

Глава седма

1.7. Взаимозаменяемост на зъбни предавки

В съвременното машиностроене зъбните предавки са едни от най-разпространените градивни елементи, които винаги изпълняват отговорни функции в машините и механизмите. Особено широко приложение те намират в автомобилно и тракторостроенето, в авиационната промишленост металообработващите машини, минните машини и т.н.

1.7.1. Показатели на точността на цилиндричните зъбни колела

Изискванията по отношение на точността на зъбните предавки зависят както от условията на тяхната работа, така и от предназначението им. Експлоатационните свойства на зъбната предавка се определят от три функционални параметри: кинематична точност, плавност на работа и контакт между зъбите.

Точността на зъбните предавки се определя чрез показатели на точността. Показател на точността се нарича грешката на който и да е параметър на зъбното колело /предавката/, чиито гранични стойности се предписват и могат да се контролират.

Грешката на който и да е функционален параметър се нарича комплексна грешка и представлява комплексен показател на точността на зъбното колело /предавка/.

Грешката на който и да е геометричен параметър /зъбния профил, стъпката, дебелината или направлението на зъба и др./ на зъбното колело се нарича елементна грешка и представлява елементен показател на точността.

Точността на зъбното колело /предавката/ се определя от три комплексни показателя на точността.

Всеки комплексен показател може да се замени с комплекс от елементни показатели на точността /съвкупността от елементни грешки/ съвместно характеризиращи комплексната грешка/.

Термините, определенията и означенията на грешките и допуските на зъбните предавки са определени с БДС 10072-80 и БДС 13197-80.

а. Кинематична точност на зъбната предавка. Кинематичната грешка F на зъбната предавка представлява разликата между дъгите, мерени по делителната окръжност, определена от разликата между действителния $\varphi_{2г}$ и номиналния φ_2 ъгъл на водимото колело 2 /фиг. 1.7.1а/.

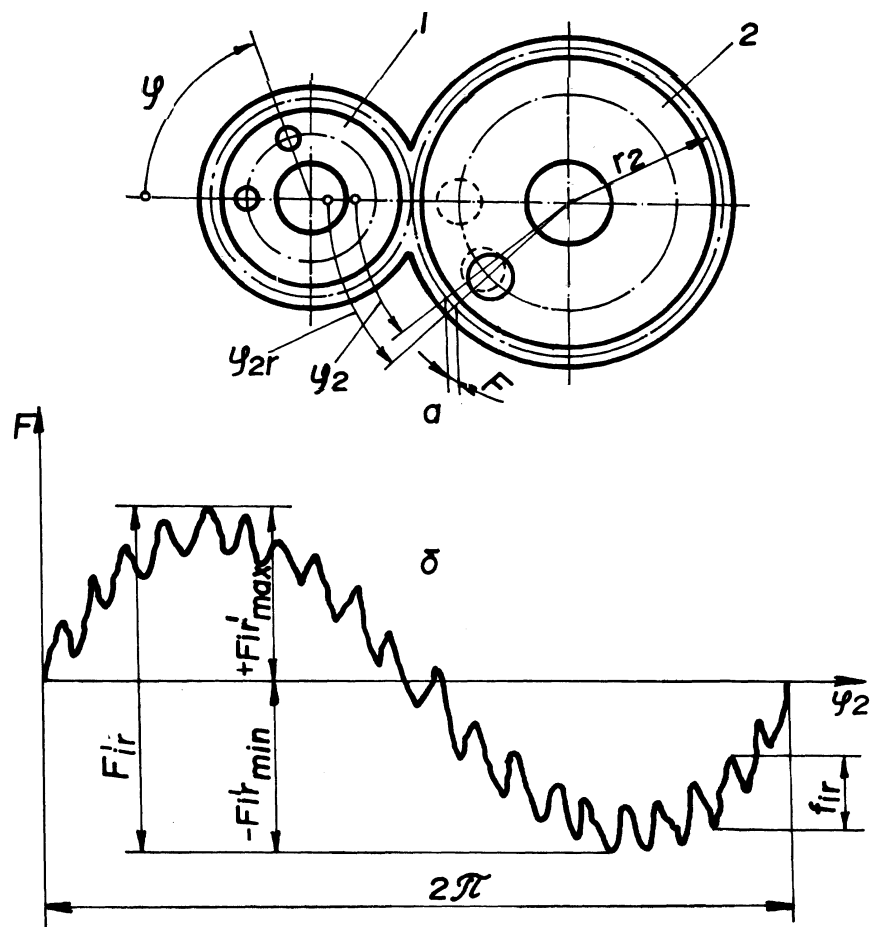
$$F = (\varphi_2 - \varphi_{2г})r_2, \quad 1.7.1$$

