

Algorytm obliczania kół  
zębatach walcowych o zębach  
prostych nie korygowanych

Tabela X/12. Okresy trwałości przekładni  $\tau$ , godzin

Rodzaj pracy przekładni	Okres trwania przekładni $\tau$ , godz
Przekładnie pracujące stale przy pełnym obciążeniu (np. przekładnie turbinowe)	40 000 do 150 000
Przekładnie pracujące okresowo przy pełnym obciążeniu (np. przekładnie napędowe obrabiarek, dźwignic itp.)	500 do 5000
Przekładnie rzadko pracujące o napędzie ręcznym (np. podnośniki zębatkowe)	50 do 100
Przekładnia w skrzynce biegów (przy przejechaniu 120 000 km)	Bieg
	I    II    III    IV    V
	<div> <div> w samochodzie {  osobowym  ciężarowym </div> <div> 9    81    300    2600    —  15    30    105    390    2460  150    450    1950    450    — </div> </div>

**Polecane skojarzenie  
materiałów zębniaka  
i koła zębatego**

Zębniak	Koło zębate
45	35 L500H L600H St5
55	40 45 L650H St6
40H	55 L40H
45H	40H
45HN	40H 45H

Tabela I/14. Rozwój walcowych kół zębatych w latach od 1910 do 1935<sup>1)</sup>

Rok	1910	1915	1920	1925	1930	1935
% kół z zębami niskimi	—	12	60	50	10	0
Nomin. kąt zarysu $\alpha_0$	14°30'	14°30'	16°—20°	17°30'—20°	20°—22°30'	17°30'—20°
% kół o zębach śrubowych	2	7	14	31	48	70
Kąt pochylenia linii zębów $\beta_0$	0—5°	5°—20'	10°—30°	15°—35°	25°—40°	30°—40°

Tabela I/15. Zastosowanie różnych nominalnych kątów zarysu  $\alpha_0$  w kołach zębatych

Nominalny Kąt zarysu $\alpha_0$	Zastosowanie
14°30'	w dawniejszych konstrukcjach amerykańskich i angielskich — w walcowych przekładniach do przenoszenia mocy, — w stożkowych przekładniach do przenoszenia mocy
15°	w dawniejszych przekładniach walcowych i stożkowych do przenoszenia mocy — w Europie
17°30'	w obecnych przekładniach stożkowych do przenoszenia mocy
20°	w nowoczesnych przekładniach walcowych i stożkowych do przenoszenia mocy
22°30'	w dawniejszych walcowych przekładniach amerykańskich do przenoszenia mocy w obecnych przekładniach stożkowych
25° ÷ 30°	w rozrusznikach motocykli itp., gdzie występuje chwilowa praca zębów i gdzie nie zależy na dużym stopniu pokrycia

Wobec tego wyciągamy wniosek, że najkorzystniejsze są:

