

Tiếp bảng 17-2

Mác thép	Đường kính phôi, mm	δ_B , MPa	σ_{ch} , MPa	HB	Gia công nhiệt (nhiệt luyện)
35X	đến 60	940	740	190 ÷ 241	thường hoá
	60 ÷ 100	740	490		
	100 ÷ 200	690	440		
35X	đến 200	740	490	220 ÷ 260	hoá tốt
35Cr	đến 120	930	690	257 ÷ 285	hoá tốt
	120 ÷ 150	880	590	243 ÷ 271	
	150 ÷ 180	830	540	230 ÷ 257	
40X	đến 60	980	790	200 ÷ 230	thường hoá
	100 ÷ 200	760	490		
	200 ÷ 300	740	490		
	300 ÷ 600	690	440		
40X	đến 120	930	690	257 ÷ 285	hoá tốt
	120 ÷ 150	880	590	243 ÷ 271	
	150 ÷ 180	830	540	230 ÷ 257	
	180 ÷ 250	780	490	215 ÷ 243	
40XH	đến 60	980	790	220 ÷ 250	thường hoá
	60 ÷ 100	840	590		
	100 ÷ 300	790	570		
40XH	đến 150	930	690	265 ÷ 295	hoá tốt
	150 ÷ 180	880	590	250 ÷ 280	
	180 ÷ 250	835	540	235 ÷ 265	
40XH2MA	đến 120	1080	900	275 ÷ 310	hoá tốt
	120 ÷ 200	980	740	265 ÷ 240	

Tiếp bảng 17-2

Mác thép	Đường kính phôi, mm	δ_B , MPa	σ_{ch} , MPa	HB	Gia công nhiệt (nhiệt luyện)
52Г2	đến 80	740	400	195 ÷ 240	thường hoá
	100 ÷ 300	690	350		
52Г2	đến 100	790	440	269 ÷ 320	hoá tốt
35Л	—	420	270	145	thường hoá
40Л	—	520	290	147	
45Л	—	540	310	153	
50Л	—	570	330	174	
55Л	—	590	340	155 ÷ 217	
40ГЛ	—	630	320	174	
35ГЛ	—	590	340	174	hoá tốt
35ХГСЛ	—	790	590	202	
35ХНЛ	—	690	490	218 ÷ 269	
40Г2Л	—	630	320	190 ÷ 225	

2. Xác định ứng suất tiếp xúc cho phép

Khi tính toán truyền động bánh răng làm việc trong điều kiện tải trọng biến đổi, cần phải lấy tải trọng làm việc cực đại làm tải trọng tính toán. Tính chất thay đổi của tải trọng được kể đến bằng cách đưa vào trong công thức xác định ứng suất tiếp xúc cho phép số chu kỳ đặt tải tương đương.

Số chu kỳ tương đương khi tính toán độ bền tiếp xúc của bánh nhỏ và bánh lớn là:

$$\begin{aligned}
 N_{\sigma_1} &= 60n_1.T \cdot \sum \left(\frac{M_j}{M_{\max}} \right)^3 \cdot \frac{t_j}{T} \\
 &= 60 \times 481 \times 24000 \times (0,7^3 \times 0,3 + 1^3 \times 0,1 + 0,3^3 \times 0,6) \\
 &= 15,3 \cdot 10^7 \\
 N_{\sigma_2} &= \frac{N_{\sigma_1}}{i_r} = \frac{15,3 \cdot 10^7}{4} = 3,8 \cdot 10^7
 \end{aligned}$$

Số chu kỳ ứng suất N_0 trước điểm uốn của đường cong mỏi, nghĩa là khi đạt được giới hạn mỏi dài lâu. Đối với ứng suất tiếp xúc là:

$$N_0 = 30.HB^{2.4}$$

N_0 còn gọi là số chu kỳ cơ sở.

Khi đó đối với bánh nhỏ và bánh lớn:

$$N_{01} = 30 \times 257^{2.4} = 1,8.10^7$$

$$N_{02} = 30 \times 215^{2.4} = 1,2.10^7$$

Để tiện theo dõi trong các ký hiệu ứng suất, ta đưa ra các chỉ số chính và phụ sau đây để chỉ các dạng tính toán (theo ГОСТ 21354-75).