където r_2 е радиусът на делителната окръжност на водимото колело;

$\varphi_{2Г}$ - измереният /действителният/ ъгъл на завъртане на водимото зъбно колело при завъртане на водещото колело на ъгъл φ_2 - се определя от зависимостта

Кинематичната грешка на отделното зъбно колело се определя както кинематичната грешка на зъбната предавка, но вместо задвижващото колело се използва измервателно зъбно колело, изработено с висока точност.

На фиг. 1.7.16 е изобразена графично зависимостта между кинематичната грешка F и ъгъла на завъртане φ_2 на зъбното колело, зацепено с измервателното колело.



Фиг. 1.7.1. Кинематична грешка на зъбното колело

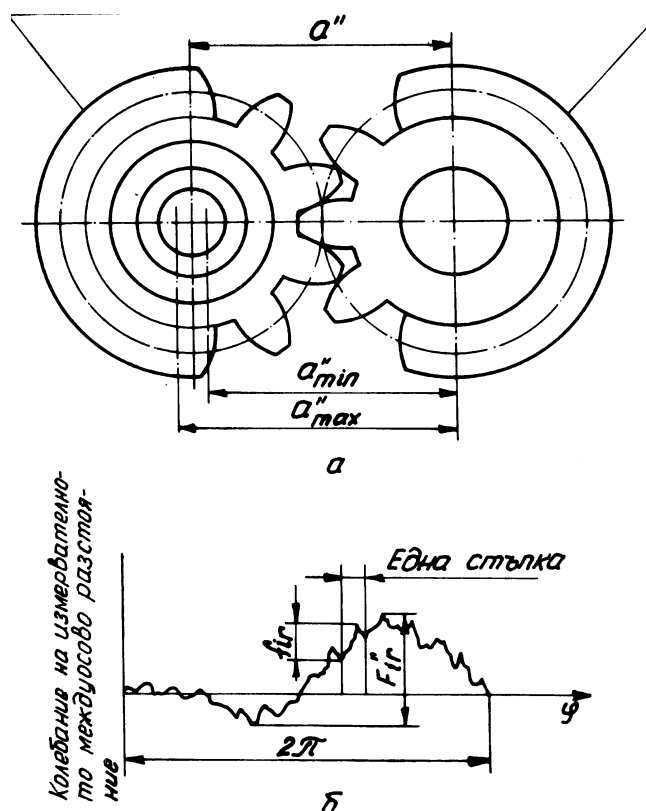
Комплексен показател на кинематичната точност на зъбното колело е най-голямата кинематична грешка $F_{iГ}$ /Фиг. 1.7.16/.

Комплексен показател на кинематичната точност на зъбната предавка е най-голямата кинематична грешка на предавката F_{ior}

$$F_{ioo} = F_{ir1} + F_{ir2} \quad , 1.7.2$$

където F_{ir1} и F_{ir2} , са най-големите кинематични грешки на водещото и водимото зъбно колело на зъбната предавка.

- грешка на профила на зъба $f_{\text{гр}}$ - определя се като разстояние, мерено по нормалата между два най-близки номинални профила на зъба в границите на работния му участък;
- колебание на между осовото разстояние при завъртане на един зъб $i''_{\text{г}}$ - разликата между максималната и минималната стойност на между осовото разстояние при завъртане на една ъглова стъпка /фиг. 1.7.26/.



фиг. 1.7.2. Колебание на измервателното между осово разстояние

Плавността на работа на предавките има голямо значение при работата на турбинни редуктори, двигатели на турбовитлови самолети и други машини, които работят при високи скорости и големи мощности.

- в. Контактът между зъбите на предавката характеризира равномерното допиране на зъбите на задружно работещите зъбни колела по цялата им ширина, с което се осигурява равномерното им движение.

