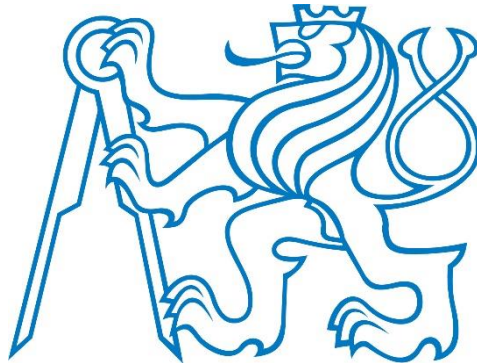


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Výpočet převodového hřídele na únavu – návrh úprav pro
snížení koncentrace napětí**

**(Calculation of the transmission shaft fatigue – desing
modifications to reduce stress concentration)**

Autor:

Marek CYPZIRSCH

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Jan Řezníček, CSc.

Akademický rok:

2014/2015



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Technická 4, 166 07 Praha 6

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: Marka CYPZIRSCHE
program: Teoretický základ strojního inženýrství
obor: bez oboru

Název tématu:

Výpočet převodového hřídele na únavu – návrh úprav pro snížení koncentrace napětí

Title:

Calculation of the transmission shaft fatigue – design modifications to reduce stress concentration

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši přístupů k určování koeficientů koncentrace napětí ve strojních součástech z běžných konstrukčních materiálů
2. Aplikujte nalezené metody a přístupy na vybrané součásti (hřídele) převodovky navrhované v rámci Konstrukčního cvičení
3. Zhodnoťte jednotlivé přístupy výpočtů a navrhněte možné úpravy vedoucí ke zlepšení únavových vlastností řešeného hřídele

Rozsah grafických prací: Výkresy řešených hřídelů

Rozsah průvodní zprávy: 25 stran

Seznam odborné literatury:

1. Michalec, J. a kol. (2004) Pružnost a pevnost II. ČVUT v Praze, skripta.
2. www.pruznost.unas.cz – podklady pro únavové výpočty
3. www.efatigue.com – stránka únavových výpočtů

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Řezníček, CSc.


Datum zadání bakalářské práce: 30. 4. 2015

Datum odevzdání bakalářské práce: 19. 6. 2015

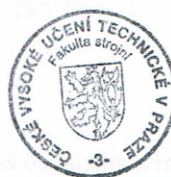
Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé

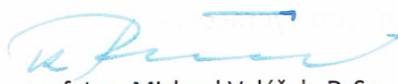
Posluchač bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Zadání diplomové práce převzal dne:


.....
diplomant


.....
prof. Ing. Milan Růžička, CSc.
vedoucí Ú 12 105




.....
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan FS ČVUT v Praze

V Praze dne 30. 4. 2015

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že bakalářskou práci „Výpočet převodového hřídele na únavu – návrh úprav pro snížení koncentrace napětí“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím podkladů a informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu citované literatury na konci práce.

V Praze dne 16. června 2015

.....

Marek CYPZIRSCH

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing Janu Řezníčkovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Marek CYPZIRSCH
Název Bakalářské práce:	Výpočet převodového hřídele na únavu – návrh úprav pro snížení koncentrace napětí
Anglický název:	Calculation of the transmission shaft fatigue – desing modifications to reduce stress concentration
Rok:	2015
Obor studia:	Teoretický základ strojího inženýrství
Ústav/odbor:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky / Odbor pružnosti a pevnosti
Vedoucí bakalářské práce:	doc. Ing. Jan Řezníček, CSc.
Konzultant:	doc. Ing. Jan Řezníček, CSc.
Bibliografické údaje:	počet stran 74 počet obrázků 47 počet tabulek 1 počet příloh 9
Klíčová slova:	únavu, napětí, bezpečnost, koncentrace
Keywords:	stress, tension, safety, concentration
Anotace:	Cílem této bakalářské práce je zhodnocení únavy materiálu u převodového hřídele navrhnutého v předmětu „Konstrukční cvičení“ a následně navrhnout konstrukčních úprav zajišťujících snížení koncentrace napětí v místě výpočtu.
Abstract:	The aim of this work is to evaluate fatigue on the proposed transmission shaft in the course "Design Exercise," and then propose structural modifications to ensure a reduction in the concentration of stress in the calculation.

OBSAH

Obsah	7
Seznam použitých OZNAČENÍ A zkratek	10
1 Namáhání při proměnném zatížení (únava) [1].....	11
1.1 Cyklické zatížení	12
2 Vruby [1].....	21
2.1 Součinitel tvaru	23
2.2 Součinitel vrubu	25
2.3 Součinitel vrubové citlivosti.....	26
2.4 Vliv velikosti	27
2.5 Vliv mechanické kvality povrchu	27
2.6 Vliv technologické úpravy povrchu	28
3 Shrnutí teorie	34
4 Výpočet.....	35
4.1 Místo prvního výpočtu	37
4.1.1 Výpočet únavové bezpečnosti za pomoci diagramů [1].....	37
4.1.2 Výpočet únavové bezpečnosti za pomoci internetové stránky www.efatigue.com [2].....	39
4.1.3 Výpočet únavové bezpečnosti pomocí podkaldů „Analytical strength assessment of components in technical engineering“ [3].....	41
4.1.4 Porovnání použitých metod	43
4.1.5 Souhrn.....	43
4.2 Místo druhého výpočtu	44
4.2.1 Výpočet únavové bezpečnosti za pomoci diagramů [1].....	44
4.2.2 Výpočet únavové bezpečnosti za použití internetové stránky www.efatigue.com [2].....	46

4.2.3	Výpočet únavové bezpečnosti pomocí podkladů „Analytical strength assessment of components in technical engineering“ [3].....	46
4.2.4	Porovnání použitých metod	47
4.2.5	Shrnutí.....	47
4.3	Místo třetího výpočtu	48
4.3.1	Výpočet únavové bezpečnosti za pomoci diagramů [1].....	48
4.3.2	Výpočet únavové bezpečnosti za pomoci internetové stránky www.efatigue.com [2].....	50
4.3.3	Výpočet únavové bezpečnosti pomocí podkladů „Analytical strength assessment of components in technical engineering“ [3].....	52
4.3.4	Porovnání použitých metod	54
4.3.5	Souhrn.....	54
4.4	Místo čtvrtého výpočtu.....	55
4.4.1	Výpočet únavové bezpečnosti za pomoci diagramů [1].....	55
4.4.2	Výpočet únavové bezpečnosti za pomoci internetové stránky www.efatigue.com [2].....	57
4.4.3	Výpočet únavové bezpečnosti pomocí podkladů „Analytical strength assessment of components in technical engineering“ [3].....	58
4.4.4	Porovnání použitých metod	60
4.4.5	Souhrn.....	60
5	Závěr.....	61
6	Bibliografie	62
7	Seznam obrázků	63
8	Seznam tabulek	65
9	Přílohy.....	66
9.1	Činitelé tvaru pro osazení hřídele namáhané krutem a ohybem [4]	66
9.2	Vliv poloměru vrubu na součinitele vrubové citlivosti ocelí [4]	66
9.1	Činitelé tvaru pro osazení hřídele namáhané krutem a ohybem [4] ...	67

9.2	Vliv poloměru vrubu na součinitele vrubové citlivosti ocelí [4]	68
9.3	Vliv jakosti povrchu [4].....	69
9.4	Součinitel velikosti dle Serensena při namáhání v ohybu a krutu [4]..	70
9.5	Souč. vrubu pro pero drážku při nam. ohybem nebo krutem [4].....	71
9.6	Činitelé tvaru pro hřídele s vrubem nam. krutem nebo ohybem [4]	72
9.7	Místo 1. výpočtu [2]	73
9.8	Místo 3. výpočtu [2]	74
9.9	Místo 4. výpočtu [2]	75

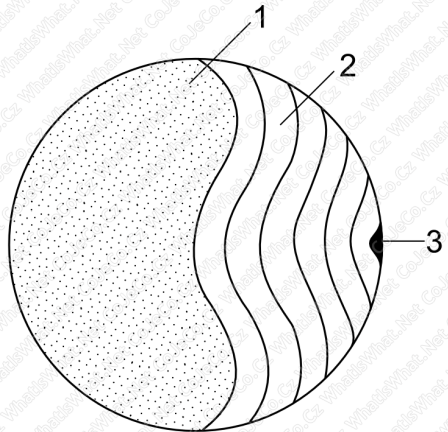


SEZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ A ZKRATEK

B	[mm]	šířka
D	[mm]	průměr
F	[N]	síla
g	[1]	gradient napětí
k	[1]	bezpečnost
M_o	[Nmm]	ohybový moment
M_k	[Nmm]	krouticí moment
N	[1]	počet cyklů
R	[1]	součinitel nesouměrnosti cyklu
t	[mm]	délka (velikost osazení)
α	[1]	součinitel tvaru
β	[1]	součinitel vrubu
γ	[1/MPa]	poměrný gradient
Δ	[MPa]	rozkmit
ε	[1]	součinitel vlivu velikosti
η	[1]	součinitel jakosti povrchu
ξ	[mm]	vzdálenost
ρ	[mm]	poloměr
σ	[MPa]	napětí (ohyb, tah, tlak)
τ	[MPa]	smykové napětí
ψ	[1]	konstanta
ω	[°]	úhel

1 NAMÁHÁNÍ PŘI PROMĚNNÉM ZATÍŽENÍ (ÚNAVA) [1]

Při řešení konstrukčních návrhů strojů se převážně počítalo se statickým zatížením materiálu. Tento výpočet je správný a potvrzovaly to i prováděné experimenty. Přesto při zatížení těchto součástí nejčastěji různé části strojů např.: hřídel, ozubené kolo, atd., dochází k lomům. Tyto lomy vznikají následkem proměnlivého zatížení. Tedy z praxe vychází, že klasický výpočet není dostačující pro proměnlivé zatížení, které stroj vytváří. Únavový lom má charakteristiku křehkého lomu, kde nejsou pozorovatelné trvalé deformace. (viz obr. 1.1)



Obrázek 1. 1 – schéma vzniku lomu [1]

1. – Hrubozrnný lom (statické dolomení průřezu). Když už trhlina dosáhne takové míry, že zbyde pouze profil, který už neunes ani statické zatížení, nastane náhlý statický lom s náznakem deformace.
2. – V této části je lom jemnozrnný (lasturovitý), v některých místech lesklý. Od vzájemných posuvů částic, bývá i zkorodovaný.
3. – Počáteční trhlina. Vzniká v místě koncentrace napětí. Převážně v povrchových vrstvách materiálu odkud se postupně šíří dále.

Vznikem trhlin a jejich šířením se zabývá tzv. fyzika kovů. I přes četné teorie a pokusy je vysvětlení stále neuspokojivé. Teorie se opírají o praktická měření. Při zkouškách se nemění krystalická struktura materiálu a ani napětí se nekonzcentruje v jedné části materiálu, jak se předpokládalo. Tedy označení „únavu materiálu“ je zcela chybné. Přesto se vžilo do podvědomí techniků a již tento název zůstává zachován. Hlavně je spojován s celou problematikou proměnlivého zatížení.

Tato problematika byla prvotně popsána Wöhlerem již v minulém století. Impulzem pro výzkum v této oblasti byly časté poruchy železničních náprav. I když tyto nápravy byly staticky dimenzovány s bezpečností $k = 5$. Praktickými zkouškami

Wöhler jako první dokázal, že za tyto poruchy může střídavé namáhání materiálu za jízdy. Položil tak základy k výzkumu „únavy“ materiálu.

1.1 CYKlickÉ ZATÍŽENÍ

Zatížení, které se v čase mění, se u strojů vyskytuje častěji než zatížení statické. Je způsobeno silami, které se během zatížení periodicky mění nebo silami neměnné velikosti při proměnlivé poloze zatěžované části.

Během zatěžování může být průběh napětí obecný, ovšem jeho tvar nemá znatelný vliv na výsledek zkoušky. Tento průběh obvykle nahrazujeme nám příjemnějším harmonickým (sinusovým) průběhem. Sinusový průběh lze také snadněji analyticky vyjádřit a lze ho při zkouškách snadno realizovat.

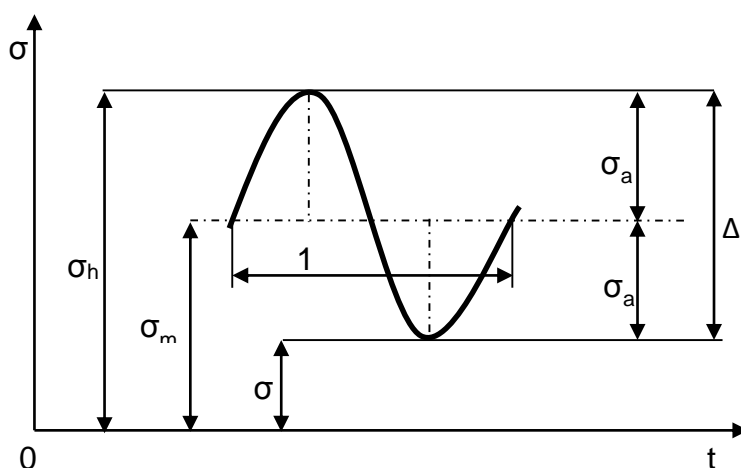
Napětí kolísá mezi maximální a minimální hodnotou. Průběh tohoto napětí je sinusovka. Tento průběh je dán superpozicí středního napětí a proměnlivé složky napětí o určité amplitudě. Dle normy ČSN 42 0302 značíme tato napětí následovně:

σ_h – horní napětí

σ_n – dolní napětí

σ_m – střední napětí

σ_a – amplituda



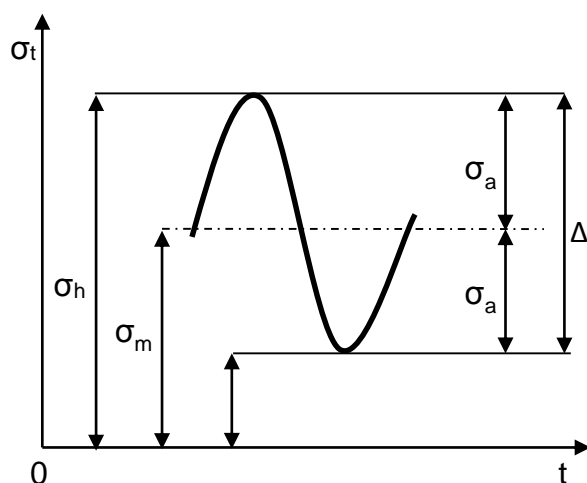
Obrázek 1. 2 - cyklické zatížení

Nutno ještě zmínit tzv. „součinitel nesouměrnosti cyklu“, který je vyjádřen poměrem napětí dolního k, napětí hornímu.

$$R = \frac{\sigma_n}{\sigma_h}$$

Druhy cyklického zatížení:

a) Napětí pulzující

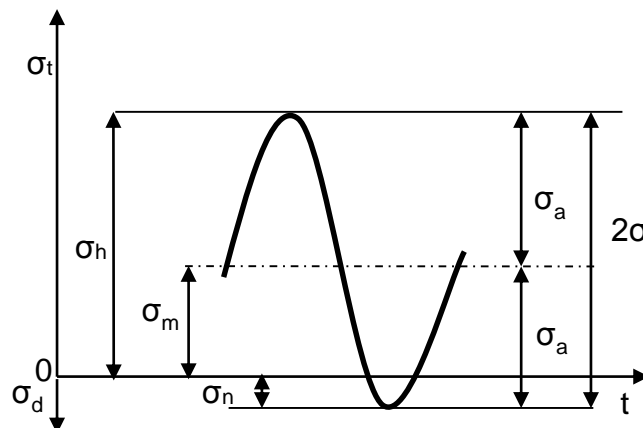


Obrázek 1. 3 – pulzující napětí

$$|\sigma_m| > \sigma_a; \Delta = 2 \cdot \sigma_a; \sigma_a, \sigma_m, \sigma_n > 0$$

$$0 < R < 1$$

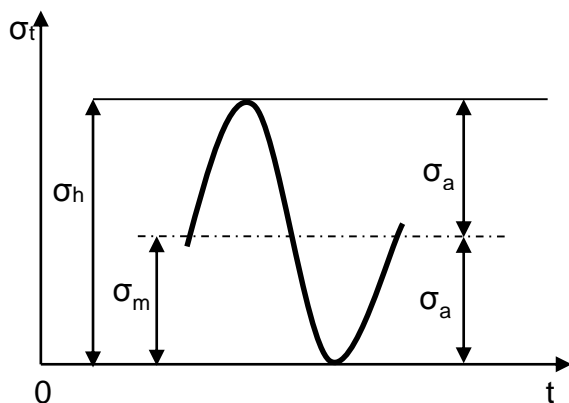
c) Napětí nesymetricky střídavé



Obrázek 1. 5 – Napětí nesymetricky střídavé

$$\sigma_h > 0; \sigma_n < 0; \sigma_m < \sigma_a$$

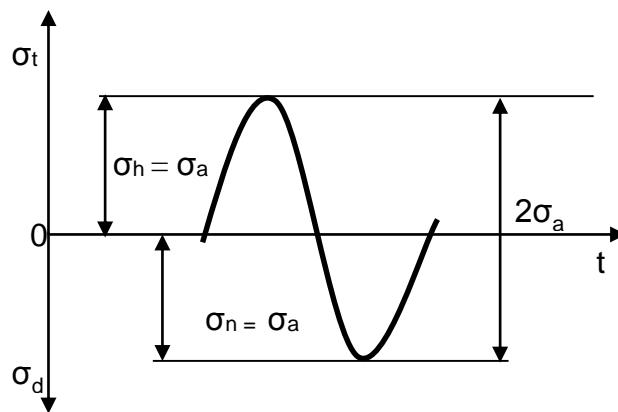
b) Napětí mívivé



Obrázek 1. 4 – napětí mívivé

$$\sigma_m = \sigma_a; \sigma_n = 0; \sigma_h = 2 \cdot \sigma_a; R = 0$$

d) Napětí symetricky střídavé



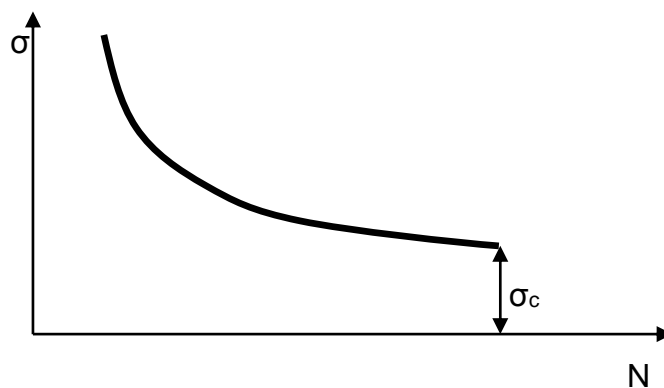
Obrázek 1. 6 – napětí symetricky střídavé

$$\sigma_h = -\sigma_n = \sigma_a; \sigma_m = 0; R = -1$$

Základní typy diagramů:a) Wöhlerův diagram (Wöhlerova křivka)

