

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B2341 – Strojírenství
Studijní zaměření: 2341R001 – Konstrukce průmyslové techniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh čelistí pro magnetořonanční zkušební stroj - Vibrophore

Autor: **Jakub Rudla**

Vedoucí práce: **Ing. Václav KUBEC, Ph.D.**

Akademický rok 2014/2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub RUDLA**

Osobní číslo: **S11B0337P**

Studijní program: **B2341 Strojírenství**

Studijní obor: **Konstrukce průmyslové techniky**

Název tématu: **Návrh čelistí pro magneto-
resonanční zkušební stroj -
Vibrophore**

Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Základní požadavky:

Cílem je vypracování konstrukce stávajícího stavu zkušebního stroje a návrh čelistí pro upínání zadaných konstrukčních dílů.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova bakalářské práce:

1. Rešerše možností zkušebního stroje
2. Analýza stávajícího řešení upínání vzorků, specifikace požadavků
3. Návrh variant upínacích čelistí
4. Zhodnocení, závěr

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Rozsah pracovní zprávy: **30-40 stran A4**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. Příručka strojního inženýra 1. Brno: Computer Press, 1999, ISBN 80-7226-055-3

SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R., BENEDIKT, V. Základní zkoušky kovových materiálů. Plzeň: 4.vydání, 2005, ISBN 80-7043-417-1

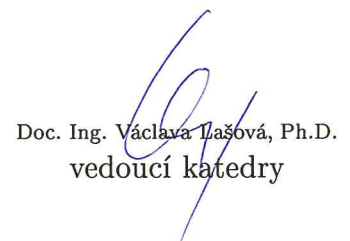
Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Kubec, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Václav Kubec, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **22. září 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **26. června 2015**


Doc. Ing. Jirí Staněk, CSc.
děkan




Doc. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 22. září 2014

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Rudla	Jméno Jakub		
STUDIJNÍ OBOR	B2341 „Konstrukce průmyslové techniky“			
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kubec, Ph.D.	Jméno Václav		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKS			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Návrh čelistí pro magnetořonanční zkušební stroj - Vibrophore			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	51	TEXTOVÁ ČÁST	51	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Cílem této práce je zmapování trhu v oblasti upínání vzorků se závitem při zkouškách únavy. Dále se práce soustředí na návrh upínacího přípravku pro magnetořonanční zkušební stroj pro zkoušení únavy vzorku se závitem, tak aby byly odstraněny nevýhody stávajícího řešení. Součástí práce jsou 3D modely stroje a navržených variant.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Magnetořonanční zkušební stroj, dynamické zkoušky, zkoušky únavy, CAD, MKP, počítačové simulace, vysokokmitové zkoušky

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Rudla	Name Jakub
FIELD OF STUDY	B2341 „Konstrukce průmyslové techniky“	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Kubic, Ph.D.	Name Václav
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Design of jaws for magnetic resonance testing machine - Vibrophore	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2015
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	51	TEXT PART	51	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The aim of this thesis is market mapping in the field of clamping thread samples during the fatigue tests. Further is the thesis focused on design of test fixture for magnetic-resonance testing machine for fatigue of thread samples trials so that drawback of current arrangement could be eliminated. The thesis contains the part with 3D models of device and designed variants.
KEY WORDS	Magnetic-resonance testing machine, dynamic tests, fatigue tests, CAD, MKP, computer numeric simulation, high-cyclic tests

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Václavu Kubci, Ph.D. za věnované cenné rady, čas a pomoc při zpracování této bakalářské práce a firmě COMTES FHT a.s. v Dobřanech za vstřícné jednání a možnost vypracovat bakalářskou práci na zajímavé téma.

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Únava materiálu	2
2.1. Historie zkoušení únavy	2
2.2. Základní pojmy a charakteristika únavy materiálu.....	4
2.2.1. Mez únavy σ_c	4
2.2.2. Vlivy na mez únavy.....	5
2.2.3. Kmit napětí	5
2.2.4. Únavový lom, únavová trhлина a její vznik	6
2.2.5. Smithův diagram	7
2.2.6. Rozdělení únavy	8
2.3. Zkoušky únavy	8
2.3.1. Zkoušky únavy podle frekvence zatížení	8
2.3.2. Zkoušky únavy podle druhu zkoušeného objektu	10
2.3.3. Zkoušky únavy podle druhu napjatosti	10
2.3.4. Zkoušky únavy podle podmínek prostředí	10
2.4. Zařízení pro zkoušky únavy	11
2.4.1. Nejjednodušší stroj pro zkoušky únavy ohybem za rotace	11
2.4.2. Hydraulické pulsátory	12
2.4.3. Rezonanční stroje	14
3. Specifikace požadavků a upřesnění zadání	17
3.1. Specifikace vzorku	17
3.2. Specifikace problému a požadavků na přípravek	17
3.3. Zkušební stroj a stávající upnutí	18
3.4. Způsoby upínání vzorků	20
4. Konstrukce a návrh variant	23
4.1. Návrh variant	23
4.1.1. Morfologická matice návrhu variant	24
4.1.2. Varianta A	24
4.1.3. Varianta B	26
4.1.4. Varianta C	27
4.1.5. Varianta D	28
4.2. Analýza variant pomocí metody konečných prvků (MKP).....	30
4.2.1. Varianta stávajícího řešení	32
4.2.2. Varianta A	34

4.2.3. Varianta B	36
4.2.4. Varianta C	38
4.2.5. Varianta D	40
4.3. Zhodnocení a výběr vhodné varianty	42
4.4. Materiál konstrukčních součástí přípravku.....	42
5. Doplnková kontrola pevnosti společných konstrukčních uzlů.....	43
5.1. Výpočet napětí zkušebního vzorku.....	43
5.2. Výpočet závitů.....	44
6. Závěr.....	45
Seznam použitých zdrojů	46

Seznam použitých veličin a zkratek

Označení	Legenda	Jednotky
σ_C	Mez únavy	MPa
σ_N	Časovaná mez únavy	MPa
R_m	Mez pevnosti v tahu	MPa
σ_m	Střední napětí kmitu	MPa
σ_a	Výkmit napětí kmitu	MPa
σ_h	Horní napětí kmitu	MPa
σ_n	Dolní napětí kmitu	MPa
N_C	Základní počet kmitů	[1]
T	Doba jednoho kmitu (perioda)	s
f	Frekvence	Hz
σ	Napětí v tahu	MPa
$-\sigma$	Napětí v tlaku	MPa
ε_a	Deformace	mm
ε_{apl}	Deformace – plastická	mm
ε_{ael}	Deformace - elastická	mm
ω	Úhlová frekvence	1/s
n	Otáčky	ot/min
k	Tuhost	N/m
m	Hmotnost	kg
Ra	Aritmetická úchylka drsnosti	μm
$\varnothing d$	Průměr zkušebního vzorku	mm
F	Síla	N
S	Plocha	mm^2
p	Tlak v závitech	MPa
$\varnothing d_2$	Střední průměr závitu	mm
H_1	Výška závitu	mm
p_H	Stoupání závitu	mm
L_m	Délka závitu	mm

1. Úvod

Během provozu technických zařízení různého druhu, především strojů, se velmi často objevují charakteristické lomy konstrukčních prvků a strojních součástí, které jsou vystaveny působení periodicky proměnných zatížení a sil, často i při napětích daleko menších, než je mez pevnosti použitých materiálů a mnohdy i v kombinaci s tepelným zatěžováním. Takovéto zatěžování vede k hromadění poškození v materiálu a současně snižování únosnosti těchto součástí a konstrukcí, označujeme je jako únava materiálu a konečný výsledek tohoto děje, tzn. porušení materiálu, jako únavový lom.[1]

Únava materiálu nepříznivě velkou měrou ovlivňuje konstrukci zařízení a zároveň použité materiály, rovněž se promítá do bezpečnosti a trvanlivosti konstrukcí. V mnoha případech vede únava materiálu k poškození a k nebezpečným haváriím, jež mají často na svědomí ztráty na lidských životech. Z těchto příčin se v minulosti začali odborníci zajímat o únavu materiálu a způsoby, jimiž by se dala zkoušet, aby se dalo předejít poškození a následnému zranění.

Jedním ze způsobů zkoušení únavy materiálů je i zkouška pomocí vysokofrekvenčního rezonančního pulsátoru s elektromagnetickým buzením, na který je zaměřená tato práce. Tímto termínem je v odborné literatuře označován stejný zkušební stroj, který je v zadání mé práce nazván jako magneto-resonanční zkušební stroj – Vibrophore. Jedná se o zkušební stroj, pomocí kterého se u zkušební vzorku zkouší únavová pevnost v tahu, tlaku, krutu, smyku a ohybu s vysokou frekvencí zátěžných cyklů. Je možné zkoušet materiály jako ocel, lehké kovy, plastické a keramické hmoty.[1]

Jak bylo již uvedeno, tato práce je zaměřená na konkrétní magneto-resonanční zkušební stroj – Vibrophore, který pro svou činnost zkoušení materiálů využívá firma COMTES FHT a.s. v Dobřanech. Cílem práce je vytvořit model stávající konstrukce stroje v CAD softwaru, analyzovat stávající řešení upínání zkušebních vzorků do prostoru stroje a následně navrhnout nové čelisti pro upínání nového zkušebního vzorku dle požadavků firmy COMTES FHT a.s.

První část práce se věnuje teorii o únavě materiálu a jejímu zkoušení, zkušebním strojům a vyhodnocování výsledků zkoušek. Druhá část práce se zabývá upínáním vzorků, požadavkům na upínání a dispozicemi daného zkušebního stroje – Vibrophoru k upínání. Třetí část je zaměřena na problematiku zkoušky se stávajícími upínacími čelistmi, průběh zkoušky a její výsledek a z toho vyplývající návrh variant nových čelistí s vhodnějším systémem upnutí a zhodnocení vhodnější varianty.

2. Únava materiálu

Únava materiálu je postupné hromadění poškození vlivem mechanického, tepelného nebo mechanicko-tepelného zatěžování kmitavého charakteru, které vede ke změnám vlastností, ke vzniku a růstu trhlin a k porušení materiálu.[2] K této degradaci materiálu může právě při cyklickém zatěžování vést i napětí nižší než mez pevnosti materiálu a dokonce i napětí nižší než je mez kluzu tohoto materiálu. Právě proto únavě věnujeme větší pozornost, protože 80% všech lomů kovových materiálů jsou lomy únavové, které mají charakteristický vzhled.[3]

2.1. Historie zkoušení únavy

Počátky výzkumu únavy materiálů zasahují do 19. století, kdy docházelo k intenzivnímu a zároveň největšímu rozvoji strojírenského průmyslu a dopravních prostředků. Na nových konstrukcích docházelo k nehodám a poškození a proto byli odborníci nuceni zabývat se příčinami jejich vzniku. Postupně docházeli k závěrům o klesání únosnosti materiálů při cyklickém a kmitavém zatěžování, což označili jako únavu materiálu.[1]

Mezi první studie únavy materiálu patří zkoušky důlních těžních řetězců, které v roce 1829 provedl německý správce těžby Wilhelm Albert. Jednalo se o zkoušky rázového charakteru s frekvencí změn zatížení 10 za minutu a s dosahovaným počtem cyklů 100 000. Dále se vyskytovaly výzkumy ve spojení s rozvojem železnice.[1]

Dalším historickým bodem v problematice únavy materiálu byl rok 1837, v tomto roce zahájil výzkum únavové pevnosti oceli a litiny W. Fairbairn, který se zvláště zajímal o problémy nosnosti ocelových mostů. K určení přípustného namáhání nýtovaných plnostěnných nosníků, používaných pro mostní konstrukce, zkoušel mimo jiné i nosníky s I profilem o délce 6,6 m a výšce 40 cm, vytvořené z plátů spojovaných úhelníky. Zkonstruoval vlastní zkušební zařízení s otáčejícím se výstředníkem, který vyvozoval změny v zatížení, zařízení dokázalo provést 7 až 8 změn za minutu. Fairbairn výsledky svých výzkumů zveřejnil až 27 let po jejich zahájení.[1]

V roce 1849 se zabýval Hodkinson použitelností litiny v železničním stavitelství, konkrétně v mostních konstrukcích. Jeho zkušební vzorky představovaly volně opřené nosníky, uprostřed zatěžované do určitého průhybu. Došel k závěru, že rovnal-li se průhyb 1/3 maximálního zatížení při statickém zatížení, byly vzorky schopné vydržet 100 000 únavových ohybů, ale při zvýšení napětí při cyklickém namáhání na 1/2, vydržely pouze 900 únavových ohybů.[1]

Mezi lety 1852-1869 se německý železniční inženýr A. Wöhler věnoval studiu únavy, v souvislosti s četnými, v praxi zjištěnými případy vzniku trhlin náprav železničních vagónů. Zkonstruoval několik typů strojů pro únavové zkoušky a vzhledem k tomu, že bylo k únavovým zkouškám zapotřebí většího počtu vzorků, rozhodl se přejít od výzkumu skutečných vagónových náprav ke vzorkům o zmenšených rozměrech, což umožnilo snížit spotřebu materiálu a zvýšit počet otáček únavového stroje. Wöhlerovy práce mají velký význam pro rozvoj studia materiálu.[1]

Koncem 19. století se německý inženýr Johann Baushinger zabýval otázkami vlivu zatížení na změnu meze kluzu měkké oceli při tahu a tlaku. Při současném provádění únavových zkoušek zjistil, že po značném počtu cyklů (řádově po několika milionech) změn zatížení, menšího než určitá mezní hodnota, vykazuje materiál stejnou pevnost jako před aplikací proměnných namáhání.[1]

Jako první se pokusili vysvětlit mechanismus únavového porušení materiálu na přelomu 19. a 20. století Ewing, Rosenheim a Humfrey. Na základě mikroskopických pozorování zjistili

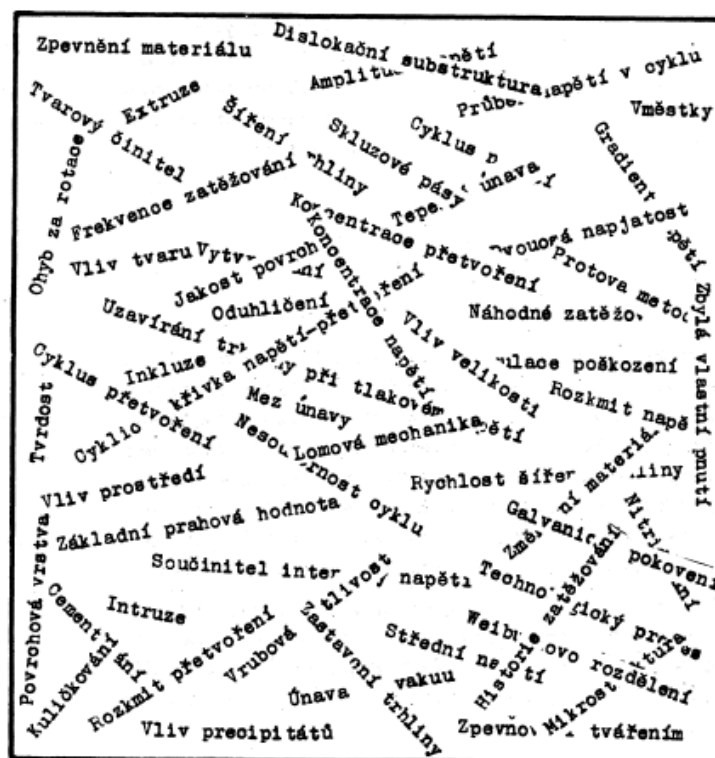
tvoření kluzových čar v krystalu feritu. V tomto období se také Gilchrist zabýval vznikem únavové trhliny. [1]

Další práce z počátku 20. století, které stojí za zmínku, jsou výzkumy vztahu mezi vnitřním útlumem materiálu a jevem únavy. V roce 1909 zjistil L. Guillet, že útlum materiálu se mění spolu s počtem zátěžných cyklů a v roce 1910 zveřejnil Bairstow práci o hysterezi pružných deformací a její souvislosti s únavou materiálu.[1]

V období mezi první a druhou světovou válkou značně vzrostl počet prací v tomto oboru v souvislosti s poptávkou po pevných a lehkých konstrukcích automobilů a letadel. Vznikaly četné laboratoře, zabývající se speciálně únavovými zkouškami. V těchto laboratořích se studovaly z hlediska odolnosti proti únavě různé nové druhy slitinových ocelí a slitin neželezných kovů. Důležité osobnosti tohoto období, které se věnovaly únavě materiálu, byli v Anglii inženýři Gough, Moore, Kommers, ve Francii Frémont, Nussaumer, Cazaud, v Německu to byli pánové Graff, Lehr, Thum, Oschatz, Fischer a další, v Rakousku Ludwig, ve Švýcarsku Roš ve známém výzkumném středisku EMPA, v SSSR to byli Daviděnkov, Serensen, Afanasjev, Podzolov, Oding, Užík a další.

