

# Kontrolní výpočet pevnosti hřídelů

Bc. Adam Baňář

---

Diplomová práce  
2013



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2012/2013

# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Adam Baňář**  
Osobní číslo: **T11731**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Kontrolní výpočet pevnosti hřídelů**

Zásady pro vypracování:

- literární přehled
- geometrický model
- FEM model
- numerická analýza současného stavu
- optimalizace návrhu
- vyhodnocení návrhu

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

**Dle zadání vedoucího DP**

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**

Ústav výrobního inženýrství

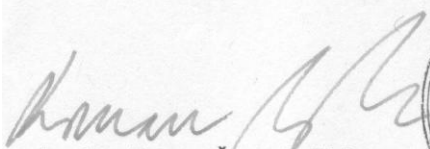
Datum zadání diplomové práce:

**8. února 2013**

Termín odevzdání diplomové práce:

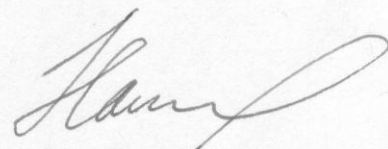
**10. května 2013**

Ve Zlíně dne 11. února 2013



doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.

*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.

*ředitel ústavu*

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 9. 5. 2013

.....

---

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevydělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpirá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Teoretická část je rozdělena do několika hlavních kapitol. V úvodu je seznámení se základní mechanikou. V další části je rozdělení oceli a možnosti jejího tepelného zpracování pro zlepšení vlastností a v závěru je krátké seznámení s FEM analýzou.

V experimentální části jsem se zaměřil na FEM analýzu konkrétní hřídele. Kde jsem prověřil dosavadní řešení a navrhnul upravený tvar.

Klíčová slova: Ohyb, krut, FEM, ocel, kalení, žíhání, hřídel, CATIA, Autodesk Inventor

## **ABSTRACT**

The theoretical part is divided into several chapters. The introduction is to introduce the basic mechanics. In another part of the distribution of steel and its heat treatment options to improve the properties and in the end is a brief introduction to the FEM analysis.

The experimental part I focused on FEM analysis of concrete shaft. Where I examined the existing solutions and proposed a modified form.

Keywords: Bending, torsion, FEM, steel, hardening, annealing, shaft, CATIA, Autodesk Inventor

Chtěl bych poděkovat Ing. Jakobovi Javoříkovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a cenné připomínky při řešení této práce.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 3. 5. 2013

.....

Podpis diplomanta

# OBSAH

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 MECHANIKA</b> .....	<b>12</b>
1.1 OHYB .....	12
1.2 KRUT.....	13
1.2.1 Napětí a deformace při prostém krutu.....	13
1.3 KOMBINOVANÉ NAMÁHÁNÍ OHYB A KRUT.....	16
<b>2 MATERIÁL</b> .....	<b>17</b>
2.1 VÝBĚR MATERIÁLU PRO VÝROBU HŘÍDELŮ .....	17
2.1.1 Rozdělení ocelí.....	17
2.1.1.1 Třídy ocelí.....	19
2.2 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ .....	21
2.2.1 Základy tepelného zpracování kovů.....	21
2.2.2 Žihání ocelí.....	22
2.2.2.1 Žihání bez překrystalizace .....	23
2.2.2.2 Žihání s překrystalizací.....	23
2.2.3 Kalení ocelí .....	24
2.2.3.1 Kalení do teplých lázní .....	25
2.2.4 Popouštění .....	27
2.2.4.1 Popouštění na nízké teploty .....	27
2.2.4.2 Popouštění na vysoké teploty — zušlechťování.....	27
2.2.5 Povrchové kalení a chemicko-tepelné zpracování .....	28
2.2.5.1 Povrchové kalení.....	28
2.2.5.2 Chemicko-tepelné zpracování.....	29
2.2.5.3 Cementování .....	29
2.2.5.4 Porovnání vlastností tvrdých povrchových vrstev.....	29
<b>3 FEM ANALÝZA</b> .....	<b>31</b>
3.1 ZÁKLADNÍ VELIČINY A ROVNICE OBECNÉ PRUŽNOSTI.....	31
3.1.1 Rovnice rovnováhy .....	32
3.1.2 Rovnice geometrické.....	32
3.1.3 Fyzikální vztahy .....	33
3.2 PROCES ANALÝZY .....	33
3.2.1 Preprocessing .....	33
3.2.2 Processing .....	35
3.2.3 Postprocessing.....	35
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>37</b>
<b>4 STANOVENÍ CÍLŮ</b> .....	<b>38</b>
<b>5 3D MODEL PŘEVODOVKY</b> .....	<b>40</b>
5.1 GENERÁTOR OZUBENÝCH KOL .....	40
5.2 GENERÁTOR HŘÍDELE.....	41
5.3 GENERÁTOR STROJNÍCH SOUČÁSTÍ.....	43
<b>6 NUMERICKÝ VÝPOČET</b> .....	<b>44</b>



6.1	PEVNOSTNÍ VÝPOČET HŘÍDELE .....	44
<b>7</b>	<b>FEM ANALÝZA .....</b>	<b>47</b>
7.1	3D MODEL .....	47
7.2	MATERIÁL .....	47
7.3	ANALÝZA ZATÍŽENÍ HŘÍDELE .....	48
7.3.1	Zadání okrajových podmínek .....	48
7.3.2	Tvorba sítě .....	49
7.3.3	Výsledky analýzy .....	49
<b>8</b>	<b>NÁVRH ŘEŠENÍ .....</b>	<b>52</b>
8.1	POUŽITÍ LEPŠÍHO MATERIÁLU .....	52
8.2	ZMĚNA POČTU ZUBŮ .....	52
8.2.1	Okrajové podmínky .....	53
8.2.2	Tvorba sítě .....	53
8.2.3	Výsledek analýzy .....	54
8.3	ZMĚNA CELÉ KONSTRUKCE POHONU .....	54
<b>9</b>	<b>CELKOVÉ ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>55</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>56</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>58</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>59</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>62</b>

## ÚVOD

V dnešní době používané konstrukční materiály lze rozdělit do třech skupin: kovy, keramika a skla, plasty. Velmi často dochází k propojování jednotlivých skupin, kvůli lepším užitným vlastnostem materiálu (např. kompozity s kovovou maticí, keramické povlaky na kovových podkladech nebo polymery zpevněné uhlíkovými vlákny).

Z výše uvedených skupin materiálů jsou nejvíce používány kovy. Je to dáno jejich vysokými mechanickými, funkčními a fyzikálními vlastnostmi a v neposlední řadě dlouhodobou znalostí výrobních i zpracovatelských technologií (slévání, tváření spojování). Kovové materiály jsou houževnaté, tvárné, mají dobrou elektrickou a tepelnou vodivost, avšak nízkou odolnost proti korozi. Vlastnosti kovů a jejich slitin lze měnit v širokém rozmezí tepelným zpracováním. [4]

Při návrhu nového výrobku patří výběr vhodného materiálu mezi jeho velmi důležité vlastnosti. Konstruktor musí zvolit správný materiál, který odpovídá požadavkům zákazníka, funkčnost a také způsob výroby, např. obrobitelnost, svařitelnost, povrchová úprava, cena atd. V prvotním návrhu může být zvoleno několik materiálů, z kterých se postupem času vybere ten nejvhodnější. V praxi stále ještě bohužel přetrvává tradice při volbě materiálu a také podřízení nabídce materiálového trhu. To má za následek horší užitné vlastnosti, zejména vyšší hmotnost výrobku z důvodu větších rozměrů.

V teoretické části jsou popsány základní druhy namáhání hřídelí. Také jsem zde uvedl rozdělení ocelí a jejich tepelné zpracování, které slouží pro jejich zlepšení vlastností. V závěru teoretické části jsou uvedeny jednotlivé fáze FEM analýzy.

V praktické části budou jednotlivé poznatky použity pro optimalizaci hřídele, která je součástí převodovky pro pohon čtyřválcového kalandru ve firmě Continental Barum s.r.o. Otrokovice.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 MECHANIKA

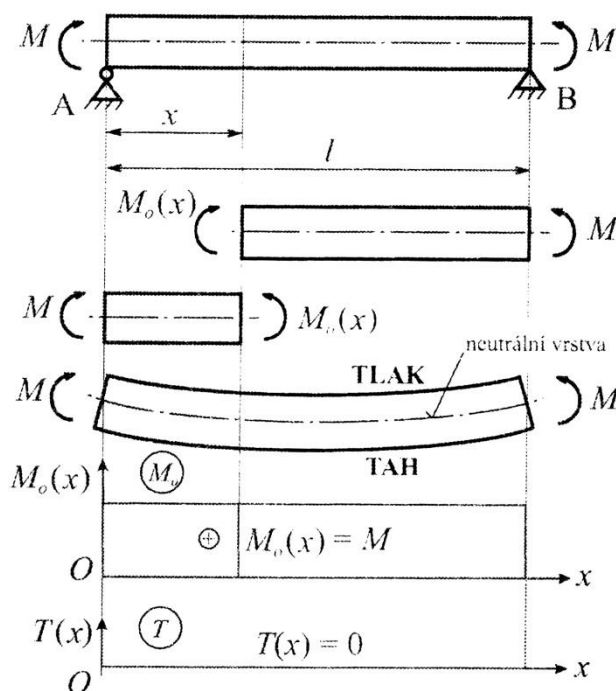
## 1.1 Ohyb

Ohyb je druh namáhání, při němž se původně přímý prut zakřivuje do rovinné nebo prostorové křivky. Každý přímý prut, namáhaný převážně na ohyb nazýváme nosník, jestliže zatížení vnějšími silovými účinky způsobí, že výslednice vnitřních sil v řezu kolmém k jeho podélné ose vytvářejí dvojici sil  $N$ , kterou nazýváme ohybový moment a označujeme  $M_O$ . Vektor dvojice  $M_O$  je kolmý k podélné ose prutu. Tento případ namáhání označujeme jako prostý ohyb na rozdíl od způsobu namáhání, kdy se s případem prostého ohybu kombinují další druhy namáhání.[1]

Stopa ohybového momentu  $M_O$  je přímka, kterou v každém příčném průřezu nosníku dostaneme jako kolmici k vektoru ohybového momentu v tomto průřezu. [1]

Pokud je stopa ohybového momentu totožná s některou hlavní centrální osou průřezu, nastává při rovinném zatížení nosníku rovinný ohyb. V opačném případě nastává při rovinném zatížení nosníku prostorový ohyb. [1]

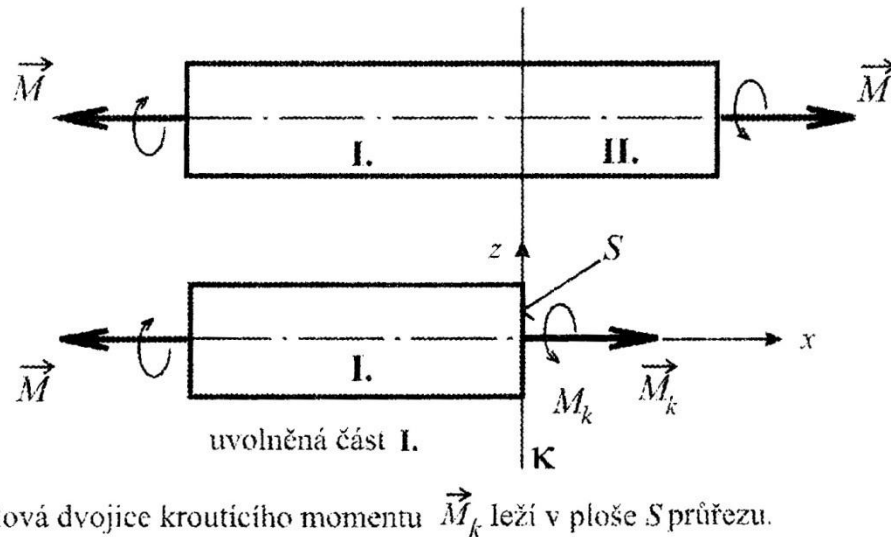
Ohyb přímého prutu vzniká působením vnějších silových účinků a vyvolá jeho prohnutí a změnu délky vláken. Vnitřní síly nám dávají ohybový moment  $M_O$  a posouvající sílu  $T$ . Tyto vnitřní síly vyvolávají v daném řezu napětí  $\sigma$  a  $\tau$ , které vlastně nahrazují účinek odstraněné části a musí proto být se soustavou vnějších sil v rovnováze. [1]



Obr. 1. Zatížení prostého nosníku [2]

## 1.2 Křut

O namáhání prostým křutém hovoříme tehdy, když ve vyšetřovaném průřezu působí jen vektor kroučícího momentu  $M_k$  jako účinek odstraněné části na uvolněnou část a ostatní složky  $M_o$ ,  $T$ ,  $N$  jsou nulové (Obr. 2). [2]



Obr. 2. Prostý křut [2]

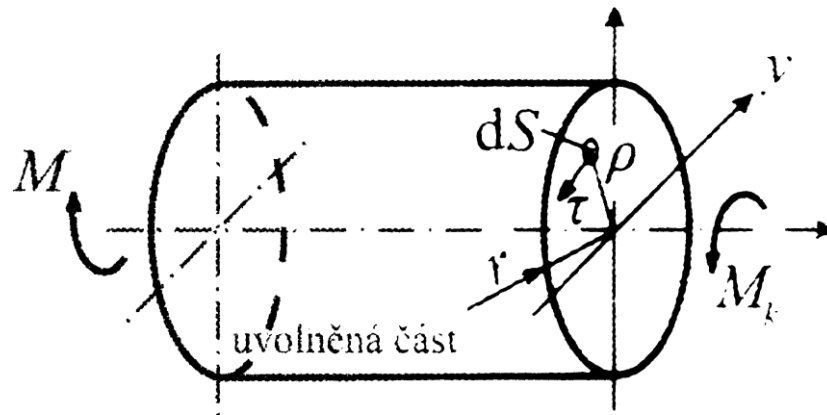
### 1.2.1 Napětí a deformace při prostém křutu

Nejprve uvedeme předpoklady pro řešení napětí a deformace při namáhání křutém:

- uvažují se velmi malé deformace,
- průřezy se kroucením nebortí a zůstávají rovinné (pouze u knihových průřezů), průměry průřezů zůstávají přímé,
- průřezy se vzájemně pouze pootočí,
- povrchové přímky krouceného válce se po deformaci zrnění v táhlé šroubovice
- a elementární útvary ve tvaru čtverců na povrchu pláště válce poloměru  $p$  se zkosí pod úhlem  $\gamma$ ,
- vzdálenost mezi jednotlivými průřezy se nemění.
- materiál je homogenní, izotropní a platí pro něj Hookeův zákon [2]

Napětí ve vyšetřovaném průřezu stanovíme metodou myšleného řezu. Účinek odstraněné části nahrazuje kroutící moment  $M_k$ , který se přenáší každým bodem průřezu na uvolněnou část tělesa. Při kroucení prutů kruhových průřezů vznikají v jednotlivých bodech řezů kolmých k ose prutu pouze smyková napětí, která mají směr tečny ke kružnicím. [2]

Elementární vnitřní síla na plošce  $dS$  je rovna součinu velikosti plošky a smykového napětí, tj.  $dS\tau$ , elementární moment  $dM_k$  je součin  $dS\tau\rho$  (Obr. 3). [2]



Obr. 3. Krut tyče kruhového průřezu [2]

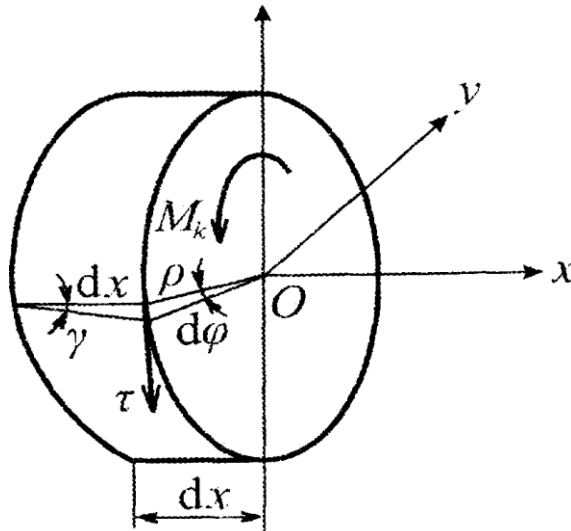
Celkový vnitřní moment je

$$M_k = \int_{(S)} \tau \rho dS$$

Z rovnováhy vnějších momentů na uvolněné části a vnitřního kroutícího momentu platí obecně  $\sum_i M_i = M_k$  [2]

K výpočtu integrálu je potřeba stanovit funkci  $\tau = f(\rho)$

Za tímto účelem vytkneme z tělesa elementární destičku o délce  $dx$  a poloměru základny  $\rho$ . Vzájemné pootočení rovin soumězných průřezů ve vzdálenosti  $dx$  je  $d\varphi$  - tj. elementární úhel zkroucení (Obr. 4). Pro velmi malé úhly platí  $\tan \gamma \approx \gamma$ . Z obrázku Obr. 4 je zřejmé, že  $\gamma dx = \rho d\varphi$ , takže zkos  $\gamma = \frac{\rho d\varphi}{dx}$ . [2]



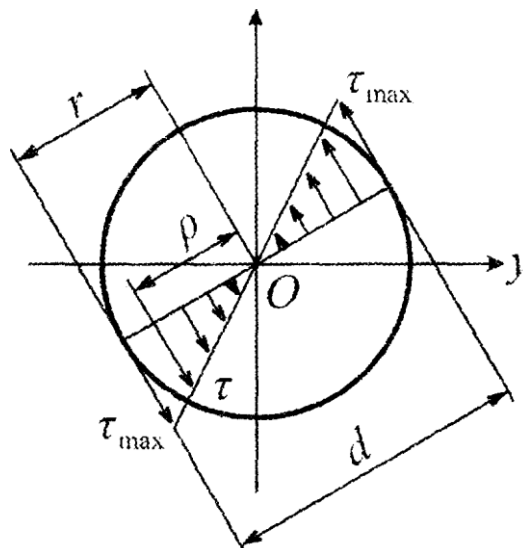
Obr. 4. Ukázka elementárního úhlu zkroucení [2]

Podle Hookeova zákona pro prostý smyk je napětí  $\tau = G\gamma$ , takže je po dosazení

$$\tau = G\rho \frac{d\varphi}{dx} = G\vartheta\rho = \text{konst.} \cdot \rho,$$

kde  $\vartheta = \frac{d\varphi}{dx}$  je poměrný úhel zkroucení (úhel zkroucení jednotky délky).