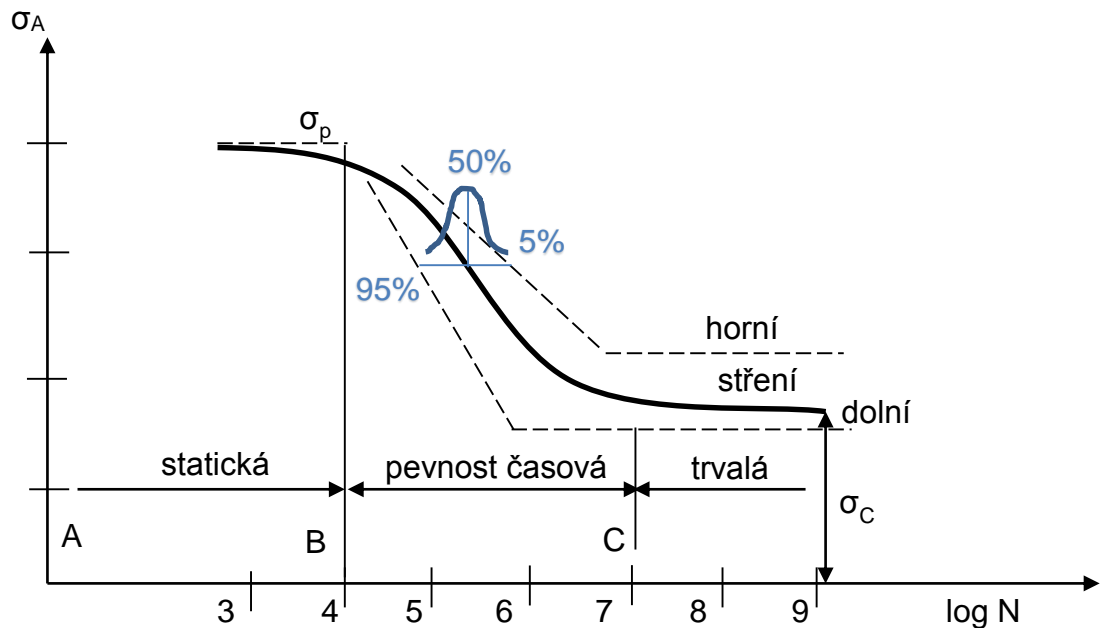
Základní diagram je sestaven pro střídavé symetrické zatížení. Při zkoušce volíme různé hodnoty napětí a podle toho zjišťujeme počty cyklů, při kterých došlo k porušení zkušebního vzorku. Obvykle začínáme velkou amplitudou, kdy dojde k porušení vzorku už po pár cyklech. Postupně tyto amplitudy zmenšujeme, čímž nám zároveň roste počet cyklů. Takto pokračujeme, až dojdeme do stavu, kdy takto nastavené napětí nezpůsobí lom zkušebního vzorku ani při „nekonečném“ počtu cyklů. Toto napětí označujeme mezí únavy, jejíž index je c tedy σ_c .

Tuto zjištěnou závislost vynášíme do grafu, kdy na jedné ose je amplituda napětí σ_a a na druhé počet cyklů N .



Obrázek 1. 7 - Wöhlerův původní diagram

Tento diagram je však pro další výpočty nevhodný. Lepšího znázornění dosáhneme, pokud počty cyklů budeme udávat v logaritmickém měřítku. σ_A mezní hodnota amplitudy napětí σ_a .



Obrázek 1. 8 - Wöhlerův diagram v log. souřadnicích

V první části diagramu zhruba do $N=10^{3-4}$ zůstává napětí skoro konstantní a je tedy srovnatelné s mezí pevnosti materiálu. Tato oblast A-B se nazývá oblast statické pevnosti. Část uprostřed B-C se nazývá oblast časové pevnosti. Zde napětí klesá s logaritmem počtu cyklů. Tato oblast se hojně využívá u různých strojů, kde je požadováno určité napětí a je možné díly po určitých cyklech měnit. Tímto krokem lze dosáhnout výrazné úspory hmotnosti.

Po dosažení určitého počtu cyklů postupně mizí pokles napětí. Je dosažená mezní amplituda, kdy s přibývajícím počtem cyklů již nedochází ke změně. Toto napětí nazýváme základní mezí únavy a označujeme σ_c .

Výsledky těchto zkoušek dávají obvykle velký rozptyl. Samotná měření jsou časově náročná a výsledky vyžadují statické zpracování. Výsledkem statického zpracování jsou horní a dolní meze. Horní ani dolní mez se běžně pro výpočty nepoužívají. Pokud bychom tyto hodnoty použili, vystavili bychom se riziku, že naše součásti budou dle mého názoru z 95% případů poruchové. Pro naše výpočty uvažujeme střední mez, která nám dává 50% jistotu. Tato mez je tvořena ojedinělými body a proto ji musíme prokládat křivkou a zaručovat se dostatečnou bezpečností k , jelikož poruchová může být jedna součást z tisíce.

Pro předběžný výpočet se uvádějí tyto vztahy:

$$\text{střídavý ohyb} \quad \text{uhlíková ocel} \quad \sigma_{OC} = (0,4 \div 0,6) \cdot \sigma_p$$

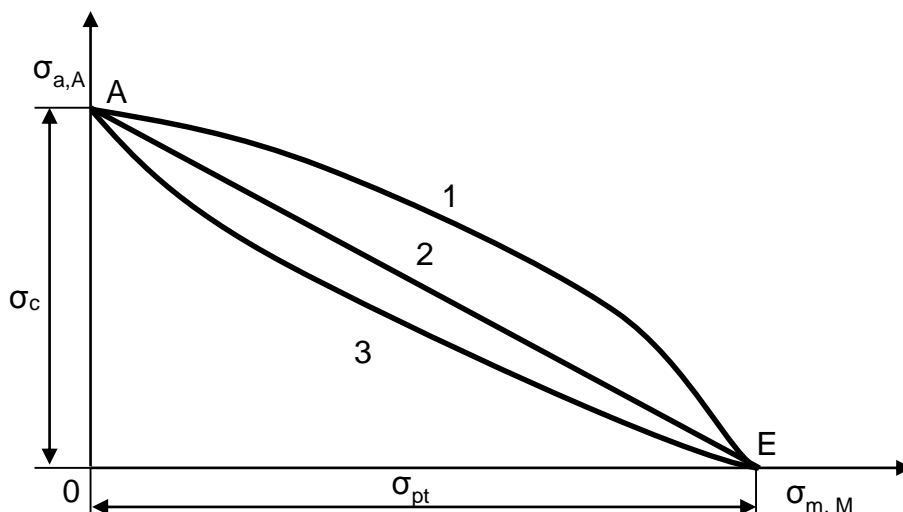
$$\text{legovaná ocel} \quad \sigma_{OC} = (0,3 \div 0,35) \cdot \sigma_p + 12$$

$$\text{střídavý tah – tlak} \quad \sigma_c = (0,6 \div 0,8) \cdot \sigma_{OC}$$

$$\text{střídavý krut} \quad \tau_{ct} = (0,5 \div 0,6) \cdot \sigma_{OC}$$

b) Haighův diagram

Toto zobrazení patří mezi nejjednodušší. U tohoto diagramu vynášíme na osy střední napětí σ_m a příslušné hodnoty cyklické složky σ_A . Obvykle u tohoto diagramu známe dva body. Dosáhne-li střední napětí meze statické pevnosti σ_p , je nosnost této součásti vyčerpána stálým předpětím a pak tedy cyklické napětí musí být nulové.



Obrázek 1. 9 - Haighův diagram

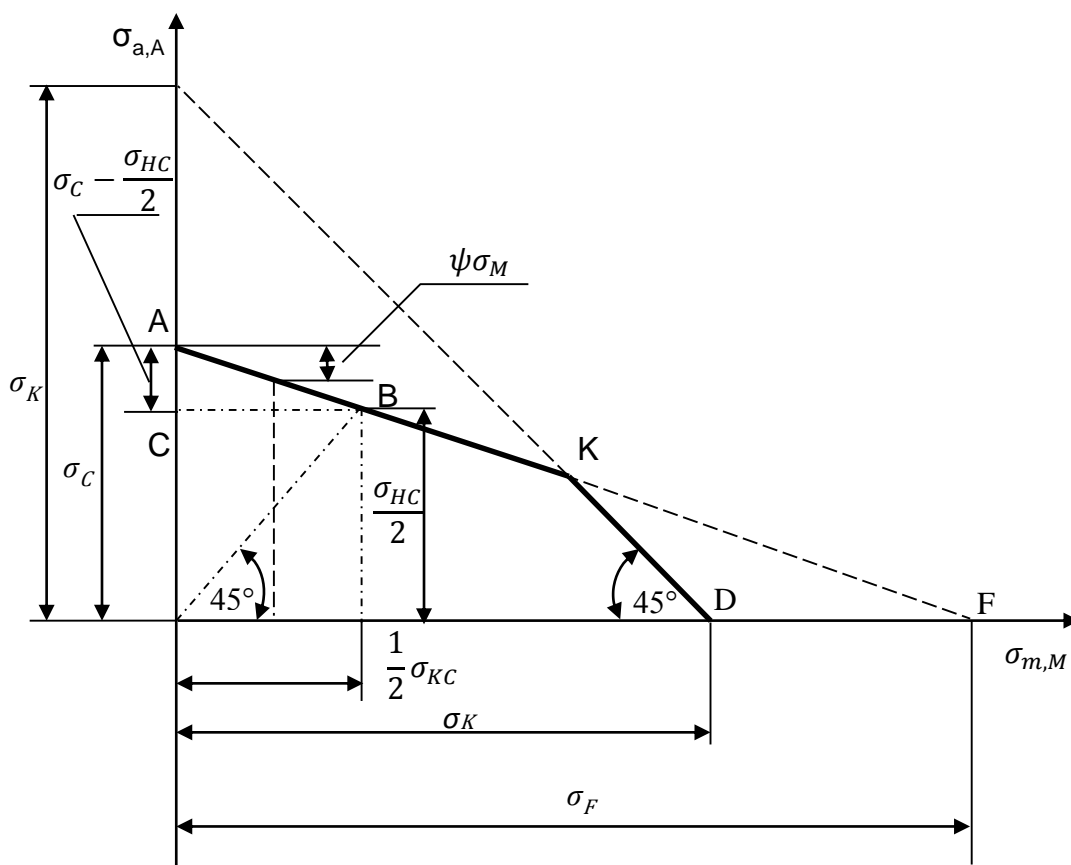
Nastane-li situace, že střední napětí σ_m je nulové, pak nastává případ symetricky střídavého namáhání a amplituda je pak rovna mezi únavy σ_c .

Tvar mezní křivky je hlavně závislý na tažnosti materiálu. Výsledky zkoušek tažných materiálů lze popsat vztahem:

$$\sigma_A = \sigma_c \cdot \left[1 - \left(\frac{\sigma_M}{\sigma_p} \right)^2 \right]$$

napětí. Plocha označená body 0AB označuje body, jejichž napětí je nesouměrně střídavé. A poslední plocha označená body 0BE zahrnuje případy pulzujícího napětí.

Pro výpočty používáme zjednodušený diagram



Obrázek 1. 11 - zjednodušený Haighův diagram

c) Smithův diagram

Dalším diagramem, který se v technickém prostředí používá, je tzv. Smithův diagram. Tento diagram se používá díky své názornosti. V tomto diagramu lze přímo odečíst hodnoty mezních napětí σ_H a σ_n v závislosti na středním napětí σ_m . Na osy vynášíme hodnoty napětí σ_H a σ_n .



Vztahy vycházející z toho diagramu jsou:

Fiktivní napětí:
$$\sigma_F = \sigma_C \cdot \frac{\sigma_{HC}}{2 \cdot \sigma_C - \sigma_{HC}} = \frac{\sigma_C}{\psi}$$

Konstanta ψ :
$$\psi = \frac{2 \cdot \sigma_C - \sigma_{HC}}{\sigma_{HC}} = 2 \cdot \frac{\sigma_C}{\sigma_{HC}} - 1$$

Mezná hodnota únavy:
$$\sigma_A = \sigma_C - \sigma_M \psi$$

Horní mez únavy:
$$\sigma_M + \sigma_A = \sigma_C + \sigma_M \cdot (1 - \psi) = \sigma_H$$

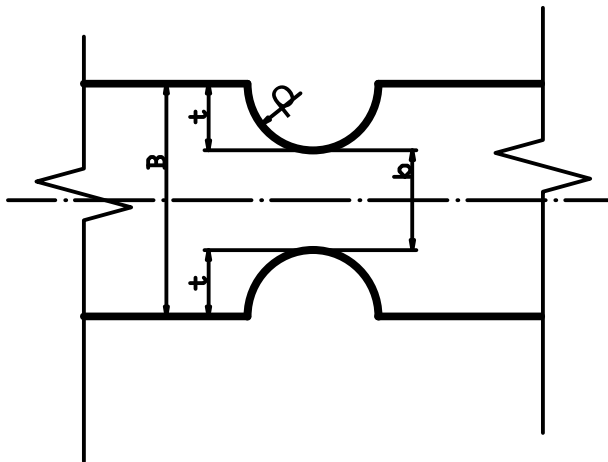
Míjivé napětí:
$$\sigma_{HC} = \frac{2 \cdot \sigma_C}{1 + \psi}$$

Součinitel ψ je běžně tabulován pro různé materiály a typy namáhání.

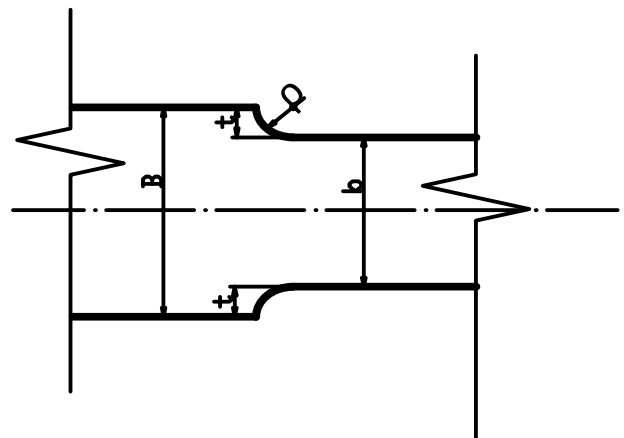
2 VRUBY [1]

Dalším problémem, který v klasické pružnosti nastává, je změna průřezu. Ideální pro výpočet je konstantní průřez. Tak to bohužel ovšem nebývá ať už z konstrukčních nebo funkčních důvodů. U různých strojů mají jejich části náhlou změnu průřezu. Tyto změny jsou např.: osazení, pero drážka, zápichy, lisování. Takto označované změny nazýváme „vruby“. Tyto změny znamenají vždy poruchu napjatosti přímo v místě vrubu. Stejný vliv na takovou součást mají tzv. rysky, které vznikají hrubým opracováním, špatným skladováním nebo pouze vyražením příslušného výrobního čísla. Obecně označujeme všechny vruby za „koncentrátory napětí“.

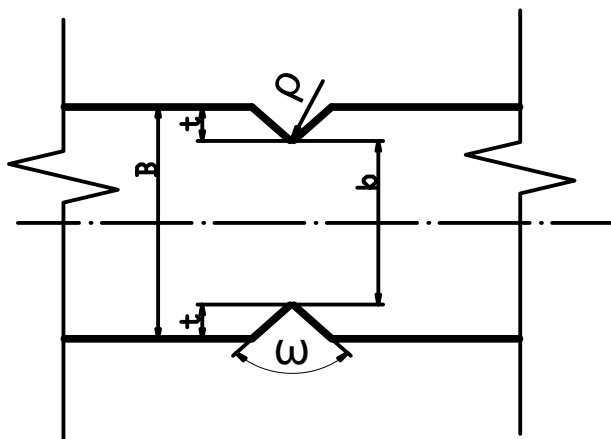
Úplné zhodnocení vrubů můžeme provést pouze u konstrukčních vrubů, neboť tam známe přesnou geometrii. Rozdělujeme je na vruby vnější a vnitřní, oblé a ostré, mělké a hluboké, jednoduché a násobné.



