Obliczenia wytrzymałościowe (sprawdzające) koła walcowego o zębach skośnych

$$S_H = \frac{\sigma_{H\,\mathrm{lim}}}{Z_H Z_E Z_\varepsilon Z_\beta \sqrt{\frac{P}{b\,d}\,\frac{u+1}{u}}} \cdot \frac{Z_{NT} Z_L Z_R Z_v Z_W Z_X}{\sqrt{K_A K_v K_{H\beta} K_{H\alpha}}}$$

Wsp. bezpieczeństwa wytrzymałości kontaktowej

$$S_F = \frac{\sigma_{F\,\mathrm{lim}}}{\frac{P}{b\,m_n} K_A K_v K_{F\beta} K_{F\alpha}} \cdot \frac{Y_{ST} Y_{NT} Y_{\delta\mathrm{rel}T} Y_{R\mathrm{rel}T} Y_X}{Y_{F\alpha} Y_{S\alpha} Y_\varepsilon Y_\beta}$$

Wsp. bezpieczeństwa na złamanie zęba u podstawy

Uwaga
„P” w powyższych wzorach oznacza siłę obwodowa w [N]

$$P = \frac{2000M}{d}$$

M ← moment obrotowy [Nm]

d ← Średnica podziałowa koła [mm]

$$S_H = \frac{\sigma_{H\,\lim}}{Z_H Z_E Z_\varepsilon Z_\beta \sqrt{\frac{P}{b\,d}\,\frac{u+1}{u}}} \cdot \frac{Z_{NT} Z_L Z_R Z_v Z_W Z_X}{\sqrt{K_A K_v K_{H\beta} K_{H\alpha}}}$$

$$Z_H = \frac{1}{\cos\alpha_t}\sqrt{\frac{2\cos\beta_b}{\mathrm{tg}\alpha_{tw}}} \qquad \mathrm{tg}\beta_b = \mathrm{tg}\beta\cos\alpha$$

$$Z_E = \sqrt{\frac{1}{\pi\left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)}}$$

lub z tabeli na kolejnych stronach

$$Z_\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_\alpha}}$$ - wsp. zazębienia przekładni

$$Z_\beta = \sqrt{\cos\beta}$$ - wsp. kąta pochylenia zęba

Z_{NT} – z wykresu na kolejnej stronie (wsp. trwałości)

Z_L – z wykresu na kolejnej stronie (wsp. lepkości oleju)

Z_R – z wykresu na kolejnej stronie (wsp. chropowatości)

Z_v – z wvkresu na koleinej stronie (wsp. prędkości obwodowej)

$$Z_W = 1{,}2 - \frac{\mathrm{HB} - 130}{1700}$$ - wsp. twardości

przy czym wzór powyższy obowiązuje dla zakresu $130 \leqslant \mathrm{HB} \leqslant 470$. Gdy $\mathrm{HB} < 130$, wówczas współczynnik twardości wynosi $Z_W = 1{,}2$, a dla $\mathrm{HB} > 470$ wynosi $Z_W = 1{,}0$. Dla kół z zębami hartowanymi powierzchniowo $Z_W = 1{,}0$.

K_A – z tabeli na kolejnych stronach

$$K_v = 1 + \left(\frac{13{,}3}{q} + 0{,}0087\right) W$$

$$q = \frac{K_A P}{b}$$

Bez względu na wynik, minimalną wartość przyjmujemy 100 N/mm

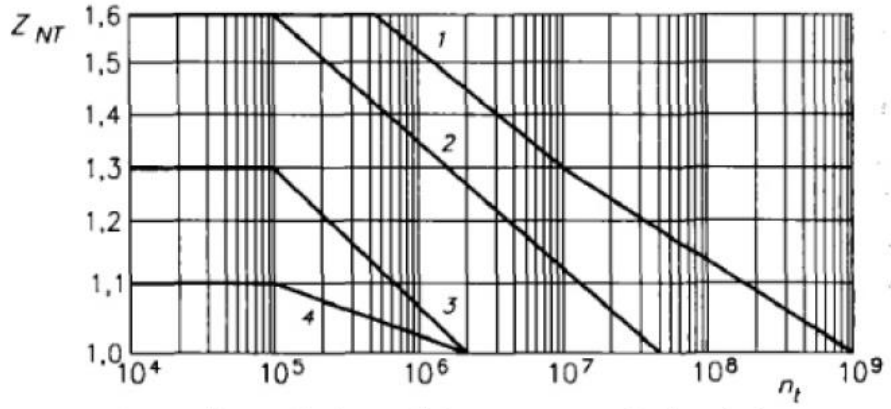
$$W = \frac{z\,v}{100}\sqrt{\frac{u^2}{u^2+1}}$$