zęby normalne  $y = 1$   
 nominalny kąt zarysu  $\alpha_0 = 20^\circ$

TABLICA 3

Właściwości wytrzymałościowe materiałów<sup>1)</sup> stosowanych na koła zębate

Materiał				Właściwości wytrzymałościowe							Wytrzymałość zmęczeniowa na zginanie <sup>4)</sup>		Uwagi
Rodzaj	Oznaczenia wg PN	Stan technologiczny <sup>2)</sup>	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ MPa (N/mm <sup>2</sup> )	Granica plastyczności $R_e$ MPa (N/mm <sup>2</sup> )	Wydłużenie $A_5$ %	Moduł sprężystości $E$ MPa (N/mm <sup>2</sup> )	Udarowość <sup>3)</sup> KM daJ/cm <sup>2</sup> min	Twardość Brinella $HB$ (daN/mm <sup>2</sup> )	obukierunkowe $Z_{90}$ MPa (N/mm <sup>2</sup> )	jednokie-runkowe $Z_{91}$ MPa (N/mm <sup>2</sup> )			
Drewno (grab, buk)				10–13			1 200	0,8	7	36	50	Wytrzymałość na zginanie ok. 100 N/mm <sup>2</sup>	
Skóra				2,5–4,5	1,2–2,1	< 35	25–45			4			
Tworzywa sztuczne w osnowie tekstylnej				5–7,5			700–900	11	13	30	45	Wytrzymałość na zginanie 60–100 N/mm <sup>2</sup>	
Brąz	cynowy	B101	$L_p$ $L_k$	min 220 min 315	130 min 170	min 3 min 3	90 000		min 80 min 90	75 93	130 160		
	aluminiowy	BA1032	$L_p$ $L_k$	min 500 min 550	min 180 min 200	min 15 min 20	— 100 000		110–120 120–150	210 210	350 355		
Żeliwo	szare	Z1 250 Z1 300	$L$ $L$	250 300			107 000 115 000		245 250	125 145	190 225		
	sferoidalne	Zs 40012 Zs 50007	$L$ $L$	400 500	250 320	12 7		4 3	max 201 170–241	200 225	320 360		
Stale do ulepszenia	węglowe	35	$N$	540	320	20			187	230	410 <sup>5)</sup>		
		45	$N$	610	360	16			241	260	460 <sup>5)</sup>		
		55	$N$	660	390	13			255	280	500 <sup>5)</sup>		
	krzemowo-manganowa	35SG	$T$	900	700	15		6	229 <sup>6)</sup>	370	590		
		chromowo-molibdenowa	35HM 40HM	$T$ $T$	1000 1050	800 900	12 10		8 7	241 <sup>6)</sup> 241 <sup>6)</sup>	415 430		660 690
	chromowo-manganowo-krzemowa		30HGS	$T$	1100	850	10		4,5	229 <sup>6)</sup>	460		725
Stale do nawęglania	węglowa	10 15	$N$ $N$	340 380	210 230	31 27			137 143	145 160	260 290	Wartości $R_m$ , $R_e$ , $Z_{90}$ i $Z_{91}$ dotyczą rdzenia warstwa nawęglona po zahartowaniu uzyskuje twardość HRC = 60–63 (HV = 620–660)	
		chromowa	15H 20H	$T$ $T$	700 800	500 650	12 11		7 6	179 <sup>6)</sup> 179 <sup>6)</sup>	290 330		460 530
			chromowo-manganowa	16HG 20HG	$T$ $T$	850 1100–1400	600 750	12 7		8 —	187 <sup>6)</sup> 217 <sup>6)</sup>		350 490
chromowo-manganowo-molibdenowa	15HGM 18HGM	$T$ $T$		950 1100–1150	800 90–95	11 10–8		8 9–7	207 <sup>6)</sup> 217 <sup>6)</sup>	400 460	630 730		
	chromowo-manganowo-tytanowa	18HGT	$T$	1000	850	9		8	217 <sup>6)</sup>	420	660		
chromowo-molibdenowa	19HM	$T$	900–1200	650	9		8	207 <sup>6)</sup>	460	730			
	chromowo-manganowo-niklowa	17HGN	$T$	1050	850	11		7	229 <sup>6)</sup>	440	690		
chromowo-niklowa	15HN 18H2N2 20H2N4A	$T$ $T$ $T$	1000 1250–1500 1300	850 850 1100	12 7 9		8 — 8	217 <sup>6)</sup> 235 <sup>6)</sup> 269 <sup>6)</sup>	420 580 540	660 920 860			

<sup>1)</sup> Większość danych w tej tabeli podano z norm: PN-76/H-83101, PN-76/H-83123, PN-75/H-84019, PN-72/H-84030, PN-72/H-84035 i PN-79/H-87026<sup>2)</sup> Oznaczenia stanu technologicznego:  $L_p$  — lany w piasku,  $L_k$  — lany w kokili,  $N$  — normalizowany,  $T$  — ulepszony cieplnie (termicznie)<sup>3)</sup> Udarowością nazywa się odporność materiału na uderzenia lub obciążenia nagłe<sup>4)</sup> Wartości te dotyczą próbki gładkiej (o jednolitym przekroju na całej długości), wypolerowanej<sup>5)</sup> Wartości  $Z_{91}$  nie powinny przekraczać wielkości  $R_m \approx 1,1 R_e$ <sup>6)</sup> Wartości te dotyczą materiału w stanie zmiekkczonym.