Lze tedy konstatovat, že napětí je přímo úměrné vzdálenosti bodu od středu kruhového průřezu. Toto smykové napětí se nazývá napětí v krutu a je největší v bodech na obvodě kruhu o poloměru  $r$ . Průběh napětí v krutu podél průměru v ploše průřezu je na Obr. 5. [2]



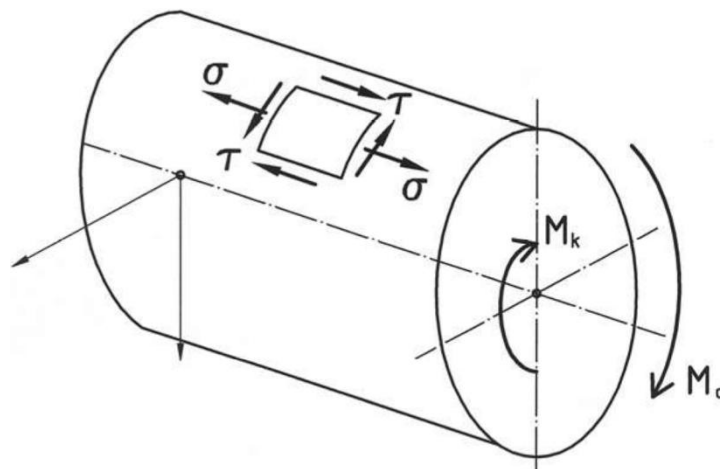
Obr. 5. Průběh napětí v krutu [2]

### 1.3 Kombinované namáhání ohyb a krut

Tento případ složené pevnosti se v technické praxi vyskytuje nejčastěji při kontrole strojních systémech, např.: hřídele řemenic, turbín, čerpadel, v zalomených hřídelích, náprav vozidel apod.

Uvažujeme přímý prut namáhaný krutícím momentem  $M_k$  a současně ohybovým momentem  $M_o$  (Obr. 6). Na element vyjmutý z povrchu působí napětí  $\tau$  a  $\sigma$ . Tyto napětí nemůžeme algebraicky sčítat, ale na jejich posouzení musíme použít redukované napětí.

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq \sigma_{dov}$$



Obr. 6. Prut namáhaný krutem i ohybem

Největší normálové napětí  $\sigma$  je v nejvzdálenějším vlákne a maximální smykové napětí  $\tau$  je na povrchu. Maximální napětí jen od ohybového momentu a smykové napětí jen od krutícího momentu jsou dány vztahy:

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \sim \frac{M_o}{0,1d^3}; \quad \sigma_o = \frac{M_k}{W_k} \sim \frac{M_k}{0,2d^3}$$

Redukované napětí:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{\frac{M_o^2}{(0,1d^3)^2} + 3\frac{M_k^2}{(0,2d^3)^2}} = \frac{1}{0,1d^3} \sqrt{M_o^2 + \frac{3}{4}M_k^2} = \frac{1}{0,1d^3} M_{red}$$

$$\frac{M_{red}}{W_o} \leq \sigma_{dov}$$



## 2 MATERIÁL

### 2.1 Výběr materiálu pro výrobu hřídelů

Výběr vhodných materiálů je ovlivněn širokým spektrem pracovních i zátěžových podmínek, ve kterých hřídele pracují.

Volba materiálů závisí na provozních faktorech :

- charakter provozního zatížení
  - může být statické, rázové, periodicky střídavé nebo míjivé
- hmotnostní požadavky konstrukce celého mechanismu
  - viz. duté hřídele
- možnost tepelného nebo chemicko-tepelného zpracování
  - některé části hřídelů získávají požadované vlastnosti cementováním, nitridací, zušlechťováním
- ostatní
  - vrubová houževnatost, odolnost proti opotřebení otěrem

Používané materiály :

- Oceli nelegované (konstrukční a uhlíkové): málo namáhané hřídele, oceli 11 500, 11 600, 11 700
- Oceli nízko, středně i vysoce legované: vysoce namáhané součásti např. hřídele motorových vozidel, obráběcích strojů

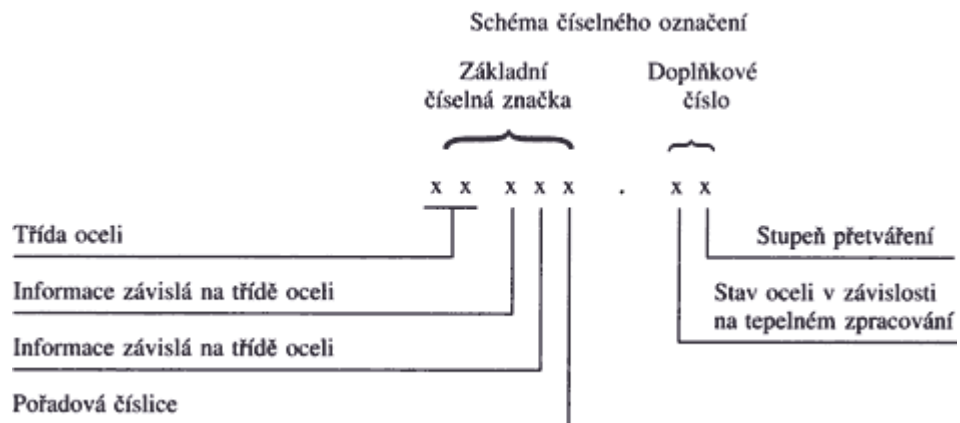
#### 2.1.1 Rozdělení ocelí

Oceli k tváření všech jakostí se označují pětímístným číselným znakem, který se skládá ze základního číselného znaku a zpravidla ještě ze dvou doplňkových číslic.

Číslo normy jakosti (materiálového listu) příslušné oceli se získá předřazením k číselné značce oceli znaku ČSN a číslicí 4. Například pro ocel označenou číselnou značkou 11 373 je číslo normy jakosti (materiálového listu) ČSN 41 1373.

Tab. 1. Rozdělení ocelí do tříd

Třída oceli	Oceli podle		Charakteristika ocelí	
	použití	stupně legování		
10	kon- strukční	nelegované	předepsané hodnoty mechanických vlastností, chemické složení není předepsáno	
11			předepsané hodnoty mechanických vlastností a obsah C, P, S popř. (P+S) i dalších prvků	
12			předepsaný obsah C, Mn, Si, P popř. (P+S) i dalších prvků	
13		lego- vané	nizkolegované	legovací prvky: Mn, Si, Mn - Si, Mn - V
14				legovací prvky: Cr, Cr - Al, Cr - Mn, Cr - Si, Cr - Mn - Si
15			legovací prvky: Mo, Mn - Mo, Cr - Mo, Cr - V, Cr - W, Mn - Cr - V, Cr - Mo - V, Cr - Si - Mo - V, Cr - Mo - V - W	
16			nizkolegované a středně legované	legovací prvky: Ni, Cr - Ni, Ni - V, Cr - Ni - Mn, Cr - Ni - V, Cr - Ni - W, Cr - Ni - Mo, Cr - V - W, Cr - Mo - V - W
17	středně legované a vysokolegované	legovací prvky: Cr, Ni, Cr - Ni, Cr - Mo, Cr - V, Cr - Al, Cr - Ni - Mo, Cr - Ni - Ti, Cr - Mo - V, Mn - Cr - Ni, Mn - Cr - Ti, Mn - Cr - V, Cr - Ni - Mo - V, Cr - Ni - Mo - W, Cr - Ni - Mo - Ti, Cr - Ni - V - W, Cr - Ni - W - Ti atd.		
19	nástro- jové	nelegované	Předepsaný obsah C, Mn, Si, P, S	
		legované (nizko, středně, vysoko)	legovací prvky: Cr, V, Cr - Ni, Cr - Mo, Cr - Si, Cr - V, Cr - W, Cr - Al, Cr - Ni - W, Cr - Si - V, Cr - Mo - V, Cr - V - W, Cr - Ni - Mo - V, Cr - V - W - Co, Cr - Ni - Mo - W, Cr - Ni - V - W atd.	



Obr. 7. Schéma číselného značení ocelí [3]

Tab. 2. Význam první číslice doplňkového čísla [3]

První číslice	Stav oceli, daný tepelným zpracováním
0	tepelně nezpracovaný
1	normalizačně žíhaný
2	žíhaný (s uvedením způsobu žíhání)
3	žíhaný naměkko
4	kalený nebo kalený a popouštěný při nízkých teplotách nebo po rozpouštěcím žíhání (jen u austenitických ocelí)
5	normalizačně žíhaný a popouštěný
6	zušlechťený na dolní pevnost obvyklou u příslušné oceli
7	zušlechťený na střední pevnost obvyklou u příslušné oceli
8	zušlechťený na horní pevnost obvyklou u příslušné oceli
9	stavy, které nelze označit první doplňkovou číslicí 0 až 8

Tab. 3. Význam druhé číslice doplňkového čísla [3]

Druhá číslice	Stupeň přetváření ocelových pásů, válcovaných za studena
0	dále nepřeválcováno
1	lehce převálcováno
2	1/4 tvrdý
3	1/2 tvrdý
4	3/4 tvrdý
5	4/4 tvrdý
6	5/4 tvrdý
7	při němž se netvoří čtyřlístky (pásky jsou zpravidla zpracovány se zřetelem na omezení anisotropie mechanických vlastností materiálu – omezení tvorby cípů): mechanické vlastnosti jsou shodné jako u materiálu měkce žíhaného
8	zpracováno podle zvláštního předpisu
9	zpracováno podle dohodnutého předpisu

### 2.1.1.1 Třídy ocelí

#### Oceli třídy 10

Dvojcísli 00, dané třetí a čtvrtou číslicí základní číselné značky, označuje oceli základní jakosti třídy 10. Dvojcísli, dané třetí a čtvrtou číslicí základní číselné značky konstrukčních ocelí třídy 10, přibližně charakterizuje pevnost oceli v tahu v 10 MPa. Dvojcísli, dané třetí a čtvrtou číslicí základní číselné značky ocelí pro výztuž betonových konstrukcí, přibližně charakterizuje  $R_e$  nebo  $R_p$  0,2 oceli v 10 MPa. [3]

***Oceli třídy 11***

Třetí číslice 1 v základní číselné značce ocelí třídy 11 označuje automatové oceli. Čtvrtá číslice v základní číselné značce automatových ocelí charakterizuje střední obsah uhlíku v desetinách procenta. U konstrukčních ocelí charakterizuje dvojčíslí, dané třetí a čtvrtou číslicí základní číselné značky, přibližně pevnost v tahu v 10 MPa. [3]

***Oceli třídy 12 až 16***

Třetí číslice v základní číselné značce těchto ocelí charakterizuje součet středních obsahů legovacích prvků (zaokrouhlený na celé číslo) vyjádřených v procentech. Čtvrtá číslice v základní číselné značce těchto ocelí charakterizuje střední obsah uhlíku v desetinách procenta. Setiny se přitom zaokrouhlují od 3 na nejbližší vyšší desetinu. Při středním obsahu uhlíku vyšším než 0.92 % je čtvrtá číslice 0. [3]

***Oceli třídy 17***

Třetí číslice v základní číselné značce ocelí třídy 17 charakterizuje typ legování oceli jednotlivými legovacími prvky nebo skupinou hlavních legovacích prvků. Čtvrtá číslice v základní číselné značce ocelí třídy 17 charakterizuje obsah hlavních legovacích prvků Cr, Mn a Ni v jednotlivých druzích ocelí podle typu legování. [3]

***Oceli třídy 19***

Třetí číslice v základní číselné značce ocelí třídy 19 charakterizuje jednak nelegované oceli, jednak typ legování oceli jednotlivými legovacími prvky nebo skupinou hlavních legovacích prvků. Čtvrtá číslice v základní číselné značce nelegovaných ocelí třídy 19 tvoří ve spojení s třetí číslicí dvojčíslí, které charakterizuje střední obsah C v oceli. [3]

## 2.2 Tepelné zpracování ocelí

### 2.2.1 Základy tepelného zpracování kovů

Tepelným zpracováním kovů se rozumí postup, při kterém se řízené mění teploty a někdy také chemické složení kovu. [5]

Účelem tepelného zpracování je zejména dosažení požadovaných mechanických a technologických vlastností kovových materiálů. V některých případech dochází při tepelném zpracování k dalším pozitivním efektům. [5]

Průběh tepelného zpracování je u všech způsobů a u všech kovových materiálů v podstatě stejný. Skládá se z ohřevu na vhodnou teplotu, setrvání na této teplotě (prohřátí, prohřev) a následném ochlazení, přičemž se tento postup může i vícekrát opakovat.

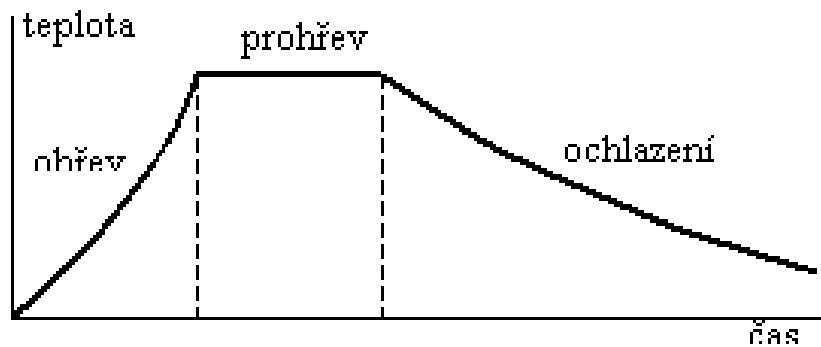
Konkrétní druh tepelného zpracování je charakterizován rychlostí a průběhem ohřevu, konečnou výškou teploty ohřevu, dobou setrvání na dané teplotě a rychlostí ochlazování, případně podmínkami při opakování základního postupu. [5]

Vhodná rychlost ohřevu a průběh ohřívání závisí na účelu tepelného zpracování. U některých postupu je nutný pozvolný ohřev, při němž rozdíl mezi teplotou povrchu a teplotou vnitřku ohřívajícího materiálu není velký, aby v důsledku teplotních dilatací v materiálu nedocházelo ke vzniku pnutí a porušení jeho pevnosti. V těchto případech se ohřev provádí v pecích s regulovanou teplotou, někdy postupně v několika pecích s rozdílnou teplotou. Jiné postupy naopak vyžadují velmi prudký ohřev povrchu kovu. Příkladem je povrchové kalení ocelí a litin, při kterém se materiál ohřívá plamenem.

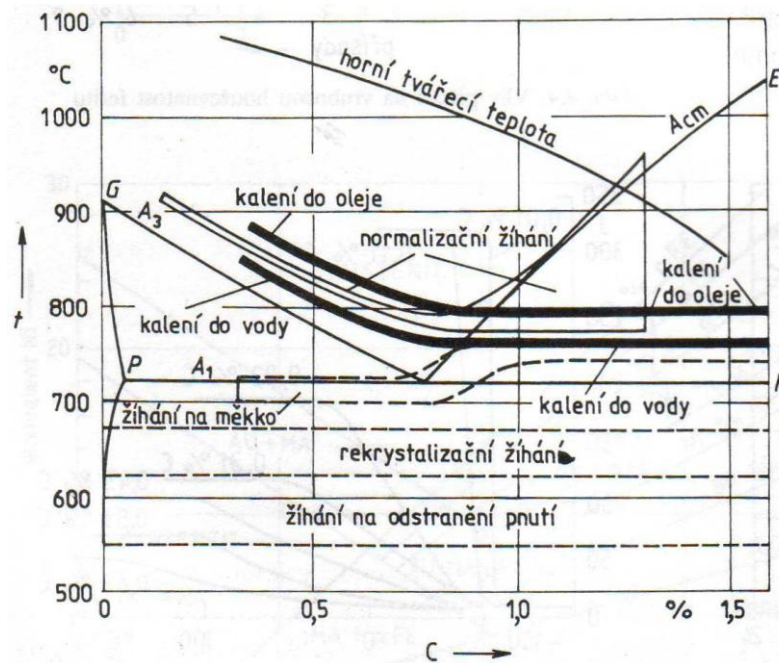
Volba výšky konečné teploty ohřevu závisí na povaze strukturálních změn, které při tepelném zpracování probíhají. V některých případech zůstává struktura v podstatě stejná jako za normálních teplot, v jiných se materiál ohřevem uvádí do potřebné strukturální oblasti. [5]

Doba přehřívání materiálu opět závisí na účelu zpracování a na rozměrech materiálu. [5]

Rychlost ochlazování je závislá na cíli tepelného zpracování. V případech, kdy má během chladnutí být zachován rovnovážný stav soustavy, probíhá ochlazování pomalu. Příkladem je chladnutí materiálu v peci s regulovaným poklesem teploty. V jiných případech je naopak cílem zpracování rychlým ochlazením potlačit změny, ke kterým by došlo v rovnovážném stavu a tak vytvořit nové strukturální složky se specifickými vlastnostmi. Ochlazování stejně jako ohřev může probíhat stupňovitě, přičemž materiál postupně prochází několika prostředími. [5]



Obr. 8. Diagram průběhu tepelného zpracování [5]



Obr. 9. Teplotní oblasti hlavních způsobů tepelného zpracování ocelí v rovnovážném diagramu Fe-C [3]

### 2.2.2 Žhání ocelí

Žhání je druh tepelného zpracování kovů prováděné za účelem zlepšení některých vlastností jako je povrchová tvrdost a odstranění účinků některých operací (kalení, tváření). Provádí se zahřátím na „žhací teplotu“ (500–1200 °C) a následným ochlazením na volném vzduchu nebo v hale při teplotě cca 20 °C.