$$v = \frac{\pi d n}{60 \cdot 1000}$$

$$Z_X = 1{,}05 - 0{,}005 \cdot m_n$$

$$K_{H\alpha} = K_{F\alpha} = \frac{\varepsilon_\alpha}{\cos^2\beta_b}$$

$$K_{H\beta} = 1{,}15 + 0{,}18\left(\frac{b}{d}\right)^2 + 0{,}0003b$$

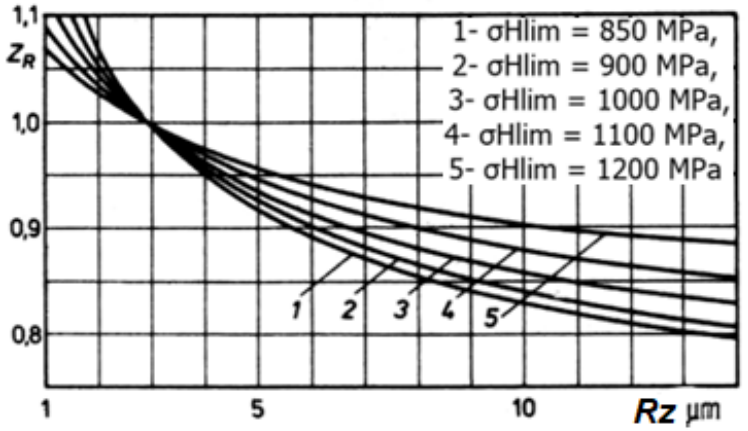


1 — stal konstrukcyjna, stale hartowane na wskroś, stale hartowane powierzchniowo (gdy dopuszcza się niewielkie objawy pittingu), *2* — materiały jak wyżej (gdy nie dopuszcza się objawów pittingu), *3* — stale hartowane na wskroś i azotowane gazowo, żeliwo szare, *4* — stale hartowane na wskroś i azotowane kąpielowo

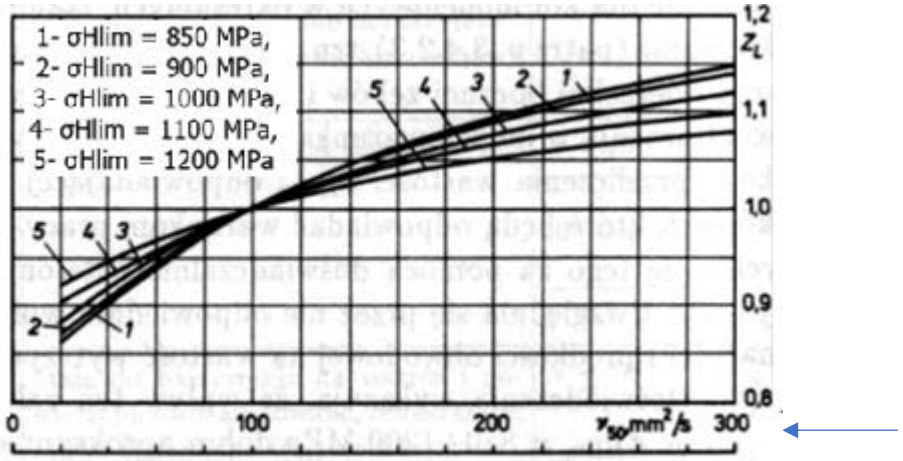
Liczbę cykli obciążenia można określić, znając liczbę godzin pracy przekładni τ