Tabl. 10.3. Wartości współczynnika przeciążenia  $C_p$ .

Silnik	Charakter obciążenia	Ilość godzin pracy na dobę		
		do 3	8 ÷ 12	12 ÷ 24
Elektryczny	I	0,8	1,0	1,15
	II	1,0	1,25	1,5
	III	1,25	1,5	1,75
Spalinowy wielocylindrowy, turbina	I	1,0	1,25	1,5
	II	1,25	1,5	1,75
	III	1,5	1,75	2,25
Jednocylindrowy	I	1,25	1,5	1,75
	II	1,5	1,75	2,0
	III	2,0	2,25	2,5

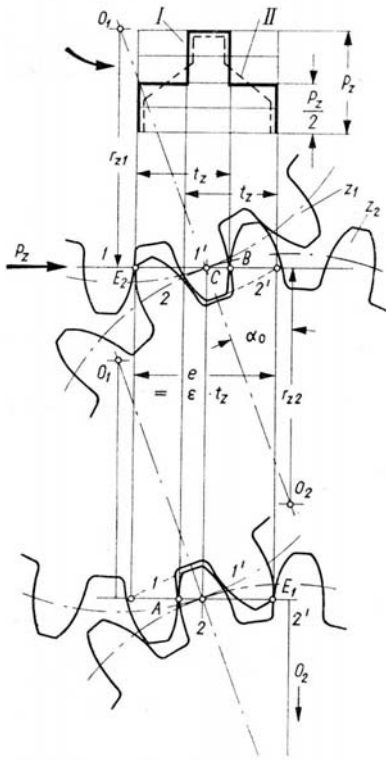
I - obciążenia prawie bez wahań, II - wahania umiarkowane, III - wahania silne.

**TABLICA 9** Wzory do obliczania współczynnika nadwyżek dynamicznych  $C_v$ .

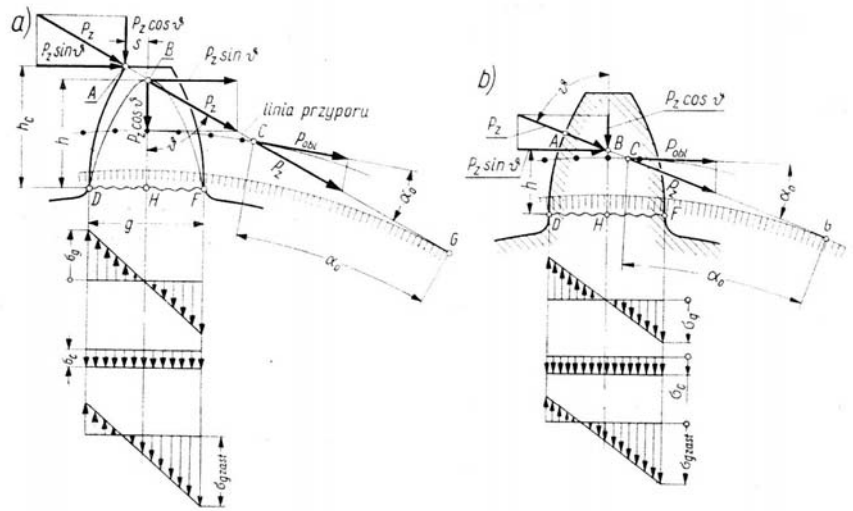
Grupa dokładności	I	II	III	IV	V
v, m/s	50 ÷ 100	20 ÷ 50	10 ÷ 20	3 ÷ 10	0 ÷ 3
Klasa dokładności	2 ÷ 5	4 ÷ 6	6 ÷ 8	8 ÷ 10	10 ÷ 12
$C_v$	$1 + \frac{\sqrt{v}}{30}$	$1 + \frac{\sqrt{v}}{18}$	$1 + \frac{\sqrt{v}}{10}$	$1 + \frac{\sqrt{v}}{7}$	$1 + \frac{\sqrt{v}}{4}$