### 2.2.2.1 Žihání bez překrytalizace

Při žihání bez překrytalizace se fázová skladba oceli (nebo její matrice) v podstatě nemění. U polymorfních ocelí je horní hranice teplotní oblasti teplota  $A_1$ . U nepolymorfních ocelí jde vždy o žihání bez překrytalizace. [3]

*Rozpouštěcí žihání* u nepolymorfních ocelí má rozpustit v tuhém roztoku karbidické (popř. nitridické) fáze. [3]

*Rekrytalizační žihání* slouží k odstranění zpevnění po tváření za studena. Obvyklé teploty jsou (620 až 680)°C. [3]

*Žihání na snížení pnutí* se dělá po svařování, po rychlém a nestejném ochlazení předmětů zejména složitějších tvarů a větších průřezů, po místním ohřevu při tváření za tepla, po tváření za tepla ukončovaném za teplot blízkých rekrytalizačním, po rozsáhlejší obrábění apod. Žihací teploty jsou do 650 °C a ochlazení je pomalé do 200°C (pec, zábal). [3]

*Žihání protivločkové* se zařazuje do výrobního postupu ocelí náchylných ke vzniku vloček, tj. vyvolaných působením vodíku. [3]

### 2.2.2.2 Žihání s překrytalizací

Překrytalizační žihání se provádí u polymorfních ocelí ohřevem nad kritické teploty ( $A_1, A_3, A_{cm}$ ). [3]

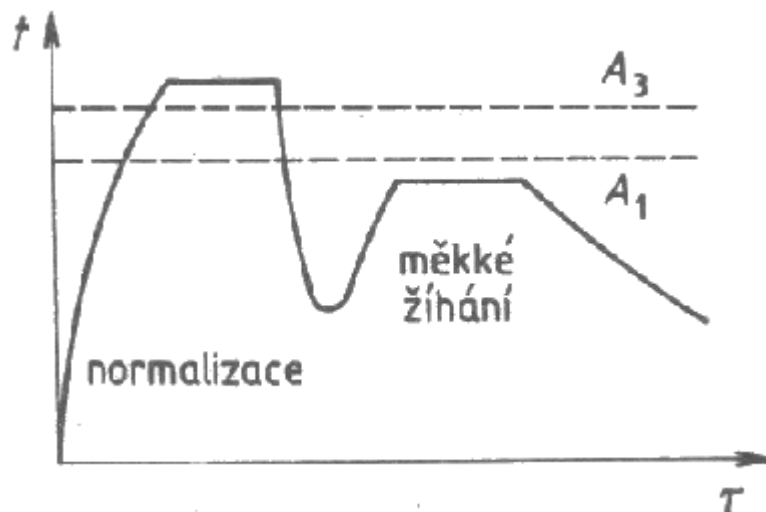
*Normalizační žihání* (normalizace) spočívá ohřevu oceli na její kalicí teplotu (*Obr. 9*) a v ochlazení na vzduchu. Normalizace umožňuje zjemnit austenické zrno a dosáhnout stejnoměrné sekundární struktury; je vhodná zejména pro uhlíkové a nízkolegované oceli. Je účelné normalizovat výkovky, svařované předměty a zejména odlitky pro zjemnění hrubé lici struktury a odstranění často přítomné Widmannstättenovy struktury. Při normalizaci se těžší odlitky někdy ochlazují na vzduchu do teploty asi 650 °C a poté chladnou v peci pro zmenšení vnitřního pnutí. [3]

*Difúzní žihání* se provádí za teplot až do 1200°C a jeho cílem je difúzí vyrovnat rozdíly chemické heterogenity. Prodleva na žihací teplotě bývá 12 až 15 hodin. Používá se pro zvýšení homogenity ingotů a těžkých odlitků. Při difúzním žihání zrno oceli zhrubne; jeho zjemnění se dosahuje následným tvářením za tepla (válcováním, kování) nebo dalším tepelným zpracováním (normalizace, zušlechtní), např. u odlitků. [3]

*Izotermické žhání* spočívá v rychlém ochlazení austenitizované oceli na teplotu izotermického rozpadu austenitu v oblasti perlitické přeměny a v ochlazování na vzduchu po ukončení přeměny. Vedle možného zkrácení doby tepelného lze jeho aplikací u slitinových ocelí zlepšit obrobiteľnosť i jakost obrobeného povrchu. [3]

*Měkké žhání* spočívá v ohřevu ocelí v oblasti teploty  $A_1$  s následným pomalým ochlazováním. Tímto postupem se vytvoří zrnitý (globulární) perlit. Výsledná struktura je měkká houževnatá a dobře obrobiteľná. Měkké žhání se užívá u ocelí s vyšším obsahem C (zejména nadeutektoidních). [3]

*Kombinované žhání* je technologický postup, při kterém se v jediném sledu realizují dva různé pochody. Obvyklé je zejména spojení normalizačního se žháním měkkým nebo na snížení pnutí (*Obr. 10*). [3]

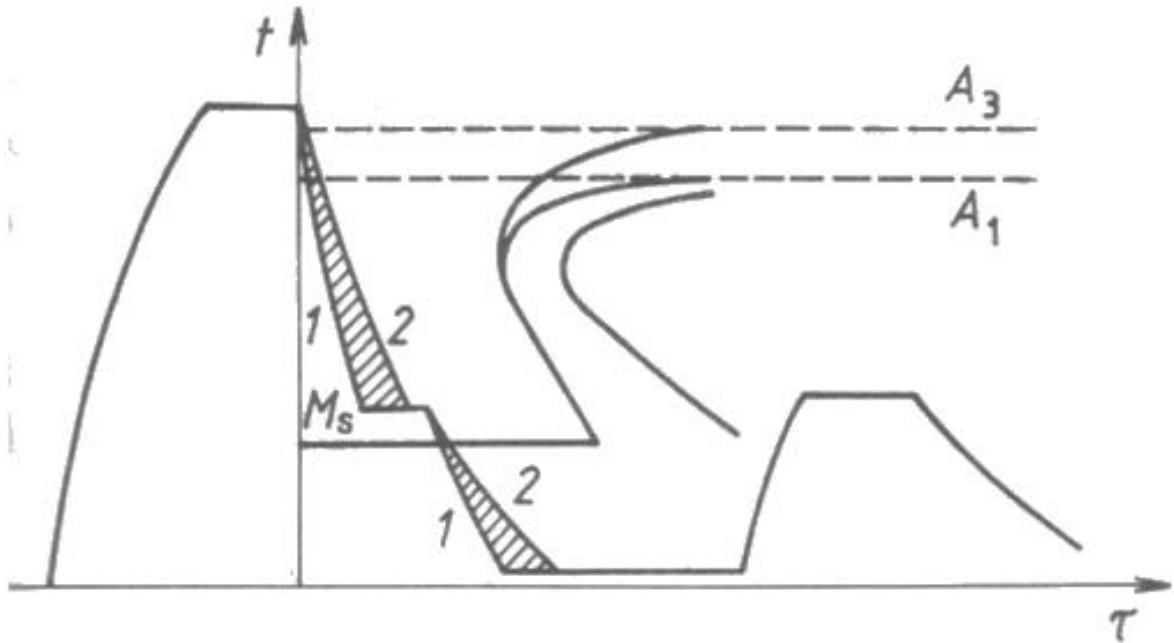


*Obr. 10. Vliv obsahu uhlíku na tvrdost nelegovaných ocelí [3]*

### 2.2.3 Kalení ocelí

Některé součásti z konstrukčních ocelí, a téměř všechny nástroje, musí mít vysokou povrchovou tvrdost a dobrou odolnost proti opotřebení. Takové vlastnosti získá ocel zakalením (*Obr. 11*), kalí se však i všechny vysoce namáhané konstrukční součásti z ušlechtilých ocelí, u nichž se vyžaduje co nejlepší kombinace pevnosti a houževnatosti. Jde o zušlechťování tj. kalení a popouštění. [3]



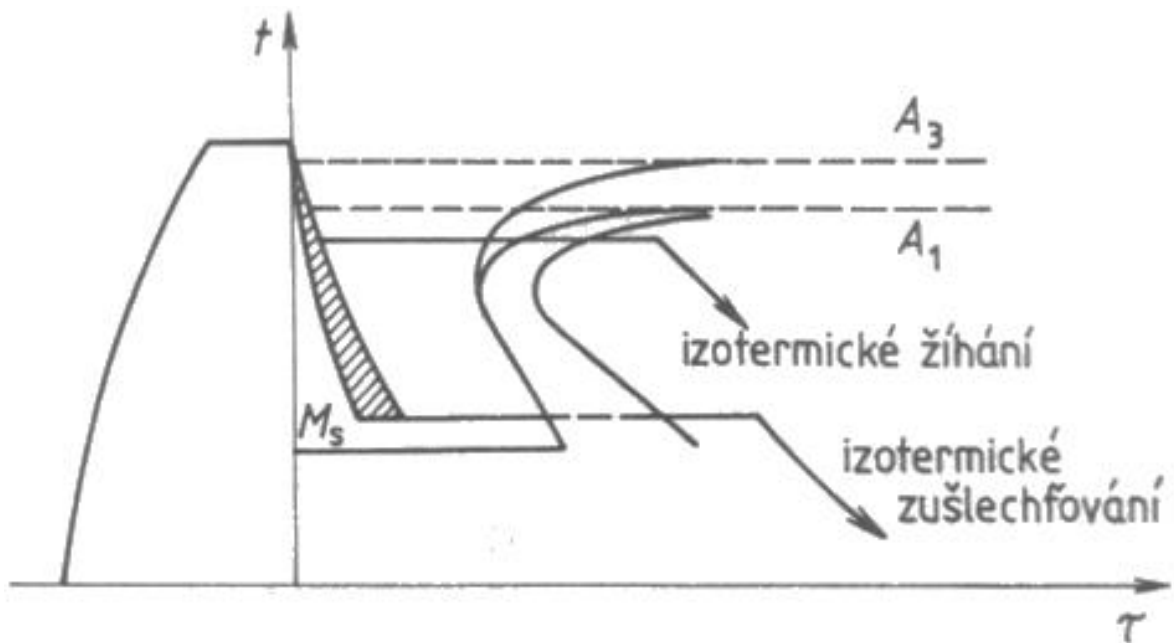


Obr. 11. Základní postup kalení do studené lázně [3]

Kalící teplota pro podeutektoidní oceli se volí (30 až 80) °C nad teplotou  $A_{C3}$ , pro nadeutektoidní oceli (30 až 80) °C nad teplotu  $A_1$ . [3]

### 2.2.3.1 Kalení do teplých lázní

Účinného omezení deformací lze dosáhnout kalením do teplých lázní (zmenšují nebo odstraňují teplotní pnutí vznikající v průběhu kalení). [3]



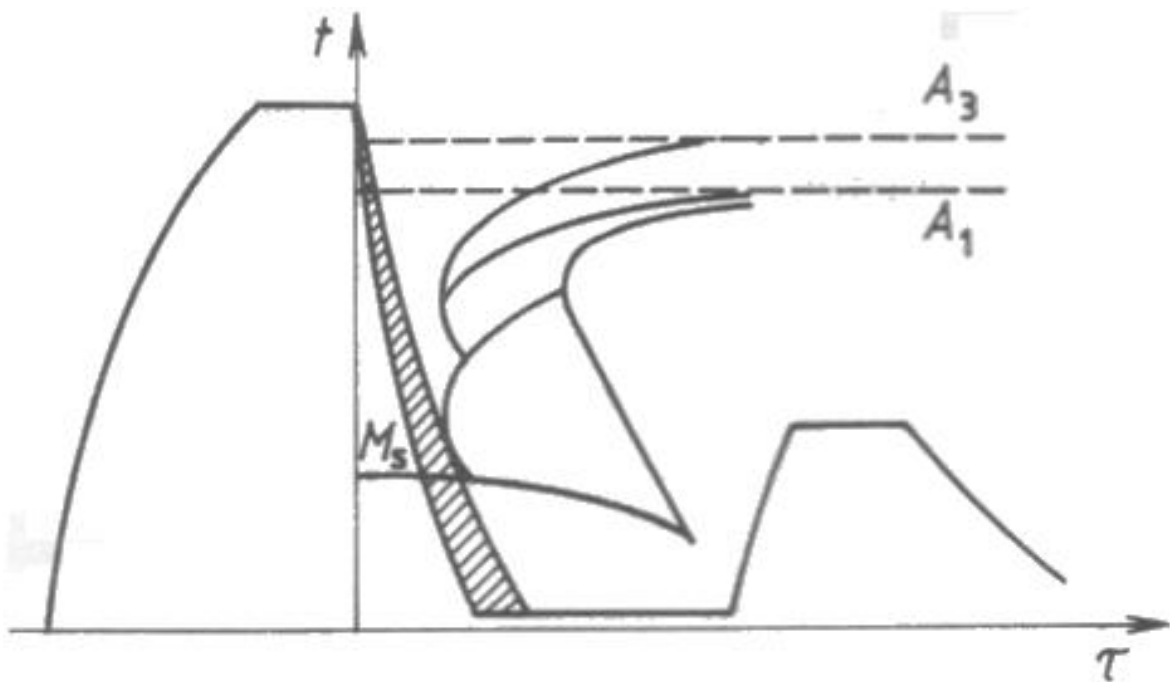
Obr. 12. Postup termálního kalení [3]

### Termální kalení

Nejběžnějším z postupů kalení do teplých lázní je termální kalení (*Obr. 12*), používané především u nástrojů. Kalená součást se po austenitizaci rychle ochladí, obvykle v solné nebo olejové lázni, na teplotu alespoň o 20 °C vyšší, než je teplota  $M_s$  příslušné oceli. Po vyrovnání teploty se součást dochladí na teplotu místnosti obvykle na klidném vzduchu. Protože teplotní i strukturní pnutí jsou mnohem menší, než při kalení přímém, jsou i deformace po kalení velmi malé. [3]

### Izotermické zušlechťování

Ještě dokonaleji než při termálním kalení lze zabránit vzniku deformací při izotermickém zušlechťování (označovaném někdy jako izotermické kalení, *Obr. 13*). Austenitizovaná součást se rychle ochladí na teplotu izotermické přeměny v bainitické oblasti. Na této teplotě se udržuje tak dlouho, dokud neskončí přeměna austenitu v bainit. Ochlazování se dokončí na klidném vzduchu. Při izotermickém zušlechťování teplotní pnutí nevznikají. [3]



*Obr. 13. Postup při izotermickém žhání a izotermickém zušlechťování [3]*

## 2.2.4 Popouštění

### 2.2.4.1 Popouštění na nízké teploty

Zakalená ocel se pomalu ohřeje na popouštěcí teplotu, na které se udržuje po dobu asi 30 min až 10 hodin. Pak se ochladí na teplotu místnosti. [3]

Nástroje se po zakalení popouštějí obvykle jen na nízké teploty do 350 °C . Nástroje, které musí mít nejvyšší tvrdost, se vyvařují ve vodě, nebo zahřívají v horkém oleji na (100 až 250) °C. [3]

Podrobně se kontroluje teplota i při popouštění zevnitř (popouštění vnitřním teplem), které je velmi výhodné pro ruční nástroje (sekáče, šroubováky, průbojníky apod.). Teplota popouštění se určí podle náběhové barvy povrchu, z čehož se odvozuje tzv. „napouštění“. [3]

### 2.2.4.2 Popouštění na vysoké teploty — zušlechťování

Součásti, u kterých se vyžaduje vysoká mez pružnosti, se popouštějí na pérovou tvrdost, tj. asi v oblasti (350 až 450) °C. [3]

Součásti, u nichž se vyžaduje zejména dobrá houževnatost se popouštějí na teploty vyšší, zpravidla na (550 až 650) °C (oblast c). Požadavek vytvoření sorbitu zušlechťováním i ve větších průřezích je hlavním důvodem pro používání slitinových ušlechtilých ocelí třídy 13 až 16. [3]

Při izotermickém zušlechťování je výsledná struktura bainitická; v porovnání se sorbitem má menší tepelné pnutí, větší houževnatost a celkově menší pevnost. S klesající teplotou přeměny se pevnostní hodnoty zvyšují a houževnatost klesá. [3]

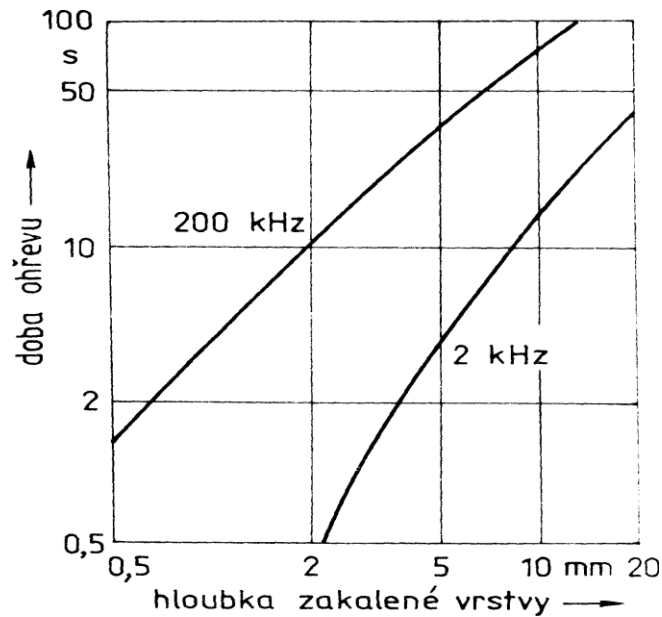
Hluboké prokalitelnosti se dosahuje přísadami, zejména Cr, Mn, Ni a Mo. Zatímco u nelegovaných ocelí klesá při vyšších teplotách popouštění rychle tvrdost, s rostoucím obsahem slitinových prvků se pokles významně zpomaluje. V tomto směru působí především karbidotvorné prvky (v konstrukčních ocelích je nejčastěji Cr). [3]

U některých ocelí dochází při popouštění kolem 550 °C k hromadění dislokací a intersticiálních atomů na hranicích austenitických zrn a dochází k tzv. popouštěcí křehkosti. Vývoj popouštěcí křehkosti potlačit přísadou (0,5 až 1) % Mo. Podobně, ale slaběji, působí i přísada wolframu. [3]

Mechanické vlastnosti ocelí se popouštěním nejen v závislosti na popouštěcí teplotě, ale i na době popouštění. [3]

### 2.2.5 Povrchové kalení a chemicko-tepelné zpracování

U mnoha strojních součástí a nástrojů se požaduje, aby byly houževnaté a zároveň odolávaly opotřebení. Toho je možno dosáhnout vytvořením tvrdé povrchové vrstvy na měkkém houževnatém jádru. Součásti opatřené takovou vrstvou odolávají zároveň i lépe únavě. Tvrdou vrstvu lze vytvořit buď povrchovým kalením, nebo chemicko-tepelným zpracováním. [3]



Obr. 14. Závislost hloubky zakalení při indukčním kalení [3]

#### 2.2.5.1 Povrchové kalení

Při povrchovém kalení se na kalicí teplotu ohřívá jen vrstva určená k zakalení. Nejrozšířenější je povrchové kalení indukční a kalení plamenem. U menších součástí se celý kalený povrch ohřeje na kalicí teplotu a pak se zakalí - *kalení jednorázové* (integrální). Větší plochy se ohřívají postupně a ohřátá část se ihned kalí sprchou - *kalení postupné*.