Комплексен показател на контакта между зъбите на зъбната предавка е сумарното контактно петно. То се определя, като зъбите на носещото колело се покриват с равномерен, тънък слой контрастна боя. При завъртане на задружно работещите зъбни колела с леко натоварване, осигуряващо непрекъснато допиране на зъбите на двете зъбни колела, боята се пренася върху зъбите на водимото зъбно колело.

б. Плавноста на работата на предавката се нарушава от резки мигновени изменения на ъгъла на завъртане на зъбните колела, което предизвиква допълнителни ускорения, допълнителни инерционни сили, удари, вибрации и повишен шум. Те влияят неблагоприятно върху надеждността на зъбните предавки. Следователно плавноста на работа на предавката зависи от кинематичната грешка и по-специално от тези нейни съставни части /грешка на стъпката и грешка на профила/, които причиняват мигновени изменения на ъгъла и се повтарят циклично при едно пълно завъртане.

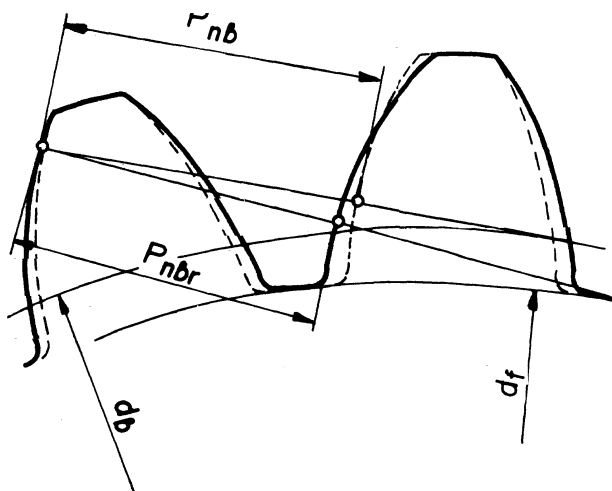
Комплексен показател на плавноста на работа на зъбното колело е местната кинематична грешка F_{tr} /Фиг. 1.7.1б/ която представлява най-голямата разлика между местните съседни минимални и максимални стойности на кинематичната грешка на колелото за едно завъртане.

Елементни показатели на плавноста на работа на предавката са

- отклонение на стъпката F_{ptr} е кинематичната грешка на зъбното колело при завъртането му на една номинална ъглова стъпка; тя се определя като разлика между измерената F_{tr} и номиналната F_t стойност на челната стъпка:

$$f_{ptr} = P_{tr} - P_t \quad , \text{ където } P_t = \frac{2\pi}{z} r \quad , 1.7.3$$

- отклонение на стъпката на зацепването f_{bpr} е разликата между действителната P_{nbr} и номиналната P_{nb} стойност на стъпката на зацепването /фиг. 1.7.3/



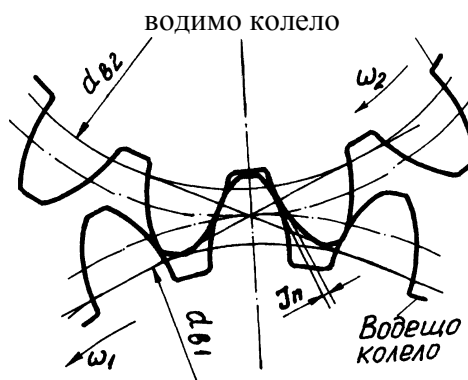
Фиг. 1.7.3. Отклонение на стъпката на зацепването

$$f_{bpr} = P_{nbr} - P_{nb} \quad , 1.7.4$$

образувайки контактните петна.

Контактът между зъбите има голямо значение за зъбните предавки на подемно-транспортни, минни, металургични и други машини, работещи при големи натоварвания и относително ниски честоти на въртене.

г. Странична хлабина j_n е хлабината между зъбите на задружно работещите зъбни колела, мерена по обща нормала и осигуряваща свободно завъртане на едното колело, ако другото е неподвижно /фиг. 1.7.4/.