$$n_t = 60n\tau$$

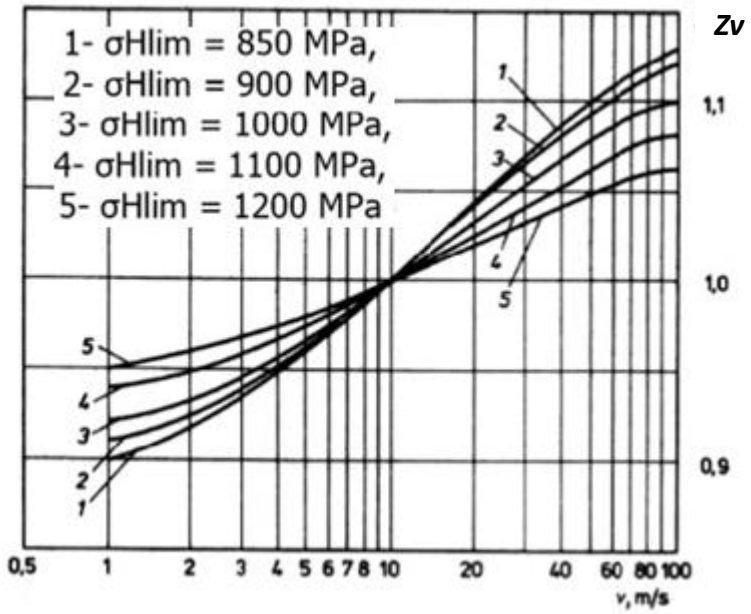
Zazwyczaj liczbę godzin pracy przekładni ‚τ' wynosi (praca dorywcza) od 5000 do 10000 godzin



Zasadniczo, podczas wykończeniowej obróbki boku zęba metodą obwiedniową (Magg), chropowatość powierzchni, wyrażona parametrem Rz, mieści się w zakresie od Rz =3.2 do 10 µm



Uwaga!
Zagadnienie związane z doborem oleju i przeliczeniu jednostek lepkości, podane są na kolejnej stronie



Dobór rodzaju smarowania i lepkości oleju

TABLICA 4.16. Wybór systemu smarowania przekładni zębatych [4.7]

v [m/s]	System smarowania
do 0,8	Smarowanie smarem plastycznym
0,8 ÷ 4	Smar plastyczny — przy małych liczbach obrotów Przez zanurzenie — przy dużych liczbach obrotów
4 ÷ 12	Przez zanurzenie
ponad 12	Przez natryskiwanie

Przy smarowaniu przez zanurzenie olej można dobierać z tabl. 4.17, w zależności od prędkości obwodowej i współczynnika c

$$c = \frac{P}{10bp_t}, \quad \text{gdy} \quad P \text{ w N} \qquad p_t = \frac{\pi \cdot d}{z} \tag{4.107}$$

Jest też pożądane, aby średnice dużych kół miały zbliżone wymiary.

TABLICA 4.17. Dobór lepkości oleju °E_{50} przy smarowaniu przez zanurzenie

v [m/s]	$c < 0{,}40$	$c = 0{,}40 \div 1{,}00$	$c > 1{,}00$
do 2	12	20	30
2 ÷ 6	8	12	20
6 ÷ 12	6	8	12

Sposób przeliczenia lepkości oleju w stopniach Englera (°E_{50})
na lepkość kinematyczną v:

$$\nu = 7{,}31 \cdot^{\circ} E - \frac{6{,}31}{^{\circ}E} \quad \textit{[mm^2/s]}$$

Wartości współczynnika zastosowania K_A

Silnik napędowy	Charakter obciążenia	Maszyna robocza			
		I	II	III	IV
Silnik elektryczny, turbina parowa	praca równomierna	1	1,25	1,5	1,75
Silnik elektryczny, turbina spalinowa	niewielkie przeciążenia	1,1	1,35	1,6	1,85
Silnik spalinowy wielocylindrowy	średnie przeciążenia	1,25	1,5	1,75	2
Silnik spalinowy jednocylindrowy	znaczne przeciążenia	1,5	1,75	2	2,25

Maszyna robocza	Charakter obciążenia
I. Generatory, przenośniki taśmowe, lekkie wyciągi, wentylatory, napędy pomocnicze obrabiarek	praca równomierna
II. Prądnice, pompy zębate, pompy rotacyjne	niewielkie przeciążenia
III. Napędy główne obrabiarek, dźwignice, mechanizmy obrotu żurawi, pompy wielotłokowe	średnie przeciążenia
IV. Walcarki, prasy, nożyce gilotynowe, koparki, ładowarki, kruszarki	znaczne przeciążenia

