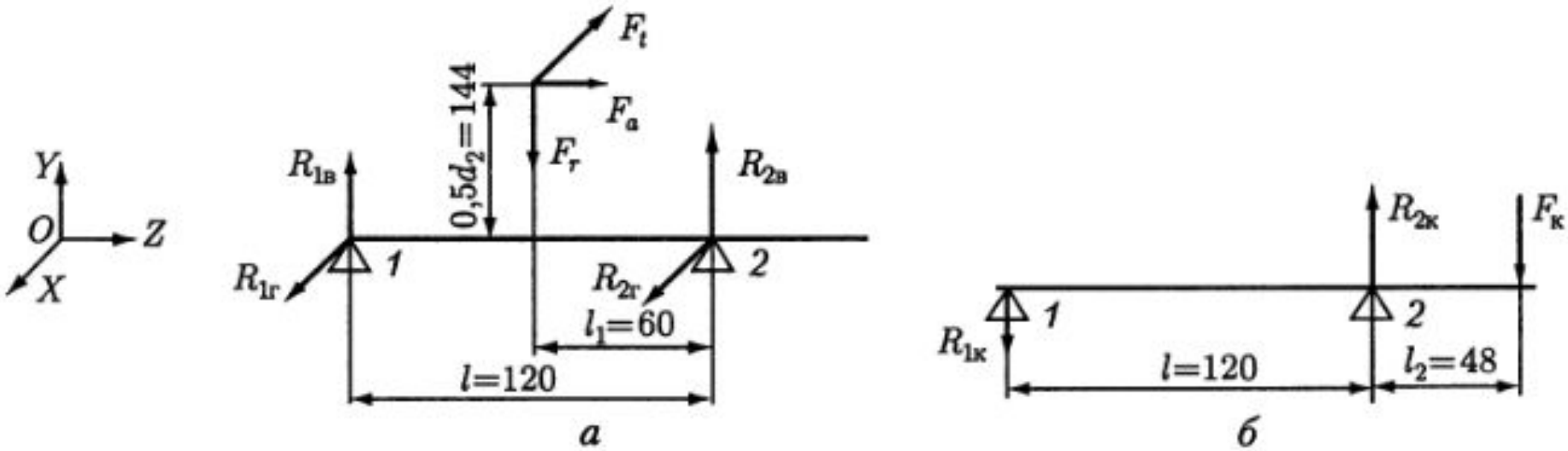
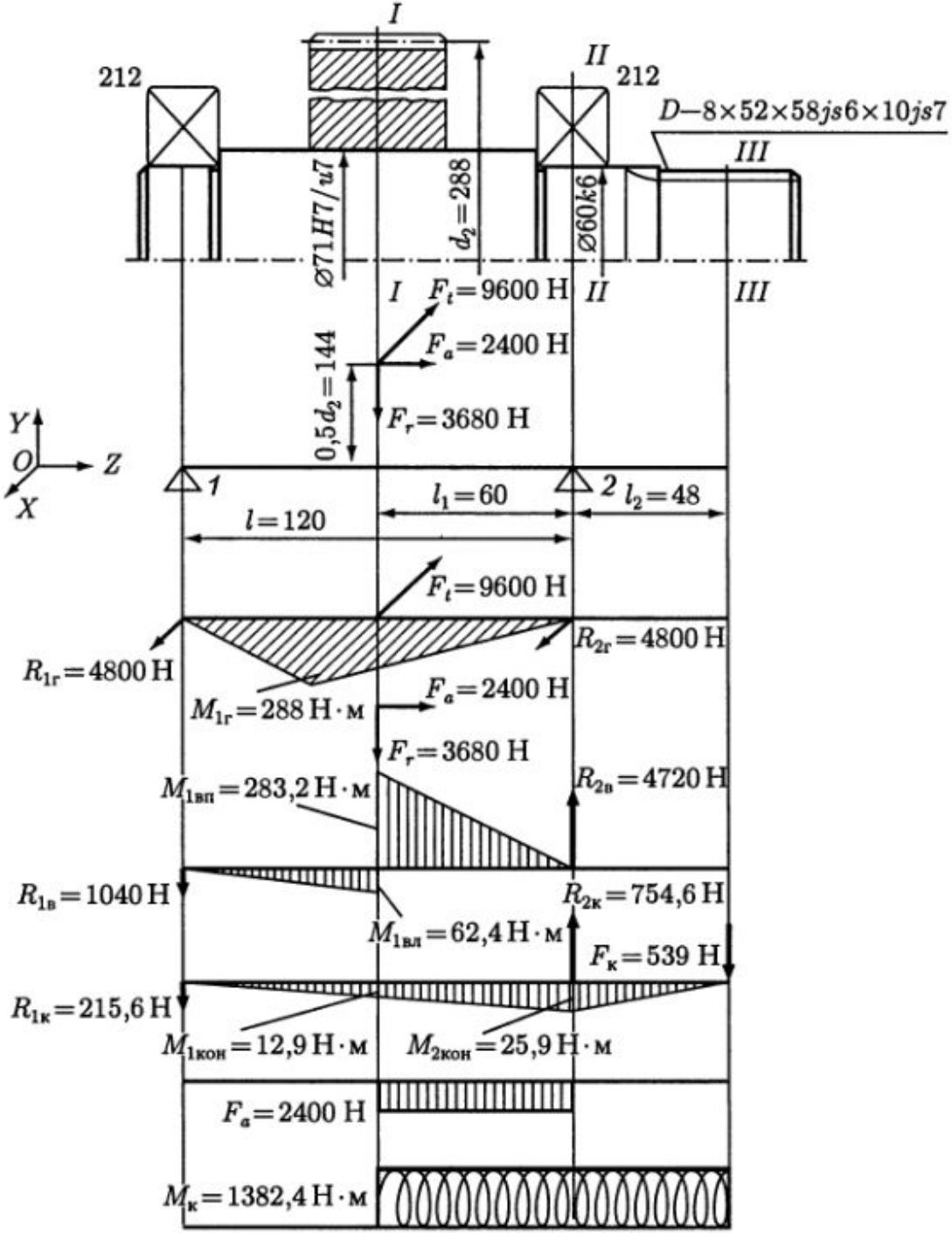
Калужский филиал
ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