Фиг. 1.7.4. Странична хлабина на зъбната предавка

Страничната хлабина се контролира чрез непосредствено измерване само на сглобената зъбна предавка. За отделното зъбно колело страничната хлабина се контролира със следните елементни показатели:

- изместване на изходния контур E_{nt}
- разстоянието на което се измества изходния контур от номиналното му положение към оста на зъбното колело, за да се осигури страничната хлабина на предавката /фиг. 1.7.4/.
- отклонение на средната дължина на общата нормала разликата между средната дължина на общата нормала и номиналната дължина.
- отклонение на дебелината на зъба - разликата между действителната и номиналната дебелина на зъба, мерени по постоянна хорда
- отклонение на между осовото разстояние - разликата между действителното и номиналното между осово разстояние на предавката.

Големината на страничната хлабина зависи от условията на работа на зъбната предавка. За зъбни предавки, работещи при големи натоварвания или при високи температури, страничната хлабина трябва да е по-голяма, за да се осигури нормално мазане на зъбната предавка и предотвратяване на заклиняването на зъбите в резултат а топлинни и силови деформации. При предавки с реверсиране на движението страничната хлабина трябва да е малка, за да се избягват ударните натоварвания при реверсирането, които могат да предизвикат разрушаване.

1.7.2. Степени на точност

Предвидени са 12 степени на точност на зъбните колела и предавки означени по реда на намаляването на точността: 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12.

За най-точните степени 1 и 2 не са утвърдени допуски и гранични отклонения, тъй като съвременните методи за обработване и контрол не позволяват да се изработят

такива точни колела. Поради това тези две степени са перспективни за машиностроенето.

За всяка степен на точност са предвидени поотделно /допуски или гранични отклонения/ на параметрите, които определят кинематичната точност, плавността на работа на колелата и контакта на зъбите. Това означава, че нормите на параметрите могат да бъдат от различна степен на точност в зависимост от функционалното предназначение на предавката. При това е необходимо нормите на параметрите, които определят кинематичната точност да не бъдат по-точни с повече от една степен и по-груби с повече от две степени от нормите на параметрите, които определят плавността на работа на колелата. Освен това степента на точност на параметрите, които регламентират контакта на зъбите, не трябва да бъде по-груба от степента на точност на параметрите, определящи плавността на работа.

Степените на точността не регламентират норми на параметрите, които определят страничната хлабина. Нормите на тези параметри са дадени в зависимост от вида на сдружаването /сглобката/.

1.7.3. Норми на показатели на точността

Комплексните показатели характеризират точността на зъбните предавки /или колела/ в експлоатационни условия, поради което се предписват от конструкторите в зависимост от функционалното предназначение на предавката. В производствени условия обаче не винаги има възможност да се измерят комплексните показатели било поради липса на уреди, било по нецелесъобразност /някои показатели/ като например най-голямата кинематична грешка на предавката/ контактното петно и др. могат да се установят след сглобяването на предавката/. Освен това с комплексните показатели не е възможно да се анализират причините, които пораждаат недопустимо големи отклонения на параметрите. Следователно в производствени условия е по-целесъобразно да се прилагат груповите показатели, още повече и поради това, че груповият показател е равностоен на съответния комплексен показател.

Норми за кинематична точност. За оценка на кинематичната точност на зъбната предавка от 3-та до 8-ма степен на точност е установен един комплексен показател: най-голямата кинематична грешка на предавката F_{ior} . Допускът F_{io} се определя като сбор от допуските F_i , на двете зъбни колела в предавката. За предавки с кратен брой на зъбите и при предавателни числа, равни на 1, 2 или 3 допускът F_{io} при селективно сглобяване може да бъде намален с 25% или повече спрямо изчислената стойност.

За оценка на кинематичната точност на зъбните колела може да се използва кинематичната грешка на колелото F_{ir} - за колела от 3-та до 8-ма степен натрупаната грешка на стъпката F_{pr} и натрупаната грешка на k стъпки F_{pkr} - за

колела от 3-та до 6-та степен или само F_{pr} - за колела от 7-ма и 8-ма степени, или някой от груповите показатели:

$$F_{pr}, F_{pkr}, F_{cr}, F_{rr}$$

$$F_{cr}, F_{rr}, F_{vwr}, F_{rr}, F_{vwr}, F_{rr}''$$

За зъбни колела от 8-ма до 12-та степен е достатъчен само показателят F_{ir} зъбни колела от 7-ма и 8-ма степен - показателя F_{ir} при колела с диаметри над 1600 mm. Същият показател е достатъчен за колела от 9-та до 12-та степен при всякакви диаметри.