F - chỉ số chính quan hệ tới tất cả các dạng tính toán về độ bền của răng khi uốn;

H - chỉ số chính quan hệ tới tất cả các dạng tính toán về độ bền bề mặt răng;

M - chỉ số phụ quan hệ tới các tính toán về độ bền dưới tác dụng của tải trọng cục đại;

P - chỉ số phụ quan hệ tới ứng suất cho phép.

Ứng suất tiếp xúc cho phép $[\sigma_{HP}]$ khi làm việc lâu dài (đường kính ngoài $d \leq 700$ mm):

$$[\sigma_{HP}] = \frac{\sigma_{OH} \cdot Z_R}{n} \cdot \sqrt[6]{\frac{N_0}{N_\sigma}}$$

trong đó: σ_{OH} - giới hạn mỏi các lớp bề mặt răng, được tìm theo bảng 17-3;

Z_R - hệ số kể đến mức độ nhám bề mặt và được chọn theo các thông số nhám bề mặt R_a và R_z :

$$Z_R = 1 \text{ khi } R_a \leq 1 \text{ } \mu\text{m}; Z_R = 0,95 \text{ khi } R_a = 1,25 \div 2,5 \text{ } \mu\text{m}; Z_R = 0,9 \text{ khi } R_z \geq 10 \text{ } \mu\text{m};$$

n - hệ số an toàn (có thể lấy $n = 1,1$ đối với răng được hóa bền bề mặt).

Nếu $N_\sigma > N_0$, nghĩa là chi tiết làm việc trong vùng nằm ngang của đường cong mỏi, thì việc tính toán được tiến hành như khi ứng suất không đổi và thừa

nhận $\sqrt[6]{\frac{N_0}{N}} = 1$. Trong trường hợp này $Z_R = 1$; $n = 1,2$; $N_{\sigma_1} = 15,3 \cdot 10^7 > N_{01} = 1,8 \cdot 10^7$ và $N_{\sigma_2} = 3,8 \cdot 10^7 > N_{02} = 1,2 \cdot 10^7$.

Bảng 17-3. Giới hạn mỏi lớp bề mặt răng σ_{OH}

Nhiệt luyện hoặc hoá nhiệt luyện	Độ cứng của lớp bề mặt	Vật liệu	σ_{OH} , MPa
Hoà tốt, thường hoá	HB \leq 350	Thép cacbon và thép hợp kim	2HB + 70
Tôi thể tích	HRC 40 - 56		18 HRC + 150
Tôi bề mặt	HRC 40 - 56		17 HRC + 200
Xementit hoá và tôi	HRC 54 - 65	Thép hợp kim	23 HRC
Thấm nitơ	HRC 50 - 65		20 HRC
Không nhiệt luyện		Gang	2HB

Vì thế:

$$[\sigma_{HP_1}] = \frac{(2HB_1 + 70) \cdot 1}{1,2} \cdot 1 = 487 \text{ MPa}$$

$$[\sigma_{HP_2}] = \frac{(2HB_2 + 70) \cdot 1}{1,2} \cdot 1 = \frac{2 \times 215 + 70}{1,2} = 417 \text{ MPa}$$

Đối với những bánh răng nghiêng không dịch chỉnh được có độ rắn không giống nhau giữa bánh nhỏ và bánh lớn thì ứng suất cho phép là:

$$[\sigma_{HP}] = \frac{\sigma_{HP_1} + \sigma_{HP_2}}{2} = \frac{487 + 417}{2} = 452 \text{ MPa}$$