Nejrozšířenější způsob povrchového kalení je kalení indukční. Závislost hloubky kalené vrstvy na době ohřevu je na Obr. 14. [3]

### 2.2.5.2 Chemicko-tepelné zpracování

Jde o děje, které vyžadují difúzi na dlouhé vzdálenosti a potřebný čas je proto silně závislý na teplotě procesu. Povrch se obohacuje prvkem, který mu dodává potřebné vlastnosti - např. tvrdost, odolnost proti opotřebení a únavě, odolnost proti korozi. Hlubší vrstvy a jejich požadované vlastnosti se dosahují následným tepelným zpracováním, kalením a popouštěním. Sem patří cementování, nitrocementování a kyanování. Při použití postupů nitridování, sulfonizování a sulfonitridování vznikají naproti tomu tenké vrstvy, které však mají požadované vlastnosti přímo, tj. bez dalšího tepelného zpracování. Podobně i vrstvy nasycené kovovými prvky se už tepelně nezpracovávají. Na rozhraní obou skupin je karbonitridování. [3]

### 2.2.5.3 Cementování

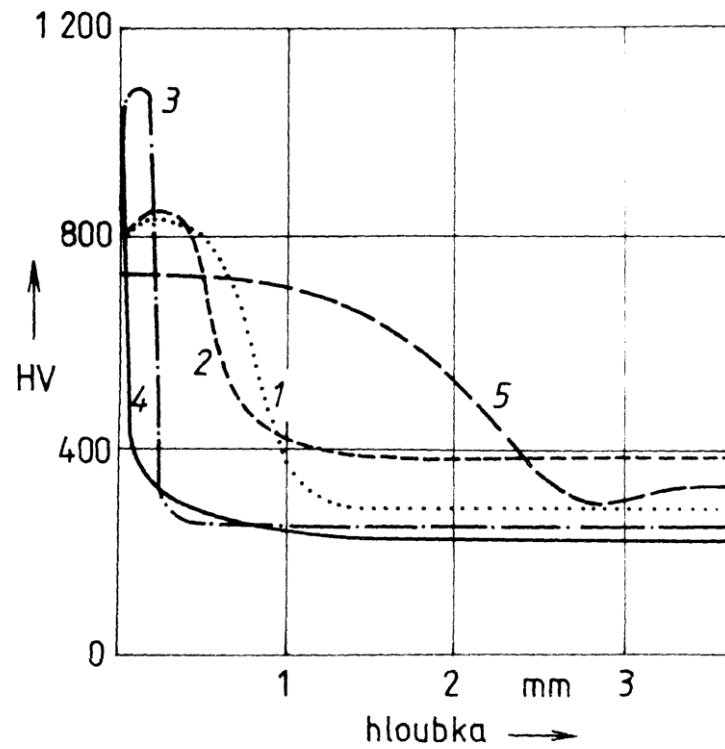
Nejpoužívanější postup chemicko-tepelného zpracování ocelí je nasycování povrchu součásti uhlíkem - cementování. Vytváří se jím na povrchu měkkých ocelí (s obsahem uhlíku asi do 0,2%, výjimečně až do 0,3 %) vrstva obohacená uhlíkem do eutektoidní nebo slabě nadeutektoidní koncentrace. Zakalením nacementované součásti se získá ve vrstvě martenzitická struktura o vysoké tvrdosti. [3]

Cementované součásti se musí vhodně tepelně zpracovat, aby nauhličená vrstva získala požadovanou tvrdost a odolnost proti opotřebení.

Tvrdší vrstvu než cementováním a zakalením je možno vytvořit nitridováním, které je založeno na povrchovém syčení oceli dusíkem. [3]

### 2.2.5.4 Porovnání vlastností tvrdých povrchových vrstev

Povrchovým kalením, cementováním, nitrocementováním, karbonitridováním a nitridováním se dosahuje podobného účinku - vytvářejí se tvrdé povrchové vrstvy s velkou odolností proti otěru. Vrstvy získané jednotlivými postupy nejsou stejně hluboké a nemají stejnou tvrdost, takže každá z nich se hodí pro jiné použití. Na *Obr. 15* jsou obvyklé průběhy tvrdosti ve vrstvách různého typu. [3]



Obr. 15. Porovnání typických průběhů tvrdosti v různých vrstvách 1 - cementování, 2 - nitocementování, 3 - nitrídování, 4 - karbonitridování, 5 - povrchové kalení [3]

### 3 FEM ANALÝZA

Metoda konečných prvků (Finite Element Method, MKP/FEM) je numerická metoda sloužící k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí, proudění tepla, jevů elektromagnetismu, proudění tekutin atd. na vytvořeném fyzikálním modelu. Její princip spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. MKP je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického (nejnamáhanějšího) místa konstrukce. Ačkoliv jsou principy této metody známy již delší dobu, k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem moderní výpočetní techniky. [9]

MKP se využívá k řešení problémů z celé řady oborů, jako například akustika, návrh antén, biomechanika, elektromagnetismus, dynamika tekutin, prostup tepla, fyzika, geofyzika, pružnost a pevnost, šíření vln atd. Z uvedeného výčtu možných aplikací vyplývá univerzálnost metody přesahující rámec strojírenství.[11]

Softwarová nabídka umožňující provádět MKP výpočty je rozsáhlá. Výpočtový systém existuje zpravidla:

- samostatně, je orientován výhradně na výpočty, poskytuje pokročilé výpočtové nástroje, vyžaduje vysokou úroveň znalosti problematiky MKP, obsahuje pouze jednoduchý modelář nebo jej neobsahuje vůbec
- ve formě CAE modulu, který je implementován do CAD systému; nabídka výpočtových nástrojů bývá omezena, je připraven pro snadné využití konstruktéry, využívá se modelář CAD systému[11]

Mezi nejznámější řešiče lze zařadit: ABAQUS, ADINA, ANSYS, COSMOS, MARC, NASTRAN, LSDYNA a další.

#### 3.1 Základní veličiny a rovnice obecné pružnosti

Obsah této kapitoly je popsán v učebnici Mechaniky - Pružnost a pevnost a proto se omezíme na základní informace. Základní úlohou, jejímž řešením se dále budeme zabývat, je tzv. *přímá úloha pružnosti*. Budeme ji formulovat následovně: „Pro těleso se známou geometrií, materiálem, zatížením a vazbami k okolí určete jeho deformaci a napjatost.“ Určení deformace a napjatosti, stručněji označované jako napěťová analýza, je předpokladem k následnému hodnocení mezních stavů konstrukce, které ovšem pro tuto chvíli leží mimo rámec naší pozornosti. [11]

V obecné prostorové statické úloze je celkem 15 neznámých funkcí proměnných  $x, y, z$ . Jedná se o:

- a) tři posuvy v osách  $u, v, w$
- b) šest přetvoření - poměrná prodloužení  $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$   
- zkosení pravoúhlých stěn  $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$
- c) šest napětí - v osách  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$   
- v rovinách na ně kolmých  $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$

Tyto funkce jsou navzájem vázány systémem obecných rovnic pružnosti, které musí být splněny uvnitř řešené oblasti. Jsou to rovnice rovnováhy, rovnice geometrické a rovnice fyzikální. Na hranici řešené oblasti musí pak být splněny předepsané okrajové podmínky. [11]

### 3.1.1 Rovnice rovnováhy

Tyto rovnice jsou podmínkami rovnováhy základního vnitřního prvku, na který kromě složek napětí působí vnější objemová síla (např. gravitační) o složkách  $o_x, o_y, o_z [N.m^{-3}]$ . Představují vzájemnou vazbu mezi složkami napětí, která musí být splněna vždy bez ohledu na typ materiálu, velikost deformací apod. Uvádíme je pro případ statického zatěžování:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + o_x &= 0 & \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + o_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + o_z &= 0 \end{aligned}$$

[11]

### 3.1.2 Rovnice geometrické

Jedná se o vztahy vytvářející vazbu mezi složkami posuvů a přetvoření a uvedeme je ve tvaru, použitelném v případě malých přetvoření (řádu  $10^{-2}$  a menším):

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} & \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} & \gamma_{zx} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{aligned}$$

[11]



### 3.1.3 Fyzikální vztahy

Představují vztah mezi deformací a napjatostí. Opět je uvedeme v nejběžnějším tvaru pro lineárně pružný materiál (v oblasti platnosti Hookova zákona  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ), jehož vlastnosti jsou určeny dvěma nezávislými materiálovými konstantami:

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left[ \sigma_x - \mu (\sigma_y + \sigma_z) \right] & \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \left[ \sigma_y - \mu (\sigma_x + \sigma_z) \right] & \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \tau_{yz} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} \left[ \sigma_z - \mu (\sigma_x + \sigma_y) \right] & \gamma_{zx} &= \frac{1}{G} \tau_{zx}\end{aligned}$$

Modul pružnosti ve smyku  $G$  není nezávislou materiálovou veličinou a můžeme jej určit ze vztahu:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$$

[11]

## 3.2 Proces analýzy

V následující kapitole je vysvětleno, jak proces konečnoprvkové analýzy probíhá a jaká jsou základní pravidla dobré MKP analýzy. Uvedený postup se většinou shoduje s většinou ostatních výpočtových systémů. Proces konečnoprvkové analýzy lze rozdělit do třech následujících částí:

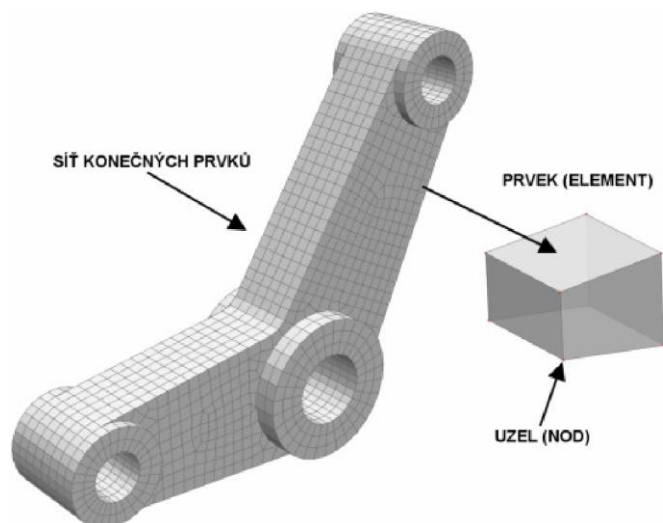
### 3.2.1 Preprocessing

Část konečnoprvkové analýzy zabývající se přípravou výpočtových dat.

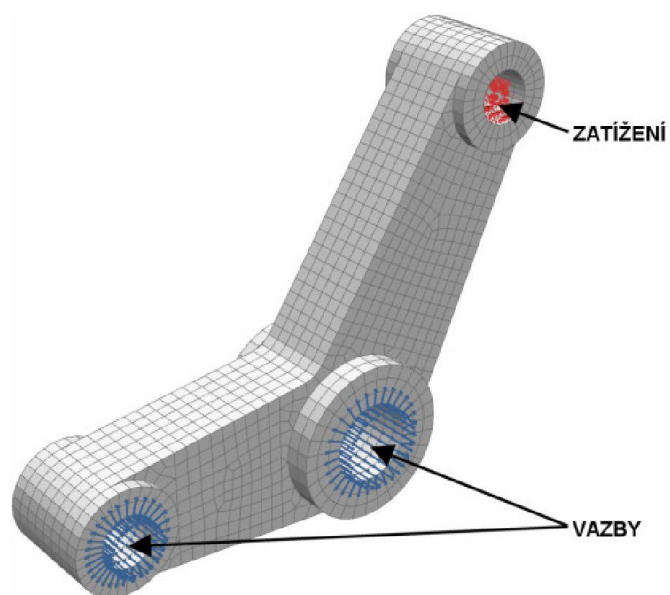
Patří sem tvorba 3D modelu součásti, následná tvorba sítě a zadání okrajových podmínek.



Obr. 16. Vytvořený 3D model [10]



Obr. 17. Síť konečných prvků [10]



Obr. 18. Okrajové podmínky [10]

### 3.2.2 Processing

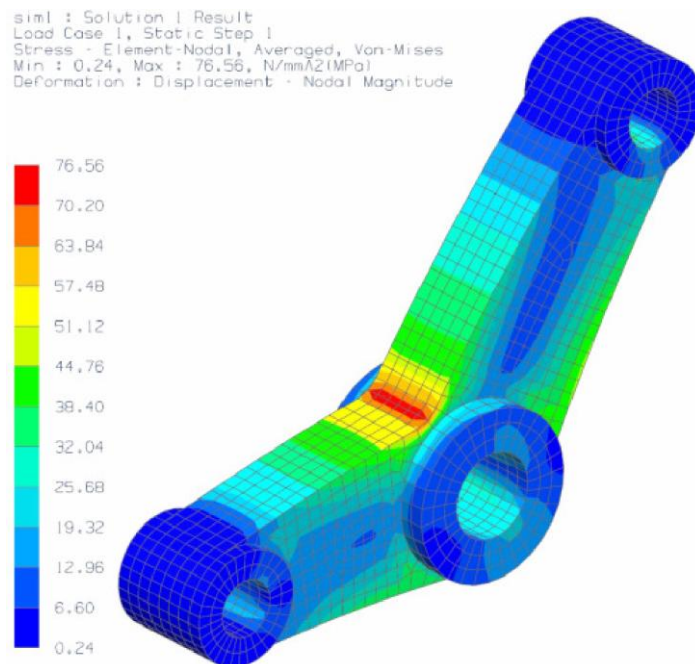
Část konečnoprvkové analýzy zabývající se zpracováním výpočtových dat.

Dochází k numerickému řešení soustavy diferenciálních rovnic popisující vlastnosti vytvořené fyzikální soustavy. [10]

### 3.2.3 Postprocessing

Část konečnoprvkové analýzy zabývající se vyhodnocováním výpočtových dat.

Po úspěšném dokončení výpočtu můžeme přistoupit ke zpracování výsledků. Nejprve zkontrolujeme, jakým způsobem se součást v důsledku zatížení zdeformovala, a poté určíme kritická místa v součásti. Pokud se výsledné hodnoty příliš liší od původního odhadu, může to poukazovat na možnou chybu ve výpočtu. Abychom se této chybě vyvarovali, součástí výpočtové analýzy by mělo být analytické, popř. experimentální ověření správnosti výpočtu a odhad chyby výpočtu. Celý proces konečnoprvkové analýzy, včetně závěru plynoucího z výpočtu, by se měl vždy zaznamenat do výpočtové zprávy. [10]



Obr. 19. Výsledek výpočtové analýzy [10]

## **Závěr teoretické části**

Teoretická část poskytuje základ pro vypracování praktické části a je vymezena několika kapitolami.

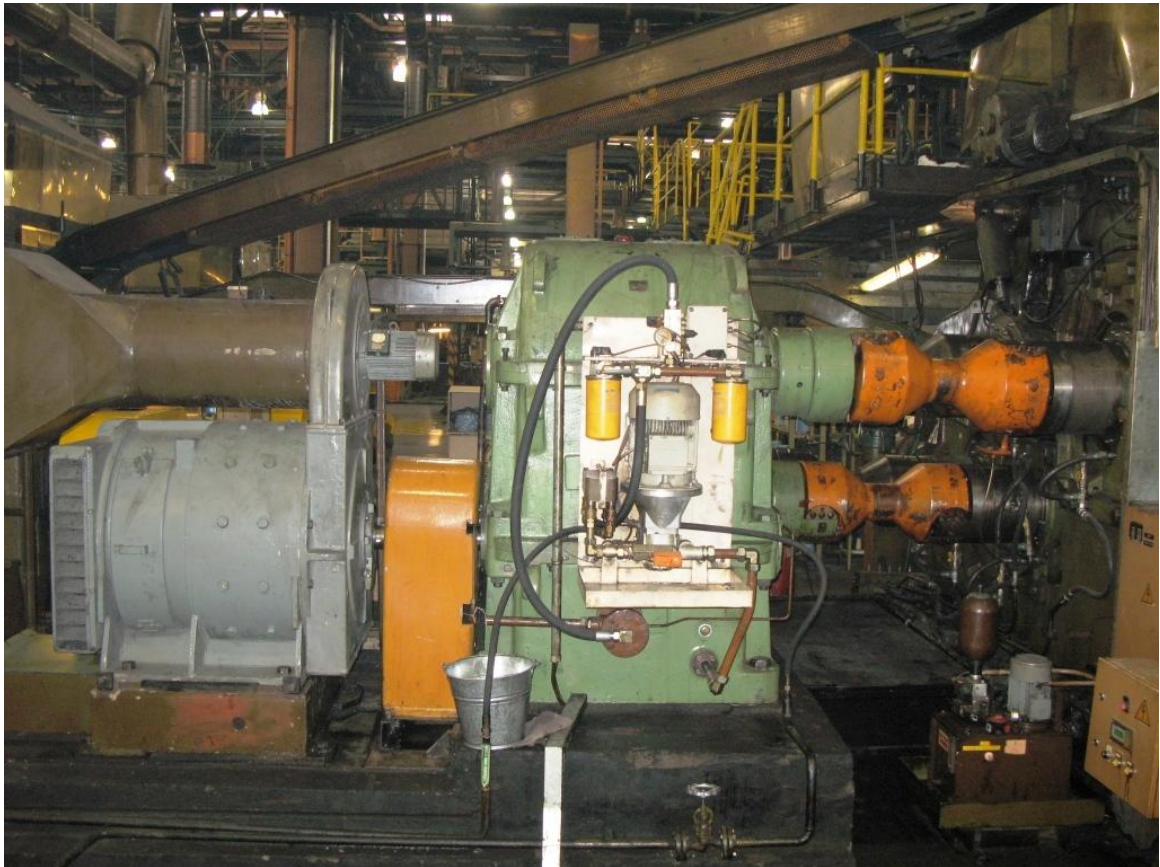
Úvodní kapitola pokrývá základní pojmy mechaniky, které mají za následek namáhání hřídelů a jejich opotřebenosti. V následující kapitole jsem se zaměřil na rozdělení ocelí a výběru vhodného materiálu na výrobu hřídele. Je zde také seznámení se základními typy tepelného zpracování ocelí pro jejich zlepšení vlastností. Na konci této kapitoly je uvedeno, s ohledem na praktickou část, jednoduché seznámení s FEM/MKP analýzou, aby se i nezasvěcený čtenář něco málo dozvěděl.