**TABLICA 1** Współczynniki  $\lambda$  wytrzymałości zęba  
Zęby normalne korygowane  $\alpha_0 = 20^\circ$ ,

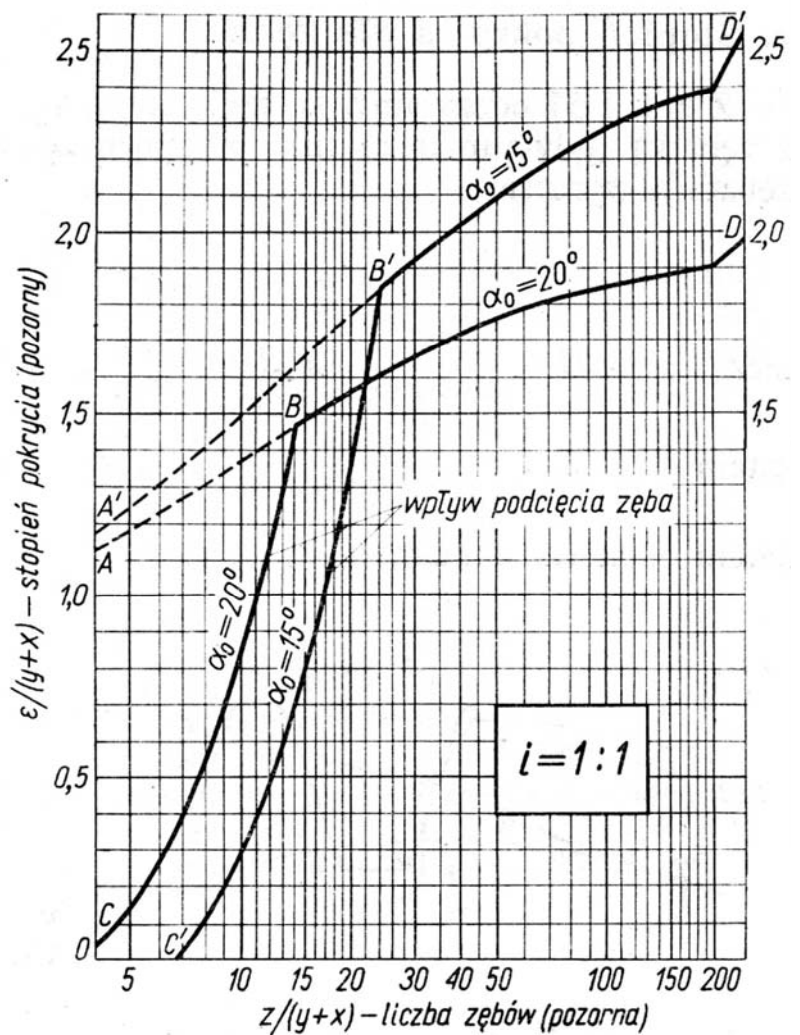
Liczba zębów z	$x = -0,6$			$x = -0,2$			$x = 0$			$x = 0,2$		
	$r_w$	$r_w - \frac{m_0}{2}$	$r_w - m_0$	$r_w$	$r_w - \frac{m_0}{2}$	$r_w - m_0$	$r_w$	$r_w - \frac{m_0}{2}$	$r_w - m_0$	$r_w$	$r_w - \frac{m_0}{2}$	$r_w - m_0$
10										3,13	4,30	5,95
11										3,29	4,55	6,34
12							2,65	3,66	4,90	3,42	4,75	6,65
13							2,78	3,85	5,30	3,53	4,91	6,90
14							2,91	4,05	5,70	3,63	5,06	7,13
15				2,40	3,24	4,50	3,05	4,22	6,00	3,73	5,20	7,36
16				2,53	3,46	4,90	3,16	4,39	6,23	3,82	5,32	7,61
17				2,65	3,65	5,15	3,26	4,53	6,44	3,90	5,43	7,87
18				2,75	3,82	5,40	3,35	4,65	6,69	3,98	5,53	8,13
19				2,85	3,97	5,63	3,44	4,77	6,93	4,05	5,63	8,33
20				2,96	4,11	5,85	3,53	4,88	7,14	4,12	5,72	8,54
22				3,13	4,35	6,26	3,68	5,10	7,50	4,23	5,90	8,88
24				3,28	4,58	6,63	3,82	5,30	7,82	4,33	6,06	9,15
26	2,43	3,28	4,60	3,43	4,77	7,00	3,95	5,47	8,15	4,42	6,20	9,40
28	2,57	3,51	5,05	3,54	4,93	7,28	4,05	5,61	8,45	4,50	6,30	9,62
30	2,72	3,71	5,42	3,64	5,08	7,53	4,15	5,72	8,66	4,57	6,40	9,82
33	2,90	3,96	5,87	3,78	5,27	7,86	4,27	5,88	8,98	4,66	6,51	10,10
36	3,07	4,22	6,25	3,91	5,45	8,15	4,38	6,02	9,22	4,73	6,61	10,32
39	3,21	4,41	6,58	4,02	5,59	8,42	4,47	6,14	9,46	4,79	6,69	10,52
42	3,33	4,60	6,86	4,12	5,71	8,65	4,54	6,24	9,65	4,84	6,77	10,68
45	3,44	4,76	7,11	4,20	5,82	8,85	4,60	6,33	9,83	4,90	6,83	10,83
50	3,60	5,00	7,50	4,32	5,98	9,12	4,68	6,47	10,10	4,97	6,92	11,02
65	3,98	5,52	8,40	4,58	6,36	9,90	4,87	6,76	10,68	5,11	7,13	11,43
80	4,18	5,90	9,18	4,75	6,68	10,50	4,98	7,00	11,12	5,16	7,28	11,74
100 i wyżej	4,28	6,35	10,05	4,85	7,04	11,10	5,03	7,23	11,58	5,18	7,40	11,93