3. Xác định khoảng cách trục A (m)

$$A = (i_r + 1) \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{0,34 \cdot Z_K}{[\sigma_{HP}] \cdot i_r}\right)^2 + \frac{K_{\alpha H} \cdot KM_2}{\Psi_a}}$$

trong đó, Z_K - hệ số kể đến tính riêng biệt của truyền động răng nghiêng phụ thuộc vào số răng của bánh nhỏ (trong các tính toán gần đúng với số răng bánh nhỏ $Z_1 \geq 20$ thì hệ số $Z_K = 0,8$. Điều này có

nghĩa là làm tăng độ bền tiếp xúc của bộ truyền răng nghiêng so với răng thẳng lên 30%);

$K_{\alpha H}$ - hệ số kể đến sự phân bố không đều của tải trọng giữa các răng (trong dải tốc độ từ 1 đến 20 m/s; $K_{\alpha H} = 1 \div 1,1$ với độ chính xác cấp 7, $K_{\alpha H} = 1,05 \div 1,2$ với độ chính xác cấp 8; K - hệ số tải trọng phụ, đối với tính toán sơ bộ $K = 1,3 \div 1,5$; giá trị bé ứng với các bánh răng đặt đối xứng trên các trục, giá trị lớn ứng với trường hợp bố trí các bánh răng không đối xứng; $\Psi_a = b/A$ - hệ số chiều rộng bánh răng (đối với các bánh răng làm bằng thép tốt bố trí không đối xứng đối với gối tựa, nên lấy $\Psi_a = 0,315 \div 0,400$, còn đối với các bánh răng làm bằng thép tôi $\Psi_a = 0,25 \div 0,315$; khi các bánh răng được đặt đối xứng $\Psi_a = 0,4 \div 0,5$; đối với bánh răng nhỏ dịch động được $\Psi_a = 0,1 \div 0,2$; các giá trị tiêu chuẩn Ψ_a đối với hộp giảm tốc: 0,100; 0,125; 0,160; 0,200; 0,250; 0,315; 0,400; 0,500; 0,630; 0,800; 1,0; 1,25).

$[\sigma_{HP}]$ tính bằng MPa ; M_2 tính bằng Nm.

Trong trường hợp này: $Z_K = 0,8$; $K_{\alpha H} = 1,1$; $K = 1,3$; $\Psi_a = 0,4$.

$$\text{Khi đó: } A = (4 + 1) \sqrt[3]{\left(\frac{0,34 \times 0,8}{452 \times 4}\right)^2 + \frac{1,1 \times 1,3 \times 725}{0,4}} = 0,195 \text{ m}$$

Ta lấy quy tròn $A = 200 \text{ mm}$ theo ГОСТ 2185-66.

4. Xác định các thông số truyền động cơ bản

Đối với sự truyền động mà các bề mặt răng có độ cứng thấp và trung bình, sau khi xác định A từ những tính toán về độ bền tiếp xúc có thể cho trước môđun (hoặc số răng) và sau đó thực hiện việc tính toán kiểm tra về uốn. Môđun cần phải nhỏ, bởi vì cùng với việc tăng môđun thì khối lượng, đường kính ngoài của phôi, khối lượng gia công càng tăng. Mặt khác, đối với những bộ truyền nặng môđun không nên lấy nhỏ hơn 1,5. Thông thường đối với bộ truyền của hộp giảm tốc có công dụng chung môđun được lấy trong khoảng $(0,01 \div 0,02)A$ với các bánh răng làm bằng thép hoá tốt; trong khoảng $(0,016 \div 0,0315)A$ với bánh răng làm bằng thép tôi.

Trong trường hợp khảo sát $m = 0,01.A = 0,01 \times 200 = 2 \text{ mm}$.

Góc nghiêng của răng lấy trong khoảng từ 8 đến 18" (rất ít đến 20").

Ở đây ta lấy $\beta = 12''$ (khi $\beta = 0$ ta có bánh răng hình trụ răng thẳng, hình 4-2a).