Допускът на кинематичната грешка F_i не е даден в стандарта, но той може да се определи като сбор от допуса на натрупаната грешка на стъпката на колелото F_p , взет за съответната степен за кинематична точност, и допуса на грешката на профила, взет за съответната степен на плавност на работата.

Ако кинематичните грешки на колелата са в допустимите граници и не е предвидено селективно сглобяване, контрол на кинематичната точност може да не се прави. От друга страна, ако се контролира кинематичната точност на предавката и тя отговаря на изискванията, не е задължително да се контролира кинематичната точност на зъбните колела. Освен това, стандартът разрешава, ако една от стойностите на отклоненията, включени в даден групов показател, е по-голяма от допустимата стойност, колелото може да се признае за годно при условие, че кинематичната грешка на колелото F_{ir} е по-малко от допуса F_i .

Норми за контакт на зъбите. Контактът на зъбите в предавката се оценява чрез петното на допирането и отклоненията f_{xt} и f_{yt} .

По стандарт се разрешава точността на зъбното колело да се оценява по сумарното или моментното контактно петно на неговите зъби при зацепване със зъбите на еталонното /измерителното/ зъбно колело.

В разглеждания стандарт е отразено едно съществено обстоятелство; нормите на кинематичната точност /освен F_r , F_{vw} , F_i / нормите за плавност на работа, освен F_i'' и нормите за контакт на зъбите в предавката /освен f_x и f_y / в зависимост от условията на работа на зъбните колела по десните и левите профили да бъдат от различна степен на точност. За неработните повърхнини на зъбите, които се използват ограничено време при намалено натоварване, се допуска намаляване на точността, но не повече от две степени.

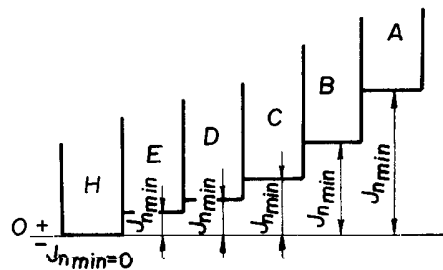
За определяне на числените стойности на допуските и граничните отклонения на параметрите са дадени аналитични зависимости, които изразяват връзката между комплексните показатели и отклоненията /грешките/ на съответните параметри на зъбните колела и предавки. Тези зависимости се основават на сумирането на отклоненията на отделните параметри, получени чрез измерване, както и на изходни величини и съотношения между тях, потвърдени от продължителна опитна проверка. Въз основа на тези зависимости и съотношения между отклоненията на отделните параметри са дадени формули, по които са изчислени

допуските и граничните отклонения на параметрите. Дадени са също така закономерности, по които се разпределят стойностите на допуските и граничните отклонения, по степени на точност.

1.7.4. Видове сглобки между зъбите в предавката

В зависимост от големината на гарантираната странична хлабина j_n^{\min} в стандарта се препоръчват шест сглобки /фиг. 1.7.5/.

А - с увеличена гарантирана хлабина за козела от 3-та до 12-та степен; В - с нормална гарантирана хлабина за козела от 3-та до 10-та степен; С - с намалена гарантирана хлабина за козела от 3-та до 9-та степен; D - с малка гарантирана хлабина за козела от 3-та до 8-ма степен; Е - с много малка гарантирана хлабина за козела от 3-та до 7-ма степен и Н - с нулева гарантирана хлабина за козела от 3-та до 7-ма степен.



Фиг. 1.7.5. Видове сглобки между зъбите на цилиндрични зъбни козела

Сглобката В гарантира минимална стойност на страничната хлабина, при която е изключена възможността за заклиняване на стоманена или чугунена предавка от нагриване при разлика в температурите на козелата и кутията до 25°C.

В технически обосновани случаи може да се предприше нестандартна сглобка с друга гарантирана странична хлабина или с друг допуск на страничната хлабина.