Rys. IX-18. Wpływ stopnia pokrycia na rozkład obciążenia w przypadku: I — gdy zęby są sztywne, II — gdy zęby podlegają odkształceniom sprężystym



Rys. IX-30. Rozkład naprężeń u podstawy zęba i sił działających na ząb: a) u wierzchołka, b) w okolicy koła podziałowego;  $P_z$  — siła działająca wzdłuż linii przyproru (zazębienia),  $P_{obl}$  — siła obwodowa (działająca na okręgu koła podziałowego),  $\sigma_g$  — naprężenie gnące,  $\sigma_c$  — naprężenie ściskające (cisnące)



Rys. I-55. Obliczanie stopnia pokrycia przekładni zerowej lub **P-0** w zależności od liczby zębów w kole, współczynnika  $y$  wysokości zęba i współczynnika  $x$  przesunięcia zarysu boku zęba przy zębach korygowanych. Linie  $AB$  i  $A'B'$  dotyczą zębów bez podcięcia (korygowanych), linie  $CB$  i  $CB'$  zaś zębów z podcięciami (nie korygowanych). Sposób obliczania — wg wzorów [I-54] i [I-55] (patrz również przykład I/8)

**TABLICA 6**

Wykres zmęzeniowy Wöhlera dla różnych materiałów przy nacisku powierzchniowym obliczanym wg wzorów Hertza (wg K.F. Kecka):