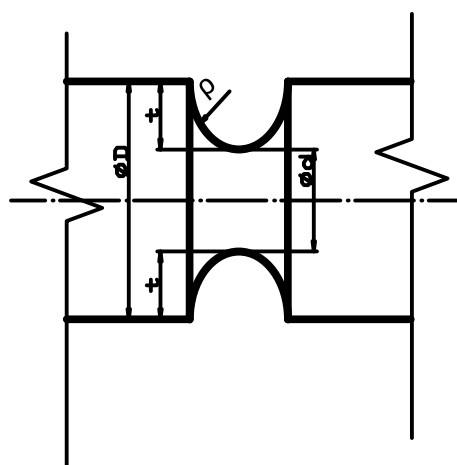
Obrázek 2.1 - oblý vrub



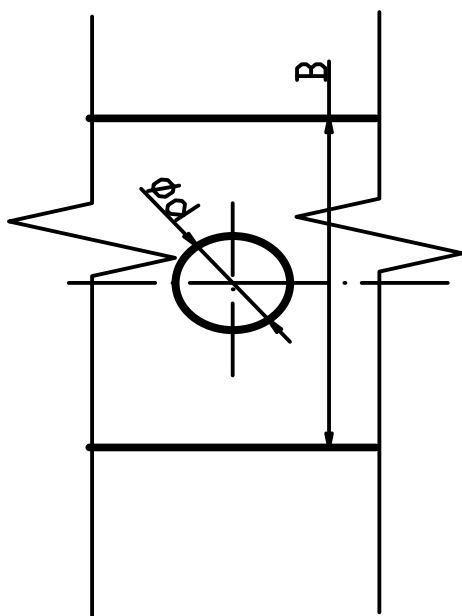
Obrázek 2.2 - osazení plechu



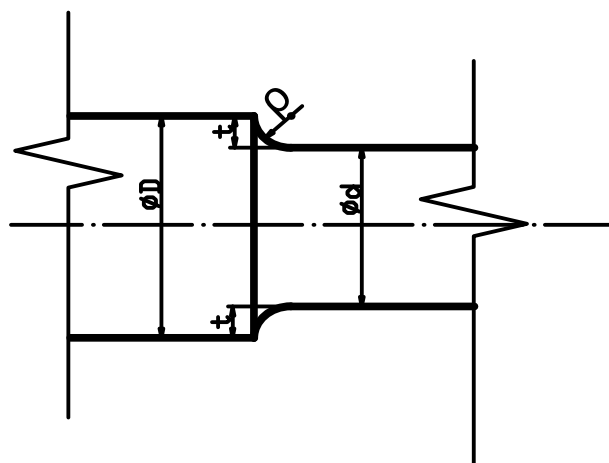
Obrázek 2. 3 - „v“ vrub



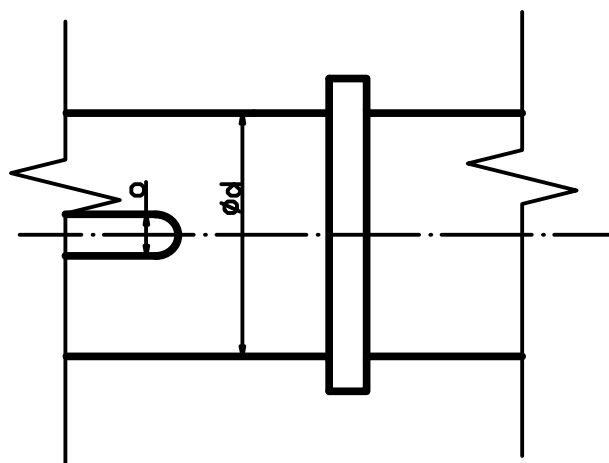
Obrázek 2. 5 - zápich



Obrázek 2. 4 - otvor v desce



Obrázek 2. 6 – osazení hřídele



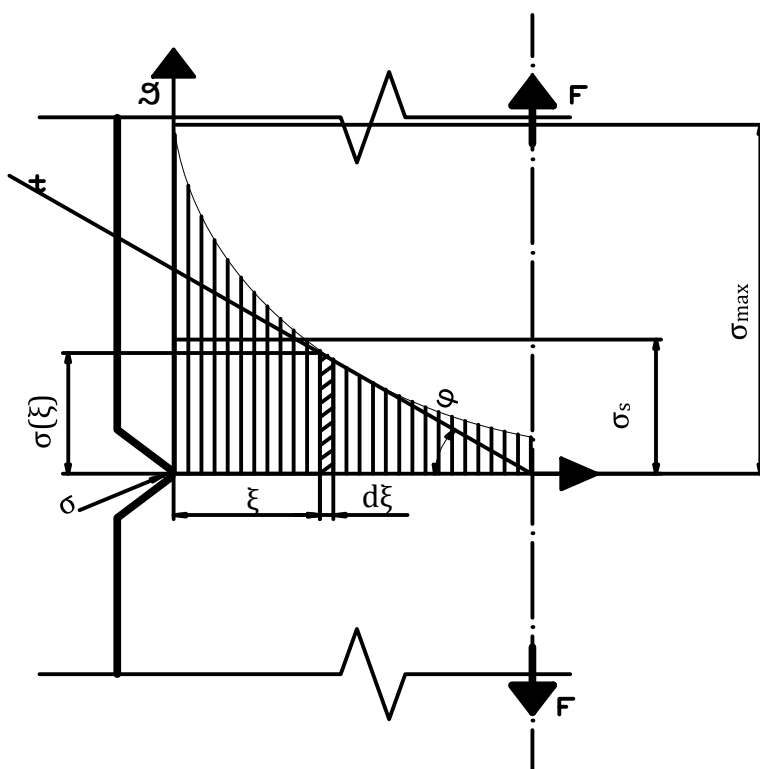
Obrázek 2. 7 - drážka

Důležité hodnoty těchto vrubů pro výpočet jsou: poloměr přechodu ρ u kořene vrubu, hloubka vrubu t , rozevření vrubu ω , rozměry změny průřezů $D - d$ ($B - b$).

2.1 SOUČINITEĽ TVARU

Na součásti v místě vrubu vzniká změna napjatosti, která je lokální a rychle doznívá. Takováto změna se vyznačuje rychlým vzrůstem napětí u kořene vrubu, kde nastává koncentrace napětí s charakteristickou špičkou, tzv. „špičkovým napětím“, které označujeme σ_{max} . Pro snadnější popsání problematiky použijeme pás plechu s vrubem. Průběh napětí v oslabeném místě vrubem je obecný. Špičkové napětí rychle klesá a ve středu průřezu je toto napětí nižší než napětí nominální σ_s .

Toto napětí je dáno vztahem: $\sigma_s = \frac{F}{S_0} = \frac{F}{s \cdot b}$



Obrázek 2. 8 – Tažený pás namáhaný silou F

Sklon tohoto napětí lze popsat gradientem napětí g .

$$g(\xi) = tg\varphi = \frac{d\sigma(\xi)}{d\xi}$$

Úhel φ nalezneme mezi tečnou ke křivce napětí a rovinou vrubu. Při osovém zatížení hladkého vzorku je gradient roven nule. Pro ohyb takového vzorku je gradient roven



konstantě $\gamma = \frac{2}{b}$, pro kruhový průřez $\gamma = \frac{2}{d}$. Trhlina s největší pravděpodobností vznikne v místě vrubu.

V řezu našeho vzorku musí platit rovnováha sil:

$$F = \sigma_s \cdot b \cdot s = 2 \cdot s \cdot \int_0^{\frac{b}{2}} \sigma(\xi) \cdot d\xi$$

Pro určení průřezu s předepsanou bezpečností je pro nás nejdůležitější σ_{max} . Toto napětí získáme násobkem nominálního napětí σ_s . Tedy:

$$\sigma_{max} = \alpha \cdot \sigma_s$$

Kde součinitel α , který je pro každý vrub jiný, se nazývá součinitel tvaru. Z předešlého vztahu vyplývá:

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_s} > 1$$

Podobně můžeme určit napětí v ohybu a součinitel tvaru:

$$\sigma_{so} = \frac{M_o}{W_o}; \alpha_o = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{so}}$$

A podobné jsou i vztahy pro krut:

$$\tau_{st} = \frac{M_k}{W_k}; \alpha_t = \frac{\tau_{max}}{\tau_{st}}$$

Tento součinitel je závislý na geometrickém tvaru vrubu, tvaru průřezu součásti a charakteru zatížení. Ovšem není závislý na materiálu vzorku a velikosti napětí. Při určování toho součinitele uvažujeme materiál vzorku homogenní. Tedy součinitel tvaru je pouze teoretický. Součinitel tvaru vrubu se tedy určil:

- Matematickým řešením vycházejícím z teorie pružnosti. Ovšem tento postup je použitelný pouze pro některé vruby, jejichž geometrický tvar se dá jednoduše matematicky vyjádřit.

- Experimentálně přesným měřením. Používáme převážně tenzometry za pomoci krátkých snímačů nebo pomocí fotoelasticimetrie. Ovšem ideální rozložení napětí získáme pomocí křehkých laků.

- Analogie napjatosti, pomocí fyzikálních jevů, jejichž veličiny jsou snadno měřitelné a řídí se podobnými zákony.



Takto určené průběhy napětí se shodují, ovšem výsledky získané měřeními jsou o něco nižší než výsledky teoretické.

Součinitelé tvaru α byly určeny pro všechny základní typy vrubů. Jsou zpracovány přehledně v závislosti na parametrech tvaru vrubu. Existují pomocné diagramy k určení tohoto součinitele. Proto není konstruktér odkázán pouze na vzorce, které jsme uváděli výše.

Součinitel tvaru α je ovlivněn tvarem vrubu, geometrickými vztahy vrubu, hloubkou vrubu t , typem zatížení a poloměrem ρ .

2.2 SOUČINITEL VRUBU

Pro statické zatížení uvažujeme taženou tyč s vrubem, tento vrub způsobí v oslabeném místě špičku napětí. Při statickém zatížení takového to vzorku vzrůstá síla zvolna z nulové hodnoty do maxima, takže se v materiálu projevují plné deformace. Pokud špičkové napětí dosáhne meze kluzu materiálu, průřez postupně zplastizuje. U tažených materiálů neuvažujeme vliv vrubu, neboť nesnižuje statickou pevnost v oslabeném průřezu. Naopak nosnost v důsledku vzniku víceosé napjatosti ve vrubu je vyšší než u hladké tyče o stejných parametrech. U statického výpočtu vrub neuvažujeme, pokud se ovšem jedná o křehký materiál, je nutno vrub uvažovat, kvůli možnému rázovému zatížení.

Při cyklickém zatížení se oslabení materiálu důsledkem vrubu projevuje významně. U takto oslabeného a zatíženého vzorku nezáleží na materiálu. Při krátkodobém zatížení materiálu v něm nenastane tzv. vyrovnání. Maximální hodnota ovlivní nosnost vrubové součásti. Skutečný vliv vrubu není tak velký, jak jsme předpokládali, je menší. Ovšem předpokládáme, že zrnitost materiálu i při cyklickém zatížení dovoluje určité vyrovnání špičky napětí. Nastane tedy snížení oproti teoretické hodnotě. Odlišujeme pevnostní hodnoty tyče hladké a tyče s vrubem a tyto hodnoty označujeme následovně:

Hladká tyč: σ_c

Tyč s vrubem: σ_c^x

Z těchto dostupných údajů můžeme určit „součinitel vrubu“, který je označován řeckým



písmenem β . Z poměru meze únavy hladké tyče s mezí únavy tyče s vrubem. Výpočet toho součinitele:

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_c^x} = \beta \leq \alpha$$

Z předešlého vzorce můžeme určit mez únavy tyče s vrubem:

$$\sigma_c^x = \frac{\sigma_c}{\beta}$$

Tento součinitel závisí na materiálu a jeho výrobě, na velikosti součásti a technologii výroby této součásti, kvalitě povrchu, teplotě a tvaru vrubu. Tento součinitel je pouze reálný a tudíž ho nelze matematicky vyjádřit, lze ho pouze experimentálně změřit. Tato měření se provádějí pouze pro některé vruby. Tímto způsobem se zjistilo, že jednotlivé materiály mají různou citlivost na vrub. Materiály, které jsou jednozrné, legované oceli jsou na vrub mnohem citlivější než litiny či nízkouhlíkové materiály.

2.3 SOUČINITEL VRUBOVÉ CITLIVOSTI

V některých podkladech je součinitel vrubové citlivosti uváděn jako materiálová konstanta, kterou lze zjistit pomocí vztahu:

$$q = \frac{\beta - 1}{\alpha - 1} \leq 1,0$$

Z toho vztahu vyplývá výpočet pro součinitele vrubu β :

$$\beta = q \cdot (\alpha - 1) + 1$$

Pro materiály vrubově citlivé je tento součinitel $q=1$. Poté nám vychází z předešlého vztahu, že $\beta=\alpha$. Pro materiály, které jsou méně citlivé na svůj vrub je $q \rightarrow 0$. Z toho plyne $\beta \rightarrow 1,0$. U materiálů, které nejsou popsány nebo u velkých součástích je bezpečnější tento součinitel vrubové citlivosti počítat.

Ovšem součinitel vrubové citlivosti nezávisí pouze na materiálu, ale i na gradientu napětí. Tedy pro ostřejší vruby je podstatný rozměr ρ tedy poloměr tohoto vrubu. Čím větší je gradient, tím menší exponovaný je objem materiálu a zvýšení napětí v povrchové vrstvě. To má za následek snížení vrubové citlivosti. Předpoklad, že $q=$ konstanta, se dobře splňuje pro vruby s poloměrem $\rho \geq 3$ mm u měkkých materiálů. Pro tvrdší materiály je poloměr $\rho \geq 2$ mm. U ostřejších vrubů bývá součinitel q podstatně nižší.



2.4 VLIV VELIKOSTI

Mez únavy se z pravidla zjišťuje u vzorků s malým průměrem, tedy s průměrem $d = 7$ až 10 mm. Ovšem v poslední době se díky pokroku technologie realizuje experimentální zjištění meze únavy pro vzorky s větším průměrem kolem $d = 40$ mm. Výsledek těchto zkoušek prokázal, že mez únavy klesá s rostoucím objemem součástí. Proto je nutné zavést tzv. „součinitel velikosti“. Tento součinitel je definován jako poměr meze únavy velkého vzorku σ_{CD} , τ_{CD} a meze únavy malého vzorku.

$$\varepsilon_V = \frac{\sigma_{CD}}{\sigma_{cd}} \quad ; \quad \varepsilon_{VO} = \frac{\sigma_{oCD}}{\sigma_{ocd}} \quad ; \quad \varepsilon_{Vt} = \frac{\tau_{CD}}{\tau_{cd}}$$

Kde ε_V je součinitel velikosti pro osově zatížení, ε_{VO} pro ohyb a ε_{Vt} pro krut. Z těchto vztahů vyplývá, že mez únavy pro velký vzorek se počítá:

Pro osově namáhání:
$$\sigma_{CD} = \varepsilon_V \cdot \sigma_{cd}$$

Pro ohybové namáhání; krut:
$$\sigma_{oCD} = \varepsilon_{VO} \cdot \sigma_{ocd} ; \tau_{CD} = \varepsilon_{Vt} \cdot \tau_{cd}$$

U vzorků s vrubem a u skutečných součástí záleží jak na součiniteli velikosti, tak na součiniteli vrubu β . U těchto vzorků se počítá, že mez únavy je definována těmito vztahy:

Pro osově namáhání:
$$\sigma_C^x = \frac{\sigma_{cd} \cdot \varepsilon_V}{\beta}$$

Pro ohybové namáhání:
$$\sigma_{OC}^x = \frac{\sigma_{ocd} \cdot \varepsilon_{VO}}{\beta_o}$$

Pro namáhání krutem:
$$\tau_C^x = \frac{\tau_{cd} \cdot \varepsilon_{Vt}}{\beta_t}$$

2.5 VLIV MECHANICKÉ KVALITY POVRCHU

Převážná většina lomů začíná v povrchové části materiálu. Proto je jakost povrchu neméně důležitá, především opracování povrchu.

Lom vzniká už na povrchu materiálu a to v tzv. povrchových koncentrátorech napětí. Těmito koncentratory myslíme různé vrypy, rýhy, zářezy, trhlinky, hrubé opracování a bodová koroze. Tyto trhlinky neovlivňují statickou pevnost, ovšem ovlivní značně mez únavy materiálu. Zvláště nepříznivě se projevuje u jemnozrnných materiálů. Jestliže chceme srovnávat jednotlivé výsledky všech pokusů u materiálů, je nutné sjednotit nejen tvar, ale i jakost povrchu. Největší mez únavy prokazuje povrch, který je jemně leštěný. Ostatní úpravy povrchu jsou vztaženy na leštěný povrch a díky



experimentálně zjištěným vlastnostem vyjadřujeme jejich vliv tzv. „součinitelem jakosti povrchu“ který značíme η_p .

Součinitel jakosti je dán poměrem meze únavy opracovaného povrchu materiálu σ_C^x k mezi únavy leštěného materiálu σ_C . Tedy:

$$\eta_p = \frac{\sigma_C^x}{\sigma_C}$$

Mez únavy materiálu s daným opracováním se stanoví z přechodního vztahu:

$$\sigma_C^x = \eta_p \cdot \sigma_C$$

Obdobným způsobem můžeme určit tyto meze pro různá zatížení:

Pro střídavý ohyb: $\sigma_{OC}^x = \eta_{pO} \cdot \sigma_{OC}$

Pro střídavý krut: $\tau_{Ct}^x = \eta_{pt} \cdot \tau_{Ct}$

Při nedostatku experimentálně zjištěných dat, si lze součinitel jakosti vztahovat na součinitel jakosti za rotace η_{pO} .

Pro střídavý tah: $\eta_p \approx \eta_{pO}$

Pro střídavý krut: $\eta_{pt} \approx \frac{1}{2} \cdot (1 + \eta_{pO})$

V případě součástí s konstrukčními vruby, tedy pokud nejsou k dispozici experimentálně zjištěné hodnoty, můžeme mez únavy vypočítat pro dvojí redukci:

$$\sigma_{OC}^x = \frac{\sigma_{OC}}{\beta} \cdot \eta_{pO}$$

$$\tau_{Ct}^x = \frac{\tau_{Ct}}{\beta} \cdot \eta_{pt}$$

Tyto vztahy jsou velmi dimenzovány, jelikož součást s konstrukčními vruby je ve skutečnosti na vruby méně citlivá. Nehledě na to, že konstrukčně umístěný vrub leštíme nebo jej zpevňujeme a tím se vliv toho vrubu výrazně snižuje.

2.6 VLIV TECHNOLOGICKÉ ÚPRAVY POVRCHU

Povrch je u většiny případů místem maximálního napětí. Proto může technologická úprava značně ovlivnit únavovou pevnost součástí. V těchto místech je povrch součástí zpevňován a s pevností roste mez únavy. V povrchové vrstvě vznikají zbytková napětí. Pokud jsou tato napětí tlaková, opět zvyšují mez únavy. Těchto změn docílíme vhodnou technologickou úpravou, kterou je:

- Mechanické zpracování povrchu (válečkování, kuličkování)



- b) Tepelným zpracováním (cementováním, nitridováním, kalením)
- c) Jinými úpravami (elektronickým leštěním)

Vliv zpevnění a povrchového pnutí se kombinuje. Byla provedena rozsáhlá experimentální měření, která ověřují vlivy jednotlivých faktorů pro mez únavy.