Průkopníkem nových názorů na výpočet pevnosti strojních součástí namáhaných v únavě se u nás stal profesor ČVUT F. Budinský. O něco později formuloval akademik J. Němec (1955) vlastní návrh výpočetního postupu, vycházející z detailního rozboru únavových jevů.[4]

Cílem všech těchto odborníků a studií bylo vytvoření systému, umožňujícího racionální návrh konstrukcí odolných proti únavovému lomu. Tento úkol však není dodnes beze zbytku vyřešen, únava je totiž velmi složitým jevem, při kterém se uplatňuje velmi mnoho různých vlivů Obr. 1.



Obr. 1: vlivy na materiál [4]

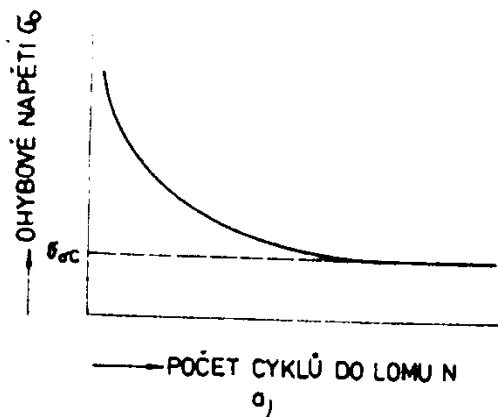
2.2. Základní pojmy a charakteristika únavy materiálu

2.2.1. Mez únavy σ_c

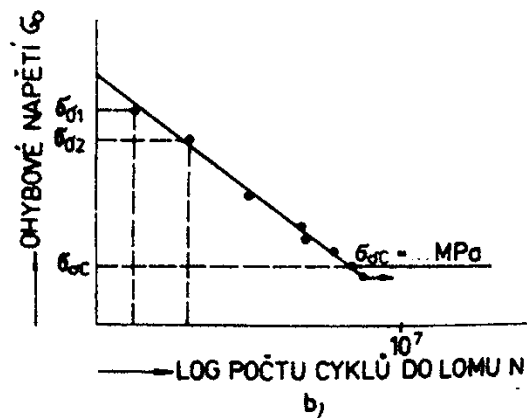
Je to napětí, které zjišťujeme pomocí únavových zkoušek, tato hodnota je kritériem odolnosti materiálu při opakovaném mechanickém namáhání. Tato hodnota je vyjádřena amplitudou kmitu neboli výkmitem napětí nebo amplitudou deformace, jež materiál teoreticky vydrží při nekonečném počtu kmitů (cyklů) nebo při základním počtu kmitů N_c pro stanovení meze kluzu. Mez únavy je nutno chápat jako střední napětí σ_m , kolem něhož se mění výkmit napětí σ_a . [3]

$$\sigma_c = \sigma_m \pm \sigma_a \quad (1)$$

Při určování meze únavy se zjišťují počty kmitů, jež při kmitavém zatěžování vedou k lomu zkušební tyče, začíná se většinou u hodnoty $\sigma_a = 0,6 \cdot R_m$ a postupně se snižuje napětí. Zjištěné hodnoty se zaznamenávají do tzv. Wöhlerova diagramu, který je buď vyjádřen jako závislost napětí – počet kmitů do lomu, nebo napětí – log počet kmitů do lomu. Při proložení těchto bodů křivkou se tato křivka označuje jako Wöhlerova křivka.

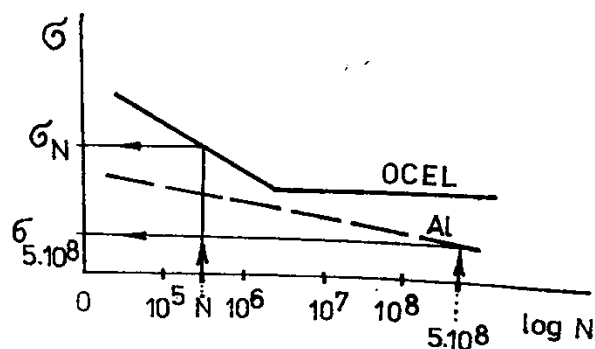


Obr. 2: Wöhlerův diagram [3]



Obr. 3: Wöhlerův diagram – polologaritmický [3]

Pro ocel, litinu, měď a její slitiny se dosahuje meze únavy při $N_c = 10^7$ kmitů. U hliníku a jeho slitin a některých neželezných kovů se meze únavy nedosáhne ani při $N_c = 10^8$ kmitů, v takovém případě nemá únavová křivka vodorovnou větev - (Obr. 4), v takových případech se zjišťuje napětí, které způsobí lom tyče při určitém počtu kmitů (většinou $5 \cdot 10^8$), potom hovoříme o časované mezi únavy σ_N . U ocelí má časovaná mez únavy význam při dimenzování součástí, které budou během své životnosti vystaveny jen malému počtu kmitů.



Obr. 4: časovaná mez únavy [2]

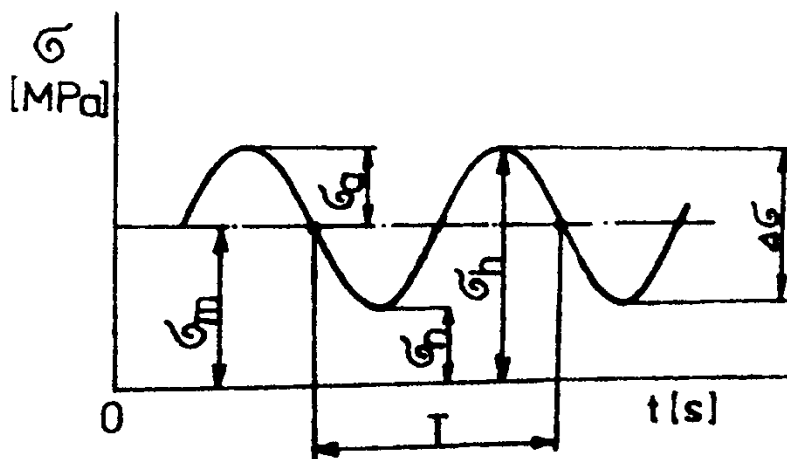
2.2.2. Vlivy na mez únavy

Mez únavy materiálu je ovlivňována mnoha faktory, mezi základní patří:

- **Mez pevnosti v tahu** - $\sigma_C = k \cdot R_m$, kde k je přibližně pro tah-tlak 0,33 a pro ohyb 0,43
- **Tepelné zpracování** – pro lepší únavovou pevnost přispívá ferit a vysokopopuštěný martenzit
- **Velikost zrna** – je zde stejná závislost jako se udává pro mez kluzu, tzv. Hall-Petchův vztah
- **Inkluze v materiálu** – mají nepříznivý vliv
- **Jakost povrchu, vlastnosti materiálu při povrchu a pnutí** – vznikající při opracování, čím je jemnější, tím je mez únavy vyšší, protože jsou daleko menší vruby na povrchu
- **Předpětí a vnitřní pnutí** – tahová pnutí snižují únavovou pevnost a tlaková ji zvyšují
- **Povrchové zpevňování mechanickým způsobem** – nejúčinnější metoda ke zvyšování únavové pevnosti, konkrétně se jedná o kuličkování a válečkování
- **Teplota** – s rostoucí teplotou klesá mez únavy a při poklesu pod 0°C naopak roste
- **Frekvence** – zvyšováním frekvence kmitů se mez únavy zvyšuje
- **Velikost zkušební tyče** – se zvětšujícím se průřezem klesá mez únavy
- **Korozní prostředí a povrchová koroze** – oba vlivy výrazně snižují mez únavy

2.2.3. Kmit napětí

Kmit napětí je prakticky jeden cyklus, stále se opakující v určitém časovém průběhu (periodicky). V našem případě je to opakované namáhání součástí silou (zatížením), která mění svou velikost nebo směr nebo obojí a které se v praxi může různým způsobem nahodile měnit.



Obr. 5: kmit napětí [2]

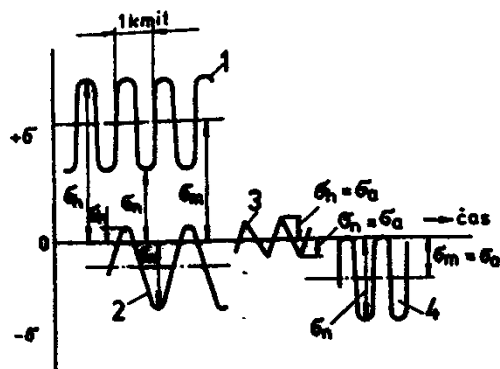
Charakteristiky kmitu napětí:

- T – doba jednoho kmitu (perioda)
- f – frekvence, tj. počet kmitů za jednotku času
- σ_h – horní napětí kmitu
- σ_n – dolní napětí kmitu
- σ_m – střední napětí kmitu
- σ_a – amplituda (výkmit) napětí

Jak již bylo řečeno, průběh kmitu může být pravidelný (např. sinusový) nebo nepravidelný, který se buď opakuje, nebo působí náhodně, stochasticky.[2]

Podle typu nesouměrnosti kmitu má namáhání charakter:

- střídavý (souměrně či nesouměrně)
- pulsující (v tahu nebo tlaku)
- míjivý (v tahu nebo tlaku)



Obr. 6: typy kmitů [3]

σ – tah

$-\sigma$ – tlak

σ_h – horní napětí kmitu

σ_n – dolní napětí kmitu

1 – cyklické napětí pulzující v tahu

2 – cyklické napětí nesouměrné

3 – cyklické napětí souměrné v tahu a tlaku

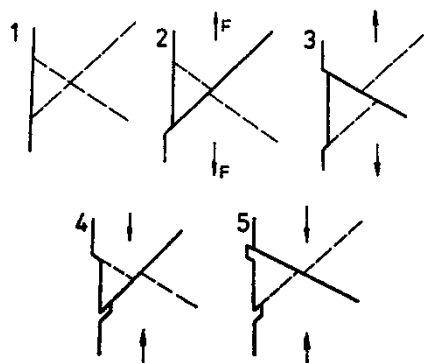
4 – cyklické napětí míjivé v tlaku

Z hlediska sil a momentů jde o namáhání:

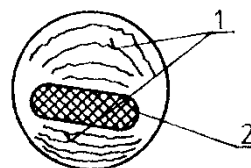
- v tahu
- v tlaku
- v tahu-tlaku
- v ohybu
- v krutu
- nebo jejich kombinace

2.2.4. Únavový lom, únavová trhlina a její vznik

Únavová trhlina vzniká v místech zvýšené koncentrace napětí: v místě vrubu, např. v ostrém zářezu, v otvoru, ve stopě po obrábění, apod. Při únavovém porušování se budou uplatňovat více trhliny na povrchu cyklicky namáhané součásti. V počátečních stádiích vznikají v materiálu skluzové pásy, podobné těm, které vznikají při tahu, jejich tloušťka je přibližně $10 \div 30 \mu m$. Při studiu povrchu tyčí po únavových zkouškách namáhaných tahem a tlakem nerovnosti vystupují z povrchu součásti.[3] Tímto způsobem vznikají na povrchu součásti výstupky (extruze) a prohlubně (intruze). Ke zvrásnění materiálu dochází podle dvou skluzových systémů (Obr. 7), a protože skluz se uskutečňuje pohybem dislokací, tak i vznik zárodků únavových trhlin je s tím spojen.



Obr. 7: vznik únavových trhlin podle Cotrella a Hulla [3]



1- POSTUPOVÉ LINIE ÚNAV. LOMU
2-DOLOM

Obr. 8: vzhled únavového lomu [2]

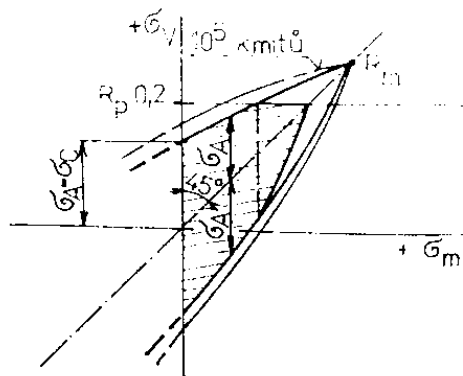
Únavový lom je výsledek únavového namáhání, při kterém je překročena mez únavy materiálu a zkušební tyč je dolomena. Únavový lom je tvořen oblastí, která odpovídá postupnému růstu únavové trhliny a z oblasti náhlého dolomení.