Практическое занятие

Расчет валов

Расчетная схема




I
II
212
212
D–8×52×58js6×10js7
III
Ø71H7/u7
d2=288
Ø60k6
I
Ft=9600 Н
II
III
Fa=2400 Н
0,5d2=144
Fr=3680 Н
Y
O
Z
X
1
2
l1=60
l2=48
l=120
Ft=9600 Н
R1г=4800 Н
R2г=4800 Н
M1г=288 Н·м
Fa=2400 Н
Fr=3680 Н
M1вп=283,2 Н·м
R2в=4720 Н
R1в=1040 Н
R2к=754,6 Н
M1вл=62,4 Н·м
Fк=539 Н
R1к=215,6 Н
M1кон=12,9 Н·м
M2кон=25,9 Н·м
Fa=2400 Н
Mк=1382,4 Н·м

Назначение материала

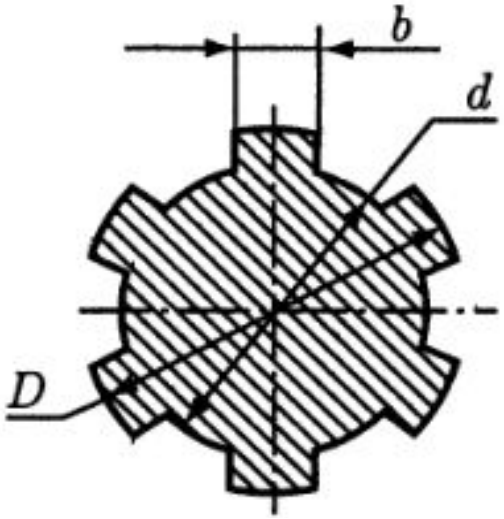
Марка стали	Диаметр заготовки, мм	Твердость HB (не менее)	Механические характеристики, МПа					Коэффициент ψ_τ
			$\sigma_в$	$\sigma_т$	$\tau_т$	σ_{-1}	τ_{-1}	
Ст5	Любой	190	520	280	150	220	130	0,06
45	≤ 120	240	780	540	290	360	200	0,09
	≤ 80	270	900	650	390	410	230	0,10
40Х	≤ 200	240	790	640	380	370	210	0,09
	≤ 120	270	900	750	450	410	240	0,10
40ХН	≤ 200	270	920	750	450	420	230	0,10
20Х	≤ 120	197	650	400	240	310	170	0,07
12ХН3А	≤ 120	260	950	700	490	430	240	0,10
18ХГТ	≤ 60	330	1150	950	660	500	280	0,12