Výpočet míry bezpečnosti. Zjištěné stavy únavové pevnosti jsou hodnoty mezní. Tyto hodnoty jsou založeny na experimentálních měřeních. U těchto stavů uvažujeme celou řadu faktorů ovlivňujících tyto stavy. Proto může být míra bezpečnosti nižší než u statických výpočtů. Ovšem zavedená bezpečnost $k = 1,5$ je hodnota, která je směrodatná. Tuto velikost musí ovšem určit konstruktér výpočtář. Tento konstruktér musí zhodnotit zatížení celé součásti, materiál, důležitost navrhované součásti a dostatek experimentálních podkladů. To má za důsledek, že v běžné praxi míra bezpečnosti kolísá od $k = 1,3$ a to pro běžné součásti s dostatečným počtem experimentálních podkladů, až do $k = 5,0$ pokud nejsou dostatečné podklady.

Pro náš případ budeme používat výpočet míry bezpečnosti pro střídavé namáhání a pro kombinované namáhání.

1) Napětí střídavé

Mezní nosností je mez únavy σ_c (τ_c) při napětí σ_a (τ_a).

U hladké tyče je míra bezpečnosti:

$$k_\sigma = \frac{\sigma_c}{\sigma_a} \qquad k_\tau = \frac{\tau_{ct}}{\tau_a}$$

Pro tyč s vrubem:

$$k_{\sigma^x} = \frac{\sigma_c^x}{\sigma_a} \qquad k_{\tau^x} = \frac{\tau_{ct}^x}{\tau_a}$$

Vezmeme-li v potaz vlivy parametrů, které jsme uvedli již výše, budeme počítat mez únavy pro různé případy:

Ve střídavém tlaku – tahu: $\sigma_c^x = \frac{\sigma_c}{\beta} \cdot \varepsilon_v \cdot \eta_p$

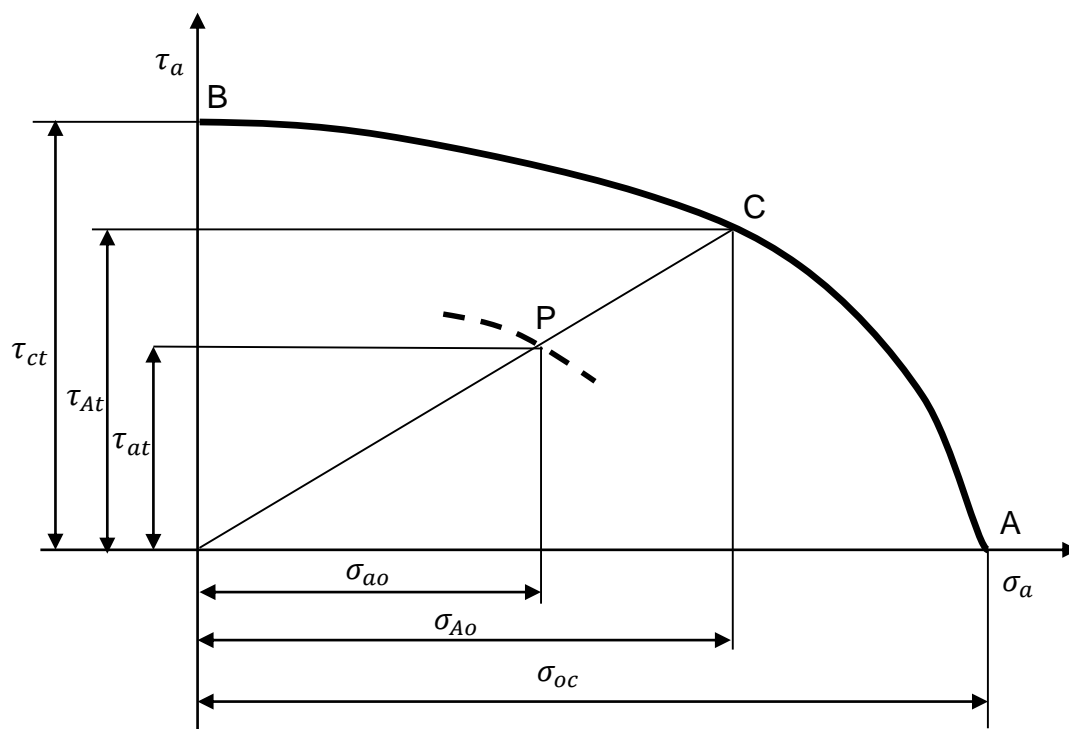
Ve střídavém ohybu: $\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{ov} \cdot \eta_{po}$

Střídavý krut: $\tau_{ct}^x = \frac{\tau_{ct}}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt}$

2) Kombinované namáhání

Nejčastěji je kombinací cyklicky proměnných zatížení u součástí strojů. Jedná se o současné působení krutu a ohybu. Vzniká buďto kombinací stálého krutu τ_m a střídavého ohybu σ_a a nebo kombinací dvou cyklických složek σ_a, τ_a . Na základě experimentálních zkoušek můžeme brát zřetel na podobnost vztahů mezi statickou a cyklickou pevností při kombinovaném zatížení. Uvažujme případ současného působení cyklických složek σ_a, τ_a . Tyto složky jsou synchronní. Naši hledanou míru bezpečnosti bychom dostali z čáry mezních stavů, která je velmi podobná Haighovu diagramu. Krajní body této čáry jsou dány mezí únavy v ohybu σ_{oc} a mezí únavy v krutu τ_{ct} . Kromě těchto bodů bylo ještě nutno určit pro jakýkoliv materiál další body. Tyto body byly zjišťovány rozsáhlými zkouškami. Proto průběh této čáry nahrazujeme kvadrantem elipsy, jejíž základní rovnice je:

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_K}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_K}\right)^2 = 1$$



Obrázek 2. 9 - čára mezních stavů



Kde σ_K (τ_K) je mez kluzu v ohybu (krutu), přepisujeme pro kombinace střídavého napětí na:

$$\left(\frac{\sigma_{Ao}}{\sigma_{oc}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{At}}{\tau_{ct}}\right)^2 = 1$$

Podmínka je, aby bod P, který je dán souřadnicemi σ_{ao}, τ_{ao} určených ze základních momentů M_o, M_k byl uvnitř plochy. Poté dostaneme míru bezpečnosti:

$$k = \frac{\sigma_{Ao}}{\sigma_{ao}} = \frac{\tau_{At}}{\tau_{at}} = \frac{OC}{OP}$$

Dosazením této rovnice do rovnice elipsy dostáváme vztah:

$$\left(\frac{\sigma_{ao}}{\sigma_{oc}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{at}}{\tau_{ct}}\right)^2 = \frac{1}{k^2}$$

Pokud v tomto vztahu zavedeme fiktivní míru bezpečnosti, pak dostaneme:

$$\frac{1}{k_\sigma^2} + \frac{1}{k_\tau^2} = \frac{1}{k^2}$$

Z tohoto vztahu vyplývá, že míra bezpečnosti je:

$$k = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{k_\sigma^2} + \frac{1}{k_\tau^2}}}$$

Obdobně bychom dostali míru bezpečnosti pro kombinaci střídavého ohybu se stálým krutem. Mezní hodnotou napětí v krutu (τ_m) je mez kluzu materiálu v krutu τ_{kt} . Fiktivní hodnoty bezpečností jsou:

$$k_\sigma = \frac{\sigma_{oc}}{\sigma_{ao}} \qquad k_\tau = \frac{\tau_{kt}}{\tau_m}$$

Tedy:

$$\left(\frac{\sigma_{ao}}{\sigma_{oc}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_m}{\tau_{kt}}\right)^2 = \frac{1}{k^2}$$

Z tohoto vztahu plyne:

$$k = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{k_\sigma^2} + \frac{1}{k_\tau^2}}}$$

Použitý kvadrant elipsy dává dobrou shodu s výsledky zkoušek u hladkých vzorků a taženého materiálu. U součástí s vrubem se spíše blíží omezení Haighova diagramu obloukem elipsy. Tato metoda s použitím elipsy je universální, ovšem nevýhodou je



požadavek na znalost obou mezí únavy. To značně komplikuje i to, že dodavatelé obvykle uvádějí pouze mez únavy v ohybu. Proto se snažíme tuto složenou napjatost převést na napjatost jednoosou a tím na případ jednoduché zkoušky střídavým ohybem. Proto použijeme některou z hypotéz a vyčíslíme z ní „reduované“ namáhání $\sigma_{c_{red}}$.

Kde platí statická podmínka:

$$\sigma_{red} \leq \sigma_D$$
$$\sigma_D = \frac{\sigma_p}{k}$$

Tyto vztahy se změjí na:

$$\sigma_{c_{red}} \leq \frac{\sigma_{co}}{k}$$

Hypotéza největšího normálového napětí:

$$\sigma_{c_{red}} = \frac{\sigma_{ao}}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{ao}^2 + 4\tau_{at}^2}$$

Předpokládejme že $\sigma_{ao} = 0$:

$$\sigma_{c_{red}} = \tau_a \rightarrow \frac{\tau_{ct}}{\sigma_{co}} = 1$$

Hypotéza τ_{max} (Guestova)

$$\sigma_{c_{red}} = \sqrt{\sigma_{ao}^2 + 4\tau_{at}^2}$$

$$\sigma_{ao} = 0 \rightarrow \sigma_{c_{red}} = 2\tau_{ao} \rightarrow \frac{\tau_{ct}}{\sigma_{oc}} = 0,5$$

Hypotéza HMM

$$\sigma_{c_{red}} = \sqrt{\sigma_{ao}^2 + 3\tau_{at}^2}$$

$$\sigma_{ao} = 0 \rightarrow \sigma_{c_{red}} = \tau\sqrt{3} \rightarrow \frac{\tau_{ct}}{\sigma_{oc}} = 0,577$$

Po mnoha experimentech je zřejmé, že výsledkům se nejvíce blíží hypotéza HMM a použitelná je metoda τ_{max} , ta nám dává větší rezervu bezpečnosti. Metoda největšího normálového napětí dává poddimenzování a mohla by být uvažována u některých litin. Pokud vyjádříme reduované napětí obecně, dostaneme:

$$\sigma_{c_{red}} = \sqrt{\sigma_a^2 + (\bar{\alpha}\tau_a)^2}$$



Máme dány mezní hodnoty prostého ohybu: $\sigma_{cred} = \sigma_{oc}$

prostého krutu: $\sigma_{cred} = \bar{\alpha}\tau_{ct}$

A z těchto hodnot vyplývá:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sigma_{oc}}{\tau_{ct}}$$

Následně:

$$\sigma_{cred} = \sqrt{\sigma_a^2 + \left(\frac{\sigma_{oc}}{\tau_{ct}}\tau_a\right)^2}$$

Tedy vyjádření míry bezpečnosti je:

$$\frac{1}{k} = \frac{\sigma_{oc}}{\sigma_{cred}}$$



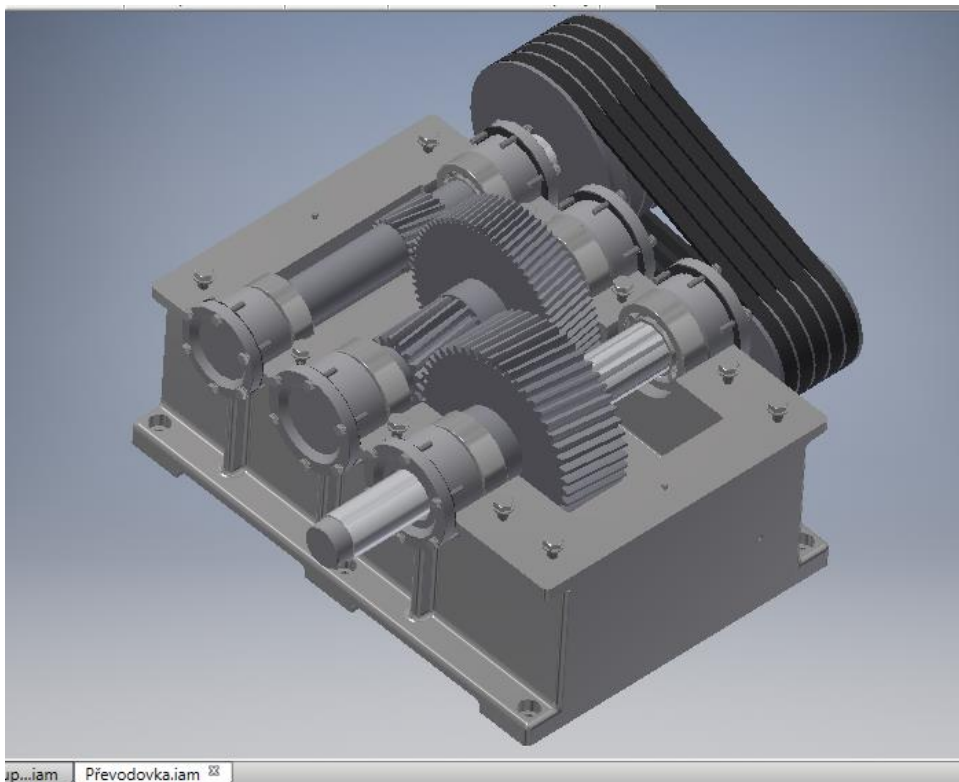
3 SHRNU TÍ TEORIE

Při zachování materiálu i jeho výroby se jako zásadní jeví vliv součinitele tvaru α , resp. součinitele vrubu β . Proto se dále zaměříme na určení těchto parametrů.



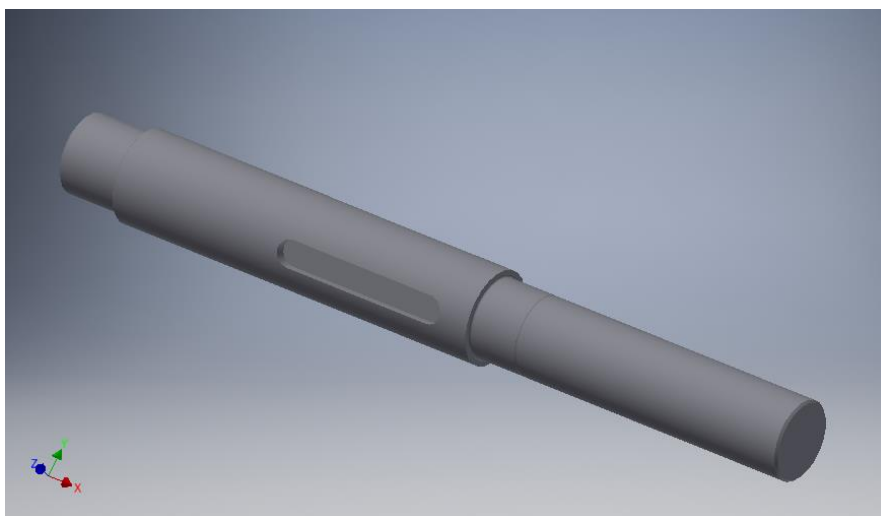
4 VÝPOČET

K výpočtům použijeme součást z konstrukčního cvičení a to výstupní hřídel čelní převodovky.



Obrázek 3. 1 - převodovka

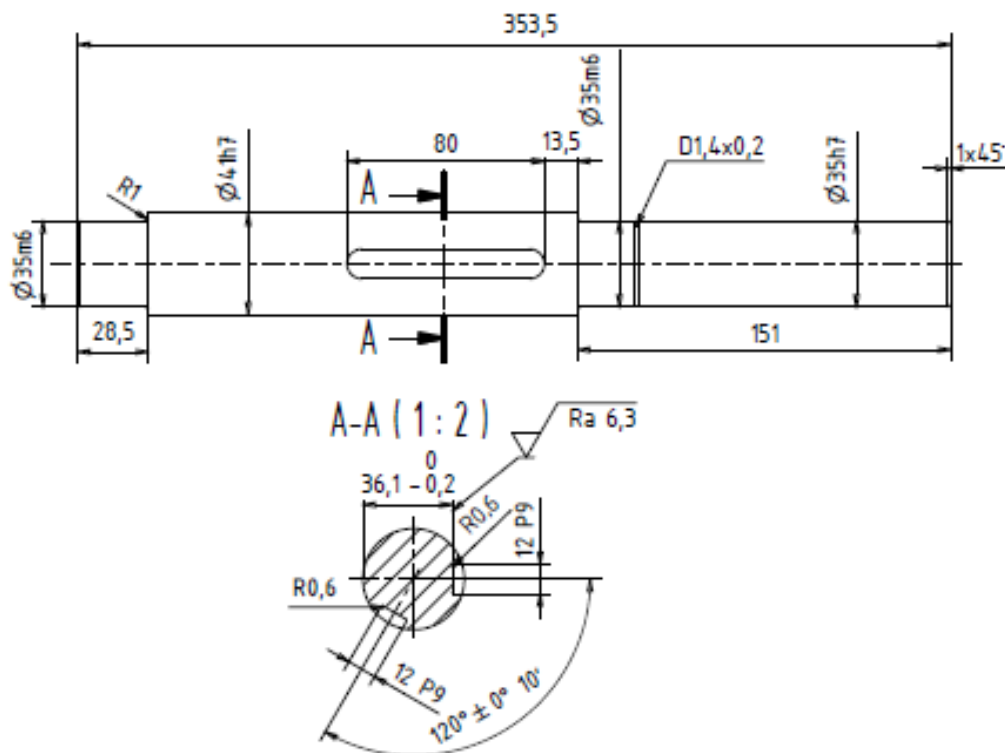
Jedná se tedy o tuto hřídel:



Obrázek 3. 2 - výstupní hřídel

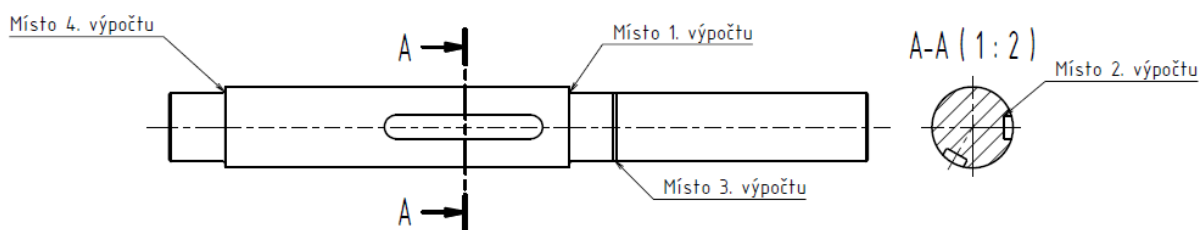


Výkres výstupní hřídele:



Obrázek 3. 3 - výkres výstupní hřídele

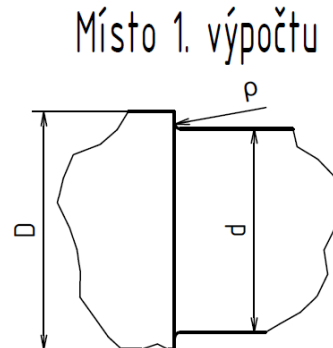
Označená místa výpočtu únavové bezpečnosti:



Obrázek 3. 4 - místa únavových výpočtů



4.1 MÍSTO PRVNÍHO VÝPOČTU



Obrázek 4. 1 - místo 1. výpočtu

Osazení

Základní parametry:

$$D = 41 \text{ mm}$$

$$d = 35 \text{ mm}$$

$$\rho = 1 \text{ mm}$$

$$M_{o_{max1}} = 40\,099 \text{ Nmm}$$

$$M_k = 321\,410 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{pt} = 590 \text{ MPa}$$

Výpočet:

4.1.1 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI ZA POMOCI DIAGRAMŮ [1]

a) Určení napětí v místě vrubu

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{M_o}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} = \frac{40\,099}{\frac{\pi \cdot 35^3}{32}} = 9,53 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi \cdot d^3}{16}} = \frac{321\,410}{\frac{\pi \cdot 35^3}{16}} = 38,18 \text{ MPa}$$

b) Určení součinitelů pro daný vrub

Pro určení součinitele α je nutno spočítat:

$$\frac{\rho}{D - d} = \frac{1}{41 - 35} = \frac{1}{6} \approx 0,17$$



$$\frac{\rho}{d} = \frac{1}{35} = 0,029$$

Z přílohy 9.1 vyplývá:

$$\alpha_t = 1,78$$

$$\alpha_o = 2,54$$

Z přílohy 9.2 odečteme:

$$q = 0,48$$

Z přílohy 9.3 odečteme a následně vypočítáme:

$$\eta_{po} = 0,89$$

$$\eta_{pt} = 0,5 \cdot (1 + \eta_{po}) = 0,5 \cdot (1 + 0,89) = 0,945$$

Z přílohy 9.4 vyplývá:

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{vt} = 0,85$$

Součinitel vrubu β :

$$\beta_o = 1 + q \cdot (\alpha_o - 1) = 1 + 0,48 \cdot (2,54 - 1) = 1,74$$

$$\beta_t = 1 + q \cdot (\alpha_t - 1) = 1 + 0,48 \cdot (1,78 - 1) = 1,37$$

c) Určení únavových napětí materiálu

$$\sigma_{oc} = \sigma_p \cdot 0,5 = 590 \cdot 0,5 = 295 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = \sigma_{oc} \cdot 0,6 = 295 \cdot 0,6 = 177 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po} = \frac{295}{1,74} \cdot 0,85 \cdot 0,89 = 128,26 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ct} = \frac{\tau_c}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt} = \frac{177}{1,37} \cdot 0,85 \cdot 0,945 = 103,78 \text{ MPa}$$

d) Určení únavové bezpečnosti

Náš případ, je případ stálého krutu, tudíž musíme použít mez kluzu v krutu τ_{kt} .

$$\tau_{kt} = \frac{R_e}{2} = \frac{325}{2} = 162,5 \text{ MPa}$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{kt}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{9,53}{128,26}\right)^2 + \left(\frac{38,18}{162,5}\right)^2}} = 4,06$$

Pokud by nastal případ proměnlivého krutu, spočítáme jeho únavovou bezpečnost takto:

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ct}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{9,53}{128,26}\right)^2 + \left(\frac{38,18}{103,78}\right)^2}} = 2,66$$

4.1.2 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI ZA POMOCI INTERNETOVÉ STRÁNKY WWW.EFATIGUE.COM [2]

a) Určení napětí v místě vrubu

Napětí v místě vrubu je stejné jako v přechodím případě.

$$\sigma_o = 9,53 \text{ MPa}$$

$$\tau = 38,18 \text{ MPa}$$

b) Určení součinitelů pro daný vrub

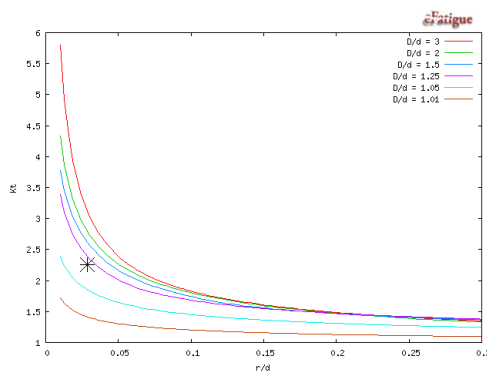
Součinitel α je určen za pomoci internetové stránky efatigue:

Namáhání ohybem

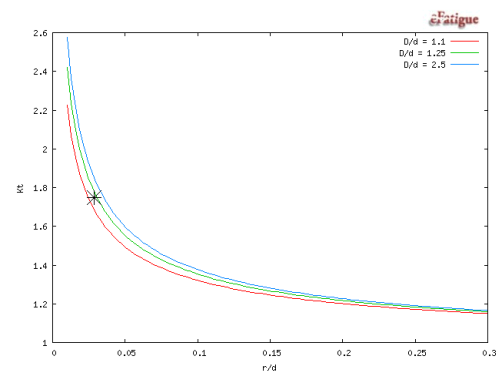
$$K_t = 2.26 = \alpha_o$$

Namáhání krutem

$$K_t = 1.75 = \alpha_t$$



Obrázek 4.1.2 1 - Součinitel tvaru pro namáhání ohybem



Obrázek 4.1.2 2 - Součinitel tvaru pro namáhání krutem

Z přílohy 9.2 odečteme:

$$q = 0,48$$

Z přílohy 9.3 odečteme a následně vypočítáme:

$$\eta_{po} = 0,89$$

$$\eta_{pt} = 0,5 \cdot (1 + \eta_{po}) = 0,5 \cdot (1 + 0,89) = 0,945$$



Z přílohy 9.4 vyplývá:

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{vt} = 0,85$$

Součinitel vrubu β :

$$\beta_o = 1 + q \cdot (\alpha_o - 1) = 1 + 0,48 \cdot (2,26 - 1) = 1,61$$

$$\beta_t = 1 + q \cdot (\alpha_t - 1) = 1 + 0,48 \cdot (1,75 - 1) = 1,36$$

c) Určení únavových napětí materiálu

$$\sigma_{oc} = \sigma_p \cdot 0,5 = 590 \cdot 0,5 = 295 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = \sigma_{oc} \cdot 0,6 = 295 \cdot 0,6 = 177 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po} = \frac{295}{1,61} \cdot 0,85 \cdot 0,89 = 138,61 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ct} = \frac{\tau_c}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt} = \frac{177}{1,36} \cdot 0,85 \cdot 0,945 = 104,54 \text{ MPa}$$

d) Určení únavové bezpečnosti

Náš případ, je případ stálého krutu, tudíž musíme použít mez kluzu v krutu τ_{kt} .

$$\tau_{kt} = \frac{R_e}{2} = \frac{325}{2} = 162,5 \text{ MPa}$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{kt}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{9,53}{138,61}\right)^2 + \left(\frac{38,18}{162,5}\right)^2}} = 4,09$$

Pokud by nastal případ proměnlivého krutu, spočítáme jeho únavovou bezpečnost takto:

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ct}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{9,53}{138,61}\right)^2 + \left(\frac{38,18}{104,54}\right)^2}} = 2,69$$



4.1.3 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI POMOCÍ PODKALDŮ „ANALYTICAL STRENGTH ASSESSMENT OF COMPONENTS IN TECHNICAL ENGINEERING“ [3]

a) Určení napětí v místě vrubu

Napětí v místě vrubu je stejné jako v přechozím případě

$$\sigma_o = 9,53 \text{ MPa}$$

$$\tau = 38,18 \text{ MPa}$$

b) Určení součinitelů pro daný vrub

Součinitel α je určen za pomoci výše uvedených podkladů:

Pro určení součinitelů je nutné odměřit nebo dopočítat velikost osazení t .

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{41 - 35}{2} = 3 \text{ mm}$$

Namáhání ohybem

$$\alpha_o = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,62 \cdot \frac{\rho}{t} + 11,6 \cdot \frac{\rho}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\rho}{d}\right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{\rho}{t}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}}$$
$$\alpha_o = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,62 \cdot \frac{1}{3} + 11,6 \cdot \frac{1}{35} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{1}{35}\right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^3 \cdot \frac{35}{41}}} = 2,31$$

Namáhání krutem

$$\alpha_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{3,4 \cdot \frac{\rho}{t} + 38 \cdot \frac{\rho}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\rho}{d}\right)^2 + 1,0 \cdot \left(\frac{\rho}{t}\right)^2 \cdot \frac{d}{D}}}$$
$$\alpha_o = 1 + \frac{1}{\sqrt{3,4 \cdot \frac{1}{3} + 38 \cdot \frac{1}{35} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{1}{35}\right)^2 + 1,0 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 \cdot \frac{35}{41}}} = 1,64$$

Z přílohy 9.2 odečteme:

$$q = 0,48$$

Z přílohy 9.3 odečteme a následně vypočítáme:

$$\eta_{po} = 0,89$$



$$\eta_{pt} = 0,5 \cdot (1 + \eta_{po}) = 0,5 \cdot (1 + 0,89) = 0,945$$

Z přílohy 9.4 vyplývá:

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{vt} = 0,85$$

Součinitel vrubu β :

$$\beta_o = 1 + q \cdot (\alpha_o - 1) = 1 + 0,48 \cdot (2,31 - 1) = 1,63$$

$$\beta_t = 1 + q \cdot (\alpha_t - 1) = 1 + 0,48 \cdot (1,64 - 1) = 1,31$$

c) Určení únavových napětí materiálu

$$\sigma_{oc} = \sigma_p \cdot 0,5 = 590 \cdot 0,5 = 295 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = \sigma_{oc} \cdot 0,6 = 295 \cdot 0,6 = 177 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po} = \frac{295}{1,63} \cdot 0,85 \cdot 0,89 = 136,91 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ct} = \frac{\tau_c}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt} = \frac{177}{1,31} \cdot 0,85 \cdot 0,945 = 108,53 \text{ MPa}$$

d) Určení únavové bezpečnosti

Náš případ, je případ stálého krutu, tudíž musíme použít mez kluzu v krutu τ_{kt} .

$$\tau_{kt} = \frac{R_e}{2} = \frac{325}{2} = 162,5 \text{ MPa}$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{kt}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{9,53}{138,91}\right)^2 + \left(\frac{38,18}{162,5}\right)^2}} = 4,09$$

Pokud by nastal případ proměnlivého krutu, spočítáme jeho únavovou bezpečnost takto:

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ct}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{9,53}{138,61}\right)^2 + \left(\frac{38,18}{108,53}\right)^2}} = 2,79$$



4.1.4 POROVNÁNÍ POUŽITÝCH METOD

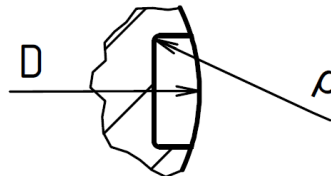
Pokud porovnáme použité metody, zjistíme, že z hlediska únavové bezpečnosti se lišíme v řádech setin (do 3%). Tedy pro výpočet únavové bezpečnosti lze použít všechny tři metody, aniž bychom se dopustili výrazné odchylky. Ovšem neoptimističtější se jeví výpočet za pomoci podkladů „Analytical strength assessment od Components in Mechanical Engineering“.

4.1.5 SOUHRN

Jak je vidět pro 1. místo výpočtu (osazení), které je namáháno stálým krutem a ohybem, vyšla naše únavová bezpečnost v celku vysoká, tudíž není potřeba konstrukčních úprav ke zvýšení této bezpečnosti.

4.2 MÍSTO DRUHÉHO VÝPOČTU

Místo 2. výpočtu



Obrázek 4. 2 - Místo 2. výpočtu

Pero drážka

Základní parametry:

$$D = 41 \text{ mm}$$

$$\rho = 0,6 \text{ mm}$$

$$M_{o_{max2}} = 197\,819 \text{ Nmm}$$

$$M_k = 321\,410 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{pt} = 590 \text{ MPa}$$

Výpočet:

4.2.1 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI ZA POMOCI DIAGRAMŮ [1]

a) Určíme napětí v místě vrubu

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{M_o}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} = \frac{197\,819}{\frac{\pi \cdot 41^3}{32}} = 29,24 \text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi \cdot d^3}{16}} = \frac{321\,410}{\frac{\pi \cdot 41^3}{16}} = 23,75 \text{ MPa}$$

b) Určení součinitelé pro daný vrub

Z přílohy 9.3 odečítáme a následně vypočítáme:

$$\eta_{po} = 0,84$$

$$\eta_{pt} = 0,5 \cdot (\eta_{po} + 1) = 0,5 \cdot (0,84 + 1) = 0,92$$



Z přílohy 9.4 vyplývá:

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{vt} = 0,83$$

Z přílohy 9.5 vyplývá:

$$\beta_o = 1,76$$

$$\beta_t = 1,54$$

Součinitele vrubu pro pero drážku jsou pevně dány.

c) Určení únavových napětí materiálu

Jedná se o stejný materiál tedy z přechozího případu víme:

$$\sigma_{oc} = 295 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = 177 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po} = \frac{295}{1,76} \cdot 0,83 \cdot 0,84 = 116,86 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ct} = \frac{\tau_c}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt} = \frac{177}{1,54} \cdot 0,83 \cdot 0,92 = 87,76 \text{ MPa}$$

d) Určení únavové bezpečnosti

V našem případě se jedná o případ stálého krutu, jak již víme z přechozích výpočtů:

$$\tau_{kt} = 162,5 \text{ MPa}$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{kt}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{29,24}{116,86}\right)^2 + \left(\frac{23,75}{162,5}\right)^2}} = 3,45$$

Ovšem pro proměnný krut lze vypočítat únavovou bezpečnost z amplitud napětí tedy:

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ct}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{29,24}{116,86}\right)^2 + \left(\frac{23,75}{87,76}\right)^2}} = 2,71$$



4.2.2 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI ZA POUŽITÍ INTERNETOVÉ STRÁNKY WWW.EFATIGUE.COM [2]

Nelze provést výpočet za pomoci uvedené internetové stránky, neboť pro výpočet pero drážky stránka uvažuje vybroušený konec, který neodpovídá námi navržené pero drážce.

4.2.3 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI POMOCÍ PODKLADŮ „ANALYTICAL STRENGTH ASSESSMENT OF COMPONENTS IN TECHNICAL ENGINEERING“ [3]

a) Určíme napětí v místě vrubu

$$\sigma_o = 29,24 \text{ MPa}$$

$$\tau = 23,75 \text{ MPa}$$

b) Určení součinitelů pro daný vrub

Z přílohy 9.3 odečítáme a následně vypočítáme:

$$\eta_{po} = 0,84$$

$$\eta_{pt} = 0,5 \cdot (\eta_{po} + 1) = 0,5 \cdot (0,84 + 1) = 0,92$$

Z přílohy 9.4 vyplývá:

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{vt} = 0,83$$

Z uvedených podkladů jsem odečetl

$$\beta_o = 1,83$$

$$\beta_t = 1,42$$

Součinitelů vrubu pro pero drážku jsou pevně dány.

c) Určení únavových napětí materiálu

Jedná se o stejný materiál, z přechozího případu víme:

$$\sigma_{oc} = 295 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = 177 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po} = \frac{295}{1,83} \cdot 0,83 \cdot 0,84 = 112,39 \text{ MPa}$$



$$\tau_{ct} = \frac{\tau_c}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt} = \frac{177}{1,42} \cdot 0,83 \cdot 0,92 = 95,18 \text{ MPa}$$

d) Určení únavové bezpečnosti

V našem případě se jedná o případ stálého krutu, jak již víme z přechozích výpočtů:

$$\tau_{kt} = 162,5 \text{ MPa}$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{kt}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{29,24}{112,39}\right)^2 + \left(\frac{23,75}{162,5}\right)^2}} = 3,35$$

Ovšem pro proměnný krut lze vypočítat únavovou bezpečnost z amplitud napětí:

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ct}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{29,24}{116,86}\right)^2 + \left(\frac{23,75}{95,18}\right)^2}} = 2,77$$

4.2.4 POROVNÁNÍ POUŽITÝCH METOD

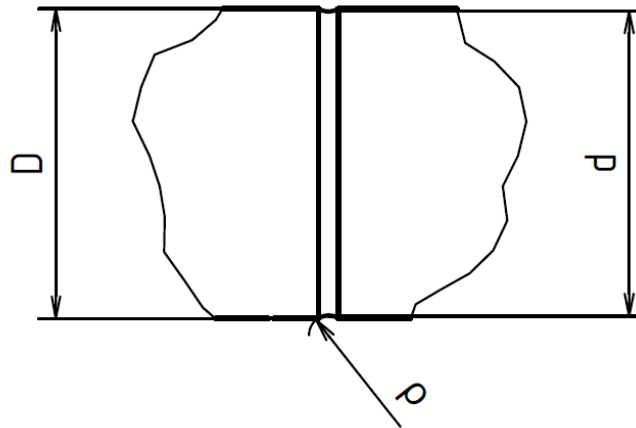
U tohoto místa (pero drážka) lze porovnat pouze dvě metody výpočtu, neboť internetová stránka nenabízí nám odpovídající perodrážku. V obou případech výpočtu nám vyšla bezpečnost vysoká, ovšem při použití podkladů, je výsledek únavové bezpečnosti optimističtější. Lišíme se v řádech setin (6%).

4.2.5 SHRUTÍ

Jak je vidět pro 2. místo výpočtu (pero drážka), které je opět namáháno stálým krutem a ohybem, vyšla naše únavová bezpečnost v celku vysoká, tudíž není za potřebí konstrukčních úprav ke zvýšení této bezpečnosti.