Na únavovém lomu rozlišujeme tři pásma:

- **Pásma únavového lomu (ohnisko porušení)** – je na obvodu součásti, jeho povrch je matný a ne vždy musí být zcela patrné.
- **Pásma dynamického lomu** – je na něm patrný růst únavové trhliny s jemnými růstovými čarami, jeho povrch je sametově lesklý, omačkaný, oksyločnený a lom je jemný, lasturový.
- **Pásma konečného rozrušení** – konečný lom, je hrubě krystalický, stříbřitě lesklý a probíhá transkrystalicky.

2.2.5. Smithův diagram

Tento diagram vytváří názornou představu o odolnosti proti porušení při cyklickém namáhání v kombinaci se statickým předpětím. Na osy tohoto diagramu se vynášejí trvalé předpětí σ_m a na osu σ_V se vynášejí součet trvalého předpětí a střídavé složky, která odpovídá příslušné mezi únavy. Bude-li součást namáhána tak, že výsledné napětí bude ležet uvnitř Smithova diagramu, potom nedojde k jejímu porušení.

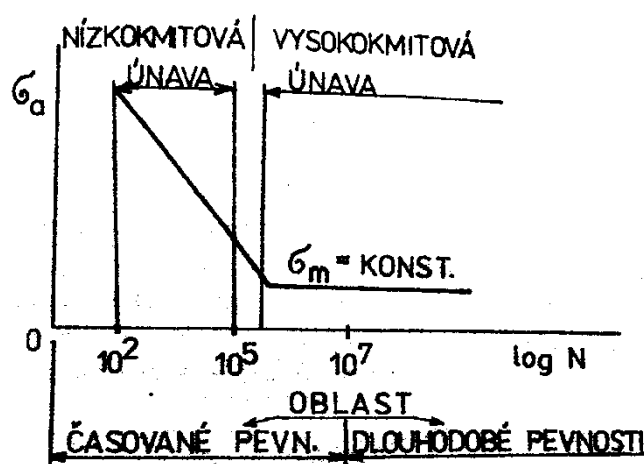


Obr. 9: Smithův diagram [2]

2.2.6. Rozdělení únavy

Kmitavé zatěžování je možné rozdělit do několika skupin podle počtu kmitů:

- **Opakované statické přetěžování** – životnost do 10^2 kmitů
- **Nízkokmitová (nízkocyklová) únavy** – životnost do 10^5 kmitů, vzniká při opakovaném namáhání nad mezí kluzu v podmínkách, kdy dochází k výrazným opakovaným plastickým deformacím v makroobjemu materiálu, o životnosti součástí rozhoduje rychlost šíření únavové trhliny. [2]
- **Vysokokmitová (vysokocyklová) únavy** – životnost nad 10^5 kmitů, vzniká v podmínkách převážně elastických deformací a napětí je vždy pod mezí kluzu, pro životnost je důležité, aby byl dlouhý časový úsek, potřebný ke vzniku zárodku únavové trhliny. V okamžiku, kdy dojde ke kritické velikosti trhliny, následuje únavový lom. [2]



Obr. 10: rozdělení únavy podle počtu kmitů [2]

2.3. Zkoušky únavy

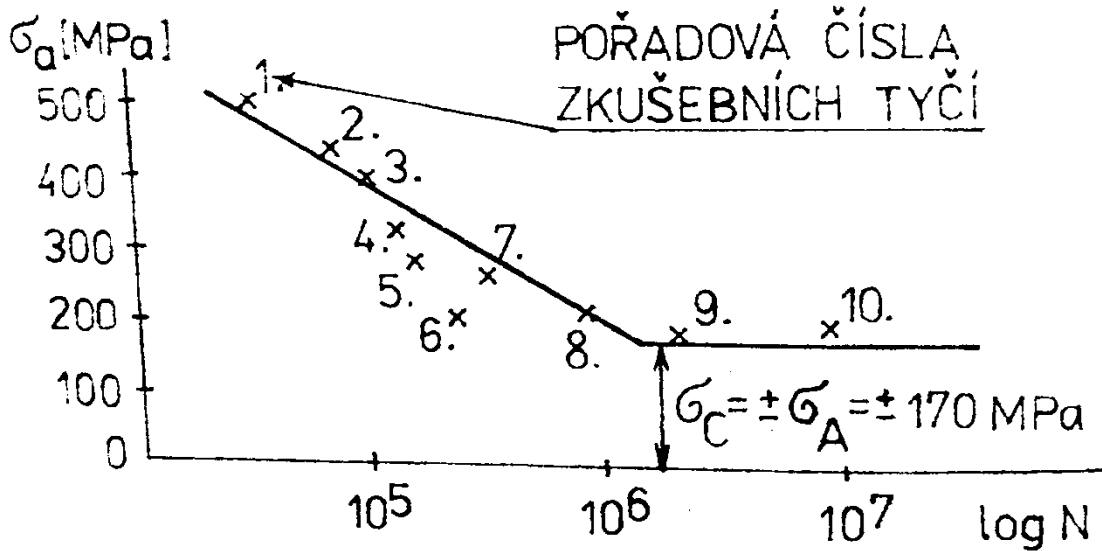
Pro zkoušky únavy kovů platí norma ČSN 42 063. Únavové zkoušky na moderních zkušebních strojích při tahovém, tlakovém, střídavém a míjivém zatížení, např. od firmy Zwick Roell, se provádí podle německé normy DIN50100. Jak již bylo řečeno, zkouškami únavy se zjišťuje mez únavy materiálu neboli jeho životnost, tudíž schopnost odolávat specifickému druhu zatížení, které není statického charakteru, ale určitým způsobem mění svůj průběh v dané časové ose, ať už pravidelně nebo nepravidelně. Těmito zkouškami je možné zjišťovat další různé vlastnosti materiálu v lomové mechanice, jako například rychlost šíření únavové trhliny, vliv tvaru průřezu součásti, vliv jejího povrchu a teploty apod. Zkoušky únavy lze rozdělit podle několika hledisek, které jsou uvedeny jako následující podkapitoly.

2.3.1. Zkoušky únavy podle frekvence zatížení

- **Zkoušky vysokokmitové únavy**

Při zkouškách vysokokmitové únavy se používá frekvence 10-200 Hz a téměř vždy se řídí amplituda napětí. Výsledkem je únavová (Wöhlerova) křivka a hodnota meze únavy. Pro

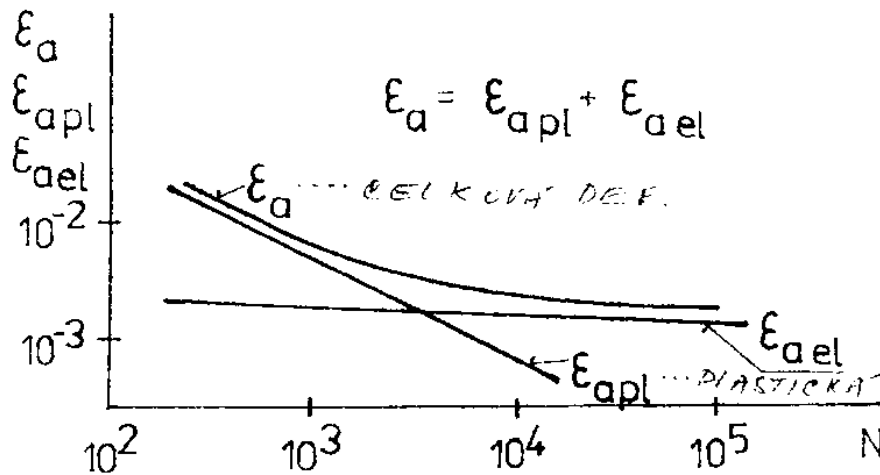
stanovení šikmé větve křivky je potřeba nejméně osm zkušebních tyčí, pro celou křivku a pro určení meze únavy se běžně používá nejméně deset zkušebních tyčí.[2]



Obr. 11: výsledek zkoušky vysokokmitové únavy [2]

- **Zkoušky nízkokmitové únavy**

Při zkouškách nízkokmitové únavy se používá frekvence do 3 Hz a obvykle se řídí amplituda deformace, a to celková nebo její elastická složka. Výsledky se vyhodnocují pro $10^2 - 10^5$ kmitů. Vyhodnocuje se hysterezní smyčka a stanovuje se závislost mezi hodnotami amplitud poměrné celkové, plastické, případně elastické deformace a počtem kmitů do ukončení zkoušky.[2]



Obr. 12: výsledek zkoušky nízkokmitové únavy [2]

2.3.2. Zkoušky únavy podle druhu zkoušeného objektu

- **Zkoušky vzorků**

Účelem je získat údaje o mezi únavy materiálu nezávisle na tvaru vzorků. Umožňují určit relativní vliv různých činitelů technologického a tvarového charakteru na mez únavy vzorků o určitých nominálních rozměrech. Je možné například zkoušet vliv stavu povrchové vrstvy, vliv činitelů vyvolávajících koncentraci napětí a vliv prostředí obklopující vzorek.[1]

- **Zkoušky součástí a celých konstrukcí**

V mnohých případech je potřeba provádět zkoušky přímo na součástech nebo celých sestavách, to zejména v případech, když je potřeba zjistit chování součástí v konkrétních specifických podmínkách, a když je důležité dosáhnout co nejdůvěryhodnějších výsledků. Tyto zkoušky se provádějí ve speciálních zkušebnách nebo v provozních podmínkách. Tímto způsobem se zkoušejí například části stavebních strojů a konstrukcí, jejich spojení, motorová vozidla, celá pole mostů apod. [1]

2.3.3. Zkoušky únavy podle druhu napjatosti

- **Zkoušky v tahu nebo tlaku**
- **Zkoušky v ohybu za rotace**
- **Zkoušky v ohybu rovinném**
- **Zkoušky krutem**

Kombinací těchto jednoosých napjatostí se dostanou napjatosti složené. Složené stavy zatížení tohoto druhu se vyskytují v různých součástech, např. jsou vystaveny současně na proměnný krut a ohyb. Některé složky zatížení mohou být aplikovány staticky. Například je možno realizovat statický tah se současným proměnným krutem nebo statický krut s proměnným tahem.[1]

- **Zkoušky tzv. povrchové únavy (pittingu)** – jde o vznik místních povrchových poškození v místech dotykových zatížení. Tato únava se vyskytuje u valivých ložisek, v ozubených převodech, kolejnic, válců válcovacích stolic apod.[1]

2.3.4. Zkoušky únavy podle podmínek prostředí

- **Zkoušky při zvýšených teplotách** – mají význam u konstrukcí, jako jsou turbíny nebo spalovací motory, apod.
- **Zkoušky při snížených teplotách** – týkají se prvků konstrukcí vystavených působení nízkých teplot, např. leteckých, lodních, chladírenských a mostních
- **Zkoušky v tekutých a plynných prostředích** – jsou významné se zřetelem na namáhání v motorech různého druhu a v zařízeních chemického průmyslu

2.4. Zařízení pro zkoušky únavy

Ke zkoušení únavy máme v současné době řadu strojů, které nám umožňují realizovat proměnné zatížení, které odpovídá zkouškám uvedeným v předchozí podkapitole.

Tyto zkušební stroje můžeme dělit podle následujících znaků:

- **Druh vyvolávaných deformací** – tah, tlak, ohyb, krut a složené stavy napjatosti
- **Způsob zatížení** – realizují se neměnné amplitudy zatížení, kde se s postupem trvání zkoušky rozvíjí únavová trhlina, zmenšuje se průřez, vzrůstají napětí a porušení se zrychluje, nebo se realizují neměnné amplitudy deformace, kde se napětí zmenšuje a k porušení tedy dochází pomaleji
- **Způsob vyvolávání zatížení** – přímo závažím nebo prostřednictvím mechanických nebo hydraulických převodů nebo elektromagnetických či setrvačných sil rotujících hmot
- **Způsob upevnění vzorků** – jednostranně vetknutý, oboustranně podepřený, oboustranně vetknutý
- **Charakter změn napětí** – souměrné nebo nesouměrné cykly, rázy
- **Tvar vzorků** – zkušební vzorky, skutečné součásti nebo celé konstrukční sestavy
- **Mezní rozměry vzorku** – vzorky normální velikosti nebo mikrovzorky
- **Kmitočet (frekvence) změn zatížení** – pomalý chod o frekvenci zatížení do několika desítek cyklů za vteřinu nebo vysokofrekvenční, kde se jedná řádově o několik set až několik tisíc cyklů za vteřinu

Vzhledem k tomu, že výsledky prováděny na zkušebních vzorcích udávají jen přibližnou hodnotu a je potřeba zkoušet přímo u součásti, proto se často konstruuje individuální zkušební zařízení pro daný druh konstrukčních částí (např. velké hřídele, konstrukční celky motorových vozidel, pole mostů, apod.).

2.4.1. Nejjednodušší stroj pro zkoušky únavy ohybem za rotace

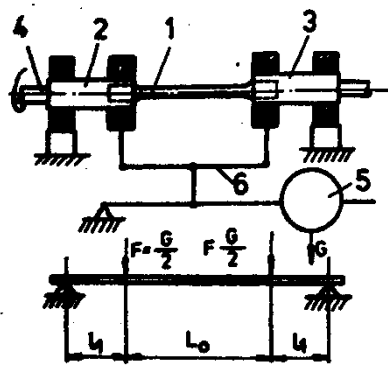
Je to nejjednodušší a nejrozšířenější stroj pro zkoušení únavy materiálu. Umožňuje snadno realizovat únavový střídavý cyklus. Vychází z konstrukce Wöhlerovo zkušebního stroje, který A. Wöhler používal při jeho prvních pracích, zkoušení únavy železničních náprav.

Střídavé zatížení se zde získává pomocí jednoduchého mechanismu. Zkušební tyč je pevně uložena ve dvou objímkách, na které přes pákový mechanismus působí závaží, to vytváří zatížení, které je možné regulovat posouváním závaží po rameni páky. Obě objímky jsou uloženy pevně v ložiskách a vyvozují rotační pohyb zkušební tyče.

Frekvence kmitů se dá řídit regulováním otáček pomocí rovnice pro úhlovou frekvenci.

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} \left[\frac{1}{s} \right] \quad (2)$$

Výhodou je jednoduchost, snadná obsluha a přesné měření síly, nevýhodou je proměnnost ohybového momentu.