Гарантираната странична хлабина j_n^{\min} за стандартните сглобки /без Н/ се определя в зависимост от между осовото разстояние на предавката, както следва;

- за сглобката А - $j_n^{\min} = IT11$;
- за сглобката В - $j_n^{\min} = IT10$;
- за сглобката С - $j_n^{\min} = IT9$
- за сглобката D - $j_n^{\min} = IT8$
- за сглобката Е - $j_n^{\min} = IT7$.

В стандарта са утвърдени и осем вида допуски на страничната хлабина, които се означават по реда на увеличаването с буквите h, f, c, b, a, z, y, x. Ако няма специални изисквания на сглобките Н и Е съответствува допуск h, а на сглобките

D, C, B и A съответно допуските d, c, b и a. Допуските z, y и x се препоръчва да се използват в технически обосновани случаи.

За гарантиране на страничната хлабина в предавката са предвидени следните показатели;

- а/ за колелата - най-малкото изместване на изходния контур A_{ne} или най-малкото отклонение на средната дължина на общата нормала A_w^{ne} /за вътрешно зацепване/ - A_w^{min} / или горното отклонение на дебелината на зъба A_{ce} /за вътрешно зацепване долно отклонение – A_{ci} / или горно отклонение на измервателното между осово разстояние A_{ae} / за вътрешно зацепване долно отклонение A_{ae} /;
- б/ за кутията - отклонението на между осовото разстояние f_a .

За осигуряване на допуски на страничната хлабина в стандарта са предвидени допуски на съответните параметри на зъбните колела:

- T_H - допуск на изместване на изходния контур;
- T_{wm} - допуск на средната дължина на общата нормала;
- T_c - допуск на дебелината на зъба по постоянната хорда;

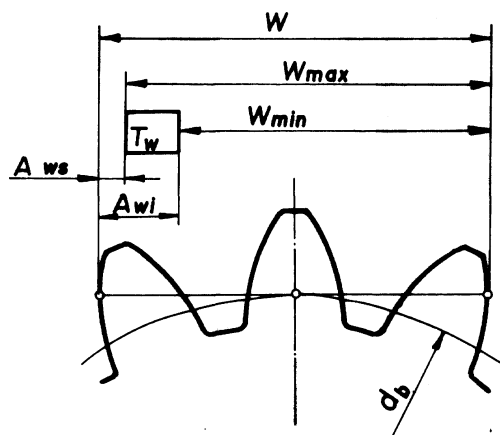
A_{ai} - долно отклонение на измервателното между осово разстояние /за вътрешно зацепване – A_{ae} /.

Между най-малкото отклонение на средната дължина на общата нормала A_{wme} /фиг.1.7.6/ най-малкото изместване на изходния контур A_{ne} и допуса на радиалното биене F_r съществува следната връзка:

$$A_{wme} = 0.68(A_{HE} + 0.35F_r) \quad , 1.7.5$$

Допускът на средната дължина на общата нормала се определя от равенството;

$$T_{wm} = 0.68(T_H - 0.35F_r) \quad , 1.7.6$$



Фиг. 1.7.6. Гранични размери и гранични отклонения на дължината на общата нормала

Горното отклонение на дебелината на зъба A_{ce} при $\alpha_g=20^0$ се определя от равенството

$$A_{ce} \approx 0.73 A_{HE} \quad , 1.7.7$$

а допускът на дебелината на зъба по постоянна хорда от равенството

$$T_e=0.73 T_H \quad , 1.7.8$$

Най-голямата странична хлабина j_n^{\max} в предавката не се регламентира числено от стандарта, но като се има предвид, че страничната хлабина играе ролята на затварящо звено, в която съставните звена са между осовото разстояние, изместването на изходните контури на колелата, радиусите на колелата и други параметри, тя може да се изчисли от уравнението

$$j_n^{\max} = j_n^{\min} + j_k + (T_{H1} + T_{H2} + 2f_a)2\sin\alpha_g \quad , 1.7.9$$

За сглобената предавка, като комплексен показател за оценка на хлабината между зъбите служи измерената странична хлабина j_{ne} , която трябва да отговаря на условието

$$j_n^{\min} \leq j_{ne} \leq j_n^{\max} \quad , 1.7.10$$

където j_n^{\min} се взема от чертежа на колелото, респ. от стандарта, а j_n^{\max} се изчислява от уравнението 1.7.9