4.3 MÍSTO TŘETÍHO VÝPOČTU

Místo 3. výpočtu



Obrázek 4. 3 - Místo 3. výpočtu

Zápich

Základní parametry:

$$D = 35 \text{ mm}$$

$$d = 34,4 \text{ mm}$$

$$\rho = 2,5 \text{ mm}$$

$$M_{o\max 3} = 0 \text{ Nmm}$$

$$M_k = 321\,410 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_{pt} = 590 \text{ MPa}$$

Výpočet:

4.3.1 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI ZA POMOCI DIAGRAMŮ [1]

a) Určení napětí v místě vrubu

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{0}{W_o} = 0 \text{ MPa}$$



$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi \cdot d^3}{16}} = \frac{321\,410}{\frac{\pi \cdot 34,4^3}{16}} = 40,21 \text{ MPa}$$

b) Určení součinitelů pro daný vrub

Pro určení součinitele α je nutné spočítat:

$$\frac{\rho}{D - d} = \frac{2,5}{35 - 34,4} = 4,16$$

$$\frac{\rho}{d} = \frac{2,5}{34,4} = 0,073$$

Z přílohy 9.6 odečteme:

$$\alpha_o = 1,62$$

$$\alpha_t = 1,31$$

Z přílohy 9.2 odečteme:

$$q = 0,71$$

V předešlém případě jsme určili součinitel $\eta_{po} = 0,84$ vzhledem k tomu, že se jedná o stejný materiál a o stejnou povrchovou úpravu, je tento součinitel stejný tedy i součinitel η_{pt} nabývá stejné hodnoty a to 0,92.

Z přílohy 9.4 je patrné:

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{vt} = 0,85$$

Součinitel vrubu β :

$$\beta_o = 1 + q \cdot (\alpha_o - 1) = 1 + 0,71 \cdot (1,62 - 1) = 1,44$$

$$\beta_t = 1 + q \cdot (\alpha_t - 1) = 1 + 0,71 \cdot (1,31 - 1) = 1,22$$



c) Určení únavových napětí materiálu

Jedná se o stejný materiál tedy z přechozích případů víme:

$$\sigma_{oc} = 295 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = 177 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po} = \frac{295}{1,44} \cdot 0,85 \cdot 0,84 = 146,07 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ct} = \frac{\tau_c}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt} = \frac{177}{1,22} \cdot 0,85 \cdot 0,92 = 113,45 \text{ MPa}$$

d) Určení únavové bezpečnosti

Opět nastává případ stálého krutu, jak již víme z přechozích výpočtů:

$$\tau_{kt} = 162,5 \text{ MPa}$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{kt}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{0}{146,07}\right)^2 + \left(\frac{40,21}{162,5}\right)^2}} = 4,04$$

Pro případ proměnlivého krutu lze určit tuto bezpečnost:

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ct}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{0}{146,07}\right)^2 + \left(\frac{40,21}{113,45}\right)^2}} = 2,82$$

4.3.2 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI ZA POMOCI INTERNETOVÉ STRÁNKY WWW.EFATIGUE.COM [2]

a) Určení napětí v místě vrubu

Napětí v místě vrubu je stejné jako v přechozím případě

$$\sigma_o = 0 \text{ MPa}$$

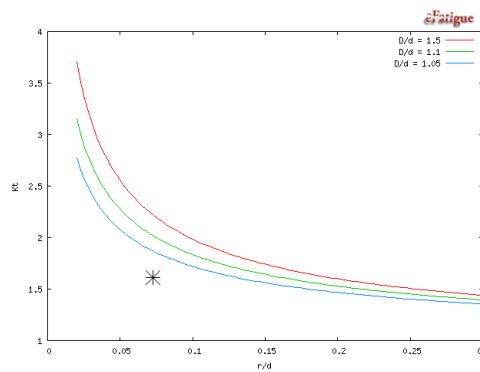
$$\tau = 40,21 \text{ MPa}$$

b) Určení součinitelů pro daný vrub

Součinitel α je určen za pomoci internetové stránky efatigue:

Namáhání ohybem

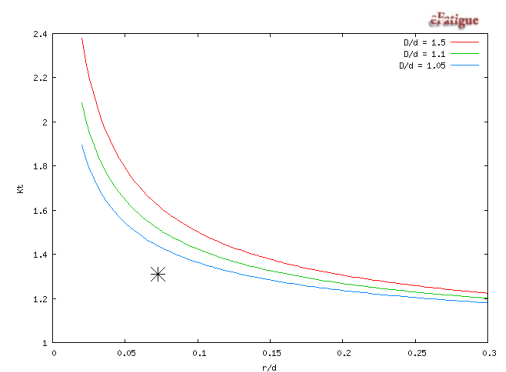
$$K_t = 1.61 = \alpha_o$$



Obrázek 4.3.2 1 - Součinitel tvaru pro namáhání ohybem

Namáhání krutem

$$K_t = 1.31 = \alpha_t$$



Obrázek 4.3.2 2 - Součinitel tvaru pro namáhání krutem

Z přílohy 9.2 odečteme:

$$q = 0,71$$

V předešlém případě jsme určili součinitel $\eta_{po} = 0,84$ vzhledem k tomu, že se jedná o stejný materiál a o stejnou povrchovou úpravu, je tento součinitel stejný tedy i součinitel η_{pt} nabývá stejné hodnoty a to 0,92.

Z přílohy 9.4 je patrné:

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{vt} = 0,85$$

Součinitel vrubu β :

$$\beta_o = 1 + q \cdot (\alpha_o - 1) = 1 + 0,71 \cdot (1,61 - 1) = 1,43$$

$$\beta_t = 1 + q \cdot (\alpha_t - 1) = 1 + 0,71 \cdot (1,31 - 1) = 1,22$$



c) Určení únavových napětí materiálu

Jedná se o stejný materiál a z přechozích případů víme:

$$\sigma_{oc} = 295 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = 177 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po} = \frac{295}{1,43} \cdot 0,85 \cdot 0,84 = 147,29 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ct} = \frac{\tau_c}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt} = \frac{177}{1,22} \cdot 0,85 \cdot 0,92 = 113,45 \text{ MPa}$$

d) Určení únavové bezpečnosti

Opět nastává případ stálého krutu, jak již víme z přechozích výpočtů:

$$\tau_{kt} = 162,5 \text{ MPa}$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{kt}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{0}{147,29}\right)^2 + \left(\frac{40,21}{162,5}\right)^2}} = 4,04$$

Pro případ proměnlivého krutu lze určit tuto bezpečnost:

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ct}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{0}{147,29}\right)^2 + \left(\frac{40,21}{113,45}\right)^2}} = 2,82$$

4.3.3 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI POMOCÍ PODKLADŮ „ANALYTICAL STRENGTH ASSESSMENT OF COMPONENTS IN TECHNICAL ENGINEERING“ [3]

a) Určení napětí v místě vrubu

$$\sigma_o = 0 \text{ MPa}$$

$$\tau = 40,21 \text{ MPa}$$

b) Určení součinitelů pro daný vrub

Součinitel α je určen za pomoci výše uvedených podkladů:

Pro určení součinitelů je nutné odměřit nebo dopočítat velikost osazení t .

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{35 - 34,4}{2} = 0,3 \text{ mm}$$



Namáhání ohybem

$$\alpha_o = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,20 \cdot \frac{\rho}{t} + 5,5 \cdot \frac{\rho}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\rho}{d}\right)^2}}$$
$$\alpha_o = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,20 \cdot \frac{2,5}{0,3} + 5,5 \cdot \frac{2,5}{34,4} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{2,5}{34,4}\right)^2}} = 1,68$$

Namáhání krutem

$$\alpha_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,70 \cdot \frac{\rho}{t} + 20,6 \cdot \frac{\rho}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\rho}{d}\right)^2}}$$
$$\alpha_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,70 \cdot \frac{2,5}{0,3} + 20,6 \cdot \frac{2,5}{34,4} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{2,5}{34,4}\right)^2}} = 1,36$$

Z přílohy 9.2 odečteme:

$$q = 0,71$$

V předešlém případě jsme určili součinitel $\eta_{po} = 0,84$ vzhledem k tomu, že se jedná o stejný materiál a o stejnou povrchovou úpravu, je tento součinitel stejný tedy i součinitel η_{pt} nabývá stejné hodnoty a to 0,92.

Z přílohy 9.4 je patrné:

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{vt} = 0,85$$

Součinitel vrubu β :

$$\beta_o = 1 + q \cdot (\alpha_o - 1) = 1 + 0,71 \cdot (1,68 - 1) = 1,48$$

$$\beta_t = 1 + q \cdot (\alpha_t - 1) = 1 + 0,71 \cdot (1,36 - 1) = 1,26$$

c) Určení únavových napětí materiálu

Jedná se o stejný materiál a z přechozích případů víme:

$$\sigma_{oc} = 295 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = 177 \text{ MPa}$$



$$\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po} = \frac{295}{1,48} \cdot 0,85 \cdot 0,84 = 142,32 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ct} = \frac{\tau_c}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt} = \frac{177}{1,26} \cdot 0,85 \cdot 0,92 = 109,85 \text{ MPa}$$

d) Určení únavové bezpečnosti

Opět nastává případ stálého krutu, jak již víme z přechozích výpočtů:

$$\tau_{kt} = 162,5 \text{ MPa}$$

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{kt}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{0}{142,32}\right)^2 + \left(\frac{40,21}{162,5}\right)^2}} = 4,04$$

Pro případ proměnlivého krutu lze určit tuto bezpečnost:

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ct}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{0}{142,32}\right)^2 + \left(\frac{40,21}{109,85}\right)^2}} = 2,73$$

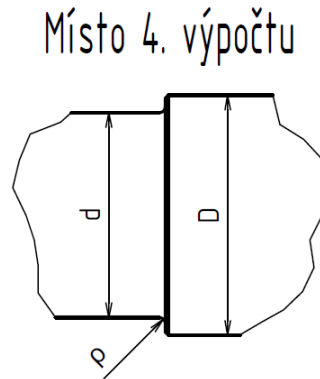
4.3.4 POROVNÁNÍ POUŽITÝCH METOD

Z výpočtů je vidět, že se v tomto místě s bezpečností vůbec nelišíme. Tudíž se dá konstatovat, že se všechny metody shodují na stejném výsledku. Teoreticky by se ovšem výsledky lišit měly, neboť jsme odečetli součinitel α_o různý. Vzhledem k tomu, že je v tomto místě ohybové napětí rovno nule, nemá tato odchylka vliv na celkovou bezpečnost.

4.3.5 SOUHRN

Jak je vidět pro 3. místo výpočtu (zápich), které je opět namáháno pouze stálým krutem a ohybem, vyšla naše únavová bezpečnost v celku vysoká, tudíž není zapotřebí konstrukčních úprav ke zvýšení této bezpečnosti.

4.4 MÍSTO ČVRTÉHO VÝPOČTU



Obrázek 4. 4 - Místo 4. výpočtu

Osazení

Základní parametry:

$$D = 41\text{mm}$$

$$d = 35\text{ mm}$$

$$\rho = 1\text{ mm}$$

$$M_{o\max 1} = 16\,605\text{ Nmm}$$

$$M_k = 0\text{ Nmm}$$

$$\sigma_{pt} = 590\text{ MPa}$$

Výpočet:

4.4.1 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI ZA POMOCI DIAGRAMŮ [1]

a) Určení napětí v místě vrubu

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{M_o}{\frac{\pi \cdot d^3}{32}} = \frac{16\,605}{\frac{\pi \cdot 35^3}{32}} = 3,95\text{ MPa}$$

$$\tau = \frac{M_k}{W_k} = \frac{M_k}{\frac{\pi \cdot d^3}{16}} = \frac{0}{\frac{\pi \cdot 35^3}{16}} = 0\text{ MPa}$$

b) Určení součinitelů pro daný vrub

Pro určení součinitele α je nutno spočítat:



$$\frac{\rho}{D-d} = \frac{1}{41-35} = \frac{1}{6} \approx 0,17$$

$$\frac{\rho}{d} = \frac{1}{35} = 0,02$$

Z přílohy 9.1 odečteme:

$$\alpha_t = 1,78$$

$$\alpha_o = 2,54$$

Z přílohy 9.2 vyplývá:

$$q = 0,48$$

Z přílohy 9.3 odečteme a vypočítáme:

$$\eta_{po} = 0,89$$

$$\eta_{pt} = 0,5 \cdot (1 + \eta_{po}) = 0,5 \cdot (1 + 0,89) = 0,945$$

Z přílohy 9.4 odečteme:

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{vt} = 0,85$$

Součinitel vrubu β :

$$\beta_o = 1 + q \cdot (\alpha_o - 1) = 1 + 0,48 \cdot (2,54 - 1) = 1,74$$

$$\beta_t = 1 + q \cdot (\alpha_t - 1) = 1 + 0,48 \cdot (1,78 - 1) = 1,37$$

c) Určení únavových napětí materiálu

$$\sigma_{oc} = \sigma_p \cdot 0,5 = 590 \cdot 0,5 = 295 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = \sigma_{oc} \cdot 0,6 = 295 \cdot 0,6 = 177 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po} = \frac{295}{1,74} \cdot 0,85 \cdot 0,89 = 136,18 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ct} = \frac{\tau_c}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt} = \frac{177}{1,37} \cdot 0,85 \cdot 0,945 = 103,78 \text{ MPa}$$

d) Určení únavové bezpečnosti

Určení únavové bezpečnosti pro případ amplitudových napětí

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ct}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{3,95}{136,18}\right)^2 + \left(\frac{0}{103,78}\right)^2}} = 34,48$$

4.4.2 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI ZA POMOCI INTERNETOVÉ STRÁNKY WWW.EFATIGUE.COM [2]

a) Určení napětí v místě vrubu

Napětí v místě vrubu je stejné jako v přechozím případě

$$\sigma_o = 3,95 \text{ MPa}$$

$$\tau = 0 \text{ MPa}$$

b) Určení součinitelů pro daný vrub:

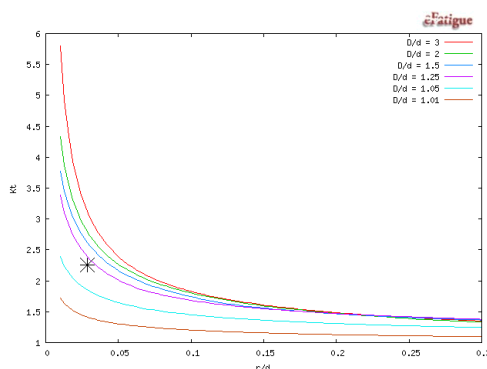
Součinitel α je určen za pomoci internetové stránky efatigue:

Namáhání ohybem

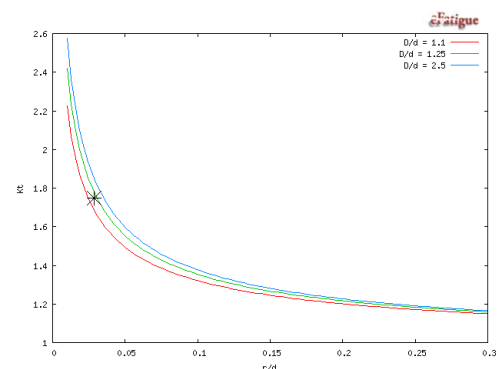
$$K_t = 2.26 = \alpha_o$$

Namáhání krutem

$$K_t = 1.75 = \alpha_t$$



Obrázek 4.4.2 1 - Součinitel tvaru pro namáhání ohybem



Obrázek 4.4.2 2 - Součinitel tvaru pro namáhání krutem

Z přílohy 9.2 odečteme:

$$q = 0,48$$

Z přílohy 9.3 odečteme a následně vypočítáme:

$$\eta_{po} = 0,89$$

$$\eta_{pt} = 0,5 \cdot (1 + \eta_{po}) = 0,5 \cdot (1 + 0,89) = 0,945$$

Z přílohy 9.4 vyplývá:

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{vt} = 0,85$$

Součinitel vrubu β :



$$\beta_o = 1 + q \cdot (\alpha_o - 1) = 1 + 0,48 \cdot (2,26 - 1) = 1,61$$

$$\beta_t = 1 + q \cdot (\alpha_t - 1) = 1 + 0,48 \cdot (1,75 - 1) = 1,36$$

c) Určení únavových napětí materiálu

$$\sigma_{oc} = \sigma_p \cdot 0,5 = 590 \cdot 0,5 = 295 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = \sigma_{oc} \cdot 0,6 = 295 \cdot 0,6 = 177 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po} = \frac{295}{1,61} \cdot 0,85 \cdot 0,89 = 138,61 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ct} = \frac{\tau_c}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt} = \frac{177}{1,36} \cdot 0,85 \cdot 0,945 = 104,54 \text{ MPa}$$

d) Určení únavové bezpečnosti

Případ amplitudových napětí:

$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ct}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{3,95}{138,61}\right)^2 + \left(\frac{0}{104,54}\right)^2}} = 35,09$$

4.4.3 VÝPOČET ÚNAVOVÉ BEZPEČNOSTI POMOCÍ PODKLADŮ „ANALYTICAL STRENGTH ASSESSMENT OF COMPONENTS IN TECHNICAL ENGINEERING“ [3]

a) Určení napětí v místě vrubu

$$\sigma_o = 3,95 \text{ MPa}$$

$$\tau = 0 \text{ MPa}$$

b) Určení součinitelů pro daný vrub

Součinitel α je určen za pomoci výše uvedených podkladů:

Pro určení součinitelů je nutné odměřit nebo dopočítat velikost osazení t .

$$t = \frac{D - d}{2} = \frac{41 - 35}{2} = 3 \text{ mm}$$

Namáhání ohybem

$$\alpha_o = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,62 \cdot \frac{\rho}{t} + 11,6 \cdot \frac{\rho}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\rho}{d}\right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{\rho}{t}\right)^3 \cdot \frac{d}{D}}}$$



$$\alpha_o = 1 + \frac{1}{\sqrt{0,62 \cdot \frac{1}{3} + 11,6 \cdot \frac{1}{35} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{1}{35}\right)^2 + 0,2 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^3 \cdot \frac{35}{41}}} = 2,31$$

Namáhání krutem

$$\alpha_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{3,4 \cdot \frac{\rho}{t} + 38 \cdot \frac{\rho}{d} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{\rho}{d}\right)^2 + 1,0 \cdot \left(\frac{\rho}{t}\right)^2 \cdot \frac{d}{D}}}$$

$$\alpha_t = 1 + \frac{1}{\sqrt{3,4 \cdot \frac{1}{3} + 38 \cdot \frac{1}{35} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{1}{35}\right)^2 + 1,0 \cdot \left(\frac{1}{3}\right)^2 \cdot \frac{35}{41}}} = 1,64$$

Z přílohy 9.2 odečteme:

$$q = 0,48$$

Z přílohy 9.3 odečteme a následně vypočítáme:

$$\eta_{po} = 0,89$$

$$\eta_{pt} = 0,5 \cdot (1 + \eta_{po}) = 0,5 \cdot (1 + 0,89) = 0,945$$

Z přílohy 9.4 vyplývá:

$$\varepsilon_{vo} = \varepsilon_{vt} = 0,85$$

Součinitel vrubu β :

$$\beta_o = 1 + q \cdot (\alpha_o - 1) = 1 + 0,48 \cdot (2,31 - 1) = 1,63$$

$$\beta_t = 1 + q \cdot (\alpha_t - 1) = 1 + 0,48 \cdot (1,64 - 1) = 1,31$$

c) Určení únavových napětí materiálu

$$\sigma_{oc} = \sigma_p \cdot 0,5 = 590 \cdot 0,5 = 295 \text{ MPa}$$

$$\tau_c = \sigma_{oc} \cdot 0,6 = 295 \cdot 0,6 = 177 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{oc}^x = \frac{\sigma_{oc}}{\beta_o} \cdot \varepsilon_{vo} \cdot \eta_{po} = \frac{295}{1,63} \cdot 0,85 \cdot 0,89 = 136,91 \text{ MPa}$$

$$\tau_{ct} = \frac{\tau_c}{\beta_t} \cdot \varepsilon_{vt} \cdot \eta_{pt} = \frac{177}{1,31} \cdot 0,85 \cdot 0,945 = 108,53 \text{ MPa}$$

d) Určení únavové bezpečnosti

Určení únavové bezpečnosti pro případ amplitudových napětí



$$k = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{\sigma_o}{\sigma_{oc}^x}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_{ct}}\right)^2}} = \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{3,95}{136,91}\right)^2 + \left(\frac{0}{108,53}\right)^2}} = 34,66$$

4.4.4 POROVNÁNÍ POUŽITÝCH METOD

U tohoto místa se únavová bezpečnost liší v řádech desetin (do 10%), což by v některých případech mohlo hrát významnou roli. Ovšem v našem případě je to zcela zanedbatelné vzhledem k extrémní bezpečnosti.