- 1 – zkušební tyč
- 2,3 – objímky
- 4 – hřídel
- 5 – závaží
- 6 – pákový převod
- L_0 – vzdálenost s konst. ohybovým momentem

Obr. 13: zkouška únavy ohybem za rotace [3]

2.4.2. Hydraulické pulsátory

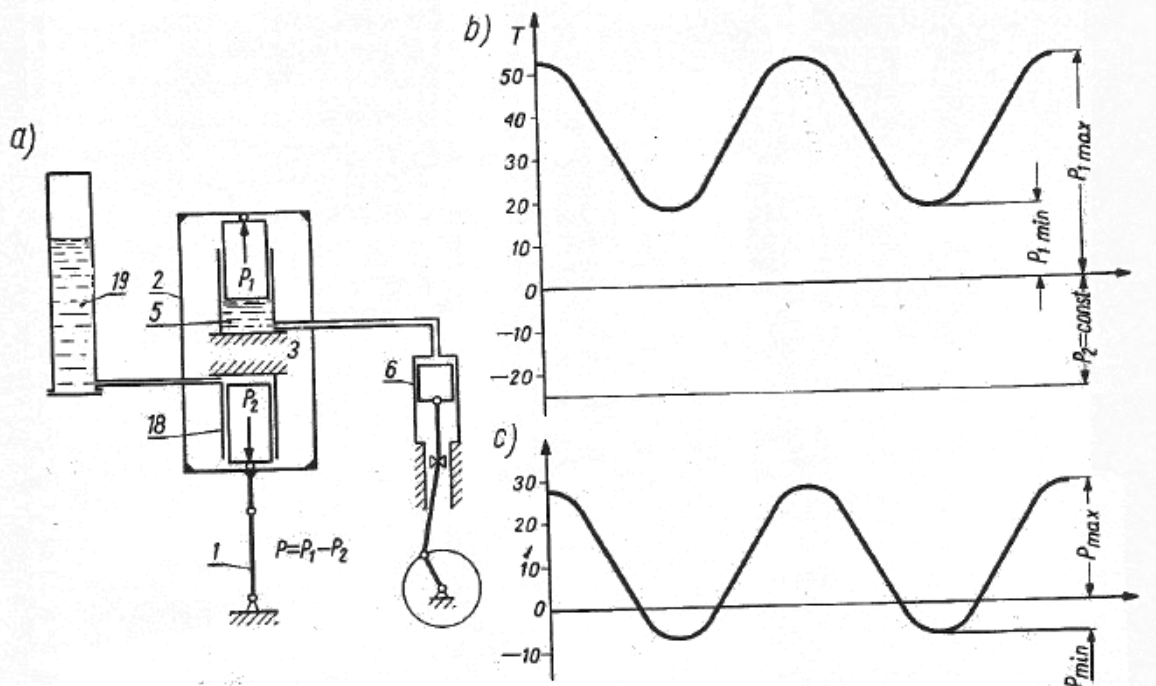
Jsou to stroje pro zkoušky únavy pro střídavý tah, tlak, ohyb s hydraulickým pohonem. Řadí se ke strojům s pomalým chodem, s frekvencí řádově 50 Hz.[1]

Rozlišují se na pulsátory s jednostranným nebo oboustranným pohybem. Jednostranné stroje jsou schopné vyvozovat zatížení jen s jedním znaménkem, dvoustranné stroje realizují zatížení se střídavým znaménkem.[1]

Většina pulsátorů má rovněž zařízení umožňující zatěžování ohybem příslušné podpěry a čelist přenášející síly, ohýbající zkoušený vzorek.[1]

Tyto stroje mohou být rovněž použity jako univerzální trhací zařízení pro statické zkoušky.

Typickým příkladem použití např. hydraulického pulsátoru s jednostranným působením může být zkoušení železobetonových železničních pražců, pulsátory s oboustranným působením mohou být používány při zkoušení betonářských výztuží.



Obr. 14: zjednodušené schéma oboustranného hydraulického pulsátoru a diagramy složek sil [1]

Moderní hydraulické pulsátory se označují jako servohydraulické zkušební stroje, jejich nabídka je velmi široká, rozdělují se podle velikosti zatížení, které jsou schopny vyvodit a podle možností upínání. Některé mají konstrukční upínání ve formě dvou čelistí proti sobě, kdy hydraulický válec je umístěn buď na spodní, nebo horní čelisti. Druhým způsobem je upínání ve formě upínací čelisti, nad kterou je umístěn hydraulický válec a spodní upínací desky například s T-drážkami, které slouží k upínání spodní části zkušebního vzorku.

Měření vzorků probíhá během měření pomocí snímačů, které vyhodnocuje měřící software a vytváří výstupní údaje zkoušek.

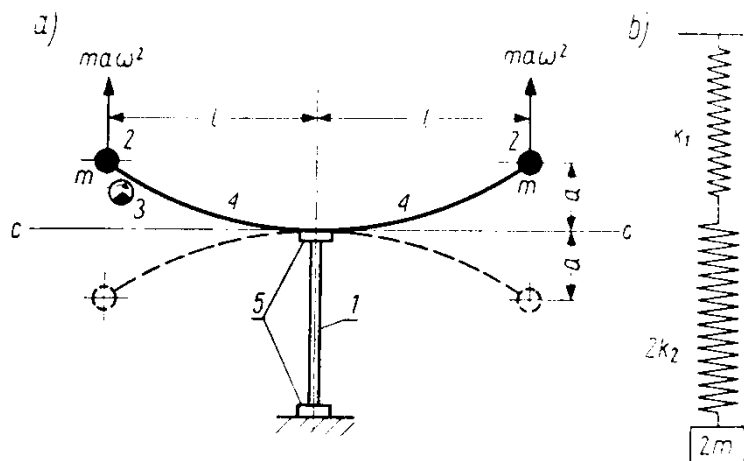
Provedení strojů je opravdu rozmanité, například firma Zwick Roell, zaměřená na zkoušení materiálů, má ve své nabídce několik řad těchto zkušebních strojů, které jsou schopny vyvozovat zatížení od 10kN do 2500 kN včetně vysoko rychlostních strojů.



Obr. 15: servohydraulický zkušební stroj - výrobní řada HA 50 - 500kN (fy Zwick Roell) [6]

2.4.3. Rezonanční stroje

K moderním strojům s vysokou frekvencí zátěžných cyklů patří rezonanční zkušební stroje, které se rovněž označují jako vysokofrekvenční pulsátory, v nichž se k zatěžování zkoušených vzorků využívá kmitů s frekvencí blízkou rezonanci soustavy hmota – pružný prvek. Částí pružného prvku je zkoušený vzorek. Hmotu tvoří závaží volená s přihlédnutím ke vzorku a požadované síle. Kmitání se budí a udržují pomocí elektromagnetických soustav, vyznačujících se velmi malou spotřebou elektrické energie a vyřazením rotujících součástí (žádné tření v ložiskách), popřípadě také pomocí malých nevyvážených rotujících hmot (mechanické budiče kmitů) nebo výstředníků. [1]



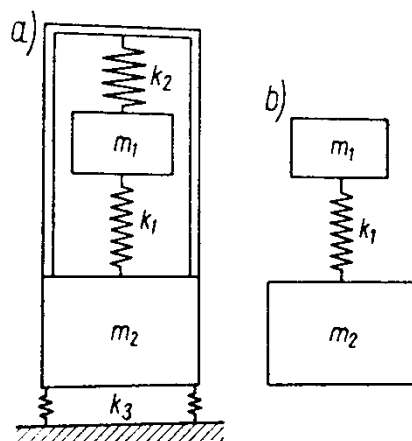
Obr. 16: princip rezonančního stroje se setrvačným buzením [1]

Ve strojích s magnetickým buzením se kmitání vyvolává cyklickými elektromagnetickými silami. Zdrojem těchto sil je magnet s dvojnásobným vinutím – z nichž jedno je napájeno stejnosměrným proudem a druhé střídavým. Napájením jednoho vinutí stejnosměrným proudem se získává počáteční zmagetování, nutné k dosažení lineární charakteristiky elektromagnetu. Střídavý magnetický tok vyvolaný střídavým proudem přitahuje periodicky kotvu a tím je způsobován kmitavý pohyb.[1]

Stroje tohoto druhu obvykle pracují s frekvencí buzení blízkou frekvenci vlastního kmitání soustavy, v níž zkušební vzorek tvoří jeden z pružných prvků. Schématické uspořádání hmot a pružných prvků v rezonančním stroji s elektromagnetickým buzením je na Obr. 17.

Na Obr. 17 v soustavě a) je k_1 společná pružná charakteristika vzorku a s ním spojeného siloměru, k_2 je pružná charakteristika pružiny předpětí a k_3 je pružná charakteristika pružin, na nichž spočívá podstavec pulsátoru, m_1 je hlavní kmitající hmota a m_2 je hmota podstavce. Protože charakteristiky k_1 a k_2 jsou poměrně malé a mohou se proto zanedbat, a tak pracujeme se soustavou b) v tomtéž obrázku. Frekvence vlastního kmitání této soustavy se rovná

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{k_1 \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (3)$$



Obr. 17: princip rezonanční stroje s el. mag. buzením [1]

- **Vysokofrekvenční rezonanční pulsátor s elektromagnetickým buzením**

Právě tímto typem zkušebního stroje je Vibrophore, který je firmou COMTES FHT používán pro zkoušení únavy materiálu při cyklickém námáhání a na který se zaměřuje tato práce, jejíž cílem je návrh vhodného typu čelistí pro upínání zkušební vzorku, ale o tom více v kapitole 3. *Specifikace požadavků.*

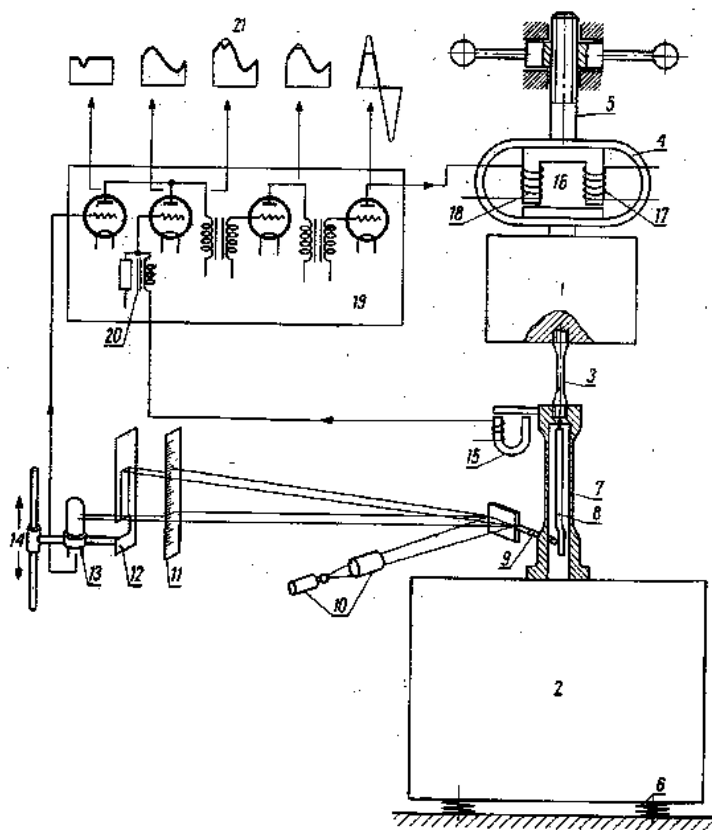
Tento typ pulsátorů slouží ke zkoušení únavové pevnosti v tahu, tlaku, smyku, ohybu a krutu materiálů jako ocel, lehké kovy, plastické hmoty a keramické materiály. Lze ho použít ke zkouškám pevnosti malých konstrukčních prvků nebo zkouškám útlumu materiálu. Tyto zkušební stroje mohou být opatřeny komorami umožňujícími únavové zkoušky při zvýšených nebo snížených teplotách.

Na Obr. 18 je schéma pulsátoru magneticky buzeného, pracujícího na vlastní frekvenci soustavy složené z hlavní kmitající hmoty 1, pružného prvku 3 (zkušební vzorek) a z tenkostěnné trubky 7. Synchronizace frekvence buzení s frekvencí vlastních kmitů (rezonance) se dosahuje elektronickou zpětnou vazbou přes elektronkový zesilovač 19, použitý k napájení elektromagnetu 16, budícího toto kmitání. Elektronkový zesilovač 19 násobí impulsy vysílače kmitů 15, buzené mechanickým kmitáním horní části siloměru. Impulsy vysílače kmitů jsou předávány pomocí fázového posuvu 20. Elektromagnet budící kmitání má vinutí k počátečnímu kmitání 17 a vinutí hlavní 18.

Frekvence vlastních kmitů je určena pružností vzorku a velikostí pohyblivé hmoty, kterou lze jednoduchým způsobem měnit a to přidáním nebo ubráním závaží ve členu 1. K měření síly se používá dynamometr 7 – 14, založený na principu optiky paprsku a fotobuňky. Dynamometr je využíván i jako regulační prvek, když dojde k překročení amplitudy, padne paprsek na fotobuňku, která je spojena se zesilovačem ovládajícím elektromagnet, dojde k tlumení zmenšujícího amplitudu.

Ve firmě COMTES FHT je tento stroj vybaven počítačem a měření sil i frekvence je tedy realizováno počítačovým softwarem, stejně jako na všech dnešních moderních zkušebních strojích.

Ke zkouškám jednoosé napjatosti se nejčastěji používá zkušebních tyčí kruhového průřezu se závitovými hlavami. Ke zkoušení různých zkušebních vzorků je potřeba i různé dodatečné vybavení. Pro běžné zkoušky je vybavení sériově vyráběno, ale u netypických vzorků je potřeba individuální konstrukce různých přípravků.



Obr. 18: schéma vysokofrekvenčního rezonančního pulsátoru fy Amsler [1]



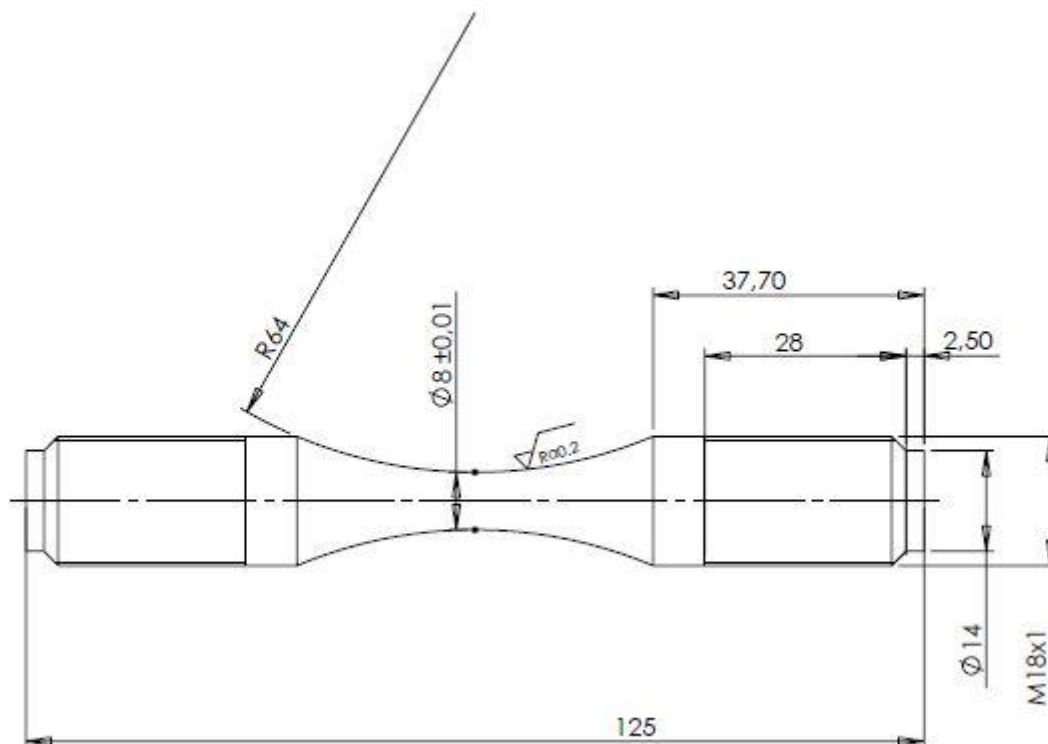
Obr. 19: vysokofrekvenční pulzátor Amsler 30 HFP 5100 (fy Zwick Roell) [7]

Na Obr. 19 je moderní vysokofrekvenční pulzátor firmy Zwick Roell, dosahující vysoké zkušební frekvence až do 300 Hz, jednoduchá instalace i obsluha, kde nejsou potřeba žádná další zařízení a s vysokou odolností součástí vůči opotřebení.