Wartości współczynnika Z_E

Zębnik			Koło			Z_E
Materiał	E [$\times 10^3$ MPa]	ν	Materiał	E [$\times 10^3$ MPa]	ν	[MPa$^{1/2}$]
stal	206	0,3	stal	206	0,3	189,8
			staliwo	202		188,9
			żeliwo sferoidalne	173		181,4
			żeliwo szare	118		162,0
			brąz cynowy*	85	0,35	146,9
staliwo	202		staliwo	202	0,3	188,0
			żeliwo sferoidalne	173		180,5
			żeliwo szare	118		161,4
żeliwo sferoidalne	173		żeliwo sferoidalne	173		173,9
			żeliwo szare	118		156,6
żeliwo szare	118		żeliwo szare	118		143,7
stal	206		tekstolit	0,8	0,5	56,4

* Dla przekładni ślimakowych.

$$S_F = \frac{\sigma_{F\,\mathrm{lim}}}{\frac{P}{b\,m_n} K_A K_v K_{F\beta} K_{F\alpha}} \cdot \frac{Y_{ST} Y_{NT} Y_{\delta \mathrm{rel}T} Y_{R\mathrm{rel}T} Y_X}{Y_{F\alpha} Y_{S\alpha} Y_\varepsilon Y_\beta}$$

$$K_{F\beta} = K_{H\beta}^{N_F}$$

$$K_{F\alpha} = \frac{\varepsilon_\alpha}{\cos^2 \beta_b}$$

$$\frac{b}{h} = \frac{b}{2{,}25 m_n}$$

$$N_F = \frac{\left(\frac{b}{h}\right)^2}{1 + \frac{b}{h} + \left(\frac{b}{h}\right)^2}$$

Y_{ST} = 2

Y_{RrelT} -z wykresu na kolejnej stronie (wsp. chropowatości pow. Zęba)

Yx – (wsp. wielkości) z wykresu na kolejnej stronie

$Y_{FS} = Y_{F\alpha} Y_{S\alpha}$ - z wykresu na kolejnej stronie

$Y_\beta = 1 - \frac{\beta_1}{120}$ - wsp. kąta pochylenia zęba

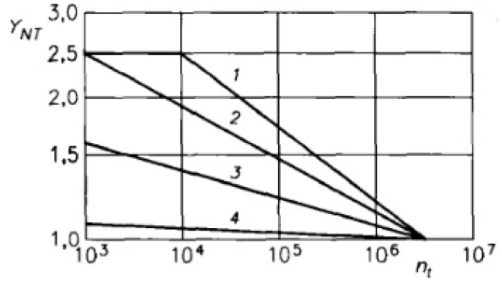
$Y_\varepsilon = 0{,}25 + \frac{0{,}75}{\varepsilon_\alpha} \cos^2 \beta_b$ - wsp. wskaźnika zazębienia

Y_{NT} - z wykresu na kolejnej stronie (wsp. trwałości przekładni)

$$Y_{\delta \mathrm{rel}T} = \begin{cases} 1 & \text{dla } q_s \geqslant 1{,}5 \\ 0{,}95 & \text{dla } q_s < 1{,}5 \end{cases}$$