I — stal stopowa nawęglona o HB = 620

II — stal 10 nawęglona o HB = 600

III — stal niklowo-chromowa 37HN3 ulepszona o HB = 400

IV — stal chromowo-molibdenowa 40HM ulepszona o HB = 340

V — stal 45 ulepszona o HB = 220

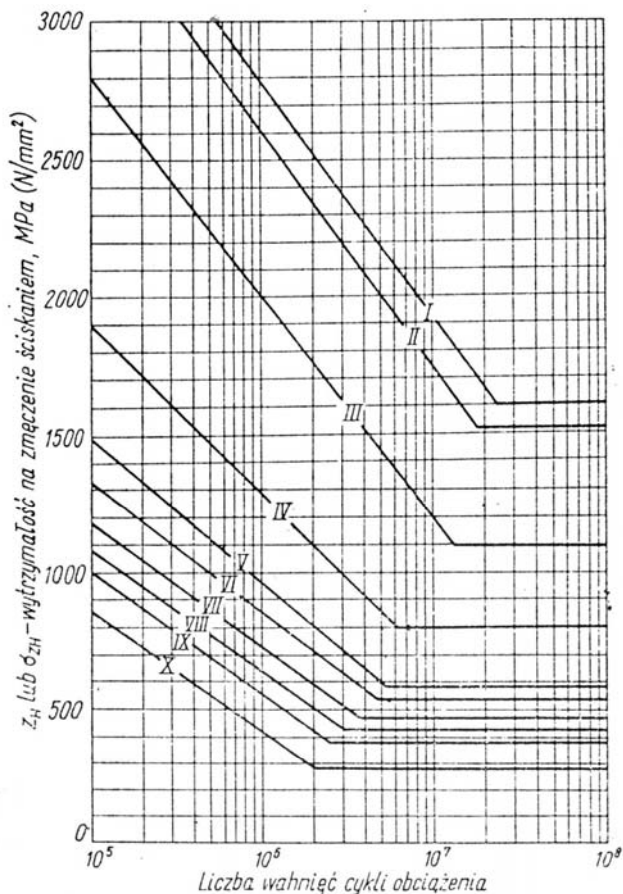
VI — stal 08 ulepszona o HB = 200

VII — stal St5 o HB = 150

VIII — stal 10 o HB = 140

IX — staliwo L-40 o HB = 150 oraz żeliwo Z1 20 o HB = 170

X — stal St4 o HB = 125



**Tabela XIV/2. Wybór lepkości oleju w °E<sub>50</sub> przy smarowaniu przez zanurzenie**

$$c = \frac{P}{bt}$$

gdzie:

$P$  — siła obwodowa, kG,  
 $b$  — szerokość wienca, mm,  
 $t$  — podziałka, mm.

$v$ m/s	$c < 0,40$	$c = 0,40 - 1,00$	$c > 1,00$
do 2	12	20	30
2-6	8	12	20
6-12	6	8	12

**TABLICA 8**

Wartość współczynnika  $C_o$  uwzględniającego lepkość oleju °E<sub>50</sub>

°E <sub>50</sub>	1,5	3,0	4,0	6,0	8,0	10,0	13,5	16	20	25	30	35	40
$C_o$	0,836	0,867	0,882	0,912	0,940	0,965	1,0	1,024	1,055	1,089	1,116	1,140	1,161

**TABLICA 7**

Wartości współczynnika  $C_{ch}$  uwzględniającego ilość cykli obciążenia powierzchni zęba

Ilość cykli obciążenia	Współczynnik $C_{ch}$	Ilość cykli obciążenia	Współczynnik $C_{ch}$
10 <sup>3</sup>	1,4	10 <sup>7</sup>	1,1
10 <sup>5</sup>	1,4	10 <sup>8</sup>	1,0
10 <sup>6</sup>	1,25	10 <sup>9</sup>	1,0

**Tabela XIV/1. Wybór systemu smarowania przekładni zębatych**

$v$ m/s	System smarowania
do 0,8	smarowanie smarem półstałym
0,8-4	przy małych liczbach obrotów — smar półstały przy dużych liczbach obrotów — przez zanurzenie
4-12	przez zanurzenie
ponad 12	przez natryskiwanie



**TABLICA 2** Dobór współczynnika szerokości wieńca.

Koła obrobione	Łożyskowanie	$\psi_{\max}$
bardzo dokładnie	b. staranne, sztywna obudowa	$30 \div 40$
średnio dokładnie	dobrze ułożysk. w skrzynkach	$< 25$
dość dokładnie	na konstrukcjach stalowych	$< 15$
niezbyt dokładnie	jednostronne (koło zwisające)	$< 10$
starannie odlewane	dość staranne	$< 10$

Przekładnie	Szer. wieńca b
lekkie	$\leq d_1$
normalne	$d_1$
średnie i ciężkie	$1,5 d_1$
najcięższe	$3 d_1$