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

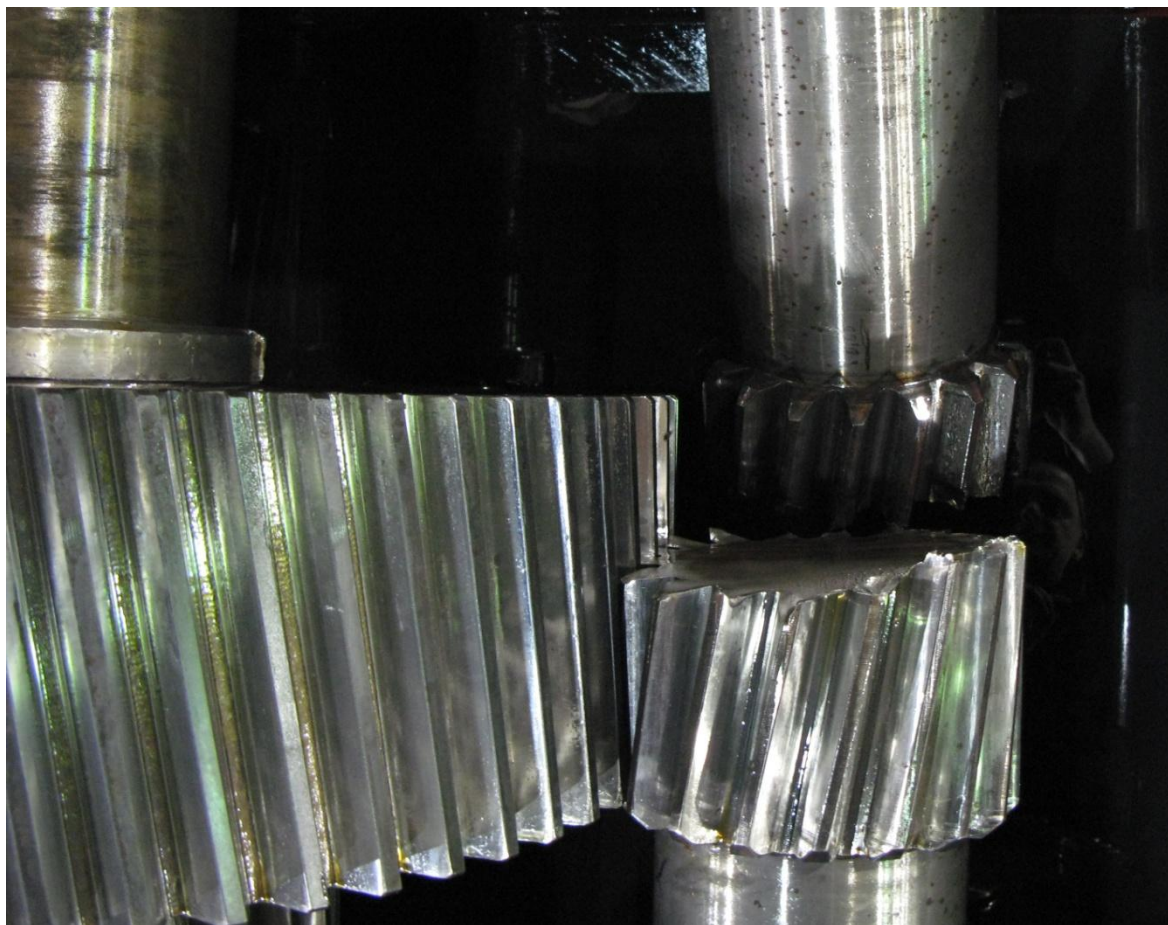
## 4 STANOVENÍ CÍLŮ

Cílem této práce je optimalizace vstupní hřídele převodovky, která slouží pro pohon 4-válcového kalandru na zpracování kaučukové směsi. Docházelo zde k vylamování zubů z pastorku na hřídeli a také ke zlomení celé hřídele. Jedná se o skutečný problém, který se objevil ve firmě Continental Barum s.r.o. Otrokovice.

Bude provedena numerická analýza současného stavu. Poté se budu snažit navrhnout lepší řešení, jak geometricky tak i materiálově. Poté se zaměřím na FEM analýzu současného i upraveného tvaru. Na základě získaných výsledků z této analýzy bude upraven tvar a materiál hřídele.



*Obr. 20. Boční pohled na převodovku*



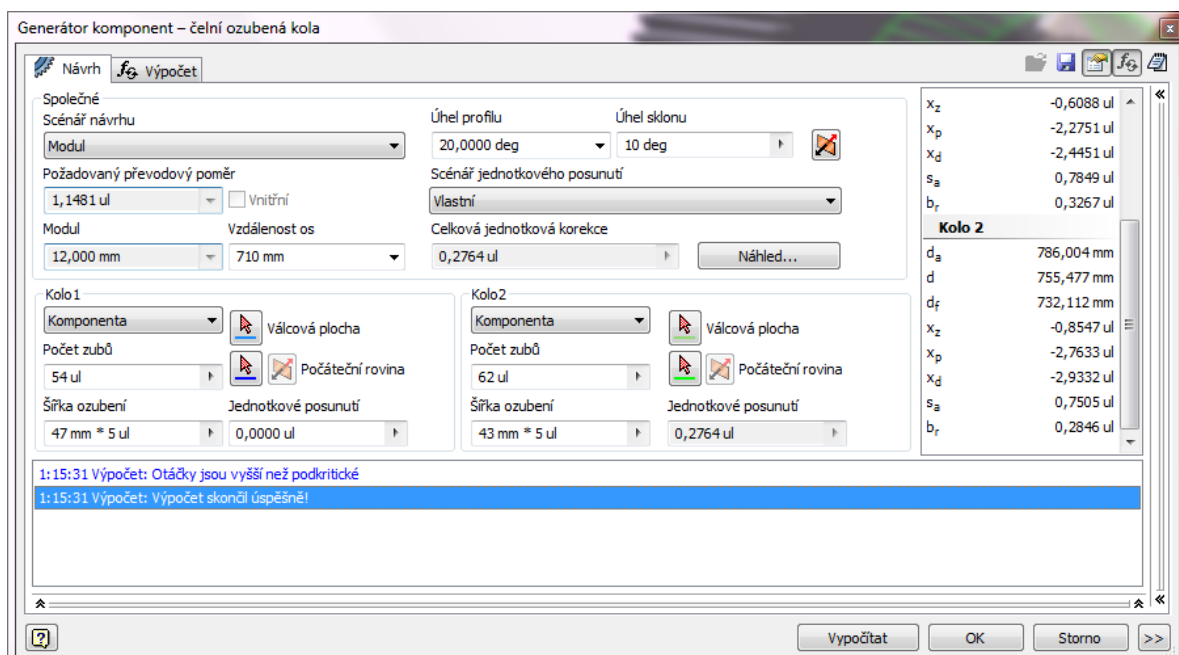
*Obr. 21. Zlomená vstupní hřídel převodovky*

## 5 3D MODEL PŘEVODOVKY

3D model celé sestavy převodovky je vymodelován v programu Autodesk Inventor 2013. Software CATIA V5R18 bohužel oproti Inventoru nenabízí generátor některých strojních součástí. Tvorba šikmých ozubených kol by proto byla v CATII velmi složitá, protože by se muselo každé kolo samostatně modelovat přes složité úkony.

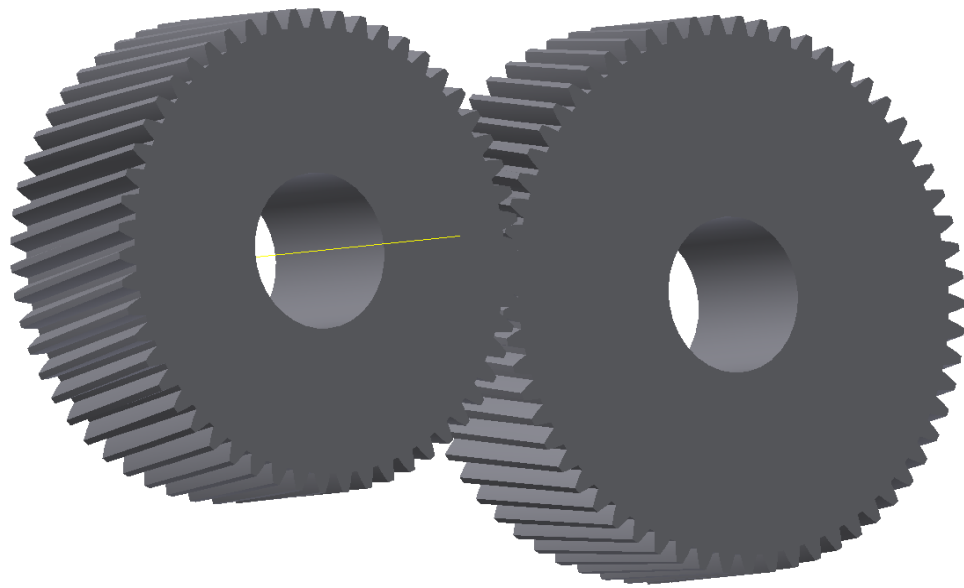
### 5.1 Generátor ozubených kol

Slouží pro jednoduché navrhnutí sestavy ozubených kol. Můžeme si v něm vybrat několik možností zadání vstupních parametrů, např. modul, osovou vzdálenost, počet zubů na kole, úhel sklonu atd. Poté co vložíme dostatek informací o kole, tak nám software vytvoří hotovou zavazbenou sestavu kol. Můžeme si také vybrat možnost, že chceme jenom jedno ozubené kolo a druhé nás nezajímá.



Obr. 22. Generátor ozubených kol v Autodesk Inventor 2013

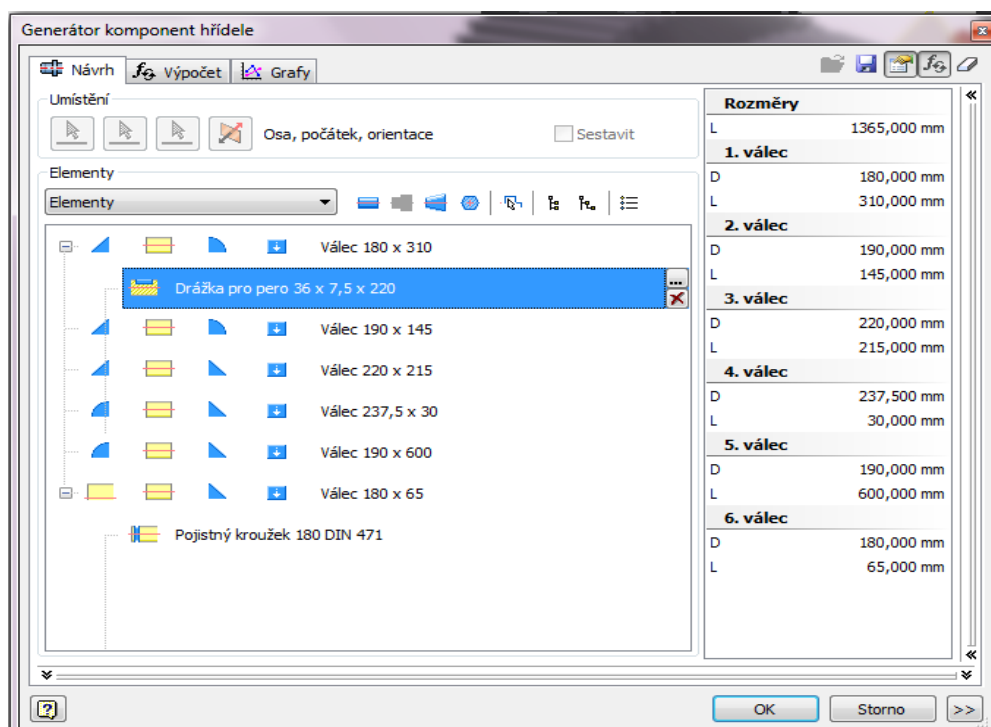




Obr. 23. Zavazbená sestava vytvořená generátorem ozubených kol

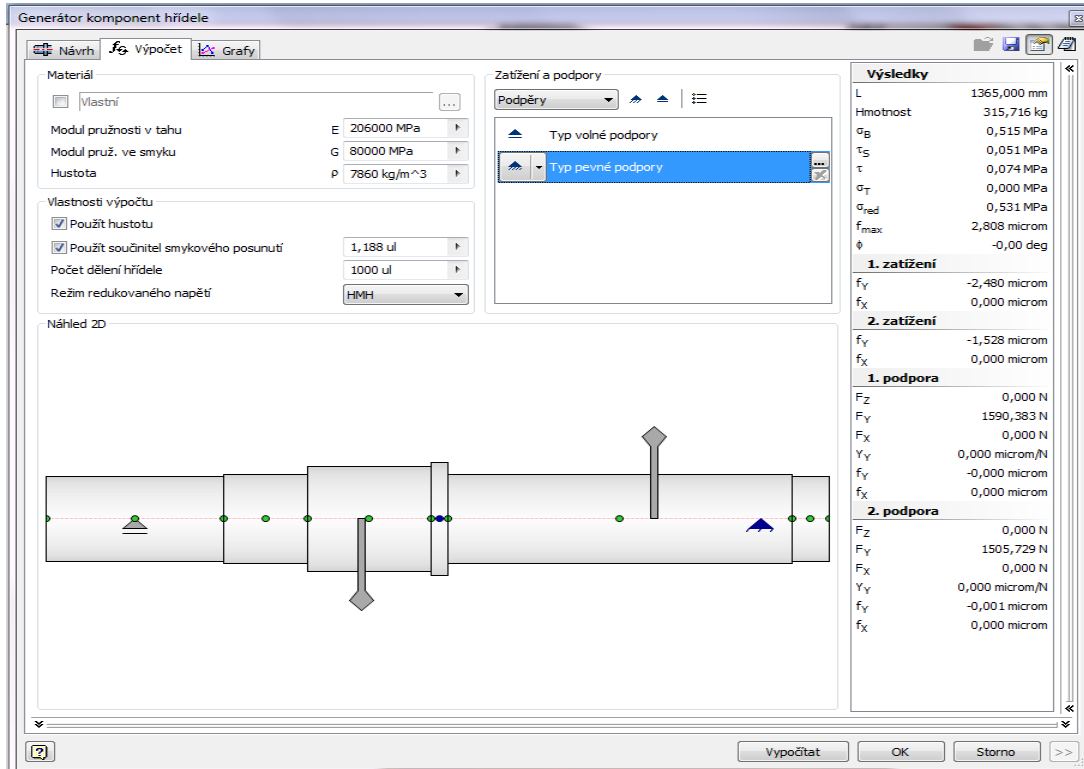
## 5.2 Generátor hřídele

Další možnost usnadnění práce v softwaru Autodesk Inventor 2013, je generátor hřídele. Zde si můžeme vybrat z několika konstrukčních prvků, např. drážka pro pero, drážka pro pojistný kroužek, průchozí otvor atd.