3. Specifikace požadavků a upřesnění zadání

3.1. Specifikace vzorku

Zkušebním vzorkem pro zkoušku únavy v tahu/tlaku je tyčinka s kruhovým průřezem v nejužším místě $\varnothing 8$ mm. Zkušební vzorek je konstruován pro upínání pomocí hlavy se závity na obou koncích. Oba konce jsou ještě opatřeny osazením délky 2,50 mm, přes které je realizováno vymezení vůlí mezi zkušebním vzorkem a upínací hlavou zkušebního stroje. Povrch části vzorku, kde předpokládáme porušení je upraven na hodnotu Ra0,2, pro zbytek ploch je předepsaná hodnota Ra1,6. Zkušební vzorek je dán výkresem C-000-116, který je majetkem fy COMTES FHT. Pro výrobu vzorku je k dispozici široká řada kovových materiálů, které se volí dle požadavku zákazníka.



Obr. 20: zkušební vzorek fy COMTES FHT č. v. C-000-116

3.2. Specifikace problému a požadavků na přípravek

Příčinou pro návrh nového přípravku pro upínání výše uvedeného vzorku při zkoušce cyklického namáhání v tahu/tlaku je fakt, že při zkouškách materiálů s vyšší pevností občas docházelo k prasknutí vzorku v oblasti prvních dvou závitů směrem ke středu tyčinky. Tento jev je způsoben skutečností, že při zatížení závitu nesou největší část tohoto zatížení právě první závity ve směru zatížení a proto je právě vrub mezi prvním a druhým závitem nejnáchylnější k porušení materiálu. V literatuře se uvádí, že první závit nese až 30% celkového zatížení.[5] Když se k tomuto faktu přidá i možnost toho, že je právě v této oblasti případná materiálová nebo povrchová vada, je toto místo velmi náchylné ke vzniku trhliny a následného poškození respektive přetržení vzorku v této oblasti.

Z uvedené problematiky plynou požadavky pro návrh přípravku, které by tyto negativní vlivy snížil, protože úplná eliminace, co se týká materiálových skrytých vad, není zcela reálná.

Proto hlavním požadavkem na přípravek je schopnost zmírnit zatížení v oblasti prvního a druhého závitu a dosáhnout rovnoměrnějšího zatížení závitu, aby byla zvýšena pravděpodobnost přetržení zkušební vzorku v požadovaném místě, tj. v nejužším průřezu. Dalšími vedlejšími požadavky na přípravek jsou jednoduchá, levná výroba a snadná obsluha přípravku, která zajistí jednoduché a rychlé upnutí a s dostatečnou přesností.

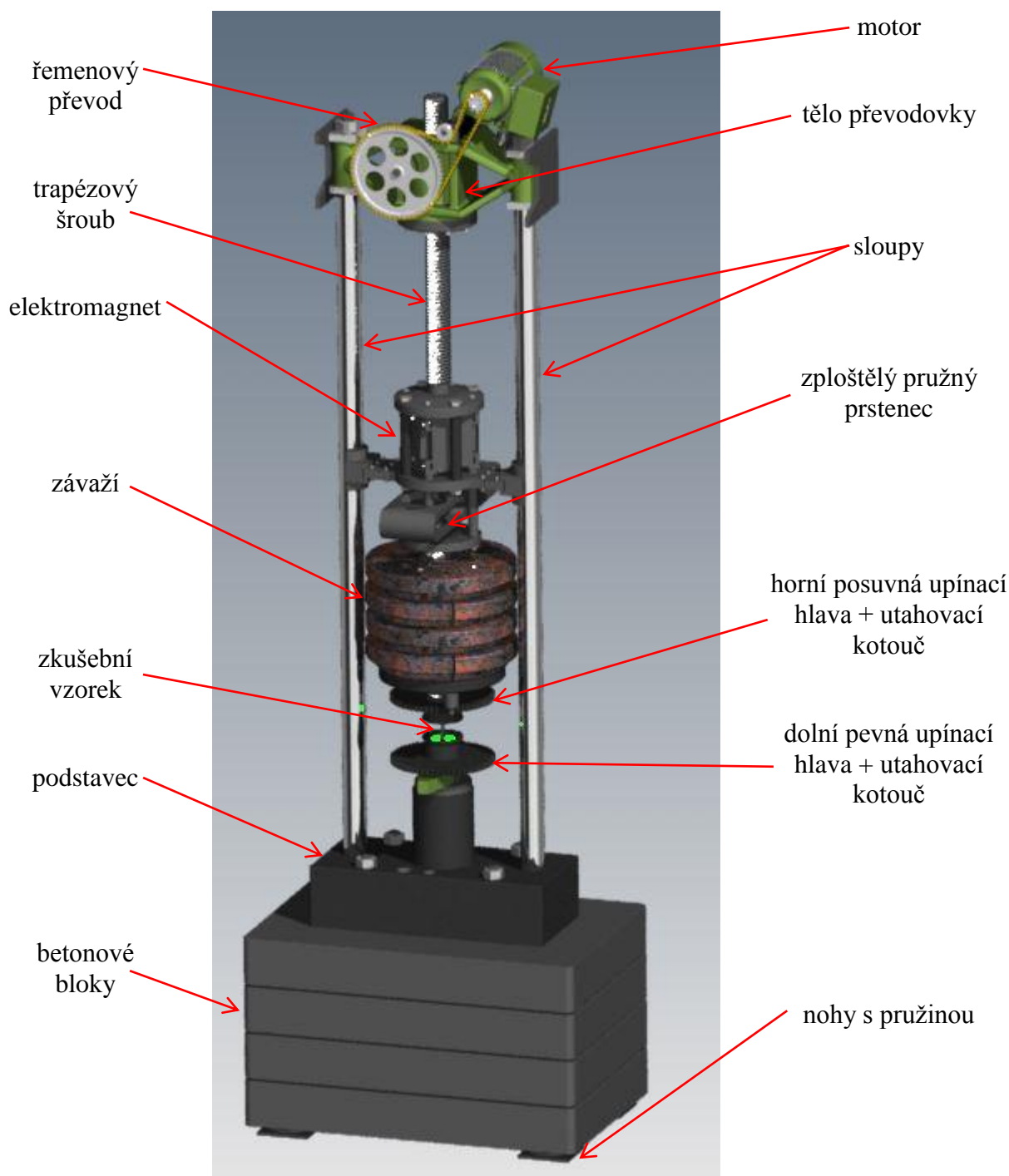
3.3. Zkušební stroj a stávající upnutí

Jedná se o vysokofrekvenční pulzátor pracující na principu, který popisuje schéma na Obr. 18, jen s rozdílem odměřování působící síly a řízení, které je u našeho stroje prováděno pomocí počítače a příslušného softwaru.

Pro úplnost je uveden stručný popis stroje (Obr. 22). Celý stroj stojí na bloku čtyřech betonových kvádrů, které jsou nasunuty ve všech 4 rozích na ocelové tyče a od podlahy pod strojem je dělí pružiny, které jsou spojeny s těmito tyčemi – v zásadě tvoří tlumící nohy stroje. Na tento blok je připevněn podstavec stroje, v němž je uložena spodní pevná upínací hlava stroje a dva vodící sloupy. Na obou sloupech je uloženo tělo šnekové převodovky, pohánějící matici trapézového šroubu, který koná posuv ve svislé poloze. Je poháněn řemenovým převodem pomocí řemenu, silou odvozenou od motoru připevněného na horní ploše těla převodovky. Tento šroub koná jak polohování horní upínací hlavy, podle potřeby, tak i při samotné zkoušce slouží jako regulátor napětí. Na spodním konci trapézového šroubu je připevněn budič kmitů – elektromagnet. Na spodní straně elektromagnetu je připevněn zploštělý pružný prstenec, k němuž je připevněna tyč s horní upínací čelistí stroje. Kolem této tyče se umísťují závaží, které tvoří hlavní kmitající hmotu, jež určuje frekvenci a amplitudu při běhu stroje.

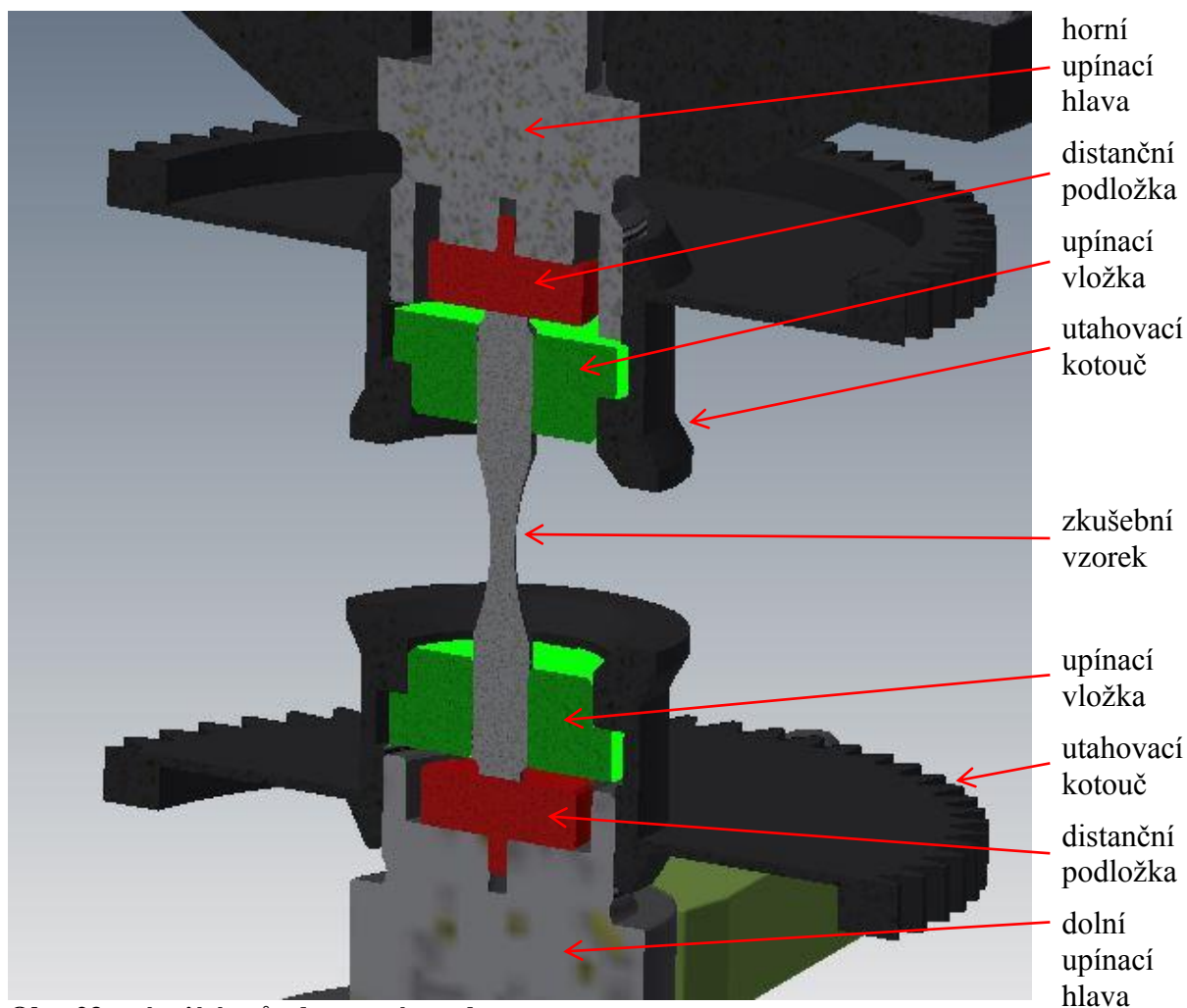


Obr. 21: vysokofrekvenční pulzátor ve firmě COMTES FHT s osazenou komorou pro zkoušky při zvýšené teplotě



**Obr. 22: vytvořený model pulzátoru s popisem
(Inventor 2012)**

Upnutí zkušební vzorku se provádí mezi horní a dolní upínací hlavu stroje pomocí vložek se závitem, do kterých jsou zašroubovány oba konce vzorku, dále jsou vymezeny vůle ve svislém směru dotažením vzorku pomocí utahovacích kotoučů na distanční podložky uložených ve vnitřku upínacích hlav. Tímto způsobem dojde k upnutí zkušební tyčinky a odstranění vůlí (Obr. 23). Po tomto upnutí následuje většinou i určité předepnutí vzorku silou vyvozenou pomocí trapézového pohybového šroubu poháněného elektromotorem. Toto předepnutí je během zkoušení průběžně sledováno počítačem a je možné automaticky regulovat toto předpnutí, aby bylo stále stejné.



Obr. 23: stávající způsob upnutí vzorku

3.4. Způsoby upínání vzorků

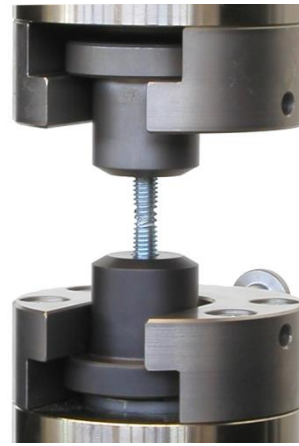
V našem případě nás bude zajímat upínání vzorků podobných našemu, tedy zkušebních tyčí s kruhovým průřezem a osazenou hlavou se závitem. Při průzkumu trhu z hlediska upínání musíme přihlížet, aby konstrukčně bylo upínání možné skloubit se současnými dispozicemi našeho stroje. Také je důležité, aby nové upínání dokázalo plnit stejné funkce, jako je například vymezení vůle mezi zkušebním tělesem a upínacími hlavami viz. Obr. 23.