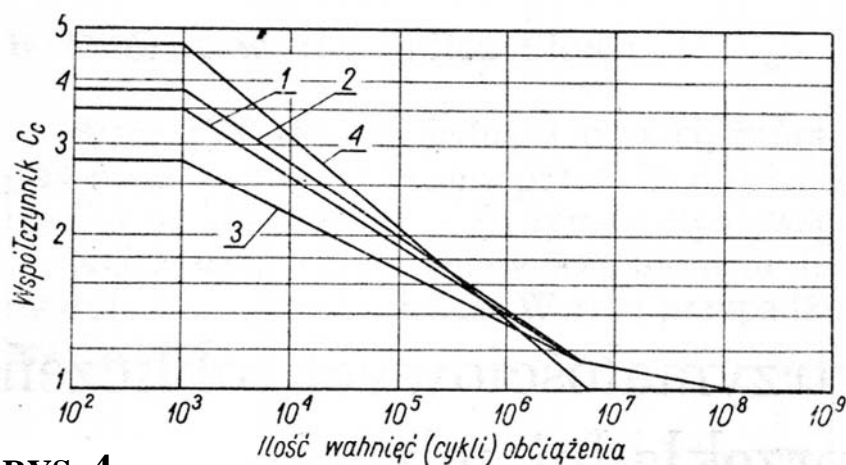
Dobór klasy dokładności.

Kryterium doboru		Klasa
Prędkość obwodowa, m/s	$1 \div 3$	$10 \div 12$
	$3 \div 6$	$8 \div 10$
	$6 \div 20$	$5 \div 8$
	$> 20$	$1 \div 5$
Koła miękkie	strug., dłutow., frez.	$6 \div 12$
Koła hartowane	strug., dłutow., frez.	$9 \div 12$
	wiórkowane	$5 \div 8$
	szlifowane	$2 \div 8$

Wartości współczynników bezpieczeństwa na złamanie.

$R_m$ , MPa	750	1200
$x_{zj}$	1,8	2,0
$x_{zo}$	2,1	2,5
$x_p$	$1,2 \div 2,0$	

**TABLICA 5**



**RYS. 4**

Współczynnik  $C_c$  trwałości zębów przy obliczaniu wytrzymałości zębów u podstawy; krzywe:

- 1 – stal o  $HB = 210 - 245 \text{ kG/mm}^2$ ,
- 2 – stal o  $HB = 302 - 351 \text{ kG/mm}^2$ ,
- 3 – stal o  $HRC = 58 - 63$  (hartowana powierzchnia),
- 4 – stal (każda twardość) dla stożkowych kół zębatych

$$N = M_1 \cdot \omega_1 = M_1 \cdot \frac{\pi \cdot n_1}{30 \cdot 1000} = \frac{M_1 \cdot n_1}{9550} [\text{kW}] \quad (3.11)$$

$N$  – moc przenoszona przez przekładnię, kW

$M_1$  – moment przenoszony przez wałek 1, na którym osadzone jest koło 1 (zębnik), Nm

$n_1$  – prędkość obrotowa koła 1 (zębника, wałka 1), obr/min

$$x_z = x_p \cdot x_{zj,zo} \quad (10.41)$$

$x_z$  – zmęczeniowy współczynnik bezpieczeństwa

$x_p$  – współczynnik uwzględniany w przypadku napędu dużych mas za pomocą kół niezbyt dokładnych oraz przy częstych rozruchach

$x_{zj}, x_{zo}$  – współczynniki bezpieczeństwa dla cyklu odzerowotętniącego i obustronnego

$$k_{gj} = \frac{C_c \cdot Z_{gj}}{x_{zj}} \quad k_{go} = \frac{C_c \cdot Z_{go}}{x_{zo}} \quad (10.40)$$

$C_c$  – współczynnik zależny od liczby cykli obciążeń

$Z_{gj}, Z_{go}$  – granice długotrwałej wytrzymałości zmęczeniowej materiału zęba dla cyklu odzerowotętniącego i obustronnego

$$m_g = 579.5 \sqrt{\frac{N \cdot C_p \cdot C_v}{\psi \cdot \lambda \cdot z_1 \cdot n_1 \cdot k_{go,gj}}} \quad (10.42)$$

$N$  – moc przenoszona przez koło zębate, kW

$C_p$  – współczynnik przeciążenia

$C_v$  – współczynnik nadwyżek dynamicznych

$\psi$  – współczynnik szerokości wieńca

$z_1$  – liczba zębów koła 1 (zębника)