Số răng tổng cộng của bánh nhỏ Z_1 và bánh lớn Z_2 là:

$$Z_c = Z_1 + Z_2 = 2A \cdot \cos\beta / m = 2 \times 200 \cdot \cos 12'' / 2 \approx 196,5$$

$$Z_1 = \frac{Z_c}{i_r + 1} = \frac{196,5}{5} = 39,2$$

$$Z_2 = Z_1 \cdot i_r = 39,2 \times 4 = 156,8$$

Ta làm tròn số răng và lấy:

$Z_1 = 39$; $Z_2 = 157$. Khi đó $Z_c = 196$ và góc nghiêng thực tế là:

$$\beta = \arccos(mZ_c/2A) = 11''31'30''$$

Môđun ăn khớp mặt dẫu m_t :

$$m_t = \frac{m}{\cos\beta} = \frac{2}{\cos 11''31'30''} = 2,04$$

Chiều rộng bánh răng lớn:

$$b_2 = \Psi_a \cdot A = 0,4 \times 20 = 80 \text{ mm}$$

Để bù vào sự không chính xác lắp ghép lấy chiều rộng bánh nhỏ lớn hơn chiều rộng bánh lớn một chút ($5 \div 7$ mm), vì vậy $b_1 = b_2 + 5 = 80 + 5 = 85$ mm.

Đường kính vòng chia của bánh lớn và bánh nhỏ:

$$d_2 = \frac{m \cdot Z_2}{\cos\beta} = \frac{2 \times 157}{\cos 11''31'30''} = 320,41 \text{ mm}$$

$$d_1 = \frac{m \cdot Z_1}{\cos\beta} = 79,59 \text{ mm}$$

Giá trị d_1 và d_2 phải tính với độ chính xác đến 1/100 mm và phải kiểm tra theo điều kiện:

$$A = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{79,59 + 320,41}{2} = 200 \text{ mm}$$

Tỷ số truyền thực tế là:

$$i_r^* = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{157}{39} = 4,02$$

Giá trị i_r^* không được khác giá trị tiêu chuẩn 2,5% khi $i_r \leq 4,5$ và 4% khi $i_r \geq 4,5$.

Trong thiết kế này:

$$\Delta i = \frac{i_r^* - i_r}{i_r} \cdot 100 = \frac{4,02 - 4}{4} \times 100 = 0,5\%$$

Vậy sai số trên cho phép.

Tốc độ góc thực của bánh lớn:

$$\omega_2^* = \frac{\omega_1}{i_r^*} = \frac{50,3}{4,02} = 12,5 \text{ rad/s}$$

và tốc độ dài của nó là:

$$v = \frac{\omega_1 \cdot d_1}{2 \times 1000} = \frac{50,3 \times 79,59}{2 \times 1000} = 2 \text{ m/s}$$

Với tốc độ như vậy, cấp chính xác ăn khớp có thể là cấp "9", nhưng bởi vì đối với các bánh răng nghiêng không thể lấy cấp chính xác nhỏ hơn 8, nên ta lấy cấp chính xác là 8.

5. Xác định hệ số tải trọng phụ thực tế

Giá trị thực tế của hệ số tải trọng phụ:

$$K = K_\beta \cdot K_v$$

trong đó: K_β - hệ số tập trung tải trọng theo chiều dài răng (bảng 17-4);

K_v - hệ số tải trọng động (bảng 17-5).

Bảng 17-4. Giá trị K_β của bộ truyền bánh răng thẳng và nghiêng có chạy mài (tử số) và không chạy mài (mẫu số)

b/d	Giá trị K_β theo vị trí bánh nhỏ			
	Đối xứng đối với gối tựa	Gắn một gối tựa; trục rất cứng	Gắn một gối tựa; trục có độ cứng vừa	Đặt trên đầu thừa
0,2	1/1	1/2	1,05/1,025	1,1/1,05
0,4	1/1	1,05/1,025	1,15/1,075	1,2/1,1
0,8	1,05/1,025	1,15/1,075	1,3/1,15	1,5/1,25
1,2	1,15/1,075	1,25/1,125	1,4/1,2	-
1,6	1,25/1,125	1,4/1,2	-	-
2,0	1,45/1,225	-	-	-

Bảng 17-5. Hệ số K_v đối với bánh răng thẳng (tử số) và răng nghiêng (mẫu số)