- **Upínací čelisti pro zkoušení vzorků s osazením nebo závitymi hlavami fy Zwick Roell**

Síla se přenáší přes osazení či závitovou hlavu. Vzorek je zasunut do upínacích čelistí otevřených z přední strany pomocí odpovídajícího držáku vzorků a centruje se sám v ose tahu. Nevýhodou těchto čelistí je pro náš případ, že není možné vymezení vůle mezi koncem zkušební tyče a upínací hlavou stroje. Vymezení této vůle je žádoucí z hlediska oboustranného charakteru zatížení – tah/tlak.



Obr. 24: upínání vzorku se závitem [8]



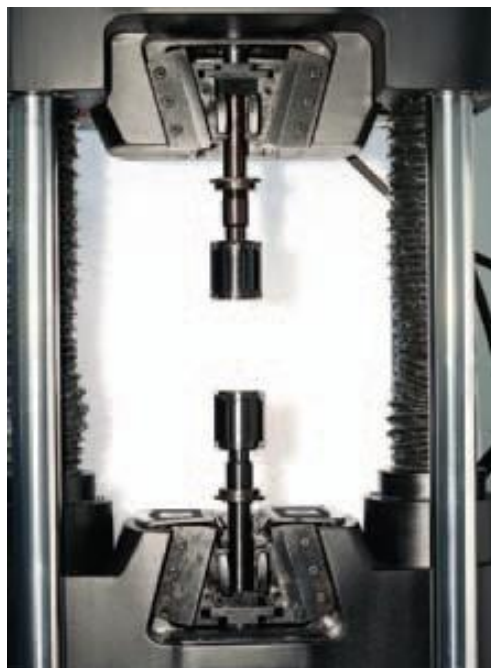
Obr. 25: detail [8]

- **Přípravky pro zkoušky vzorků s vnitřním nebo vnějším závitem nebo s válcovou hlavou fy LabTech**

Pro testování kovů, kompozitů, plastů.

Jmenovitá silová kapacita:	300 kN, 600 kN, 1000 kN
Vzorky s vnějším závitem:	M5, M6, M8, M10, M12, M16, M20, M24, M30
Vzorky s vnitřním závitem:	M5, M6, M8, M10, M12, M16, M20, M24, M30
Vzorky s válcovou hlavou:	Ø 12,5 mm
Úhel klínů:	4°, 6° nebo 10°
Teplotní rozsah:	0... +50 °C

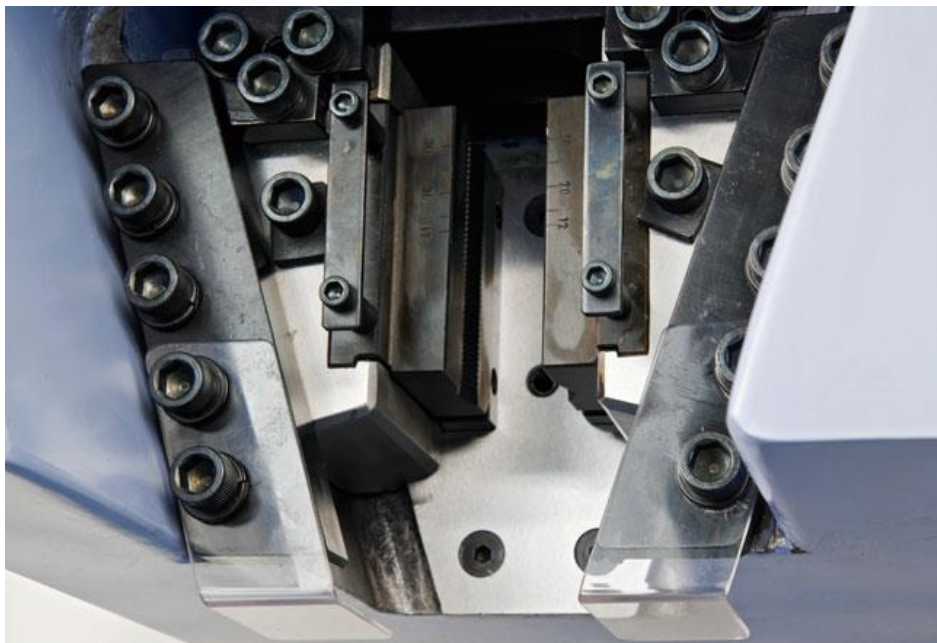
Tab. 1: parametry čelistí fy LabTech [9]



Obr. 26: upínání vzorku se závitem pomocí čelistí s klínem [9]

- **Upínací čelisti pro vzorky se závitovými hlavami fy Shimadzu**

Podobné provedení jako od firmy LabTech pomocí klínových čelistí s dvěma vložkami se závitem.



Obr. 27: klínové čelisti s dvěma vložkami pro vzorek se závitem [10]



Obr. 28: detail čelistí [10]

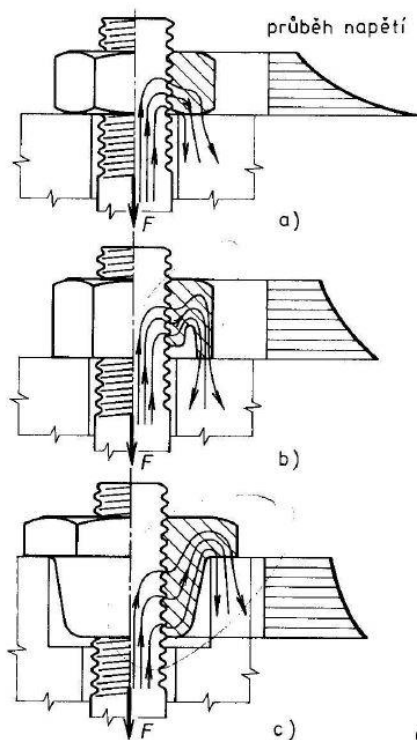
Z uvedených příkladů by měl principiálně vycházet návrh variant na upínací čelisti, které ovšem budou přizpůsobeny pro upínání stávajícího vzorku i stroje.

4. Konstrukce a návrh variant

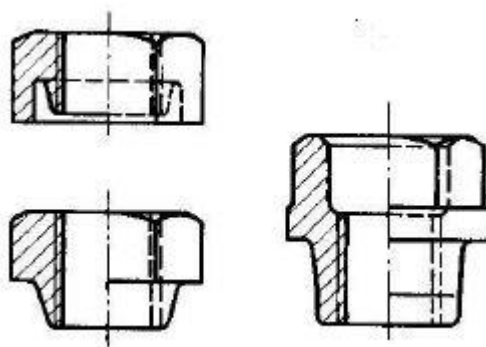
4.1. Návrh variant

Návrh variant je vztažen ke dvěma hlediskům, prvním je problematika průběhu napětí podél závitu a druhým je inspirace provedení čelistí konkurencí na trhu v této oblasti strojů a zkoušení podobných vzorků.

Literatura uvádí, jak již bylo uvedeno (v kapitole 3.2), že první závity přenášejí až 30% osově síly, proto i napětí je u nich nejvyšší, často se deformují a podél celého závitu není napětí konstantní – viz. Obr. 29. První variantou pro rovnoměrnější rozdělení osově síly na jednotlivé závity se dosáhne použitím materiálu s větší pružnou poddajností (s menším modulem pružnosti než ocel – dural, šedá litina) nebo úpravou matice – viz. Obr. 30, tím se dosáhne její menší tuhosti na začátku závitu.[5]



Obr. 29: rozdíly průběhu napětí v závitech [5]



Obr. 30: úpravy matice pro rovnoměrnější rozložení síly na jednotlivé závity [5]

Druhou variantou, která je ovšem založena na metodě experimentu a čerpá ze sortimentu čelistí konkurence na trhu, která se věnuje zkoušení tvarově podobných zkušebních vzorků je možnost navrhnout čelisti tak, aby při zatížení byla závitová hlava ještě více sevřena a vyvozen tím větší tlak na závity, tudíž také rovnoměrnější rozložení a nepatrné zvětšení stykové plochy. Jako vhodné řešení skýtá možnost tento tlak vyvodit pomocí dělených kuželových (klínových) čelistí, jako je tomu na Obr. 27, kdy s rostoucí osovou silou bude růst i tlak sevření. Možná vhodnější, než dvě vložky, by bylo rozdělit čelist na segmenty čtyři s menší mezerou mezi jednotlivými segmenty.

4.1.1. Morfologická matice návrhu variant

Vhodné poznatky z předchozích kapitol byly zpracovány do morfologické matice, která slouží k návrhu struktury jednotlivých variant. Do této tabulky byly barevně vyznačeny jednotlivé varianty, kde je jasně vidět, co která varianta obsahuje a jakým způsobem je u ní dosaženo požadavků na upínací čelisti.

Cesta, která vedla k volbě následujících variant, je rozepsána v následujících podkapitolách, které jednotlivé varianty popisují a obsahují jejich vyobrazení.

Funkce	Eventuální varianta provedení funkce (organizační struktura)		
Upínání vzorku	ruční	automatické	-
Upínací síla	mechanicky	hydraulicky	pneumaticky
Upínací prvek	čelisti	vložka	kleština
Rovnoměrné zatížení závitu	sevření závitu	úprava tvaru matice - menší tuhost upínacího prvku (vložky)	úprava materiálu matice - s menším modulem pružnosti
Vymezení vůle mezi vzorkem a strojem	mechanicky původním kotoučem	hydraulicky	pneumaticky
Vyplnění dutiny v upínací hlavě	distanční podložka	samotný upínacím prvkem	žádné

Tab. 2: Morfologická matice návrhu variant s barevně vyznačenými variantami A, B, C, D

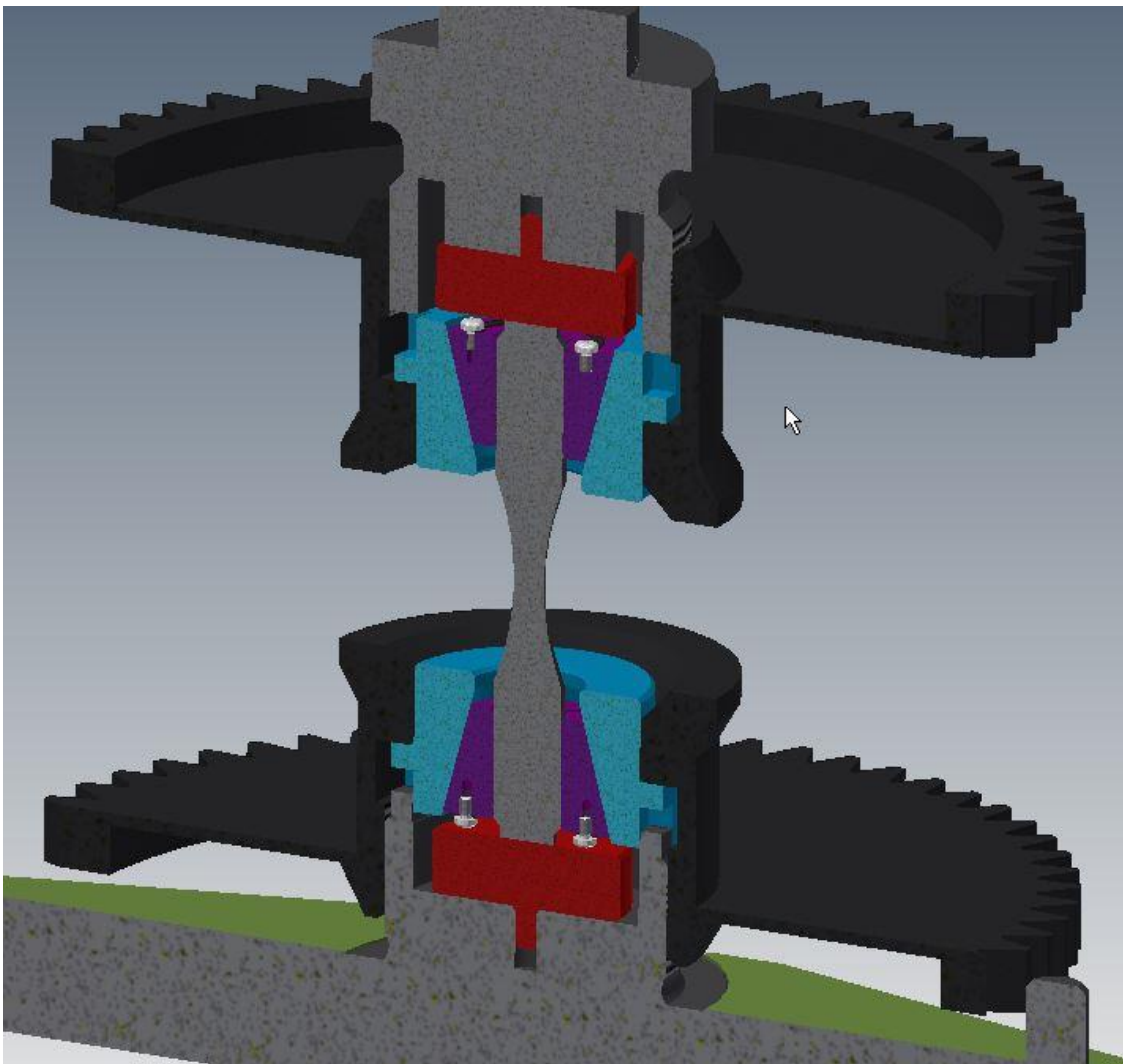
4.1.2. Varianta A

Varianta A je variantou, u které je využito ručního upínání vzorku, protože stroj je určen pro zkoušení dalších druhů vzorků, které vyžadují jiný způsob upínání, dalším důvodem je, že vzorky musí mít vymezenou vůli mezi koncem zkušební tyče a dosedací plochou distanční podložky a ruční upínání zajistí, že obsluha si upnutí zkontroluje a nedojde k chybě a posledním důvodem je ekonomické hledisko, které je rozhodně příznivější na rozdíl od stavby vhodného upínacího automatu. Z ekonomického pohledu je také důležité, že doba upínání je proti době zkoušení zanedbatelná a tedy automatické upínání by se „nezaplatilo“. Z těchto důvodů je automatické upínání vzorků zavrhnuto i pro všechny ostatní varianty.