- wsp. wrażliwości na działanie karbu

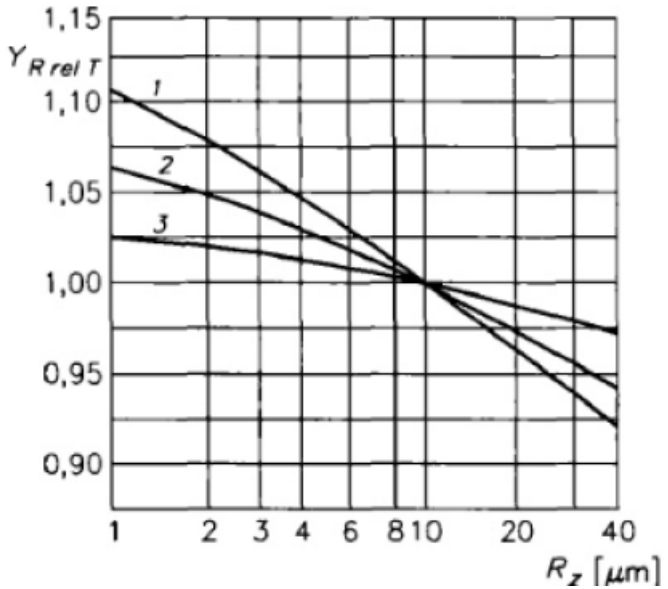
Y_{NT} Wsp. trwałości



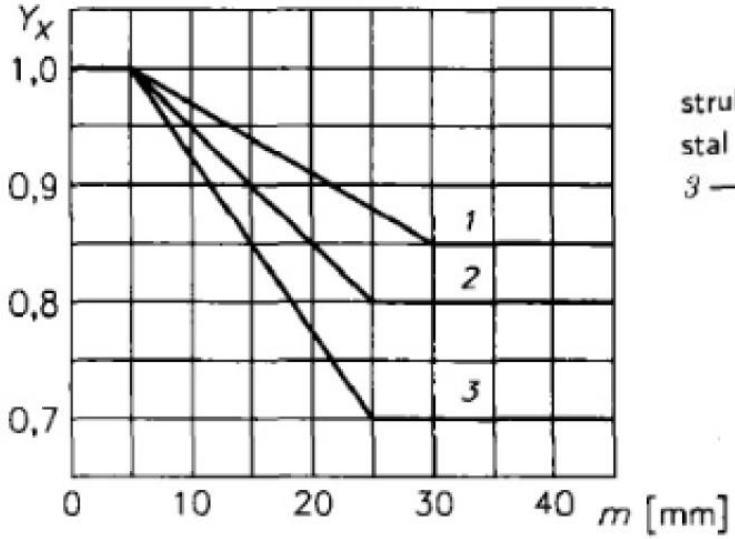
1 — stale konstrukcyjne, hartowane na wskroś, *2* — stale nawęglane lub hartowane powierzchniowo, *3* — stale hartowane na wskroś i azotowane gazowo, żeliwo szare, *4* — stale hartowane na wskroś i azotowane kąpielowo

Liczbę cykli obciążenia można określić, znając liczbę godzin pracy przekładni τ

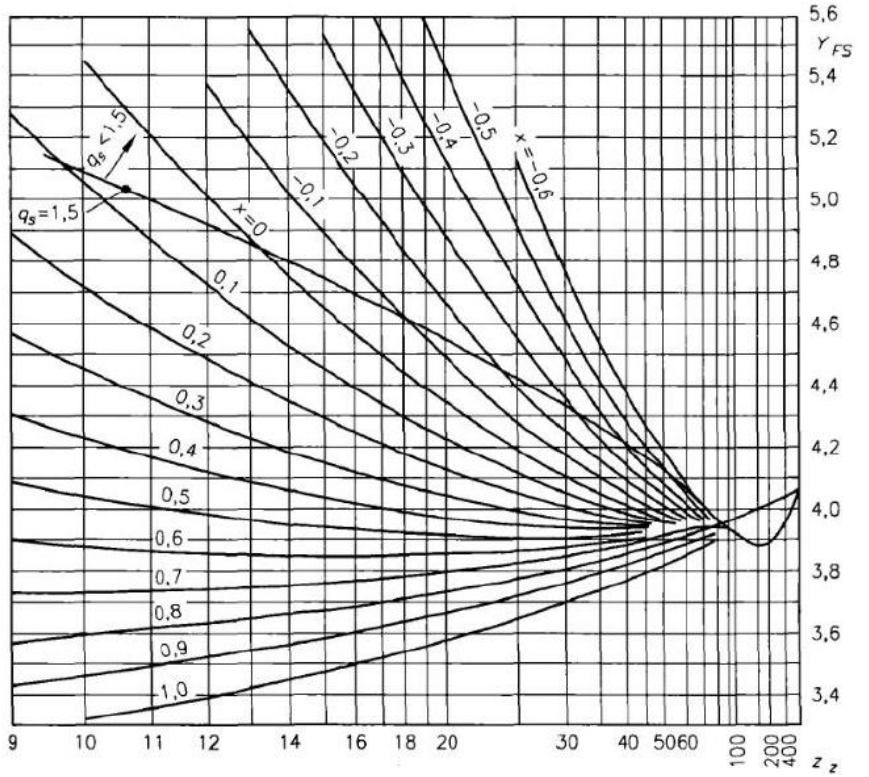
$$n_t = 60n\tau$$



1 — stal utwardzona na wskroś lub hartowana powierzchniowo, *2* — stal w stanie miękkim, *3* — żeliwo szare oraz stal azotowana lub cyjanowana



1 — stal konstrukcyjna oraz stale hartowane na wskroś, *2* — stal hartowana powierzchniowo i azotowana, *3* — żeliwo szare