Решение

1. Определение внутренних силовых факторов.

Крутящий момент:

$$M_к = T = F_t \cdot \frac{d_2}{2} = 9600 \cdot \frac{288 \cdot 10^{-3}}{2} = 1382,4\ Н \cdot м$$



Прямобочные шлицы

Сечение I-I

1) изгибающие моменты:

- в плоскости *XOZ*

$$M_{1г} = R_{2г} l_1 10^{-3} = 4800 \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 288 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- в плоскости *YOZ* слева от сечения

$$M_{1вл} = R_{1в}(l - l_1) 10^{-3} = 1040(120 - 60) 10^{-3} = 62{,}4 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- в плоскости *YOZ* справа от сечения

$$M_{1вп} = R_{2в} l_1 10^{-3} = 4720 \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 283{,}2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- момент от консольной нагрузки

$$M_{1кон} = R_{1к}(l - l_1)10^{-3} = 215{,}6(120 - 60)10^{-3} = 12{,}9 \text{ Н·м.}$$

<u>*Суммарный изгибающий момент:*</u>

$$M_1 = \sqrt{M_{1г}^2 + M_{1вп}^2} + M_{1кон} = \sqrt{288^2 + 283{,}2^2} + 12{,}9 = 416{,}8 \text{ Н·м.}$$

2) крутящий момент:

$M_{к1} = M_к = 1382{,}4\ Н \cdot м$

3) осевая сила:

$F_{a1} = F_a = 2400\ Н$

Сечение II-II

1) изгибающий момент:

$$M_2 = M_{2кон} = 10^{-3}\ F_к l_2 = 10^{-3} \cdot 539 \cdot 48 = 25{,}9\ Н \cdot м.$$

2) крутящий момент: $M_{к2} = M_к = 1382{,}4\ Н \cdot м$

3) осевая сила: $F_{a2} = F_a = 2400\ Н$

Сечение III-III

крутящий момент: $M_{к3} = M_к = 1382{,}4\ Н \cdot м$

2. Вычисление геометрических характеристик опасных сечений вала

Сечение I-I

$$W_1 = \pi d^3/32 = 3{,}14 \cdot 71^3/32 = 35\,120 \text{ мм}^3;$$

$$W_{к1} = \pi d^3/16 = 3{,}14 \cdot 71^3/16 = 70\,240 \text{ мм}^3;$$

$$A_1 = \pi d^2/4 = 3{,}14 \cdot 71^2/4 = 3957 \text{ мм}^2.$$

Сечение II-II

$$W_2 = \pi d^3/32 = 3{,}14 \cdot 60^3/32 = 21\,195 \text{ мм}^3;$$

$$W_{к2} = \pi d^3/16 = 3{,}14 \cdot 60^3/16 = 42\,390 \text{ мм}^3;$$

$$A_2 = \pi d^2/4 = 3{,}14 \cdot 60^2/4 = 2826 \text{ мм}^2.$$

Сечение III-III

$$W_{к3} = 2W = 2 \cdot 15540 = 31080 мм^3$$

3. Расчет вала на статическую прочность

Сечение I-I

Напряжение изгиба с растяжением (сжатием) σ_1 и напряжение кручения τ_1:

$$\sigma_1 = 10^3 K_п M_1 / W_1 + K_п F_{a1} / A_1 = 10^3 \cdot 2,2 \cdot 416,8 / 35\,120 + 2,2 \cdot 2400 / 3957 = 27,4 \text{ МПа};$$

$$\tau_1 = 10^3 K_п M_{к1} / W_{к1} = 10^3 \cdot 2,2 \cdot 1382,4 / 70\,240 = 43,3 \text{ МПа}.$$