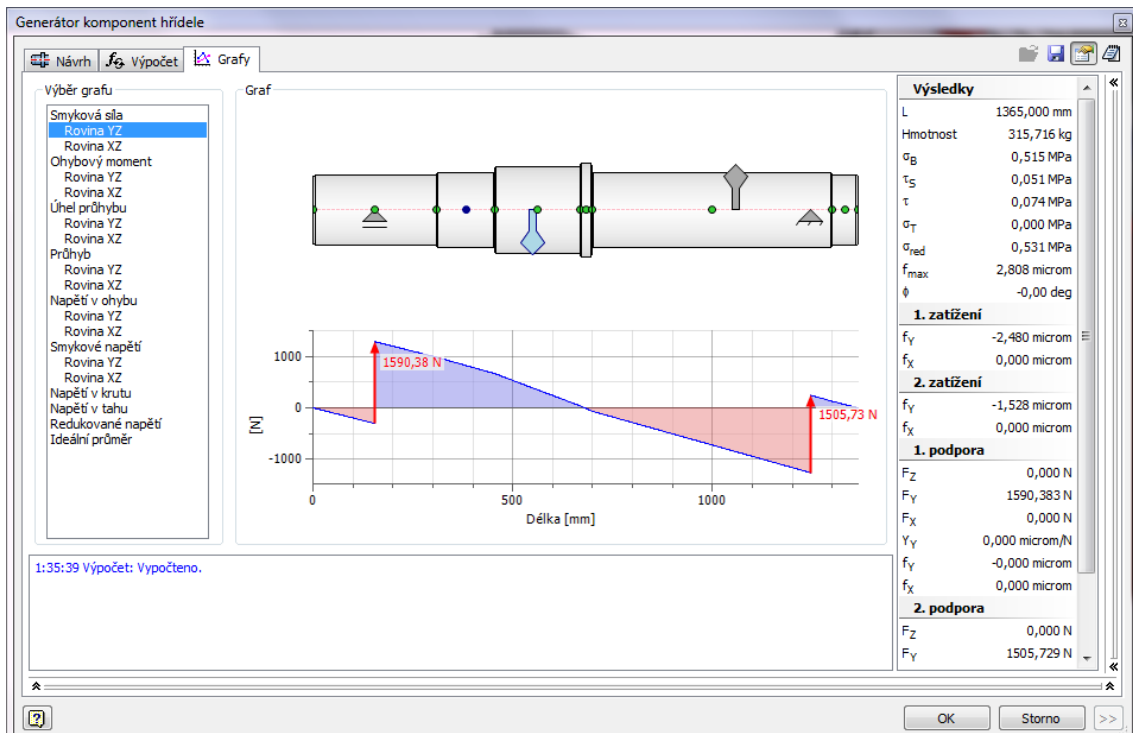


Obr. 24. Generátor hřídele

V tomto okně jsou ještě další 2 záložky jedna je výpočet a druhá grafy. V první si můžeme po zadání zatěžujících sil vypočítat reakce na hřídeli. V druhé kartě si můžeme tyto výsledky prohlédnout v grafech.



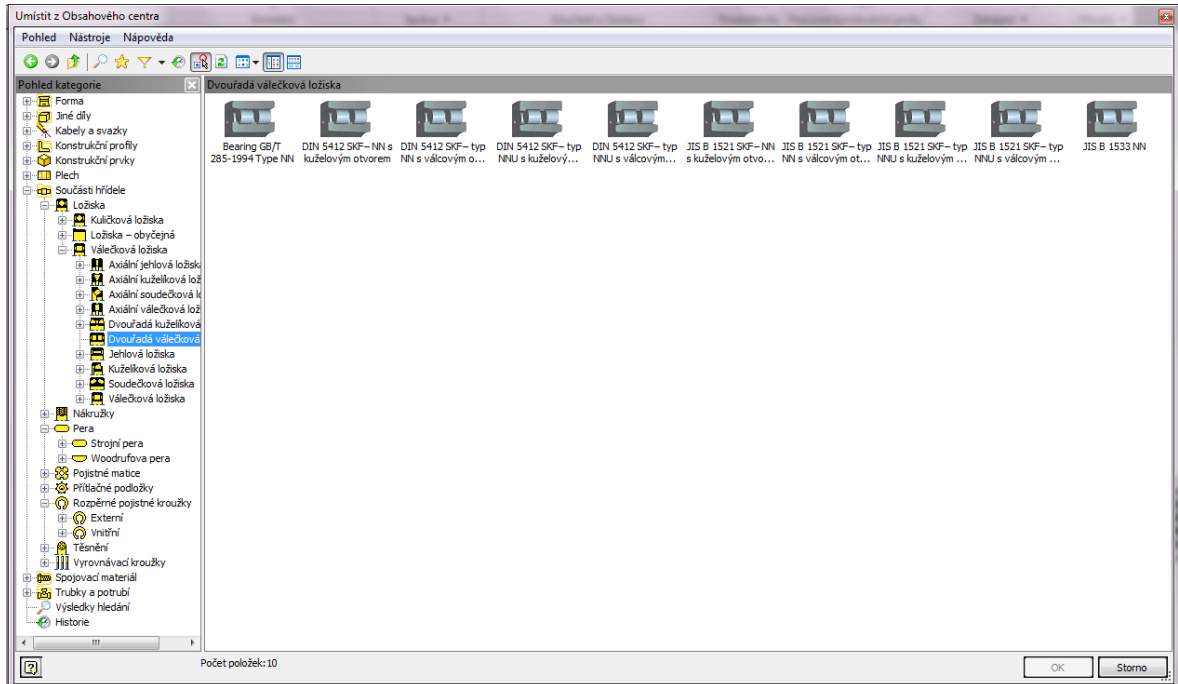
Obr. 25. Výpočet reakcí na hřídeli



Obr. 26. Zobrazení výsledků v diagramech

### 5.3 Generátor strojních součástí

Ještě se zde objevuje funkce tzv. Obsahového centra, z kterého si můžeme do sestavy vkládat různé strojní součásti, např. pojistné pera, ložiska, podložky, matice, pojistné podložky atd.



Obr. 27. Generátor různých strojních součástí



Obr. 28. Hotová sestava převodovky

## 6 NUMERICKÝ VÝPOČET

### Zadané hodnoty:

- příkon elektromotoru  $P_o = 30 - 300 \text{ kW}$
- vstupní otáčky  $n_1 = 140 - 1400 \text{ ot/min}$
- výstupní otáčky  $n_2 = 4 - 40 \text{ ot/min}$
- materiál hřídele ocel 14 220.4
- dovolené napětí v krutu  $\tau_d = 250 \text{ MPa}$
- dovolené napětí v tahu  $\sigma_d = 260 \text{ MPa}$
- dovolené napětí v ohybu  $\sigma_{od} = 280 \text{ MPa}$
- účinnost elektromotoru  $\eta = 65\%$

### 6.1 Pevnostní výpočet hřídele

#### Výpočet výkonu elektromotoru:

$$\eta = \frac{P}{P_o}$$

$$P = \eta * P_o = 0,65 * 300 = \underline{195 \text{ kW}}$$

#### Výpočet obvodové síly:

$$F = \frac{P}{\pi * D_n * n_1} = \frac{195000}{\pi * 0,109 * \frac{1400}{60}} = \underline{24417 \text{ N}}$$

#### Výpočet normálové síly:

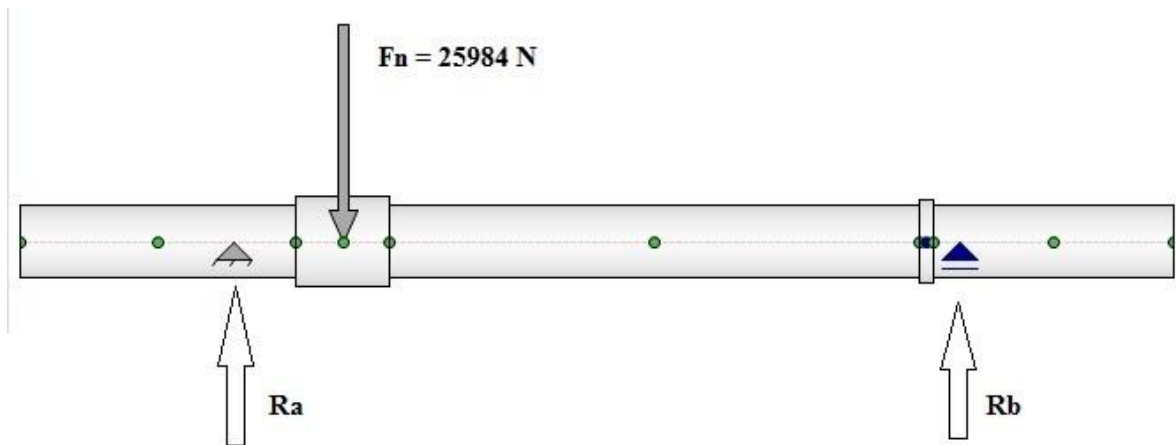
$$F_n = \frac{F_1}{\cos \alpha} = \frac{24417}{\cos 20^\circ} = \underline{25984 \text{ N}}$$

#### Výpočet kroutícího momentu od elektromotoru:

$$M_k = 159,2 * \frac{P}{n} = 159,2 * \frac{195}{\frac{1400}{60}} = \underline{1330 \text{ Nm}}$$

#### Výpočet průměru hřídele z $M_k$ :

$$d = \sqrt[3]{\frac{16 * M_k}{\pi * \tau_D}} = \sqrt[3]{\frac{16 * 1330000}{\pi * 250}} = \underline{30 \text{ mm}}$$

**Výpočet reakcí:**

Obr. 29. Znárodnění sil působících na hřídel

$$\sum M = 0$$

$$M_A = -F_n \cdot a - R_B \cdot b = -25984 \cdot 0,1515 - R_B \cdot 1003$$

$$R_B \cdot 1,003 = -25984 \cdot 0,1515 = \underline{3924 \text{ N}}$$

$$\sum F_Y = 0$$

$$R_a - F_n - R_b = 0$$

$$R_a = F_n + R_b = 25984 - 3924 = \underline{22060 \text{ N}}$$

**Výpočet ohybového momentu:**

$$M_{Omax} = \frac{F \cdot a \cdot b}{l} = \frac{25984 \cdot 0,1515 \cdot 1,003}{1,1545} = \underline{3419 \text{ Nm}}$$

**Výpočet průměru hřídele z \$M\_o\$:**

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_o}{\pi \cdot \sigma_{od}}} = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 3419000}{\pi \cdot 260}} = \underline{51 \text{ mm}}$$

**Výpočet průměru hřídele z kombinace krut a ohyb:**

$$\sigma_{red} = \frac{1}{0,1d^3} \sqrt{M_o^2 + 0,75M_K^2} \leq \sigma_{od}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{\sqrt{M_0^2 + 0,75M_k^2}}{0,1\sigma_{od}}} = \sqrt[3]{\frac{3607802}{0,1\sigma_{od}}} = \underline{50,5 \text{ mm}}$$

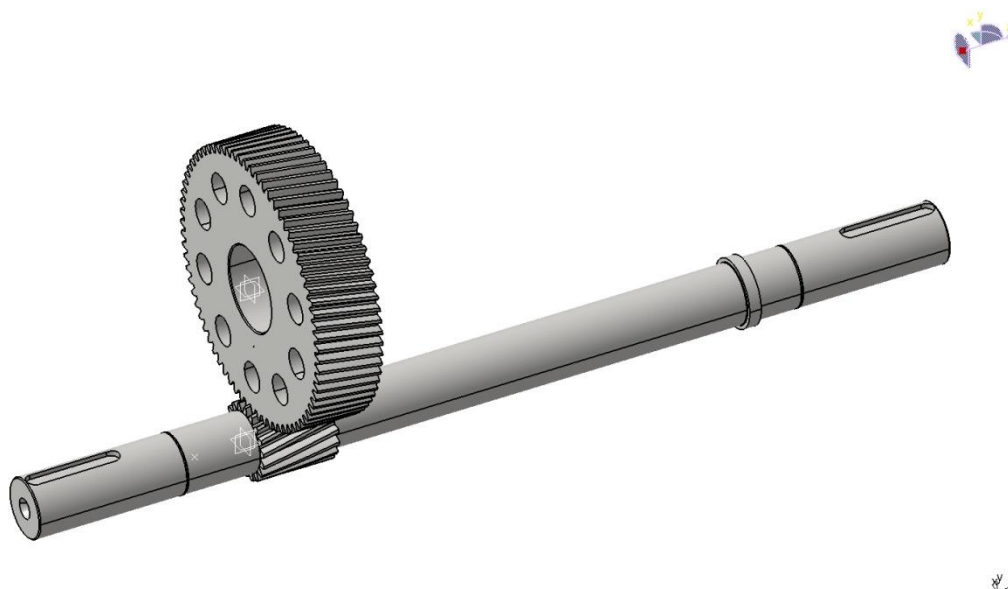
Jelikož nejmenší průměr, který je na hřídeli je 99 mm, tak nám podmínky na krut a ohyb vyšly v pořádku.

## 7 FEM ANALÝZA

Analýza bude provedena pomocí softwaru CATIA V5R18, který pracuje s metodou konečných prvků MKP, což je v angličtině finite elements method FEM.

### 7.1 3D model

Jak je psáno v dřívější kapitole, 3D model je vymodelován v programu Autodesk Inventor 2013. Poté je vyexportoval do formátu \*.CATProduct, který lze otevřít v softwaru CATIA. Po otevření v softwaru ho je ještě potřeba zavazbit, aby nedošlo k negativnímu vzájemnému posunutí součástí.



*Obr. 30. Zavazbená exportovaná sestava pastorku a ozubeného kola*

### 7.2 Materiál

Při výběru materiálu máme možnost si zvolit z několika nabízených skupin materiálů: látky, kovy, kámen, dřevo, stavba a barvy. Zvolili jsme skupinu kovů a v ní jsem našel **steel** (ocel). U každého materiálu si ještě můžeme změnit jeho vizuální i mechanické vlastnosti, modul pružnosti, mez kluzu, poissonova konstanta, odraz světla, barva atd.

### 7.3 Analýza zatížení hřídele

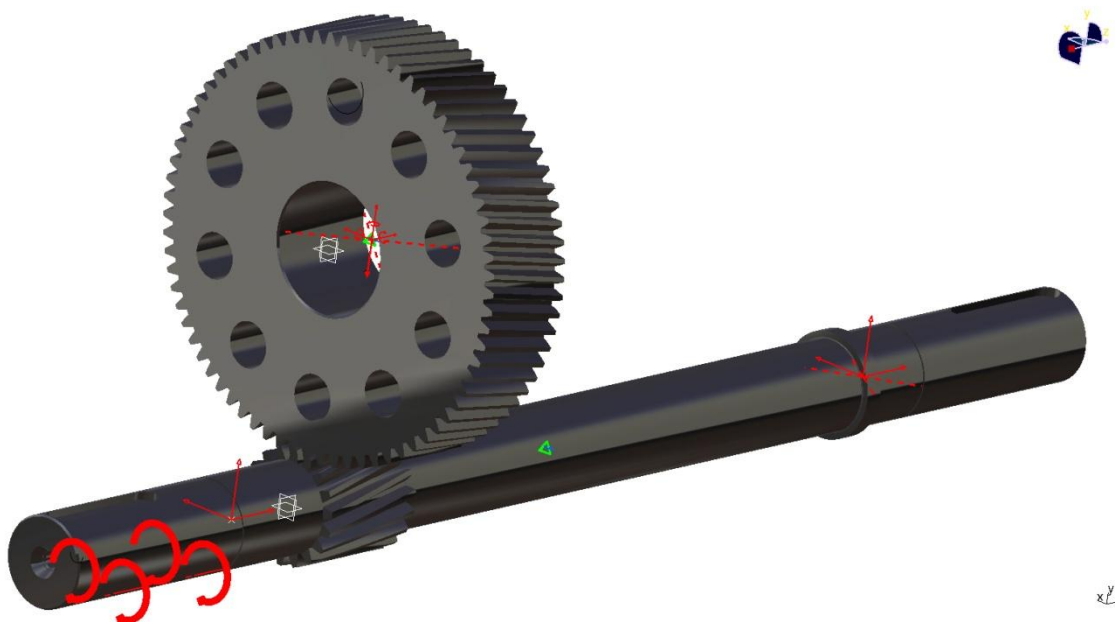
Při této analýze jsem namáhal konec hřídel kroučícím momentem, stejně jako to dělá elektromotor. Zvolil jsem vypočítaný kroučící moment  $M_k = 1330 \text{ Nm}$ . Také je namáhána na ohyb v důsledku síly působící od ozubeného kola  $F = 25\,984 \text{ N}$ .

#### 7.3.1 Zadání okrajových podmínek

Byl zde vytvořen kontakt mezi zubem pastorku a zubem ozubeného kola, které jsou zrovna v záběru.

Pastorek je uchycen na místech kde jsou umístěna ložiska, na těchto místech jsou zakázány posunutí ve všech třech osách, ale povolena naklápění ve všech třech osách. Uchycení ozubeného kola je pomocí funkce **User - defined Restraint**, kde jsem zakázal všechny posunutí i rotace.

Zatížení je zde pomocí kroučícího momentu, který jsem zadal na plochu na konci hřídele. A také normálová síla působící na ozubení pastorku.