Y_{FS}

$$z_z = \frac{z}{\cos^3 \beta}$$

Minimalne wartości współczynników bezpieczeństwa $S_{F\min}$ i $S_{H\min}$

Wymagania eksploatacyjne	$S_{F\min}$	$S_{H\min}$
Maksymalna niezawodność	1,50 ÷ 3,00	1,25 i wyżej
Prawdopodobieństwo zniszczenia $\leqslant 1\%$	1,00 ÷ 1,25	1
Prawdopodobieństwo zniszczenia $\leqslant 30\%$	0,70 ÷ 0,80	0,8

Nomenklatura oznaczeń stosowanych w obliczeniach

a, a_p, a_w [mm] — odległości osi: nominalna, pozorna, rzeczywista,

b [mm] — szerokość wieńca zębatego,

B_p, B_r — współczynniki zmiany odległości osi, pozorny i rzeczywisty

d, d_f, d_a, d_w, d_b [mm] — średnice okręgów: podziałowego, podstaw, wierzchołków, tocznego, zasadniczego,

h, h_a, h_f [mm] — wysokości zębów: całkowita, głowy, stopy,

k — współczynnik skrócenia głów,

K_A — współczynnik zastosowania,

K_v — współczynnik dynamiczny,

K_F, K_H — współczynniki eksploatacyjne,

$K_{F\alpha}, K_{H\alpha}$ — współczynniki nierównomierności rozkładu obciążenia w przekroju czołowym,

$K_{F\beta}, K_{H\beta}$ — współczynniki nierównomierności rozkładu obciążenia wzdłuż linii zęba,

m, m_n, m_t [mm] — moduły: nominalny, normalny, czołowy,

M [N·m] — moment obrotowy,

n_t — liczba cykli obciążenia,

N [kW] — moc przenoszona przez przekładnię,

P, P_r, P_a [N] — składowe sił międzyzębnych: obwodowa, promieniowa, osiowa,

$u = z_2/z_1$ — przełożenie geometryczne,

x, x_t, x_n, x_g — współczynnik przesunięcia zarysu, czołowy, normalny, graniczny,

y, y_n, y_t — współczynnik wysokości zęba, normalny, czołowy,

$Y_{F\alpha}$ — współczynnik kształtu zęba,

Y_{NT} — współczynnik trwałości,

Y_{RrelT} — współczynnik wpływu chropowatości,

$Y_{S\alpha}$ — współczynnik kształtu karbu,

Y_{ST} — współczynnik spiętrzenia naprężeń w kołach modelowych,

Y_X — współczynnik wielkości,

Y_β, Y_ε — współczynniki wpływu kąta pochylenia linii zęba i wskaźnika zazębienia,

$Y_{\delta relT}$ — współczynnik wrażliwości materiału na koncentrację naprężeń,

z, z_z, z_g — liczba zębów, zastępcza, graniczna,

Z_H — współczynnik kształtu powierzchni zębów,

Z_{NT} — współczynnik trwałości,

Z_L — współczynnik wpływu rodzaju smarowania,

Z_R — współczynnik wpływu chropowatości powierzchni,

Z_E — współczynnik sprężystości,

Z_v — współczynnik wpływu prędkości obwodowej,

Z_W — współczynnik twardości,

Z_X — współczynnik wielkości,

Z_β, Z_ε — współczynniki wpływu kąta pochylenia linii zęba i wskaźnika zazębienia,

$\alpha, \alpha_n, \alpha_t, \alpha_w$ — kąt przyporu (dla zazębienia), kąt zarysu (dla uzębienia): nominalny, normalny, czołowy, toczny,

Nomenklatura oznaczeń stosowanych w obliczeniach

β, β_b, β_w	— kąty pochylenia linii zęba na walcu podziałowym, zasadniczym, tocznym
$\varepsilon, \varepsilon_\alpha, \varepsilon_\beta, \varepsilon_\gamma$	— wskaźnik zazębienia (stopień pokrycia), czołowy, skokowy, całkowity,
$\kappa = b/d_1$	— współczynnik szerokości wieńca,
$\sigma_{F\,\mathrm{lim}}$ [MPa]	— granica wytrzymałości zmęczeniowej zębów na zginanie,
$\sigma_{H\,\mathrm{lim}}$ [MPa]	— granica wytrzymałości zmęczeniowej powierzchni zębów na naprężenia stykowe,
Σx	— suma współczynników przesunięcia zarysu,
τ [h]	— okres trwałości przekładni.