Cấp chính xác	HB	Giá trị K_v theo tốc độ v , m/s			
		đến 3	3 ÷ 8	8 ÷ 12,5	12,5 ÷ 30
6	≤ 350	1/1	1,2/1	1,3/1,1	1,45/1,2
	> 350	1/1	1,15/1	1,25/1	1,35/1
7	≤ 350	1,15/1	1,35/1	1,45/1,2	-/1,3
	> 350	1,15/1	1,25/1	1,35/1,1	-/1,1
8	≤ 350	1,25/1,1	1,45/1,3	-/1,4	-
	> 350	1,2/1,1	1,35/1,2	-/1,3	-

Khi $\frac{h_1}{d_1} = \frac{85}{79,59} = 1,07$ đối với các bánh răng có độ cứng HB ≤ 350. Khi đạt chúng đối xứng đối với gối tựa $K_\beta = 1,1$. Khi $v = 2$ m/s, HB ≤ 350, độ chính xác bậc 8 đối với các bánh răng $K_v = 1,2$.

Khi đó: $K = 1,1 \times 1,2 = 1,32$

6. Kiểm tra về mỏi theo ứng suất tiếp xúc

Công thức xác định ứng suất tiếp xúc lớn nhất đối với bánh răng nghiêng có dạng:

$$\sigma_H = \frac{0,34 \cdot Z_K}{A \cdot i_r} \cdot \sqrt{\frac{(i_r + 1) \cdot K_{\alpha H} \cdot K \cdot M_2}{b_1}}$$

Với σ_H (MPa); M_2 (N.m); A (m); b_1 (m).

Sau khi thay vào công thức này các giá trị bằng số ta có:

$$\sigma_H = \frac{0,34 \times 0,8}{0,2 \times 4} \times \sqrt{\frac{5 \times 1,1 \times 1,32 \times 725}{0,08}} = 436 \text{ MPa}$$

Sai số của ứng suất tiếp xúc thực tế này với ứng suất tiếp xúc cho phép là:

$$\Delta\sigma_H = \frac{436 - 452}{452} \times 100\% = -3,54\% < +5\%$$

Sai số này cho phép. Nếu độ lệch của σ_H với giá trị cho phép là không được phép thì việc tính toán được làm lại sau khi thay đổi khoảng cách trục.

7. Kiểm tra độ bền tiếp xúc theo sự vượt tải ngắn hạn

Ứng suất tiếp xúc tính toán khi vượt tải:

$$\sigma_{HM} = \sigma_H \sqrt{\gamma} = 436 \times \sqrt{2,2} = 646 \text{ MPa}$$

Ứng suất giới hạn cho phép đối với các bánh răng được tôi thể tích và hoá tốt $[\sigma_{HPM}] = 2,8 \cdot \sigma_{ch}$, đối với các răng được thấm cacbon thì $[\sigma_{HPM}] = 40 \text{ HRC}$, đối với các răng được thấm nitơ $[\sigma_{HPM}] = 30 \text{ HRC}$.

Trong trường hợp khảo sát:

$$[\sigma_{HPM}] = 2,8 \cdot \sigma_{ch} = 2,8 \times 490 = 1370 \text{ MPa}$$

Vì $\sigma_{HM} < \sigma_{HPM}$, nên độ bền theo sự vượt tải ngắn hạn là đảm bảo.

8. Xác định ứng suất cho phép khi uốn

Số chu kỳ chịu tải khi tính toán độ bền uốn như sau:

$$N = 60n_1 \cdot T \cdot \sum \left(\frac{M_i}{M_{\max}} \right)^m \cdot \frac{t_i}{T}$$

trong đó $m = 6$ đối với răng làm bằng thép thường hoá và hoá tốt, đồng thời đối với các răng được hoá bền bề mặt có các rãnh tròn được làm bóng, $m = 9$ đối với các răng làm bằng thép tôi.