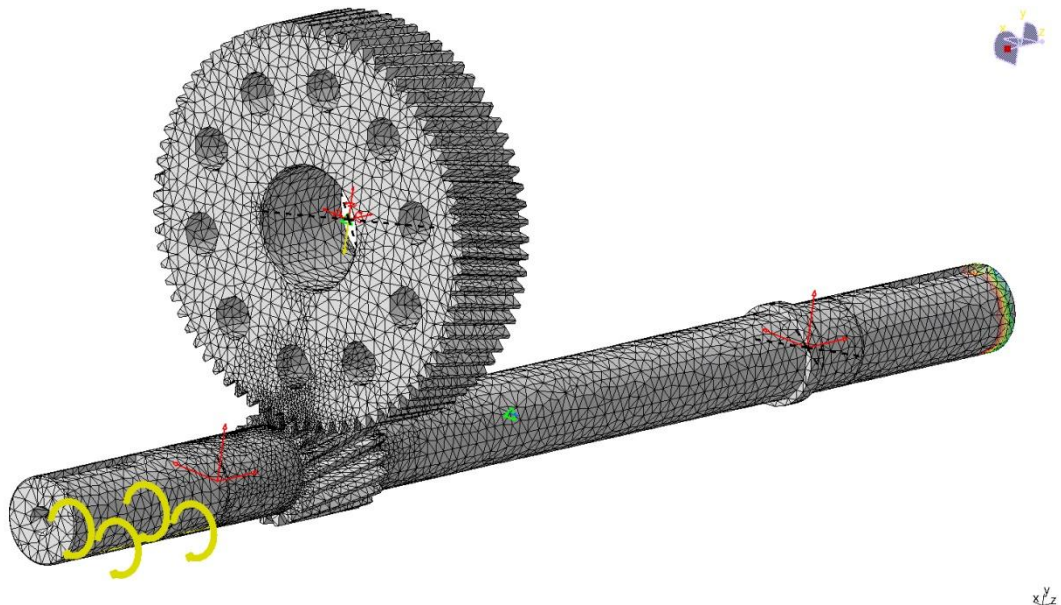


Obr. 31. Zadání okrajových podmínek a zatížení  $M_k$



### 7.3.2 Tvorba sítě

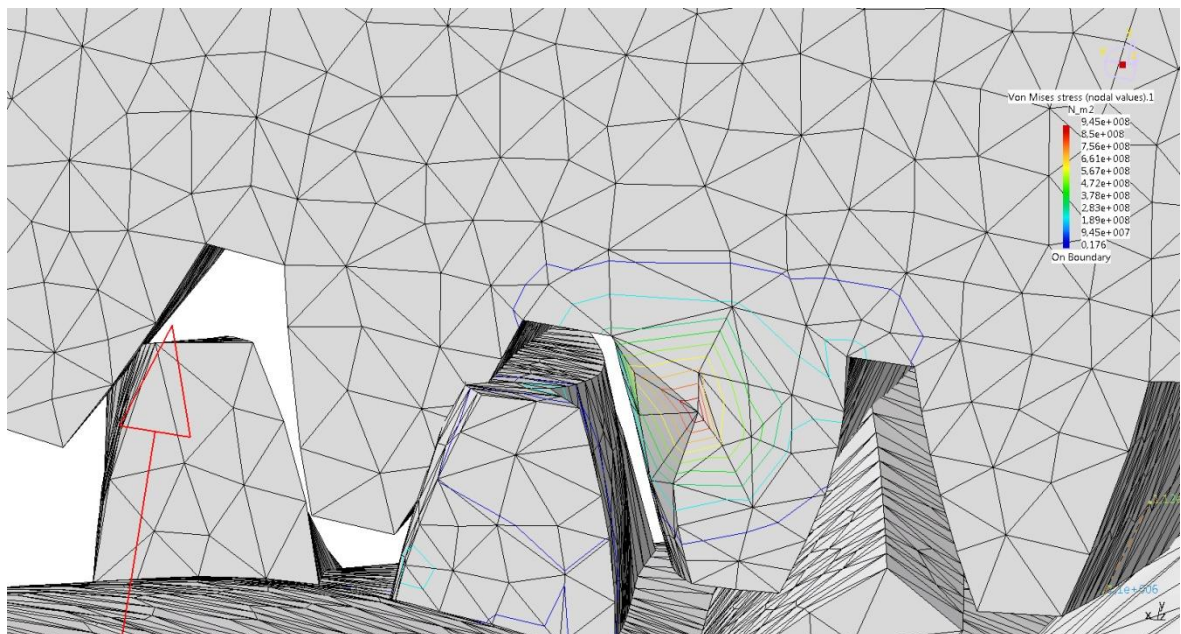
Síť je tvořena čtyřstěny, délka strany je 14 mm.



Obr. 32. Vytvořená síť na modelu

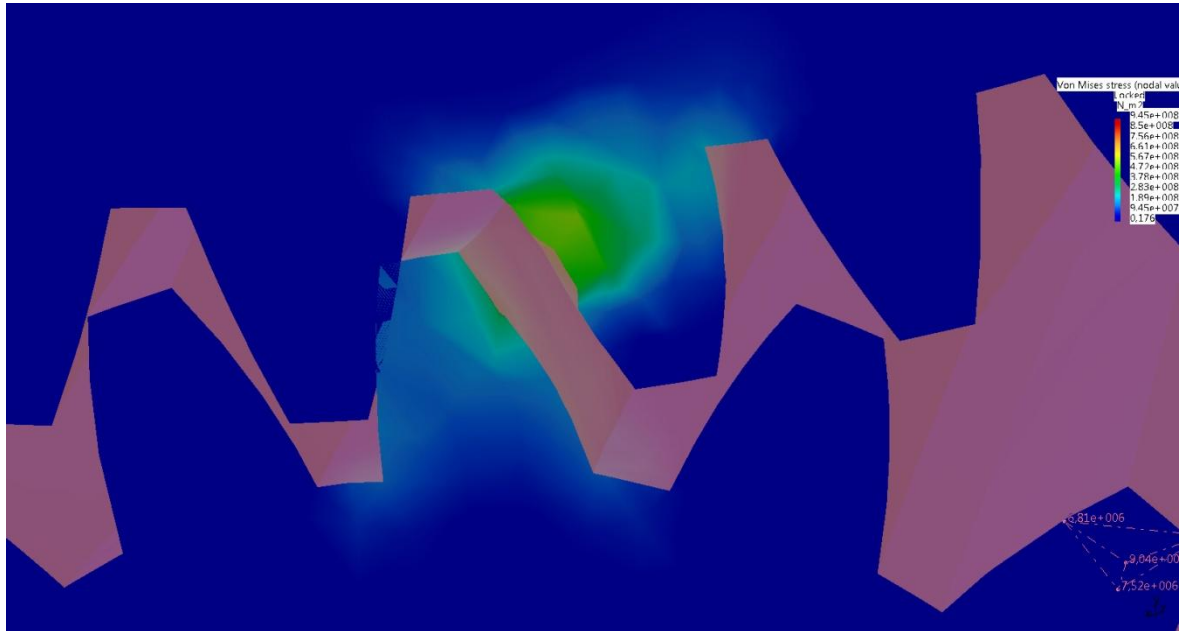
### 7.3.3 Výsledky analýzy

Maximální von Misesovo napětí nám vyšlo 945 MPa. Tato hodnota není po celé délce zubu, ale pouze bodově. Z toho vyplývá, že nám může docházet k vyštipování kousků materiálu ze zubu nebo k vylomení celého zubu.



Obr. 33. Výsledek analýzy - von Misesovo napětí

Toto bodové zatížení zubu jde vidět na následujícím obrázku. Jedná se o řez výsledkem analýzy ve vzdálenosti 2 mm od čela ozubeného kola. V tomto místě už napětí pokleslo na hodnotu okolo 300 MPa.

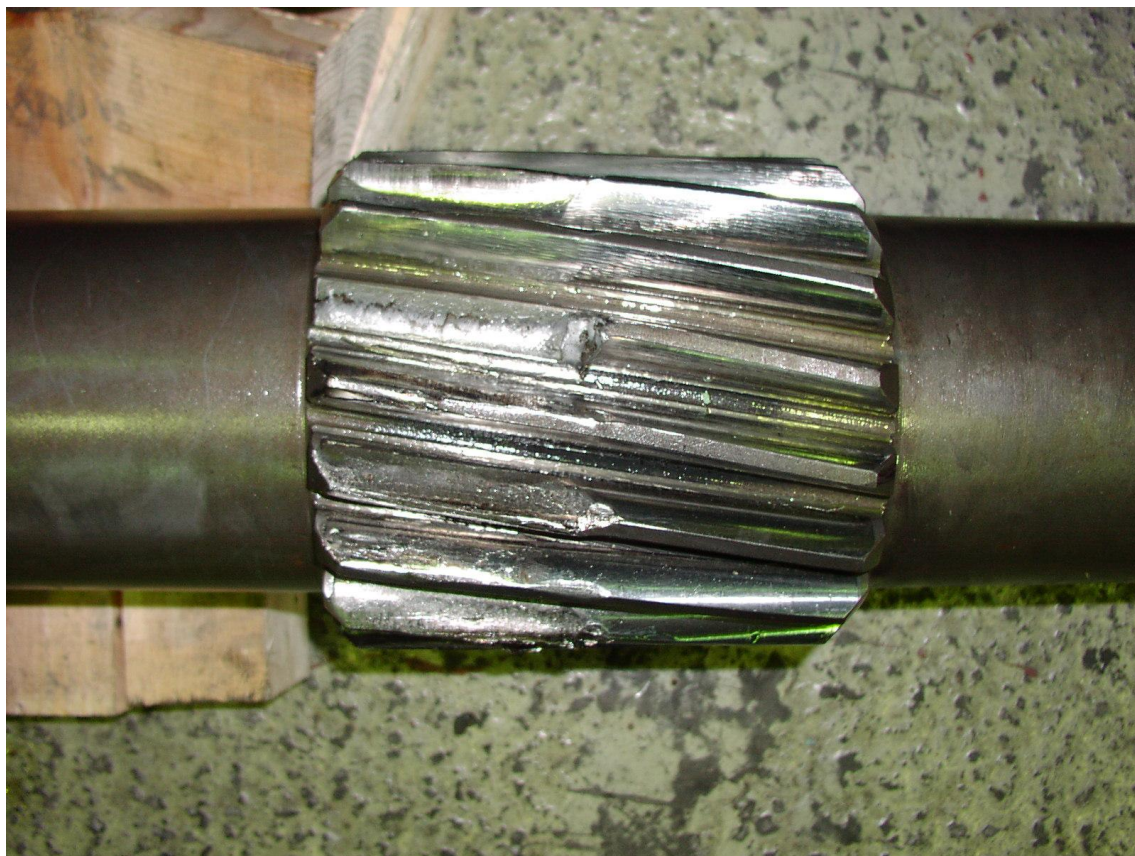


Obr. 34. Řez výsledkem analýzy ve vzdálenosti 2 mm od čela kola

Tento výsledek nám potvrzuje to co se stalo při provozu převodovky, kdy došlo k vylomení zubu jak na pastorku tak i na ozubeném kole. Poté nastalo i zlomení hřídele, hned vedle pastorku. Tato situace zřejmě nastala v důsledku šíření lomu od vyštípnutého zubu a velkého zatížení. Mohlo tomu napomoci také to, že plocha na které se vzniknul lom, je zřejmě pouze soustružena, protože má drsnost  $R_a = 6,3\mu\text{m}$ . Na povrchu mohl po soustružení vzniknout malý vrub nebo ořep, který zapříčil šíření lomu.



*Obr. 35. Fotografie vylomených zubů na ozubeném kole*



*Obr. 36. Vyštipnutý materiál a vylomené zuby na pastorku*

## 8 NÁVRH ŘEŠENÍ

### 8.1 Použití lepšího materiálu

Na stávající pastorek i ozubené kolo je použita ocel 14 220.4, která má hodnoty:

$$\sigma_{od} = 280 \text{ MPa}$$

$$\tau_d = 250 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d = 260 \text{ MPa}$$

Na výrobu této hřídele by se mohla použít ocel 16 220.4, která má hodnoty:

$$\sigma_{od} = 380 \text{ MPa}$$

$$\tau_d = 330 \text{ MPa}$$

$$\sigma_d = 310 \text{ MPa}$$

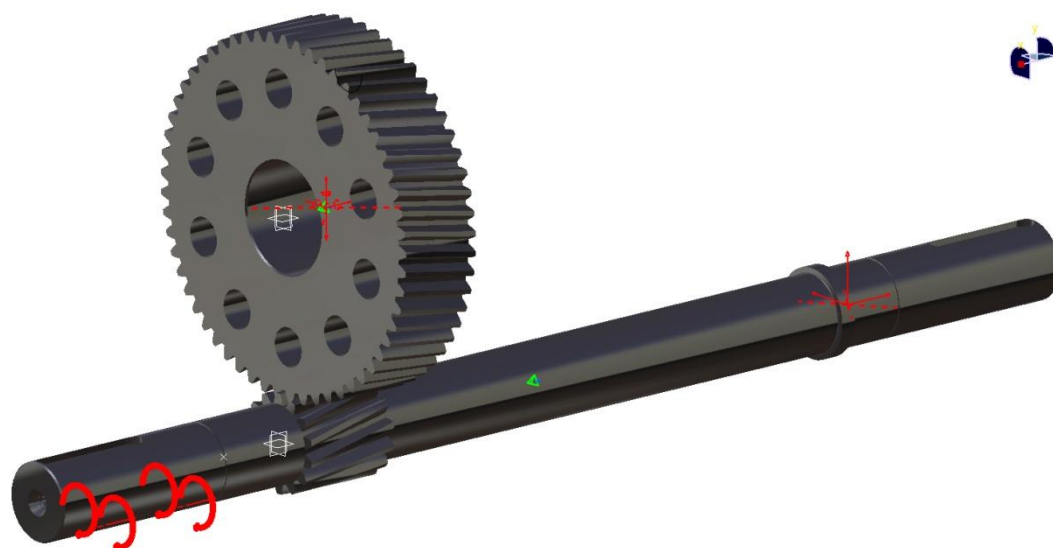
Z uvedených hodnot dovolených napětí je patrné, že pokud by se změnil materiál, tak by nedocházelo k tak velkému vyštípování materiálu. Ale zřejmě by se nezabránilo úplnému vyštípování. Proto tato volba není vhodná pro tento problém. Neřeší problém, pouze ho zlepšuje.

### 8.2 Změna počtu zubů

Změnil se počet zubů pastorku na 14 zubů a na ozubeném kole je 57 zubů. Nemohlo se více experimentovat z důvodu zachování převodového poměru a zachování osové vzdálenosti.

### 8.2.1 Okrajové podmínky

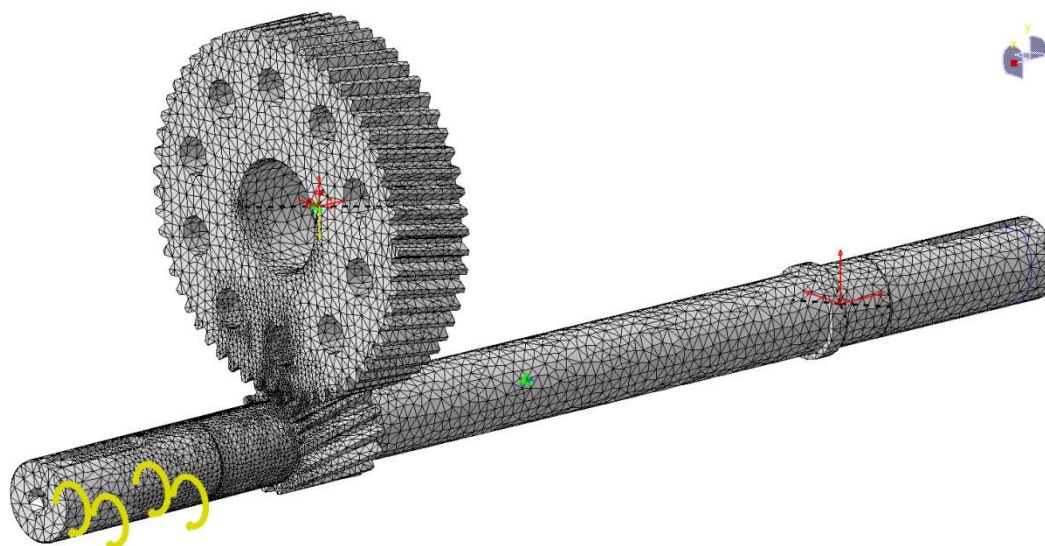
Okrajové podmínky se shodují s podmínkami popsaným v kapitole 7.3.1.



Obr. 37. Okrajové podmínky u změněné sestavy pastorku a kola

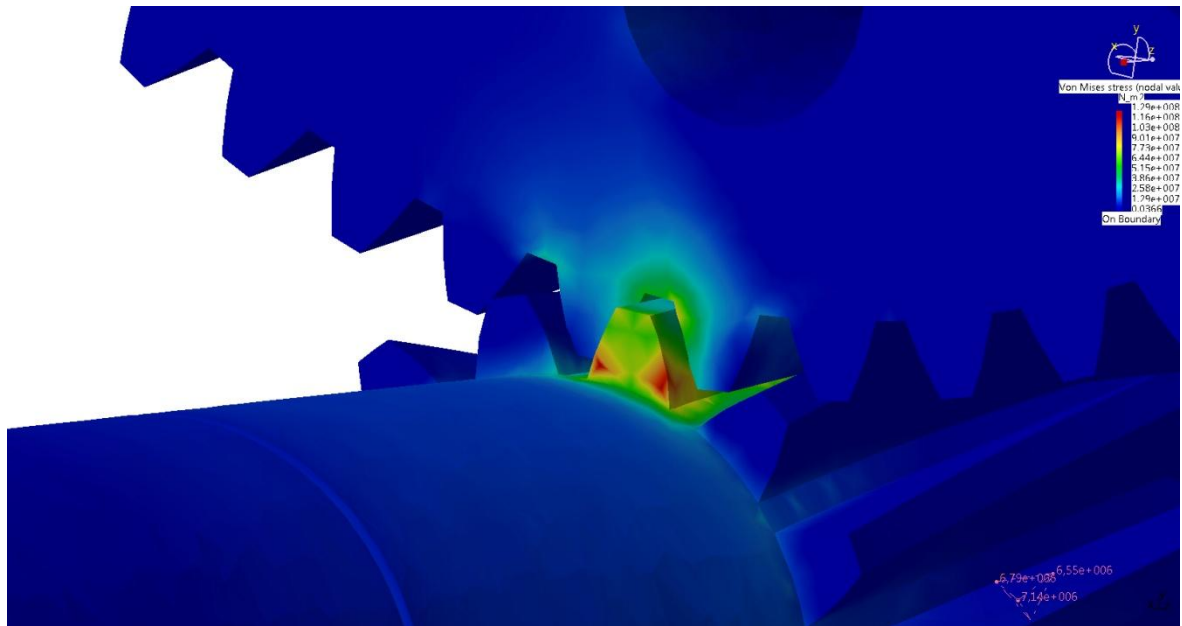
### 8.2.2 Tvorba sítě

Síť má zadané podmínky taktéž stejně jako síť původního řešení.



Obr. 38. Vytvořená síť pro upravený počet zubů

### 8.2.3 Výsledek analýzy



Obr. 39. Výsledné von Misesovo napětí, deformace zvětšena 200x

Výsledné maximální von Misesovo napětí vyšlo 126 MPa. Což je naprosto dostačující pro pevnost zubu. Je zde i patrné lepší rozložení namáhání zubu, které není bodové, ale spíše plošné.

### 8.3 Změna celé konstrukce pohonu

Zvolený pohon zpracovatelského stroje není podle výpočtu zvolený vhodně pro zpracovávání tvrdých směsí.

Vzhledem k modernizaci se tu objevuje další varianta, kdy by každý válec byl poháněn samostatně. Jednalo by se o odstranění současného elektromotoru tak i celé převodovky. Místo nich by se použila rámová konstrukce, která by sloužila pro upevnění elektromotorů. Takže by každý válec měl svůj elektromotor s převodovkou. Tímto řešením by se mohl řídit každý válec samostatně a měnit jednoduše obvodové rychlosti (skluz).