4.4.5 SOUHRN

Jak je vidět pro 4. místo výpočtu (osazení), které je namáháno pouze ohybem, vyšla naše únavová bezpečnost extrémně vysoká, tudíž není zapotřebí konstrukčních úprav ke zvýšení této bezpečnosti. Toto místo je stejné jako 1. místo výpočtu, liší se pouze ve složení napětí. Provedli jsme kontrolu tohoto místa, abychom se ujistili jednak o správnosti výpočtu a jednak o bezpečnosti této součásti.

5 ZÁVĚR

Jak již bylo uvedeno v kapitole výše, naše výpočty prokázaly, že únavová bezpečnost pro naše místa určení je poměrně vysoká, někdy až extrémně. Tudíž lze soudit, že takto konstrukčně navržená hřídel, je správně navržená hřídel a nejsou nutné konstrukční úpravy za účelem zvýšení bezpečnosti. Ovšem za zmínku stojí místo čtvrté, kde vyšla bezpečnost $k \approx 35$. Taková bezpečnost je extrémní a je tedy patrné, že takové místo je předdimenzováno a lze tedy uvažovat o konstrukčních úpravách na snížení hmotnosti této součásti jako je například zmenšení malého průměru.

Místo výpočtu	Použitá metoda					
	Výpočet pomocí skript PP I [1]		Výpočet pomocí Efatigue.com [2]		Výpočet pomocí podkladů [3]	
	β_o	β_t	β_o	β_t	β_o	β_t
1.	1,74	1,37	1,61	1,36	1,63	1,31
2.	1,76	1,54	-	-	1,83	1,42
3.	1,44	1,22	1,43	1,22	1,48	1,26
4.	1,74	1,37	1,61	1,36	1,63	1,31

Tabulka 1. 1 - porovnání použitých metod

V tabulce jsou uvedeny součinitele vrubu pro jednotlivé případy výpočtu. Jak lze vidět, nejoptimističtější vychází druhý případ výpočtu (efatigue.com [2]). Ovšem nejpesimističtější je výpočet pomocí skript PP I [1]. Přibližně mezi oběma předchozími výpočty jsou výsledky získané podle předpisu [3], a proto bych pro zjištění součinitele vrubu doporučoval tento postup.



6 BIBLIOGRAFIE

- [1] MICHALEC, Jiří. *Pružnost a pevnost II*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001, 215 s.
- [2] *Efatigue* [online]. 2008 [cit. 2015-07-06]. Dostupné z: www.efatigue.com
- [3] FKM - GUIDELINE. *ANALYTICAL STRENGTH ASSESSMENT OF COMPONENTS IN MECHANICAL ENGINEERING*. Frankfurt: Forschungskuratorium Maschinenbaum (FKM), 2003.
- [4] ŘEZNÍČEK, Jan. *Doplněk skript PP I - kapitola Únava* [online]. [cit. 2015-07-06]. Dostupné z: http://www.pruznost.unas.cz/PP_I_unava_s.pdf



7 SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1. 1 – SCHÉMA VZNIKU LOMU [1]	11
OBRÁZEK 1. 2 - CYKLICKÉ ZATÍŽENÍ	12
OBRÁZEK 1. 3 – PULZUJÍCÍ NAPĚTÍ	13
OBRÁZEK 1. 4 – NAPĚTÍ MÍJIVÉ	13
OBRÁZEK 1. 5 – NAPĚTÍ NESYMETRICKY STŘÍDAVÉ	13
OBRÁZEK 1. 6 – NAPĚTÍ SYMETRICKY STŘÍDAVÉ	13
OBRÁZEK 1. 7 - WÖHLERŮV PŮVODNÍ DIAGRAM	14
OBRÁZEK 1. 8 - WÖHLERŮV DIAGRAM V LOG. SOUŘADNICÍCH	15
OBRÁZEK 1. 9 - HAIGHŮV DIAGRAM	16
OBRÁZEK 1. 10 – HAIGHŮV DIAGRAM	17
OBRÁZEK 1. 11 - ZJEDNODUŠENÝ HAIGHŮV DIAGRAM	18
OBRÁZEK 1. 12 - SMITHŮV DIAGRAM	19
OBRÁZEK 1. 13 - ZJEDNODUŠENÝ SMITHŮV DIAGRAM	19
OBRÁZEK 2. 1 - OBLÝ VRUB	21
OBRÁZEK 2. 2 - OSAZENÍ PLECHU	21
OBRÁZEK 2. 3 - „V“ VRUB	22
OBRÁZEK 2. 4 - OTVOR V DESCE	22
OBRÁZEK 2. 5 - ZÁPICH	22
OBRÁZEK 2. 6 – OSAZENÍ HŘÍDELE	22
OBRÁZEK 2. 7 - DRÁŽKA	22
OBRÁZEK 3. 1 - PŘEVODOVKA	35
OBRÁZEK 3. 2 - VÝSTUPNÍ HŘÍDEL	35
OBRÁZEK 3. 3 - VÝKRES VÝSTUPNÍ HŘÍDELE	36
OBRÁZEK 3. 4 - MÍSTA ÚNAVOVÝCH VÝPOČTŮ	36
OBRÁZEK 4. 1 - MÍSTO 1. VÝPOČTU	37
OBRÁZEK 4. 2 - MÍSTO 2. VÝPOČTU	44
OBRÁZEK 4. 3 - MÍSTO 3. VÝPOČTU	48
OBRÁZEK 4. 4 - MÍSTO 4. VÝPOČTU	55
OBRÁZEK 4.1.2 1 - SOUČINITEL TVARU PRO NAMÁHÁNÍ OHYBEM	39
OBRÁZEK 4.1.2 2 - SOUČINITEL TVARU PRO NAMÁHÁNÍ KRUTEM	39
OBRÁZEK 4.3.2 1 - SOUČINITEL TVARU PRO NAMÁHÁNÍ OHYBEM	51
OBRÁZEK 4.3.2 2 - SOUČINITEL TVARU PRO NAMÁHÁNÍ KRUTEM	51
OBRÁZEK 4.4.2 1 - SOUČINITEL TVARU PRO NAMÁHÁNÍ OHYBEM	57
OBRÁZEK 4.4.2 2 - SOUČINITEL TVARU PRO NAMÁHÁNÍ KRUTEM	57



OBRÁZEK 9. 1 - ČINITELÉ TVARU PRO OSAZENÍ HŘÍDELE NAMÁHANÉ KRUTEM A OHYBEM	67
OBRÁZEK 9. 2 - VLIV POLOMĚRU VRUBU NA SOUČINITELE VRUBOVÉ CITLIVOSTI OCELÍ	68
OBRÁZEK 9. 3 - VLIV JAKOSTI POVRCHU	69
OBRÁZEK 9. 4 - SOUČINITELE VELIKOSTI DLE SERENSENA PŘI NAMÁHÁNÍ V OHYBU A KRUTU	70
OBRÁZEK 9. 5 - SOUČINITELE VRUBU PRO PERO DRÁŽKU PŘI NAMÁHÁNÍ OHYBEM NEBO KRUTEM	71
OBRÁZEK 9. 6 - ČINITELÉ TVARU PRO HŘÍDELE S VRUBEM NAMÁHANÉ KRUTEM NEBO OHYBEM	72
OBRÁZEK 9. 7 – MÍSTO 1. VÝPOČTU OHYB	73
OBRÁZEK 9. 8 - MÍSTO 1. VÝPOČTU KRUT	73
OBRÁZEK 9. 9 - MÍSTO 3. VÝPOČTU OHYB	74
OBRÁZEK 9. 10 - MÍSTO 3. VÝPOČTU KRUT	74
OBRÁZEK 9. 11 - MÍSTO 4. VÝPOČTU OHYB	75
OBRÁZEK 9. 12 - MÍSTO 4. VÝPOČTU KRUT	75

[1] -RED-. *Co je co* [online]. [cit. 6.7.2015]. Dostupný na WWW:

http://www.cojeco.cz/index.php?detail=1&id_desc=100894&s_lang=2



8 SEZNAM TABULEK

TABULKA 1. 1 - POROVNÁNÍ POUŽITÝCH METOD

61



9 PŘÍLOHY

9.1 ČINITELÉ TVARU PRO OSAZENÍ HŘÍDELE NAMÁHANÉ KRUTEM A OHYBEM [4]

9.2 VLIV POLOMĚRU VRUBU NA SOUČINITELE VRUBOVÉ CITLIVOSTI OCELÍ [4]

9.3 VLIV JAKOSTI POVRCHU [4]

9.4 SOUČINITELE VELIKOSTI DLE SERESENA PŘI NAMÁHÁNÍ V OHYBU A KRUTU [4]

9.5 SOUČ. VRUBU PRO PERO DRÁŽKU PŘI NAMÁHÁNÍ OHYBEM NEBO KRUTEM [4]

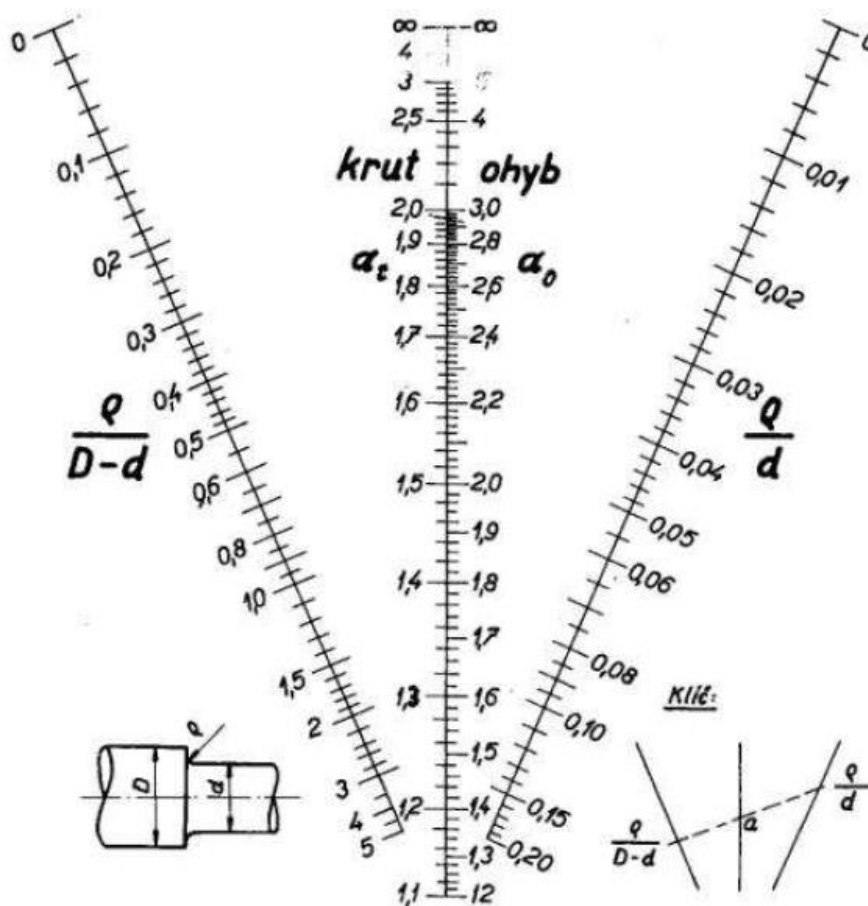
9.6 ČINITELÉ TVARU PRO HŘÍDELE VRUBEM NAMÁHANÉ KRUTEM A OHYBEM [4]

9.7 MÍSTO 1. VÝPOČTU [2]

9.8 MÍSTO 3. VÝPOČTU [4]

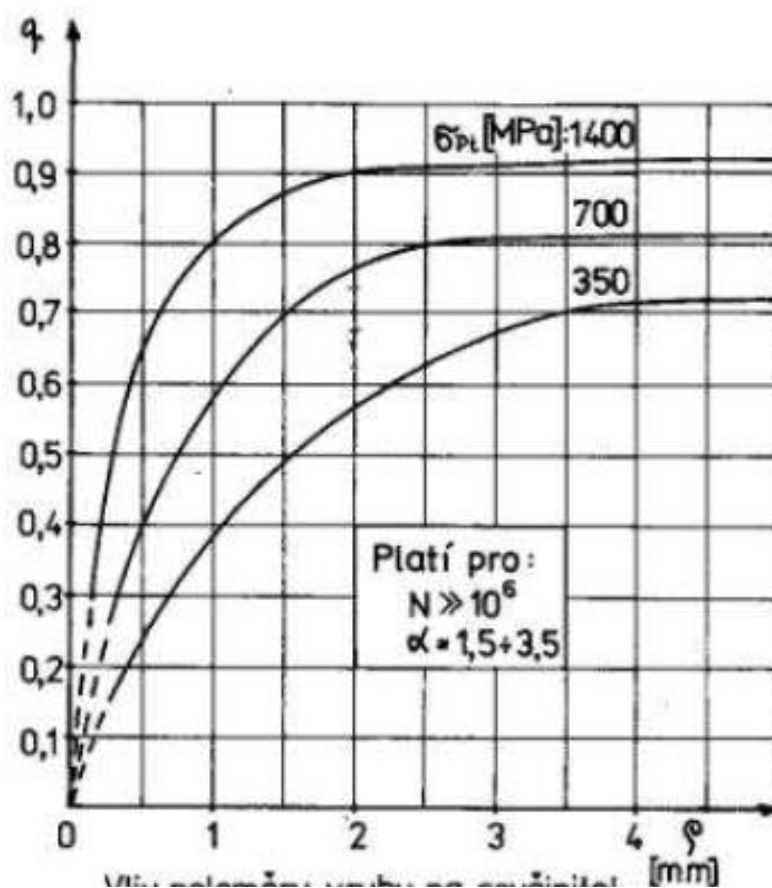
9.9 MÍSTO 4. VÝPOČTU [4]

9.1 ČINITELÉ TVARU PRO OSAZENÍ HŘÍDELE NAMÁHANÉ KRUTEM A OHYBEM [4]



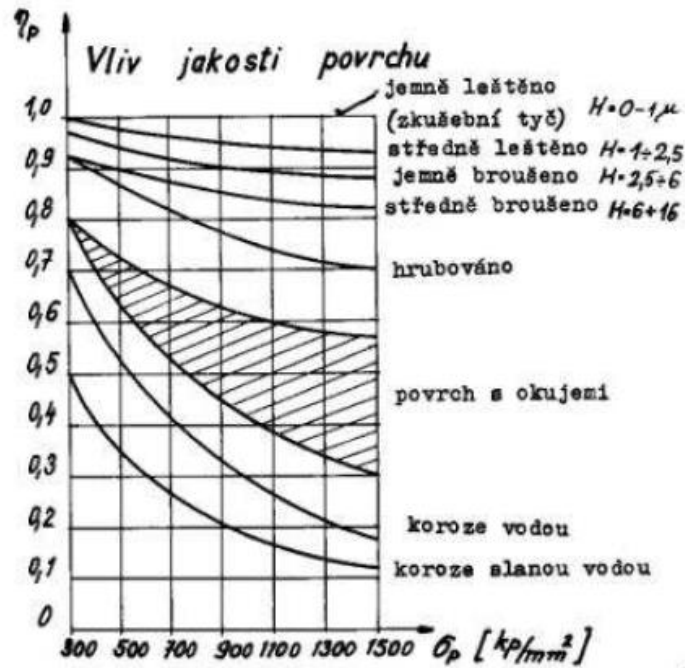
Obrázek 9. 1 - Činitelé tvaru pro osazení hřídele namáhané krutem a ohybem