Частные коэффициенты запаса прочности по нормальным и касательным напряжениям:

$$S_{т\sigma 1} = \sigma_т / \sigma_1 = 650 / 27,4 = 23,7;$$

$$S_{т\tau 1} = \tau_т / \tau_1 = 390 / 43,3 = 9,0.$$

Общий коэффициент запаса прочности по пределу текучести:

$$S_{т1} = S_{т\sigma 1} S_{т\tau 1} \Big/ \sqrt{S_{т\sigma 1}^2 + S_{т\tau 1}^2} = 23,7 \cdot 9,0 \Big/ \sqrt{23,7^2 + 9,0^2} = 8,4.$$

Сечение II-II

Напряжение изгиба с растяжением (сжатием) σ_2 и напряжение кручения τ_2:

$$\sigma_2 = 10^3 K_п M_2 / W_2 + K_п F_{a2} / A_2 = 10^3 \cdot 2,2 \cdot 25,9 / 21\,195 + 2,2 \cdot 2400 / 2826 = 4,6 \text{ МПа};$$

$$\tau_2 = 10^3 K_п M_{к2} / W_{к2} = 10^3 \cdot 2,2 \cdot 1382,4 / 42\,390 = 71,7 \text{ МПа}.$$

Частные коэффициенты запаса прочности по нормальным и касательным напряжениям:

$$S_{т\sigma 2} = \sigma_т / \sigma_2 = 650 / 4,6 = 141,3;$$

$$S_{т\tau 2} = \tau_т / \tau_2 = 390 / 71,7 = 5,44.$$

Общий коэффициент запаса прочности по пределу текучести:

$$S_{т2} = S_{т\sigma 2} S_{т\tau 2} / \sqrt{S_{т\sigma 2}^2 + S_{т\tau 2}^2} = 141,3 \cdot 5,44 / \sqrt{141,3^2 + 5,44^2} = 5,4.$$

Сечение III-III

Напряжение кручения:

$$\tau_з = 10^3 K_п M_{кз} / W_{кз} = 10^3 \cdot 2,2 \cdot 1382,4 / 31\,080 = 97,9 \text{ МПа}.$$

Общий коэффициент запаса прочности:

$$S_{тз} = S_{ттз} = \tau_т / \tau_з = 390 / 97,9 = 3,98.$$

Коэффициенты концентрации напряжений и коэффициенты влияния абсолютных размеров поперечных сечений для соединений с натягом (сечение I-I)

Диаметр вала d, мм	$K_\sigma/K_{d\sigma}$ при $\sigma_в$, МПа				$K_\tau/K_{d\tau}$ при $\sigma_в$, МПа			
	500	700	900	1200	500	700	900	1200
30	2,6	3,3	4,0	5,1	1,5	2,0	2,4	3,05
40	2,75	3,5	4,3	5,4	1,65	2,1	2,6	3,25
50	2,9	3,7	4,5	5,7	1,75	2,2	2,7	3,4
60	3,0	3,85	4,7	5,95	1,8	2,3	2,8	3,55
70	3,1	4,0	4,85	6,15	1,85	2,4	2,9	3,7
80	3,2	4,1	4,95	6,3	1,9	2,45	3,0	3,8
90	3,3	4,2	5,1	6,45	1,95	2,5	3,05	3,9
100	3,35	4,3	5,2	6,6	2,0	2,55	3,1	3,95