Trong bài toán này chúng ta lấy $m = 6$ đối với bánh nhỏ và bánh lớn.

$$\begin{aligned} N_{\sigma_1} &= 60 \times 481 \times 24000 \times (0,7^6 \times 0,3 + 1^6 \times 0,1 + 0,3^6 \times 0,6) \\ &= 9,5 \cdot 10^7 \end{aligned}$$

$$N_{\sigma_2} = \frac{N_{\sigma_1}}{i_r} = \frac{9,5 \cdot 10^7}{4} = 2,4 \cdot 10^7$$

Ứng suất cho phép khi uốn với sự làm việc lâu dài một phía và hai phía:

$$[\sigma_{0PF}] = \frac{\sigma_0 \cdot Y_R \cdot Y_y \cdot Y_M}{n} \cdot \sqrt[m]{\frac{N_0}{N_\sigma}}$$

$$[\sigma_{-1PF}] = \frac{\sigma_{-1} \cdot Y_R \cdot Y_y \cdot Y_M}{n} \cdot \sqrt[m]{\frac{N_0}{N_\sigma}}$$

σ_0 - giới hạn mỏi khi răng làm việc một phía (chu trình mạch động);

$\sigma_{-1} = \frac{\sigma_0}{1,2 + 1,6}$ - giới hạn mỏi khi răng làm việc hai phía (tải trọng thuận nghịch), hệ số 1,2 lấy đối với thép được nitơ hoá, 1,4 đối với thép thấm cacbon và hydrocacbon, 1,6 đối với các răng làm bằng thép khác;

Y_R - hệ số kể đến độ nhám bề mặt (khi $R_Z = 10 + 40 \mu\text{m}$ đối với răng tôi thể tích và hoá tốt $Y_R = 0,85 + 0,95$, khi đánh bóng thô sau xementit và tôi $Y_R = 0,65 + 0,70$, khi đánh bóng tinh $Y_R = 0,8$);

Y_y - hệ số kể đến sự hoá bền bằng cơ học (phun bi sau khi xementit và tôi $Y_y = 1,1 + 1,3$);

Y_M - hệ số kích thước (với đường kính ngoài $d \leq 400 \text{ mm}$ và môđun $m \leq 10 \text{ mm}$ thì $Y_M = 1$; $n = n_1 n_2 n_3$ - hệ số an toàn (n_1 được chọn phụ thuộc vào xác suất làm việc không an toàn; $n_2 = 1,3$ chỉ đối với phối đúc; $n_3 > 1$ đối với chế độ làm việc trong điều kiện có sự ăn mòn và nhiệt độ cao; $N_0 = (2 + 5) \cdot 10^6$ - số chu kỳ ứng suất trước điểm uốn của đường cong mỏi (số chu kỳ cơ sở); nếu $N_\sigma > N_0$, nghĩa là chi tiết làm việc trong vùng nằm ngang của đường cong mỏi, thì tính toán như với chế độ ứng suất không đổi và lấy $\sqrt[m]{\frac{N_0}{N_\sigma}} = 1$).

Trong bài toán này $\sigma_{01} = 1,8\text{HB} = 1,8 \times 257 = 462 \text{ MPa}$ và $\sigma_{02} = 1,8\text{HB} = 1,8 \times 215 = 387 \text{ MPa}$; $Y_R = 1$; $Y_y = 1$; $Y_M = 1$; $n = 1,75$.

$N_{\sigma_1} = 9,5 \cdot 10^7 > N_0 = 0,3 \cdot 10^7$ và $N_{\sigma_2} = 2,4 \cdot 10^7 > N_0 = 0,3 \cdot 10^7$, vì vậy

$$[\sigma_{0PF1}] = \frac{462 \times 1 \times 1 \times 1}{1,75} \times 1 = 264 \text{ MPa}$$

$$[\sigma_{0PF2}] = \frac{387 \times 1 \times 1 \times 1}{1,75} \times 1 = 221 \text{ MPa}$$

9. Tính toán kiểm tra khi uốn

Số răng tương đương:

$$Z_{01} = \frac{Z_1}{\cos^3 \beta} = \frac{39}{0,98^3} = 41,4$$

$$Z_{02} = \frac{Z_2}{\cos^3 \beta} = \frac{175}{0,98^3} = 166,7$$