## 9 CELKOVÉ ZHODNOCENÍ

Při analýze současného stavu bylo zjištěno, že průměr hřídele je dostatečně nadimenzován pro přenos kroutícího momentu a také i pro ohybové zatížení. K lomu docházelo v místě hned za pastorkem. Tato porucha byla způsobena nejspíše v důsledku šíření trhlin od vylámaných a vyštípnutých zubů na pastorku. Toto místo bylo také na pomezí mezi namáháním krutem a ohybem. K vylámaní zubů docházelo v důsledku velkého bodového zatížení.

Řešením zde nebylo zvětšení průměru celé pastorkové hřídele, protože se musel zachovat převodový poměr a také osová vzdálenost mezi pastorkem a ozubeným kolem. Jelikož na toto spoluzabírající ozubené soukolí navazuje několik dalších soukolí převodovky.

Tento problém nelze vyřešit pouze změnou materiálu, protože při FEM analýze nám vyšel výsledek von Misesova napětí 945 MPa a takové namáhání nevydrží žádná konstrukční ocel.

Dalším návrhem na zlepšení byla změna počtu zubů jak na pastorku tak i samozřejmě na ozubeném kole. Nebylo zde moc možností na změnu z důvodu zachování převodového poměru a osové vzdálenosti. Při snížení počtu zubů, nám na stávajícím průměru vzniklo více míst, tím pádem se zmožutněly jednotlivé zuby. Došlo k rozšíření paty zubu a snížení výšky zubu. Tato skutečnost se projevila na výsledku FEM analýzy, kdy nám vyšlo maximální napětí 126 MPa. U této analýzy bylo vidět také plošné rozložení napětí působící na zub. Tento návrh se jeví jako dostatečný, ale bohužel se tu můžou časem objevit také mikrotrhliny na povrchu zubu v důsledku míjivého zatížení. Při šíření mikrotrhlin může nastat původní problém s vyštípnutými zuby nebo s prasknutou hřídelí.

Nejlepší návrh, který se objevil v průběhu vypracovávání této práce je odstranění zastaralého pohonu a nahrazením moderním. Což je rámová konstrukce pro upevnění elektromotorů s vlastními převodovkami pro pohon každého válce samostatně.

## ZÁVĚR

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na mechanické namáhání hřídelí. Také je zde popsáno rozdělení konstrukčních ocelí a jejich tepelné zpracování pro zlepšení vlastností. V závěru teoretické části je krátké seznámení s konečně prvkovou analýzou FEM.

Praktická část se zabývá skutečný problém z provozu ve firmě Continental Barum s.r.o. Otrokovice. Jedná se o praskání vstupní hřídele převodovky, která pohání čtyřválcový kalandr na zpracování kaučuku. 3D modely jednotlivých součástí převodovky byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor 2013. Pro FEM analýzu byl zvolen software CATIA V5R18. Z výsledků analýz byly stanoveny návrhy na zlepšení.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] VOLEK, František. *Základy pružnosti a pevnosti*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2004, 157 s. ISBN 8073182009.
- [2] VALENDIN, Miroslav. *Mechanika II: vybrané statě z pružnosti a pevnosti : teorie a základní část*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati, 2004, 149 s. ISBN 80-731-8228-9.
- [3] KŘÍŽ, Rudolf. *Strojírenská příručka 3. svazek: H- Mechanika tuhých těles, I- Pružnost a pevnost, J- Materiál a jeho zkoušení*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1993, 254 s. ISBN 80-858-2723-9.
- [4] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-32.
- [5] VOLEK, František. *Základy konstruování a části strojů I*. Vyd. 1. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009, 167 s. ISBN 978-80-7318-654-8.
- [6] BOHÁČEK, František. *Části a mechanismy strojů II: Hřídele, tribologie, ložiska*. 2. vyd. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1987, 215 s. ISBN 55-581-87.
- [7] KŘÍŽ, Rudolf. *Strojnické tabulky II: Pohony*. 2. vyd. Ostrava: Montanex, 1997, 213 s. ISBN 80-857-8051-8.
- [8] HAMERNÍK, Mgr. Jan. Mgr. Jan Hamerník, 2005: *Základy tepelného zpracování kovů*. [online]. [cit. 2013-01-30]. Dostupné z: <[http://jhamernik.sweb.cz/tepelne\\_zpracovani.htm](http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm)>
- [9] Metoda konečných prvků. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-02-10]. Dostupné z: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda\\_konečných\\_prvků](http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_konečných_prvků)>
- [10] ŠRÁMEK, T.: *Příručka pro výuku Finite Element Method (FEM)* [online]. Žďár nad Sázavou: VOŠ a SPŠ, 36 s. Dostupné z: <<http://www.spszr.cz/projekty/plm/fem2012.pdf>>
- [11] FINK, M., ŘEZNÍČEK, L. *FEM/MKP: metody konečných prvků pro technické výpočty v programu Autodesk Inventor Professional* [online]. Turnov: Střední průmyslová škola, 2006, 60 s. Dostupné z: <<http://www.spstrutnov.cz/o-skole/projekty/technicke-vypocty/skripta-fem-mkp.pdf>>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FEM	Finite element method	-
MKP	Metoda konečných prvků	-
$M_o$	Ohybový moment	Nm
$M_k$	Kroutící moment	Nm
$l$	Délka	mm
$S$	Plocha průřezu	mm <sup>2</sup>
$\tau$	Smykové napětí	MPa
$\sigma$	Ohybové napětí	MPa
Hv	Tvrдость podle Vickerse	-
$\varepsilon$	Poměrné prodloužení	%
$G$	Smykový modul	MPa
$E$	Modul pružnosti	MPa
$P_o$	Příkon elektromotoru	kW
$P$	Výkon elektromotoru	kW
$n_1$	Vstupní otáčky převodovky	ot/min
$n_2$	Výstupní otáčky převodovky	ot/min
$\eta$	Účinnost elektromotoru	%
$F$	Obvodová síla	N
$F_n$	Normálová síla	N
$d$	Průměr hřídele	mm
$R_a$	Reakce na zatěžující sílu na hřídeli	N
$R_b$	Reakce na zatěžující sílu na hřídeli	N
$\sigma_{od}$	Dovolené napětí v ohybu	MPa
$\sigma_d$	Dovolené napětí v tahu	MPa
$\tau_d$	Dovolené napětí v krutu	MPa

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Zatížení prostého nosníku [2]</i> .....	12
<i>Obr. 2. Prostý krut [2]</i> .....	13
<i>Obr. 3. Krut tyče kruhového průřezu [2]</i> .....	14
<i>Obr. 4. Ukázka elementárního úhlu zkroucení [2]</i> .....	15
<i>Obr. 5. Průběh napětí v krutu [2]</i> .....	15
<i>Obr. 6. Prut namáhaný krutem i ohybem</i> .....	16
<i>Obr. 7. Schéma číselného značení ocelí [3]</i> .....	18
<i>Obr. 8. Diagram průběhu tepelného zpracování [5]</i> .....	22
<i>Obr. 9. Teplotní oblasti hlavních způsobů tepelného zpracování ocelí v rovnovážném diagramu Fe-C [3]</i> .....	22
<i>Obr. 10. Vliv obsahu uhlíku na tvrdost nelegovaných ocelí [3]</i> .....	24
<i>Obr. 11. Základní postup kalení do studené lázně [3]</i> .....	25
<i>Obr. 12. Postup termálního kalení [3]</i> .....	25
<i>Obr. 13. Postup při izotermickém žihání a izotermickém zušlechťování [3]</i> .....	26
<i>Obr. 14. Závislost hloubky zakalení při indukčním kalení [3]</i> .....	28
<i>Obr. 15. Porovnání typických průběhů tvrdosti v různých vrstvách 1 - cementování, 2 - nitocementování, 3 - nitridování, 4 - karbonitridování, 5 - povrchové kalení [3]</i> .....	30
<i>Obr. 16. Vytvořený 3D model [10]</i> .....	34
<i>Obr. 17. Síť konečných prvků [10]</i> .....	34
<i>Obr. 18. Okrajové podmínky [10]</i> .....	34
<i>Obr. 19. Výsledek výpočtové analýzy [10]</i> .....	35
<i>Obr. 20. Boční pohled na převodovku</i> .....	38
<i>Obr. 21. Zlomená vstupní hřídel převodovky</i> .....	39
<i>Obr. 22. Generátor ozubených kol v Autodesk Inventor 2013</i> .....	40
<i>Obr. 23. Zavazbená sestava vytvořená generátorem ozubených kol</i> .....	41
<i>Obr. 24. Generátor hřídele</i> .....	41
<i>Obr. 25. Výpočet reakcí na hřídeli</i> .....	42
<i>Obr. 26. Zobrazení výsledků v diagramech</i> .....	42
<i>Obr. 27. Generátor různých strojních součástí</i> .....	43
<i>Obr. 28. Hotová sestava převodovky</i> .....	43
<i>Obr. 29. Znázornění sil působících na hřídel</i> .....	45

---

<i>Obr. 30. Zavazbená exportovaná sestava pastorku a ozubeného kola .....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 31. Zadání okrajových podmínek a zatížení <math>M_k</math> .....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 32. Vytvořená síť na modelu .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 33. Výsledek analýzy - von Misesovo napětí .....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 34. Řez výsledkem analýzy ve vzdálenosti 2 mm od čela kola .....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 35. Fotografie vylomených zubů na ozubeném kole .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 36. Vyšťipnutý materiál a vylomené zuby na pastorku .....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 37. Okrajové podmínky u změněné sestavy pastorku a kola .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 38. Vytvořená síť pro upravený počet zubů .....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 39. Výsledné von Misesovo napětí, deformace zvětšena 200x .....</i>	<i>54</i>

**SEZNAM TABULEK**

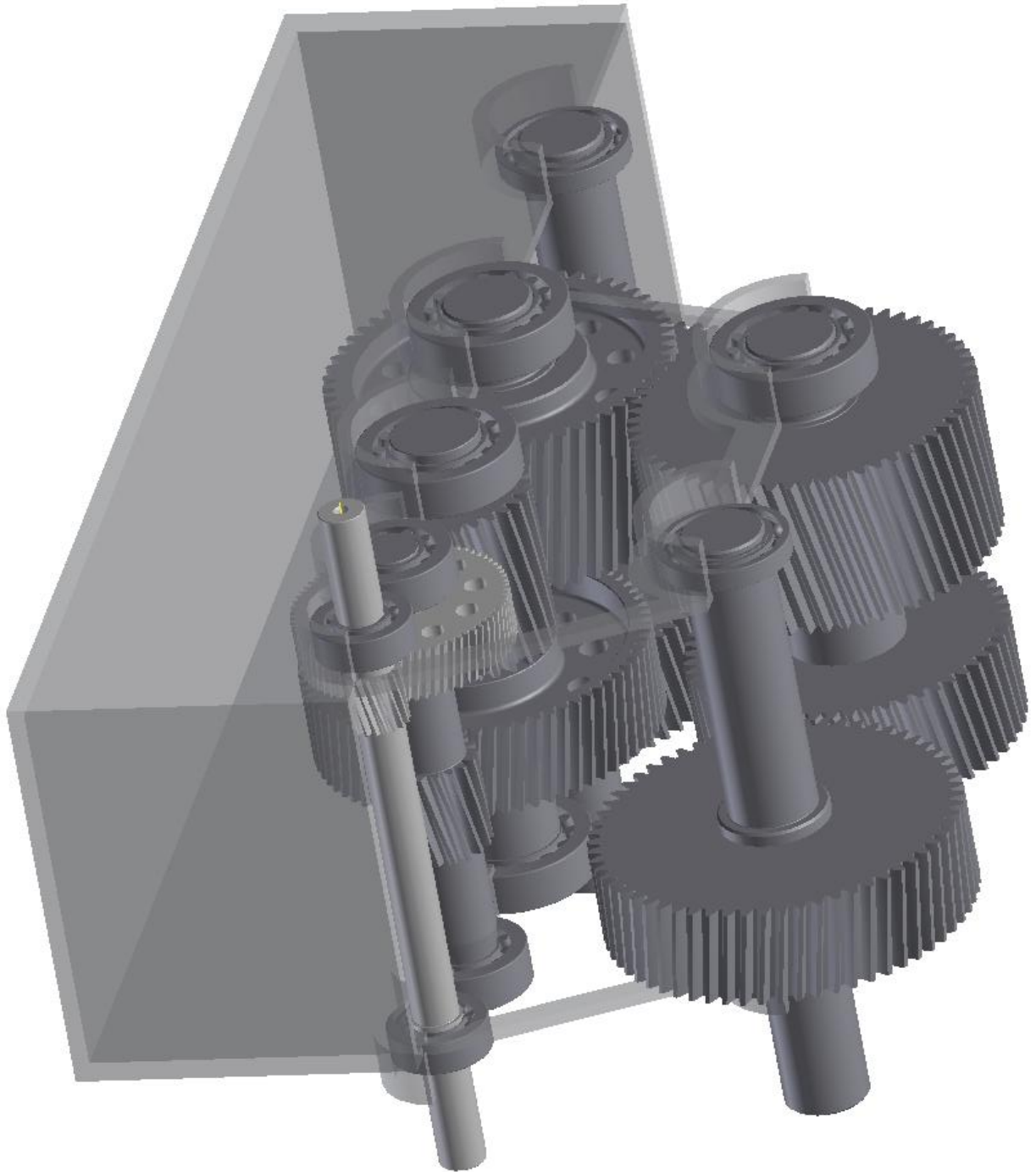
<i>Tab. 1. Rozdělení ocelí do tříd</i> .....	18
<i>Tab. 2. Význam první číslice doplňkového čísla [3]</i> .....	19
<i>Tab. 3. Význam druhé číslice doplňkového čísla [3]</i> .....	19

## SEZNAM PŘÍLOH

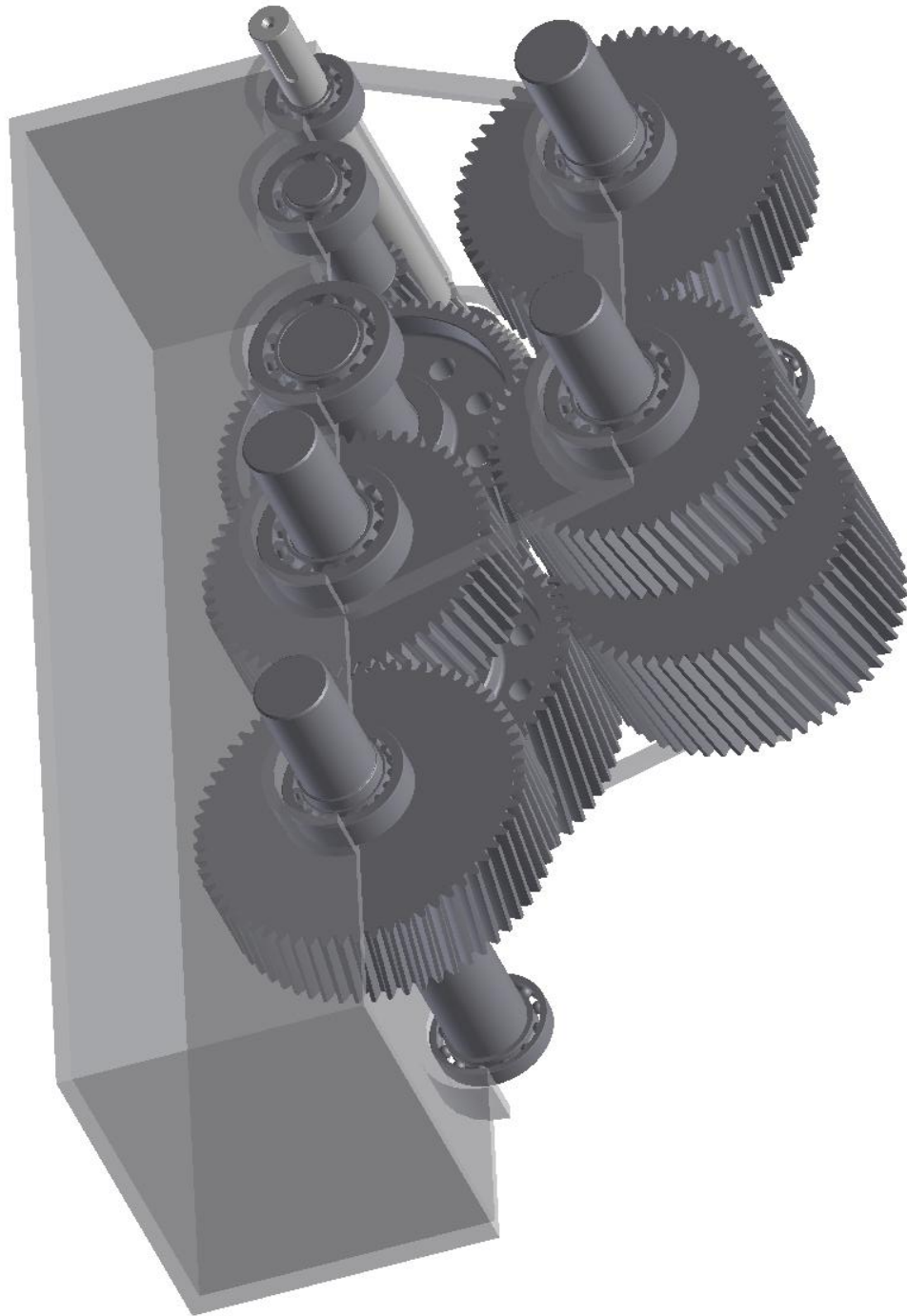
- P 1 Výrobní výkres hřídele
- P 2 Model sestavy převodovky
- P 3 Model sestavy převodovky
- P 4 Sestava 1. soukolí převodovky



## P 2 Model sestavy převodovky



### P 3 Model sestavy převodovky





#### P 4 Sestava 1. soukolí převodovky