Коэффициенты влияния качества поверхности

Вид механической обработки	Параметр шероховатости Ra, мкм	$K_{F\sigma}$ при $\sigma_в$, МПа		$K_{F\tau}$ при $\sigma_в$, МПа	
		≤ 700	> 700	≤ 700	> 700
Шлифование тонкое	до 0,2	1	1	1	1
Обтачивание тонкое	0,2 ... 0,8	0,99 ... 0,93	0,99 ... 0,91	0,99 ... 0,96	0,99 ... 0,95
Шлифование чистовое	0,8 ... 1,6	0,93 ... 0,89	0,91 ... 0,86	0,96 ... 0,94	0,95 ... 0,92
Обтачивание чистовое	1,6 ... 3,2	0,89 ... 0,86	0,86 ... 0,82	0,94 ... 0,92	0,92 ... 0,89

Коэффициент влияния поверхностного упрочнения

Вид упрочнения поверхности вала	Значения K_V при:		
	$K_\sigma = 1{,}0$	$K_\sigma = 1{,}1 \ldots 1{,}5$	$K_\sigma \geq 1{,}8$
Закалка ТВЧ	1,3 ... 1,6	1,6 ... 1,7	2,4 ... 2,8
Азотирование	1,15 ... 1,25	1,3 ... 1,9	2,0 ... 3,0
Накатка роликом	1,2 ... 1,4	1,5 ... 1,7	1,8 ... 2,2
Дробеструйный наклеп	1,1 ... 1,3	1,4 ... 1,5	1,6 ... 2,5
Без упрочнения	1,0	1,0	1,0

4. Расчет вала на сопротивление усталости

Сечение I-I

Амплитуды напряжений и среднее напряжение цикла:

$$\sigma_{a1} = \sigma_{и1} = 10^3 M_1 / W_1 = 10^3 \cdot 416,8 / 35\,120 = 11,9 \text{ МПа};$$
$$\tau_{a1} = \tau_{к1}/2 = 10^3 M_{к1} / (2W_{к1}) = 10^3 \cdot 1382,4 / (2 \cdot 70\,240) = 9,84 \text{ МПа};$$
$$\tau_{m1} = \tau_{a1} = 9,84 \text{ МПа}.$$

Коэффициенты снижения предела выносливости:

$$K_{\sigma D} = (K_\sigma / K_{d\sigma} + 1/K_{F\sigma} - 1)/K_V = (4,85 + 1/0,91 - 1)/1 = 4,95;$$
$$K_{\tau D} = (K_\tau / K_{d\tau} + 1/K_{F\tau} - 1)/K_V = (2,9 + 1/0,95 - 1)/1 = 2,95.$$

Пределы выносливости вала:

$$\sigma_{-1D} = \sigma_{-1}/K_{\sigma D} = 410/4,95 = 82,8 \text{ МПа};$$
$$\tau_{-1D} = \tau_{-1}/K_{\tau D} = 230/2,95 = 78,0 \text{ МПа}.$$

Коэффициент влияния асимметрии цикла:

$$\psi_{\tau D} = \psi_\tau / K_{\tau D} = 0{,}1/2{,}95 = 0{,}034.$$

Коэффициенты запаса по нормальным и касательным напряжениям:

$$S_\sigma = \sigma_{-1D}/\sigma_{a1} = 82{,}8/11{,}9 = 6{,}96;$$
$$S_\tau = \tau_{-1D}/(\tau_{a1} + \psi_{\tau D}\tau_{m1}) = 78{,}0/(9{,}84 + 0{,}034 \cdot 9{,}84) = 7{,}67.$$

Коэффициент запаса прочности

$$S = S_\sigma S_\tau \Big/ \sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2} = 6{,}96 \cdot 7{,}67 \Big/ \sqrt{6{,}96^2 + 7{,}67^2} = 5{,}1.$$

Коэффициенты концентрации напряжений и коэффициенты влияния абсолютных размеров поперечных сечений для соединений с натягом (сечение II-II)