$n_1$  – prędkość obrotowa koła 1 (zębника, wałka 1), obr/min

$k_{gj}, k_{go}$  – naprężenia dopuszczalne, MPa

$$C_{m\alpha} = \sqrt{\frac{1.4 \cdot E_1 \cdot E_2}{(E_1 \cdot E_2) \cdot \sin(2\alpha_0)}} \quad (10.44a)$$

$C_{m\alpha}$  – współczynnik uwzględniający sprężystość materiałów zębów

(stal+stal:  $C_{m\alpha}=478.1 \sqrt{N/mm}$ )

$E_1, E_2$  – moduły Younga dla materiałów współpracujących kół, MPa

$\alpha_0$  – nominalny kąt zarysu

$$z_2 = z_1 \cdot i_z \quad (10.1)$$

$z_2$  – liczba zębów koła 2 (koła zębatego)

$z_1$  – liczba zębów koła 1 (zębника)

$i_z$  – przełożenie przekładni zębatej



$$k_{dH} = \frac{C_{cH} \cdot C_{oH} \cdot Z_{dj}}{x_{zc}} \quad (10.45)$$

$k_{dH}$  – dopuszczalne naprężenia na naciski kontaktowe wg Hertza, MPa

$C_{cH}$  – współczynnik liczby cykli obciążenia powierzchni zęba

$C_{oH}$  – współczynnik uwzględniający lepkość oleju

$x_{zc}$  – współczynnik bezpieczeństwa na naciski powierzchniowe

po obróbce szlifowaniem:  $x_{zc} = 1.1 \cdot (0.111 \cdot 10^{-4} \cdot R_m + 1)$

po obróbce frezowaniem lub struganiem:  $x_{zc} = 1.1 \cdot (0.114 \cdot 10^{-4} \cdot R_m + 1.05)$

$R_m$  – granica wytrzymałości materiału koła 1 (zębnika), MPa

$$m_H = \frac{4370.4 \cdot C_{m\alpha}}{z_1 \cdot k_{dH}} \sqrt{\frac{N}{b \cdot n_1 \cdot \varepsilon} \cdot \left(1 + \frac{z_1}{z_2}\right)} [\text{mm}] \quad (10.46)$$

$b$  – szerokość wieńca koła zębatego, mm

$\varepsilon$  – stopień pokrycia dla przekładni

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2}$$

$\varepsilon_1$  – stopień pokrycia dla przekładni o przełożeniu 1:1 i liczbie zębów  $z_1$  (odczyt z Rys. I-55)

$\varepsilon_2$  – stopień pokrycia dla przekładni o przełożeniu 1:1 i liczbie zębów  $z_2$  (odczyt z Rys. I-55)

**Szereg wybranych modułów nominalnych (znormalizowanych) metrycznych,  $m_0$ :**

1	1,25	1,5	2	2,5	3	4	5	6	8	10
10	12	16	20	25	32	40	50	-	80	100

[mm]

$$v = \frac{\pi \cdot m_0 \cdot z_1 \cdot n_1}{60000} [\text{m/s}] \quad (10.35)$$

$v$  – liniowa prędkość punktów leżących na średnicy podziałowej koła 1 (zębnika)

$m_0$  – moduł nominalny, mm

$z_1$  – liczba zębów koła 1 (zębnika)

$n_1$  – prędkość obrotowa koła 1 (zębnika, wałka 1), obr/min

$$b = \psi \cdot m_0 [\text{mm}] \quad (10.43)$$

$b$  – szerokość wieńca koła zębatego, mm

**Sprawność zazębienia** - określa straty tarcia podczas zazębienia zębów o zarysie ewolwentowym w przekładniach walcowych i stożkowych:

$$\eta = 1 - \frac{k \cdot \mu}{z_1} \cdot \left(1 + \frac{z_1}{z_2}\right) \quad \langle 0,914 \div 0,999 \rangle$$

$$k = \frac{8}{\pi \cdot \sin^2(2 \cdot \alpha_0)} \quad (10.6)$$

gdzie:  $\mu$  - współczynnik tarcia między powierzchniami zębów.