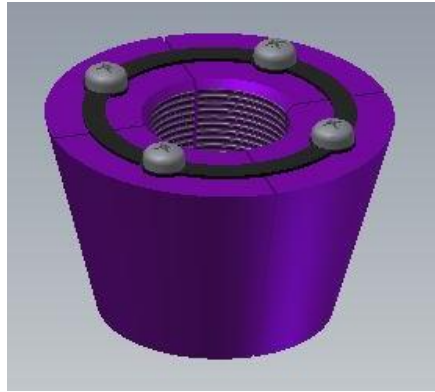
Upínací síla, která vymezuje vůli mezi vzorkem a distanční podložkou a předejde závit vzorku, je vyvozena mechanicky ozubeným utahovacím kotoučem. Všechny síly jsou tedy vyvozeny mechanicky za pomoci lidské nebo elektrické síly. Ostatní druhy pohonů, ať hydraulika či pneumatika, byly vynechány zde i u dalších variant, protože by byly technicky i finančně náročné a také protože původní řešení je odzkoušené a plně vyhovující.

Konce zkušební vzorku jsou upínány do čelisti tvořené ze čtyř segmentů, která z vnější strany tvoří kužel viz. Obr. 32. Segmenty jsou k sobě spojeny pomocí kroužku z tenkého plechu, aby držely pohromadě kvůli upínání. Kužel má úhel stoupání 15° a je žádoucí, aby byl nesamosvorný, kvůli zjednodušení demontáže po přetržení vzorku.

Varianta A byla volena jako varianta, u které je dosahováno co nejrovnoměrnějšího rozložení působící síly po celé délce závitu pomocí sevření závitu na konci zkušební vzorku větší silou. Větším tlakem sevření závitu by se získala větší dosedací plocha mezi závity a zároveň by všechny závity přenášely stejnou sílu, neboť kdyby došlo k deformaci (prodloužení) závitu, vzniklé vůle by byly vymezeny silnějším sevřením. Síla sevření je u tohoto řešení vyvozena pomocí kuželových ploch na čelisti a pouzdře, do kterého je tato čelist uložena. Pouzdro je uloženo v utahovacím ozubeném kotouči, který je našroubován na závitech upínacích hlav stroje. Pouzdro má na spodní ploše dvě drážky, do kterých zapadají jazýčky, které jsou na upínacích hlavách, tím se zamezí pootočení při utahování utahovacího kotouče. Jeho utažením je za prvé vymezena vůle mezi distanční podložkou a zkušebním vzorkem a za druhé s tím přichází již uvedené silnější sevření závitu vzorku. Síla sevření pak dále roste v závislosti na velikosti zatížení vzorku v tahu. Princip varianty je zřejmý z Obr. 31.



Obr. 31: Varianta A



Obr. 32: čelist varianty A

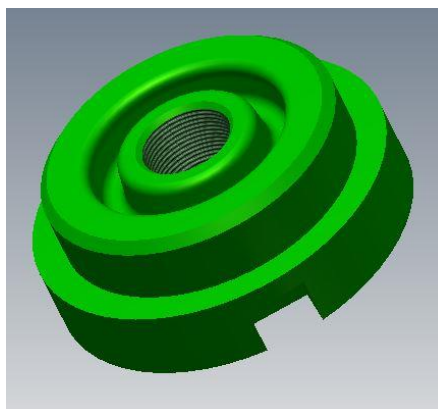
4.1.3. Varianta B

Varianta B je svou konstrukcí podstatně jednodušší než varianta A, protože upínací mechanismus obsahuje méně součástí a jsou méně náročné na výrobu i montáž (Obr. 34).

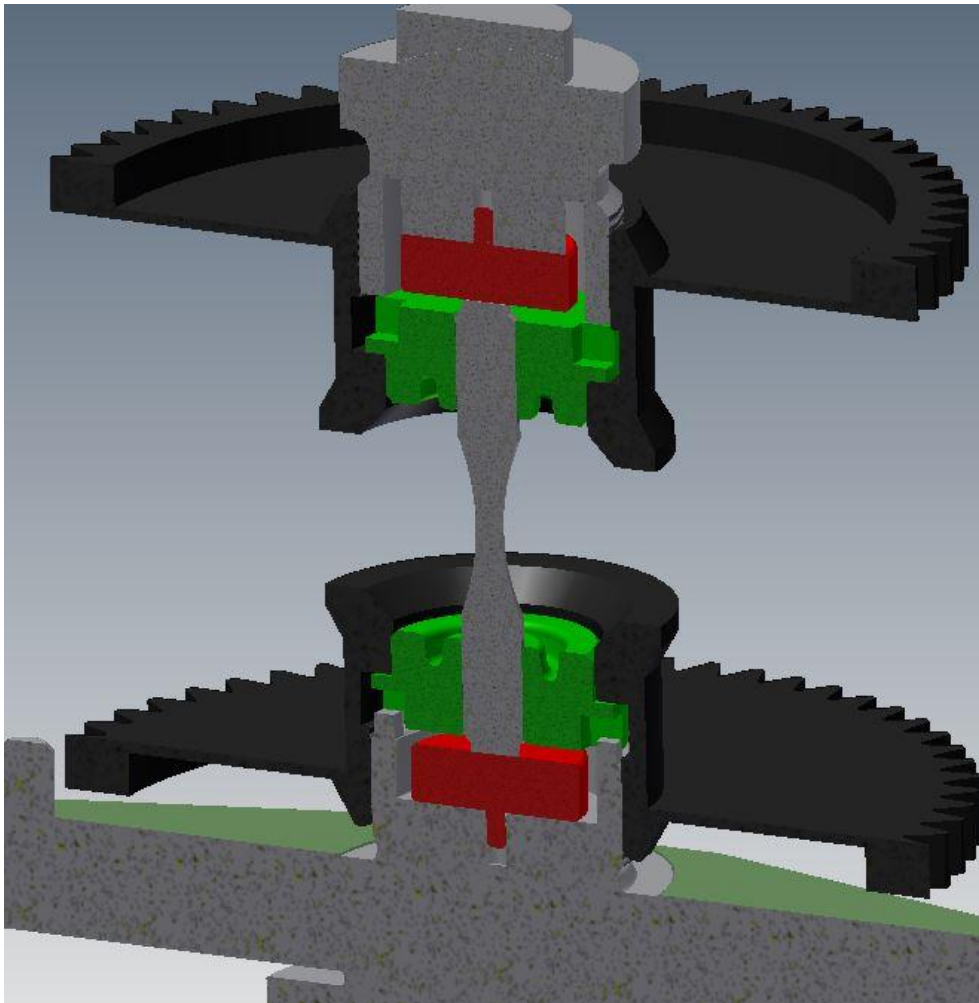
V této variantě je opět použito ruční upínání vzorku. Důvody, které vedly k volbě tohoto řešení, jsou již uvedeny v předchozím případě. Síla, která vymezuje vůli mezi vzorkem a distanční podložkou a předepne závit vzorku, je vyvozena mechanicky ozubeným utahovacím kotoučem a síla pro následující předepnutí vzorku v tahu je zajištěna svislým trapézovým šroubem. Toto je řešení stejné jako u všech ostatních variant, protože řešení je technicky nejjednodušší a finančně nejpříjemnější.

Zkušební vzorek je na obou koncích zašroubován do celistvé vložky, která je uložena v ozubeném utahovacím kotouči. Ve vložce jsou drážky, do kterých zapadají jazýčky na upínací hlavě, aby nedocházelo k pootočení vložky nebo vzorku při utahování kotouče a docílilo se požadovaného vymezení vůle mezi koncem zkušební tyče a plochou distanční podložky.

K dosažení rovnoměrného rozložení napětí po celé délce závitu zkušební tyče je v této variantě zvolen způsob pomocí úpravy tvaru vložky, tak aby byla snížena její tuhost. Při snížení tuhosti dojde při zatížení k deformaci prvních závitů a zatížení se tak přeneso i na další závity a tím nebude napětí v prvních závitech zkušební tyče tak vysoké, aby došlo k prasknutí.



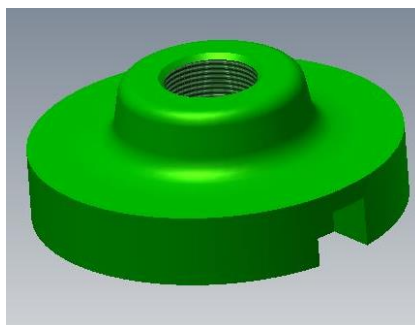
Obr. 33: vložka varianty B



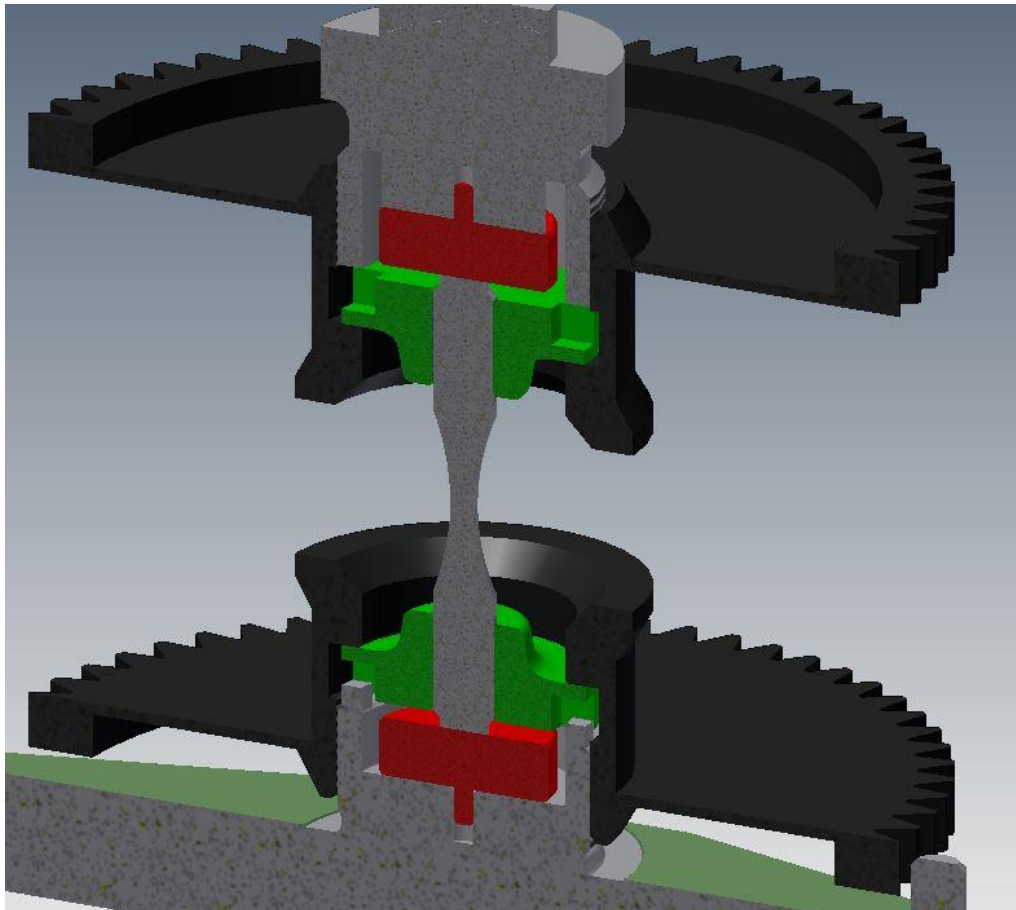
Obr. 34: Varianta B

4.1.4. Varianta C

Varianta C je svou konstrukcí i funkčně shodná s variantou B, pouze vložka, do které je upínán zkušební vzorek má jiný tvar, který by měl snížit tuhost vložky a docílit podobného výsledku jako varianta B. Při porovnání s původním způsobem upínání (Obr. 23) se mu varianty A i B velmi podobají, ale vložky mají tvar, který snižuje jejich tuhost a odlehčuje zatížení na prvních závitech závitu zkušební tyče.



Obr. 35: vložka varianty C



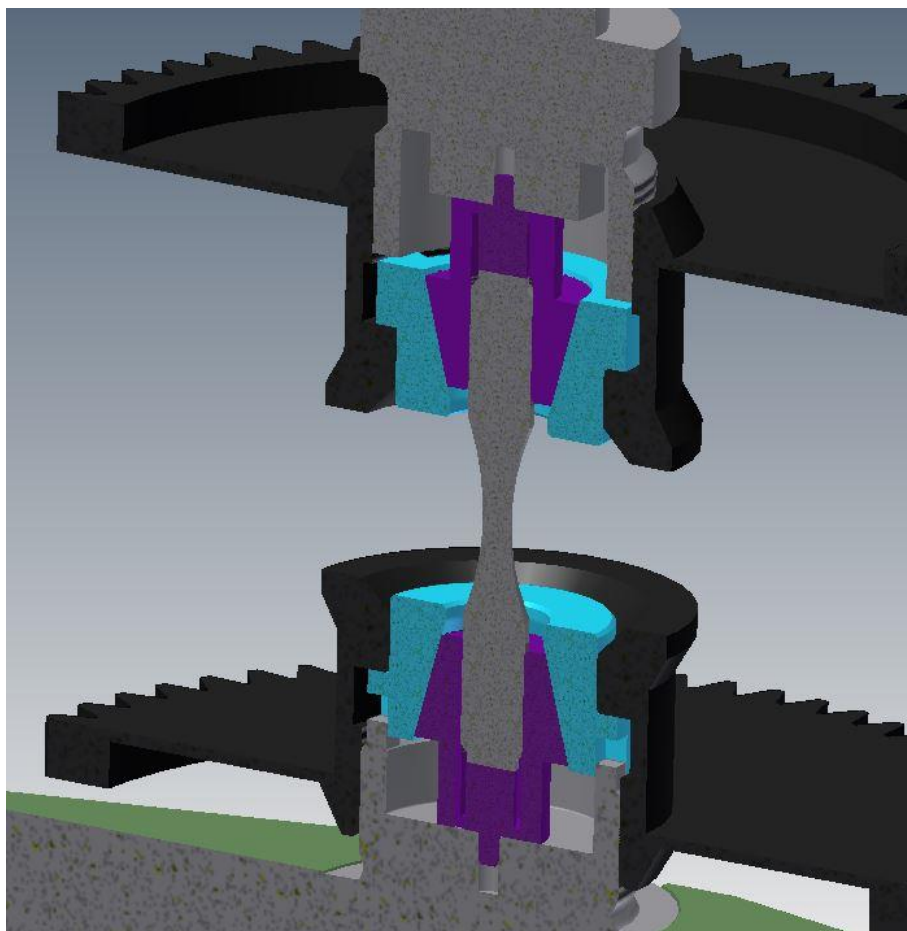
Obr. 36: Varianta C

4.1.5. Varianta D

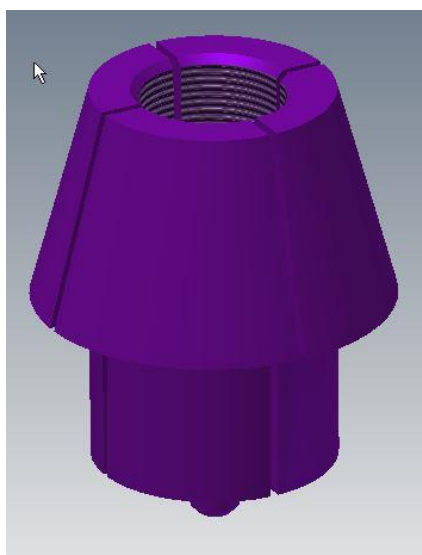
Varianta D je kombinací předchozích variant, kdy je zkušební vzorek upnut do kleštiny (Obr. 38), která koná jak funkci distanční podložky, tak funkci svěrného kuželového pouzdra jako u varianty A viz. Obr. 37. Pro správnou funkci kleštiny musí být vzorek zašroubován na obou koncích až na dorazovou plochu uvnitř kleštiny, tak je zajištěna náhrada distanční podložky. Následně musí být obě kleštiny pomocí ozubených utahovacích kotoučů dotaženy na dosedací plochy uvnitř upínacích hlav stroje s vystředěním pomocí čepů. Kleštiny jsou uloženy v pouzdře, které je naprosto stejné jako u varianty A. Kleština musí být proříznuta co nejvíce ke středu, aby mohlo docházet k její deformaci a následnému sevření závitu.