Диаметр вала d, мм	$K_\sigma/K_{d\sigma}$ при $\sigma_в$, МПа				$K_\tau/K_{d\tau}$ при $\sigma_в$, МПа			
	500	700	900	1200	500	700	900	1200
30	2,6	3,3	4,0	5,1	1,5	2,0	2,4	3,05
40	2,75	3,5	4,3	5,4	1,65	2,1	2,6	3,25
50	2,9	3,7	4,5	5,7	1,75	2,2	2,7	3,4
60	3,0	3,85	4,7	5,95	1,8	2,3	2,8	3,55
70	3,1	4,0	4,85	6,15	1,85	2,4	2,9	3,7
80	3,2	4,1	4,95	6,3	1,9	2,45	3,0	3,8
90	3,3	4,2	5,1	6,45	1,95	2,5	3,05	3,9
100	3,35	4,3	5,2	6,6	2,0	2,55	3,1	3,95

Коэффициенты влияния качества поверхности

Вид механической обработки	Параметр шероховатости Ra, мкм	$K_{F\sigma}$ при $\sigma_в$, МПа		$K_{F\tau}$ при $\sigma_в$, МПа	
		≤ 700	> 700	≤ 700	> 700
Шлифование тонкое	до 0,2	1	1	1	1
Обтачивание тонкое	0,2 ... 0,8	0,99 ... 0,93	0,99 ... 0,91	0,99 ... 0,96	0,99 ... 0,95
Шлифование чистовое	0,8 ... 1,6	0,93 ... 0,89	0,91 ... 0,86	0,96 ... 0,94	0,95 ... 0,92
Обтачивание чистовое	1,6 ... 3,2	0,89 ... 0,86	0,86 ... 0,82	0,94 ... 0,92	0,92 ... 0,89

Коэффициент влияния поверхностного упрочнения

Вид упрочнения поверхности вала	Значения K_V при:		
	$K_\sigma = 1{,}0$	$K_\sigma = 1{,}1 \ldots 1{,}5$	$K_\sigma \geq 1{,}8$
Закалка ТВЧ	1,3 ... 1,6	1,6 ... 1,7	2,4 ... 2,8
Азотирование	1,15 ... 1,25	1,3 ... 1,9	2,0 ... 3,0
Накатка роликом	1,2 ... 1,4	1,5 ... 1,7	1,8 ... 2,2
Дробеструйный наклеп	1,1 ... 1,3	1,4 ... 1,5	1,6 ... 2,5
Без упрочнения	1,0	1,0	1,0

Сечение II-II

Амплитуды напряжений и среднее напряжение цикла:

$$\sigma_{a2} = \sigma_{и2} = 10^3 M_2 / W_2 = 25,9 \cdot 10^3 / 21\,195 = 1,22 \text{ МПа};$$
$$\tau_{a2} = \tau_{к2} / 2 = 10^3 M_{к2} / (2W_{к2}) = 1382,4 \cdot 10^3 / (2 \cdot 42\,390) = 16,3 \text{ МПа};$$
$$\tau_{m2} = \tau_{a2} = 16,3 \text{ МПа}.$$

Коэффициенты снижения предела выносливости:

$$K_{\sigma D} = (K_\sigma / K_{d\sigma} + 1/K_{F\sigma} - 1)/K_V = (4,7 + 1/0,88 - 1)/1 = 4,84;$$
$$K_{\tau D} = (K_\tau / K_{d\tau} + 1/K_{F\tau} - 1)/K_V = (2,8 + 1/0,935 - 1)/1 = 2,87.$$

Пределы выносливости вала:

$$\sigma_{-1D} = \sigma_{-1} / K_{\sigma D} = 410/4,84 = 84,7 \text{ МПа};$$
$$\tau_{-1D} = \tau_{-1} / K_{\tau D} = 230/2,87 = 80,1 \text{ МПа}.$$

Коэффициент влияния асимметрии цикла:

$$\psi_{\tau D} = \psi_\tau / K_{\tau D} = 0{,}1/2{,}87 = 0{,}035.$$

Коэффициенты запаса по нормальным и касательным напряжениям:

$$S_\sigma = \sigma_{-1D}/\sigma_{a2} = 84{,}7/1{,}22 = 69{,}4;$$
$$S_\tau = \tau_{-1D}/(\tau_{a2} + \psi_{\tau D}\tau_{m2}) = 80{,}1/(16{,}3 + 0{,}035 \cdot 16{,}3) = 4{,}75.$$