9.2 VLIV POLOMĚRU VRUBU NA SOUČINITELE VRUBOVÉ CITLIVOSTI OCELÍ [4]



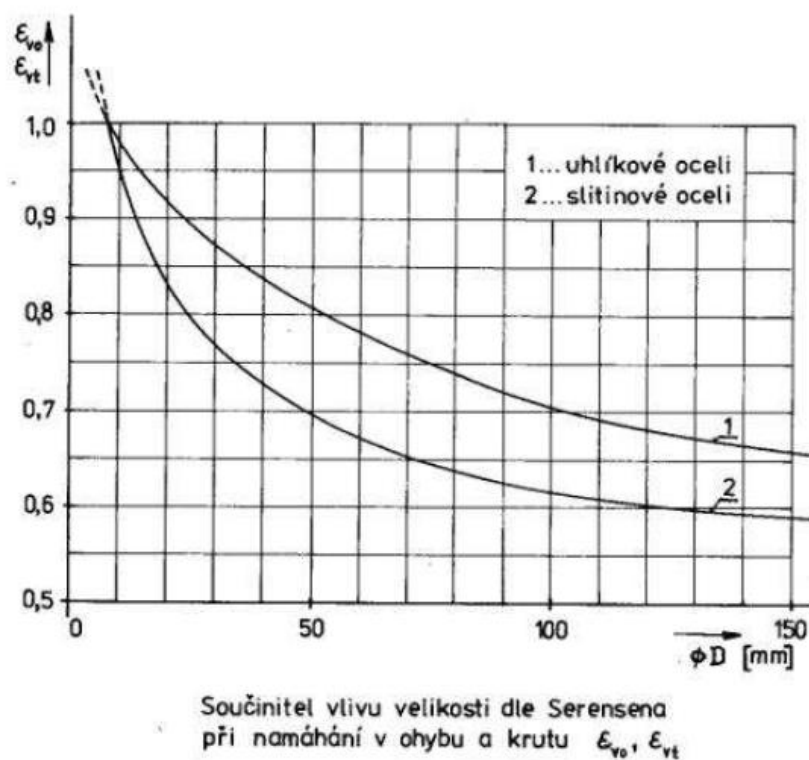
Obrázek 9. 2 - Vliv poloměru vrubu na součinitele vrubové citlivosti ocelí

9.3 VLIV JAKOSTI POVRCHU [4]



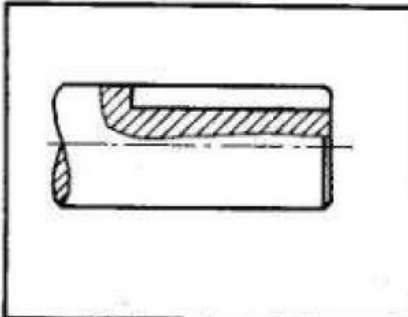
Obrázek 9. 3 - Vliv jakosti povrchu

9.4 SOUČINTEL VELIKOSTI DLE SERENSENA PŘI NAMÁHÁNÍ V OHYBU A KRUTU [4]



Obrázek 9. 4 - Součinitel velikosti dle Serensena při namáhání v ohybu a krutu

9.5 SOUČ. VRUBU PRO PERO DRÁŽKU PŘI NAM. OHYBEM NEBO KRUTEM [4]

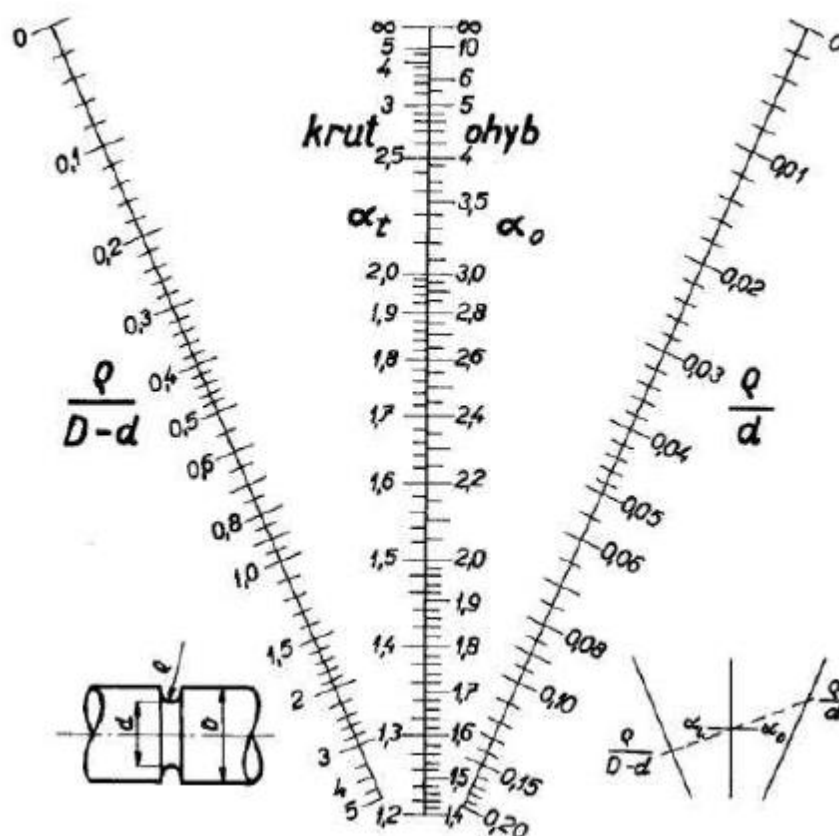


σ_F [MPa]	β_o OHYB	β_t KRUT
400	1,51	1,20
500	1,64	1,37
600	1,76	1,54
700	1,89	1,71
800	2,01	1,88
900	2,14	2,05
1000	2,26	2,22
1200	2,50	2,39

Obrázek 9. 5 - Součinitel vrubu pro pero drážku při namáhání ohybem nebo krutem

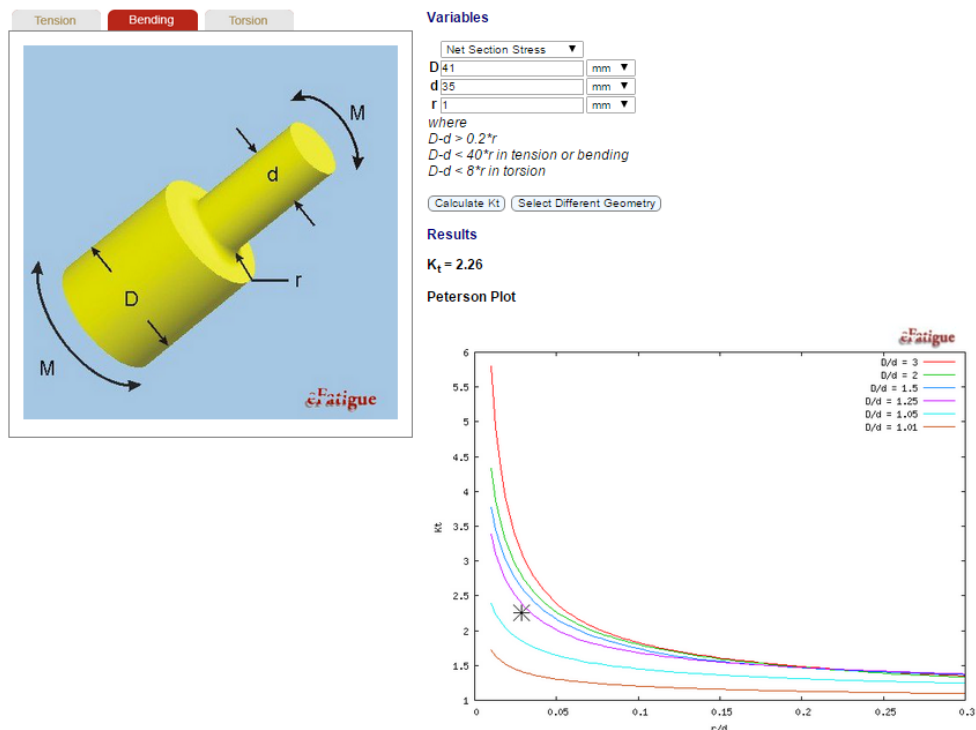


9.6 ČINITELÉ TVARU PRO HŘÍDELE S VRUBEM NAM. KRUTEM NEBO OHYBEM [4]

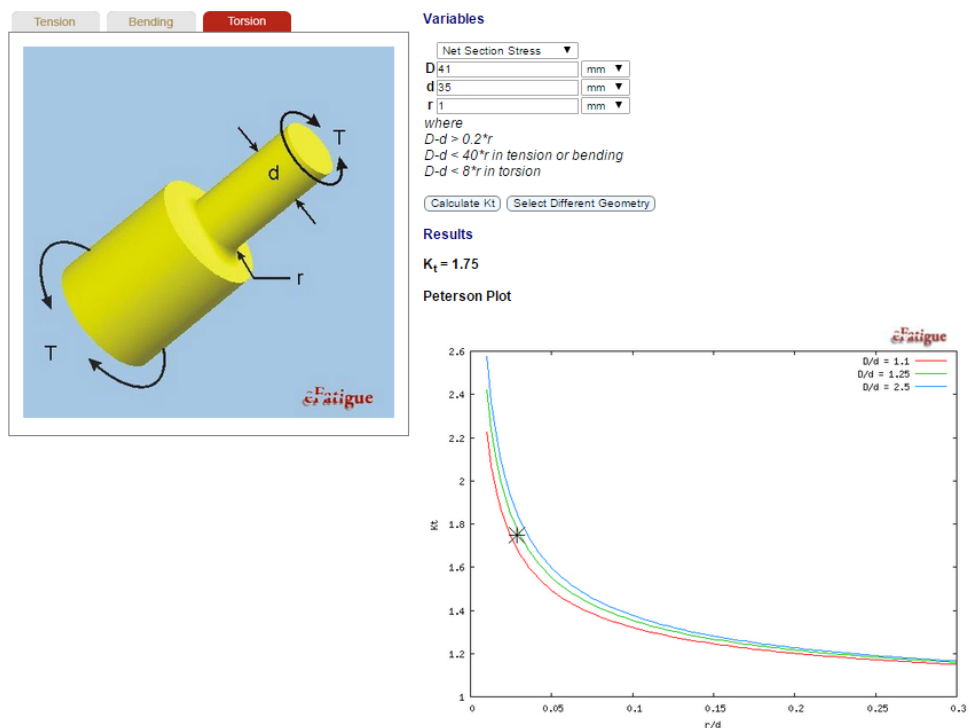


Obrázek 9. 6 - Činitelé tvaru pro hřídele s vrubem namáhané krutem nebo ohybem

9.7 MÍSTO 1. VÝPOČTU [2]

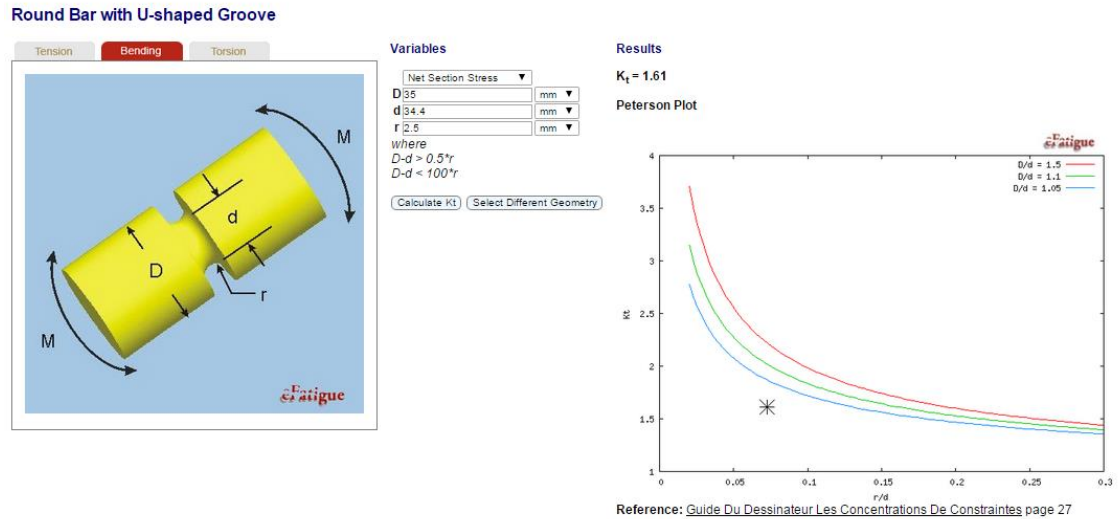


Obrázek 9. 7 – Místo 1. výpočtu ohyb

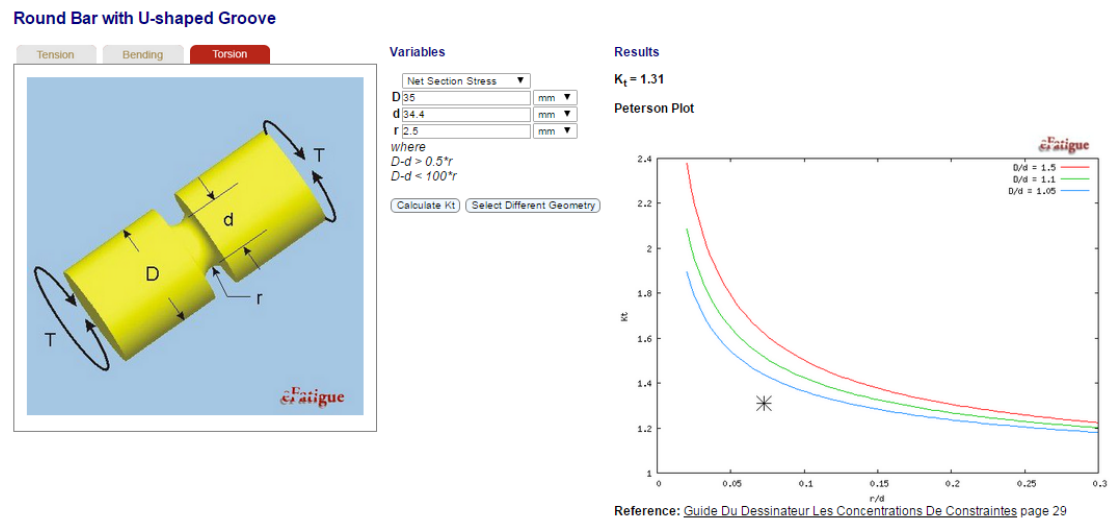


Obrázek 9. 8 - Místo 1. výpočtu krut

9.8 MÍSTO 3. VÝPOČTU [2]

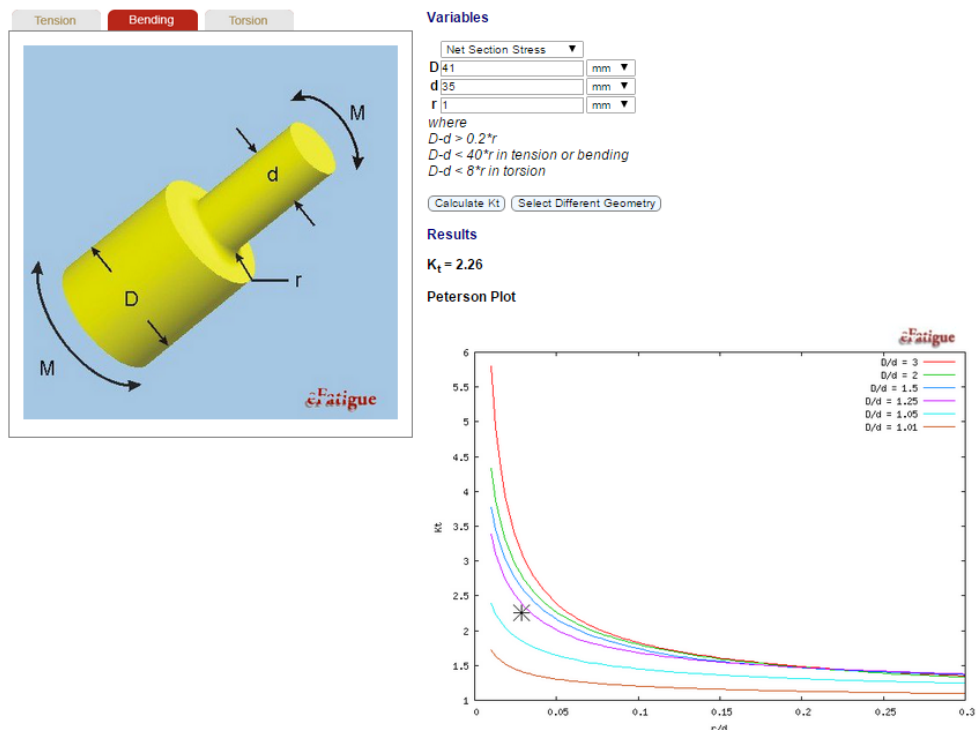


Obrázek 9. 9 - Místo 3. výpočtu ohyb

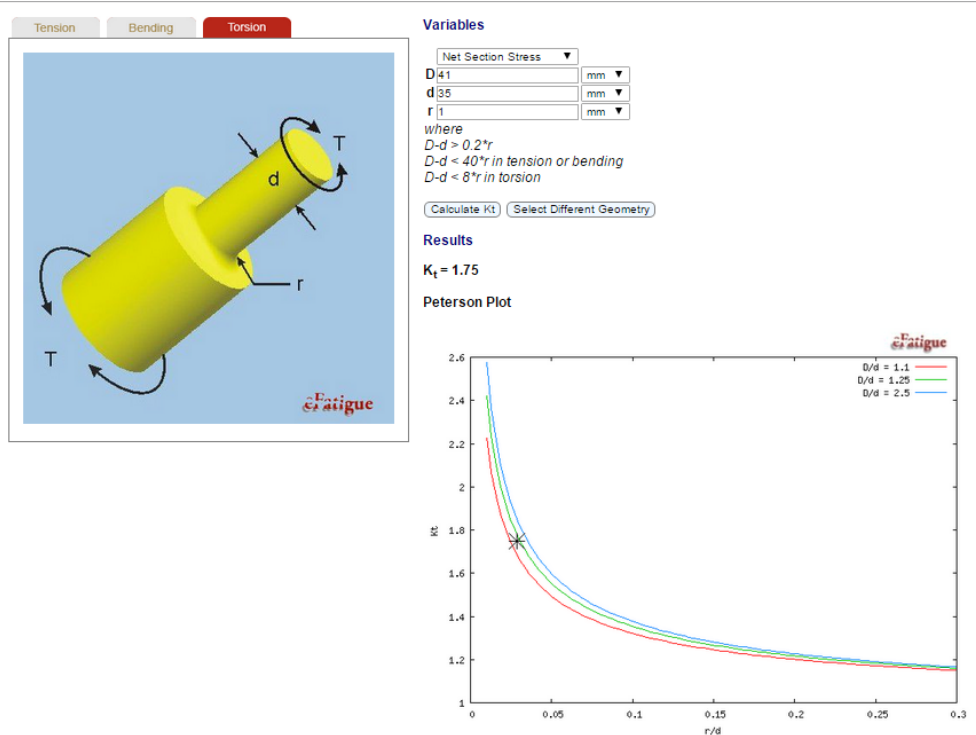


Obrázek 9. 10 - Místo 3. výpočtu krut

9.9 MÍSTO 4. VÝPOČTU [2]



Obrázek 9. 11 - Místo 4. výpočtu ohyb



Obrázek 9. 12 - Místo 4. výpočtu krut