Страничната хлабина в предавката може да се измери по няколко начина; с измервателен уред със скала се измерва тангенциалната хлабина j_{tr} , което става чрез относително завъртане на едното колело спрямо другото, задържано неподвижно и тогава се изчислява страничната хлабина от равенството

$$j_{ne} = j_{tr} \cos\alpha_g \quad 1.7.11$$

с помощта на измервателни пластинки / хлабиномер / или и оловна жица. В последния случай оловната жица се поставя между неработните повърхнини на зъбите в равнина, перпендикулярна на осите на колелата, а и след превъртане на колелата жицата се деформира – дебелината и в най-тънкото място е равна на страничната хлабина в предавката.

1.7.5. Подбиране на степените на точност и на сглобките

Подбиране на степените на точност на цилиндричните зъбни предавки трябва да бъде обосновано от конкретните експлоатационни изисквания и условия на работа на предавката; периферна скорост предавана мощност, функционално значение на кинематичната точност, трептения и шум на предавката и др.

Като ориентиращ критерий при подбирането на степените на точност може да служи периферната скорост на зъбните колела.

В табл. 1.7.1 са отразени препоръчителните граници на периферната скорост на всяка степен на точност.

При подбиране на степените на точност се вземат под внимание точността и експлоатационните показатели на аналогични предавки. В това отношение могат да послужат ориентировъчните препоръки по приложението на степените на точност, отразени в табл.1.7.2.

Таблица 1.7.1

Степени на точност		3	4	5	6	7	8	9	10	11
Периферна скорост m/s	С прави зъби	↑35	↑25	↑15	15	10	6	3	1	.5
	С наклонени зъби	↑70	↑45	↑25	25	15	10	5	2	1

Таблица 1.7.2

Изделие	Степени на точност	Изделие	Степени на точност
Еталонни колела	3-5	Пътнически подвижен състав	5-7
Металорежещи машини	3-8	Товарен подвижен ж.п.състав	6-8
Турбинни редуктори и Турбомашини	3-6	Валцовъчни машини	6-10
Обикновени редуктори	6-9	Кранови механизми и минни лебедки	7-10
Леки коли	5-8	селскостопански машини	8-11
Камиони	7-9		
Трактори	8-10		

Теоретично обоснован избор на степента на точност може да се направи чрез съответни изчисления на основата на необходимата кинематична точност на машината като цяло, допустимите трептения и нивото на шума, якостта на зъбите и трайността на предавката.

Видът на сглобката в зъбната предавка се подбира на основата на изчисления на температурните изменения на размерите на предавката, както и в зависимост от мазането на колелата, периферните скорости и възможните отклонения на параметрите на предавката, от които зависи страничната хлабина. Ако изчисленията покажат, че нито една от стандартните сглобки не осигурява необходимата гарантирана хлабина, по стандарт се разрешава да се приемат нестандартни стойности на страничната хлабина.

1.7.6. Означаване на точността на зъбните предавки в техническата документация

В техническата документация точността на изработването на зъбните предавки се означава чрез степените на точността и вида на сглобката между зъбите. Примери за означаване; 8-В БДС 3296-79 - предавка с 8-ма степен на точност по трите основни показатели и сглобка с нормална странична хлабина и пълно съответствие между сглобката - допускателна на страничната хлабина и класа на точността на между осовото разстояние, т.е. допуск В и клас V; 8-7-7-С БДС 3296-79 - предавка с 8-ма степен на кинематична точност, 7-ма степен на плавност и контакт на зъбите, сглобка С, допуск на страничната хлабина b и съответствие между вида на сглобката и класа на точността на между осовото разстояние /IV/.

При избор на по-груб клас на точност на между осовото разстояние, отколкото е предвидено за дадената сглобка, в означението на предавката се посочва приетия клас и коригираната гарантирана странична хлабина, изчислена по формулата

$$j_n^{\text{min}} = j_n^{\text{min}} - 0.68(|f_a^{\cdot}| - |f_a|) \quad 1.7.12$$

където f_a^{\cdot} е отклонението на между осовото разстояние за по-грубия клас, а f_a - отклонението на между осовото разстояние на съответстващия клас.