Коэффициент запаса прочности

$$S = S_\sigma S_\tau / \sqrt{S_\sigma^2 + S_\tau^2} = 69{,}4 \cdot 4{,}75 / \sqrt{69{,}4^2 + 4{,}75^2} = 4{,}74.$$

Коэффициенты концентрации напряжений и коэффициенты влияния абсолютных размеров поперечных сечений для шлицевого соединения (сечение III-III)

$\sigma_в$, МПа	K_σ для		K_τ для шлицев		K_τ для резьбы
	шлицев	резьбы	прямобочных	эвольвентных	
500	1,45	1,8	2,25	1,43	1,35
700	1,6	2,2	2,5	1,49	1,7
900	1,7	2,45	2,65	1,55	2,1
1200	1,75	2,9	2,8	1,6	2,35

Коэффициенты влияния абсолютных размеров поперечного сечения

Напряженное состояние и материал	$K_{d\sigma}(K_{d\tau})$ при диаметре вала d, мм				
	20	30	40	50	70
Изгиб для углеродистой стали	0,92	0,88	0,85	0,81	0,76
Кручение для всех сталей и изгиб для легированной стали	0,83	0,77	0,73	0,70	0,65

У нас 52х58, откуда примем примерно 0,68

Коэффициенты влияния качества поверхности

Вид механической обработки	Параметр шероховатости Ra, мкм	$K_{F\sigma}$ при $\sigma_в$, МПа		$K_{F\tau}$ при $\sigma_в$, МПа	
		≤ 700	> 700	≤ 700	> 700
Шлифование тонкое	до 0,2	1	1	1	1
Обтачивание тонкое	0,2 ... 0,8	0,99 ... 0,93	0,99 ... 0,91	0,99 ... 0,96	0,99 ... 0,95
Шлифование чистовое	0,8 ... 1,6	0,93 ... 0,89	0,91 ... 0,86	0,96 ... 0,94	0,95 ... 0,92
Обтачивание чистовое	1,6 ... 3,2	0,89 ... 0,86	0,86 ... 0,82	0,94 ... 0,92	0,92 ... 0,89

Коэффициент влияния поверхностного упрочнения

Вид упрочнения поверхности вала	Значения K_V при:		
	$K_\sigma = 1{,}0$	$K_\sigma = 1{,}1 \ldots 1{,}5$	$K_\sigma \geq 1{,}8$
Закалка ТВЧ	1,3 ... 1,6	1,6 ... 1,7	2,4 ... 2,8
Азотирование	1,15 ... 1,25	1,3 ... 1,9	2,0 ... 3,0
Накатка роликом	1,2 ... 1,4	1,5 ... 1,7	1,8 ... 2,2
Дробеструйный наклеп	1,1 ... 1,3	1,4 ... 1,5	1,6 ... 2,5
Без упрочнения	1,0	1,0	1,0

Сечение III-III

Амплитуда напряжений и среднее напряжение цикла:

$$\tau_{a3} = \tau_{к3}/2 = 10^3 M_{к3}/(2W_{к3}) = 1382,4 \cdot 10^3/(2 \cdot 31\,080) = 22,2 \text{ МПа};$$
$$\tau_{m3} = \tau_{a3} = 22,2 \text{ МПа}.$$

Коэффициенты снижения предела выносливости:

$$K_{\tau D} = (K_\tau/K_{d\tau} + 1/K_{F\tau} - 1)/K_V = (2,65/0,68 + 1/0,95 - 1)/1 = 3,95.$$

Пределы выносливости вала:

$$\tau_{-1D} = \tau_{-1}/K_{\tau D} = 230/3,95 = 58,2 \text{ МПа}.$$

Коэффициент влияния асимметрии цикла:

$$\psi_{\tau D} = \psi_{\tau} / K_{\tau D} = 0,1/3,95 = 0,025.$$

Коэффициент запаса по касательному напряжению:

$$S = S_{\tau} = \tau_{-1D} / (\tau_{a3} + \psi_{\tau D} \tau_{m3}) = 58,2/(22,2 + 0,025 \cdot 22,2) = 2,6.$$