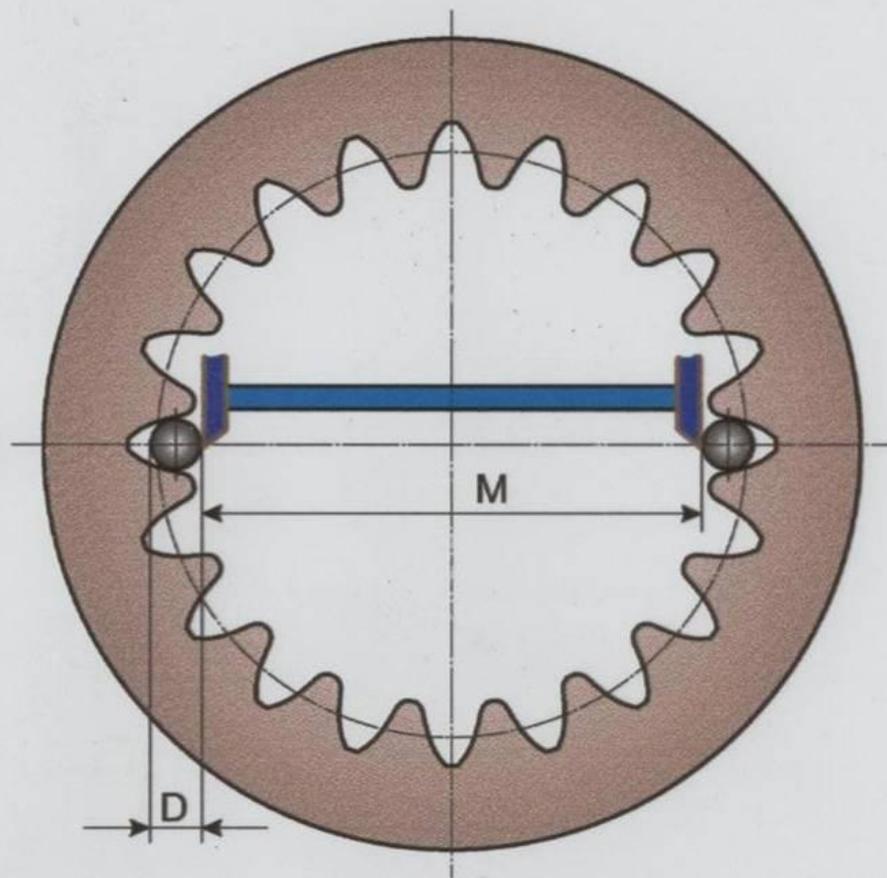
КОНТРОЛЬ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПО ШАРИКАМ ИЛИ РОЛИКАМ

Зубчатые колеса с внешними зубьями



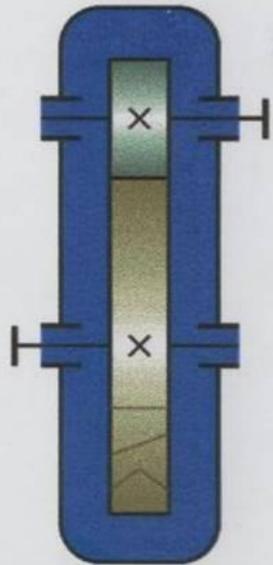
M - размер по шарикам или роликам;
D - диаметр шарика или ролика.

Зубчатые колеса с внутренними зубьями



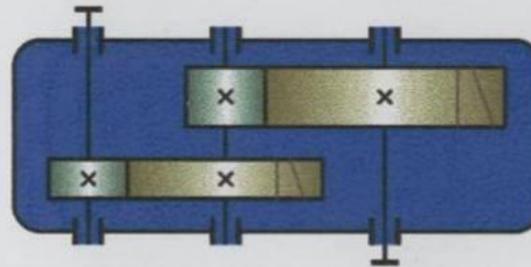
СХЕМЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕДУКТОРОВ

Одноступенчатый
 $i < 6,3$

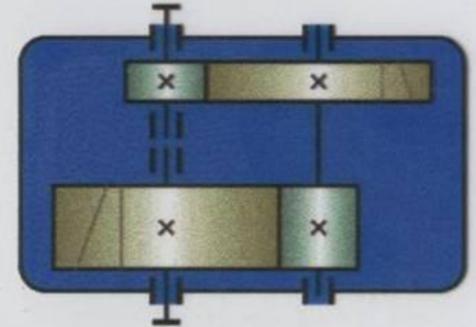


Двухступенчатые $i = 6,3...40$

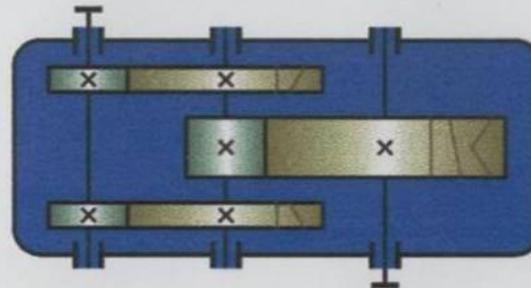
по развернутой схеме



соосный



с раздвоенной
быстроходной ступенью



с раздвоенной
тихоходной ступенью