Upínání vzorku je ruční, stejně jako u všech ostatních variant, důvody použití tohoto způsobu jsou shodné s předchozími variantami. Upínací síly jsou také shodné jako u ostatních variant, jsou mechanicky vyvozené pomocí ozubeného utahovacího kotouče a od svislého trapézového šroubu.

Zajištění rovnoměrného rozložení napětí podél závitu je zajištěno stejně jako u varianty A pomocí sevření závitu. Závit je svíráán pomocí kleštiny, která je tvořena kuželem s úhlem stoupání 15° , u kterého je vhodné, aby byl nesamosvorný stejně jako u varianty A. Kleština je uložena v pouzdře s vnitřním kuželem, které v kombinaci s kleštinou vyvozuje tlak na závit při zatížení v tahu. První sevření přijde při utažení pomocí utahovacího ozubeného kotouče a následně roste síla sevření v závislosti na velikosti zatížení vzorku v tahu.



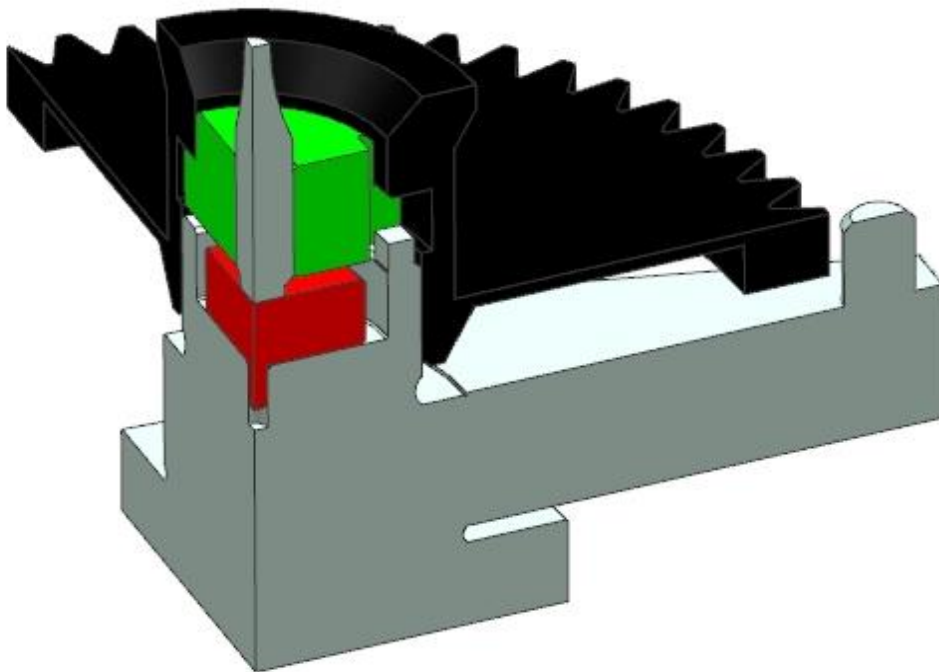
Obr. 37: Varianta D



Obr. 38: kleština varianty D

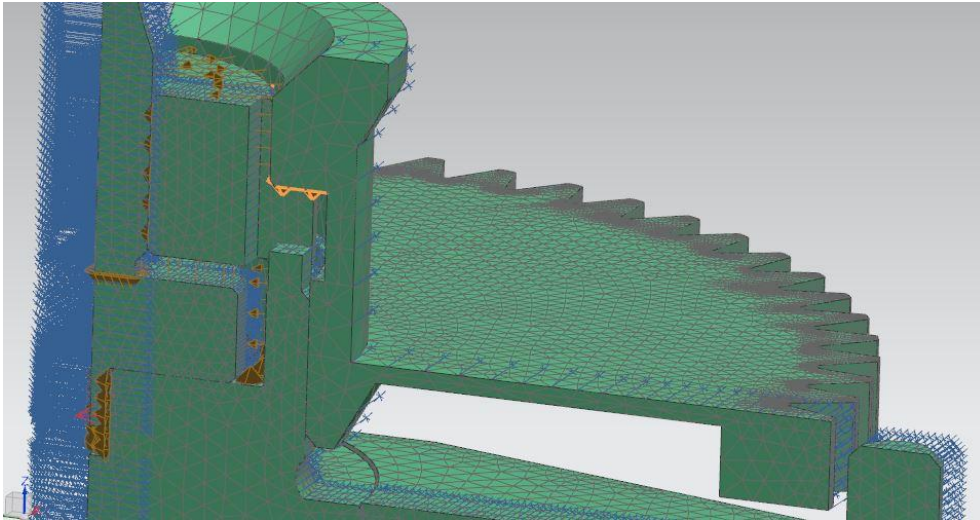
4.2. Analýza variant pomocí metody konečných prvků (MKP)

V této podkapitole jsou jednotlivé varianty včetně stávající varianty upínání z pevnostního hlediska porovnány a zobrazeny výsledky pevnostní analýzy MKP, provedené v softwaru Siemens NX 8.5 – řešič Nastran. Pro zjednodušení výpočtu a tím i zkrácení výpočtového času byly počítány pouze části variant, ve kterých je upnut zkušební vzorek a pevné části horní a dolní upínací hlavy stroje byly za upínací částí odříznuty. Dalším velkým zjednodušením bylo využití skutečnosti, že úloha je převážně axisymetrická (osově symetrická) v několika rovinách, ale některé konstrukční prvky tuto symetrii porušují. Jedná se o čep pro utahovací klíč a drážky v upínací vložce, které brání jejímu pootočení. Tyto dvě skutečnosti jsou zanedbány, jelikož nemají velký vliv na tuhost celé sestavy. První rovina symetrie je kolmá na osu vzorku a je umístěná v jeho polovině. Další dvě roviny jsou shodné s osou vzorku a jsou navzájem kolmé. Z těchto důvodů byl výpočetní model sestaven jako jedna osmina celku viz. Obr. 39.



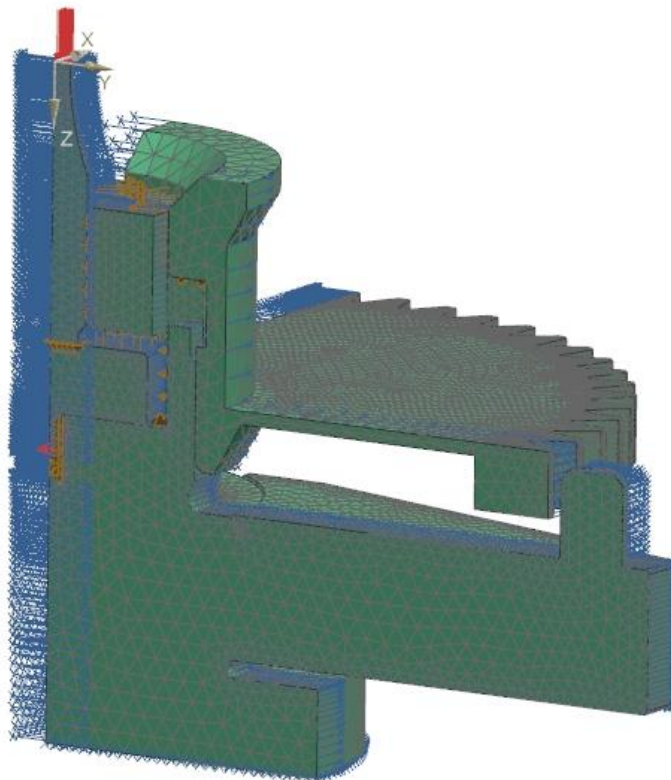
Obr. 39: zjednodušení varianty stávajícího řešení pro výpočet

Všechny počítané varianty byly síťovány stejným způsobem pomocí tetrahedrové sítě s velikostí elementů 3 mm u zkušebního vzorku, upínací vložky, distanční podložky a velikostí elementů 4 mm u utahovacího kotouče a upínací hlavy. Varianty byly definovány pevnou vazbou na spodní straně upínací hlavy, vazbami proti posunutí v kolmém směru v rovinách řezů a ploška řezu zkušebním vzorkem je zatížena silou. Požadavkem na výdrž čelistí bylo 100 kN, byla tedy zvolena zatěžovací síla 25 000N (čtvrtina průřezu). Mezi jednotlivými součástmi jsou zvoleny vazby „contact“ a mezi součástmi, které jsou spojeny závitem, je definována vazba „glue“.



Obr. 40: vazba "contact" - definované předpětí

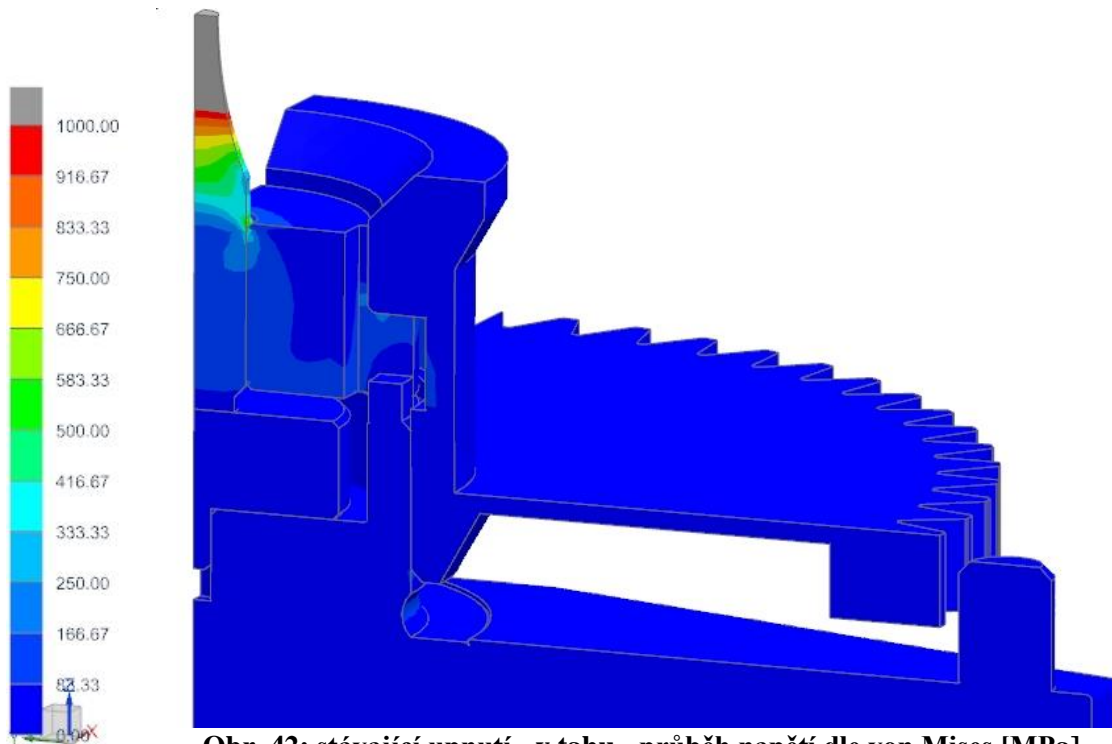
Na Obr. 40 je zvýrazněná vazba „contact“ mezi dosedací plochou upínacího pouzdra a dosedací plochou utahovacího kotouče. Tato vazba má předepsané odchylení těchto dosedacích ploch od sebe o 0,05 mm, to zajišťuje předpětí, které je vyvoláno po dotažení utahovacího kotouče a vymezuje vůli mezi zkušebním vzorkem a distanční podložkou. Tato vzdálenost vychází ze zadání, které je vyjádřeno předepsaným pootočením kotouče při jeho utažení vztaženého ke stoupání závitu.



Obr. 41: nasíťovaný a zavazbený model stávajícího řešení upnutí vzorku

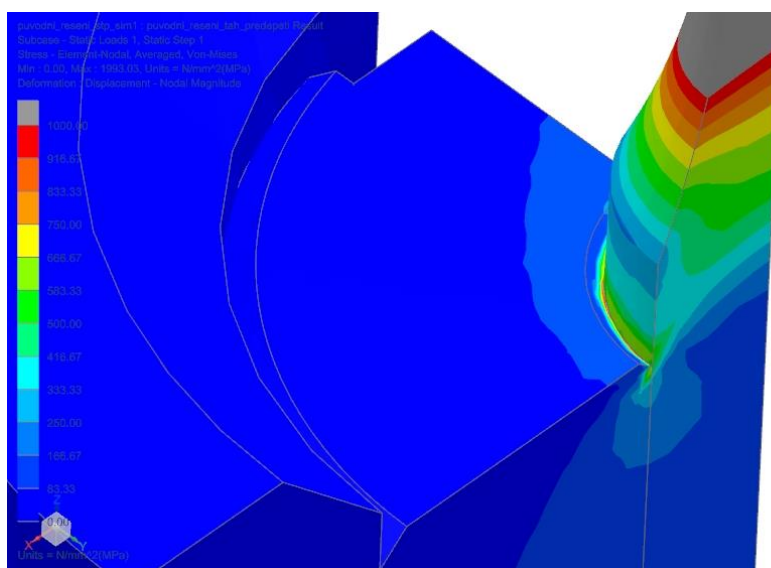
4.2.1. Varianta stávajícího řešení

Jako první byla provedena pevnostní analýza v tahu a tlaku stávajícího řešení upnutí zkušební vzorku pomocí pouzdra se závitem, které je uloženo v utahovacím kotouči. Maximální napětí v tahu dosáhlo hodnoty 1993 MPa, ale toto napětí je na zkušební vzorku, kde dochází k jeho přetržení. Pro nás jsou směrodatné hodnoty na upínacích součástech a závitu zkušební vzorku.

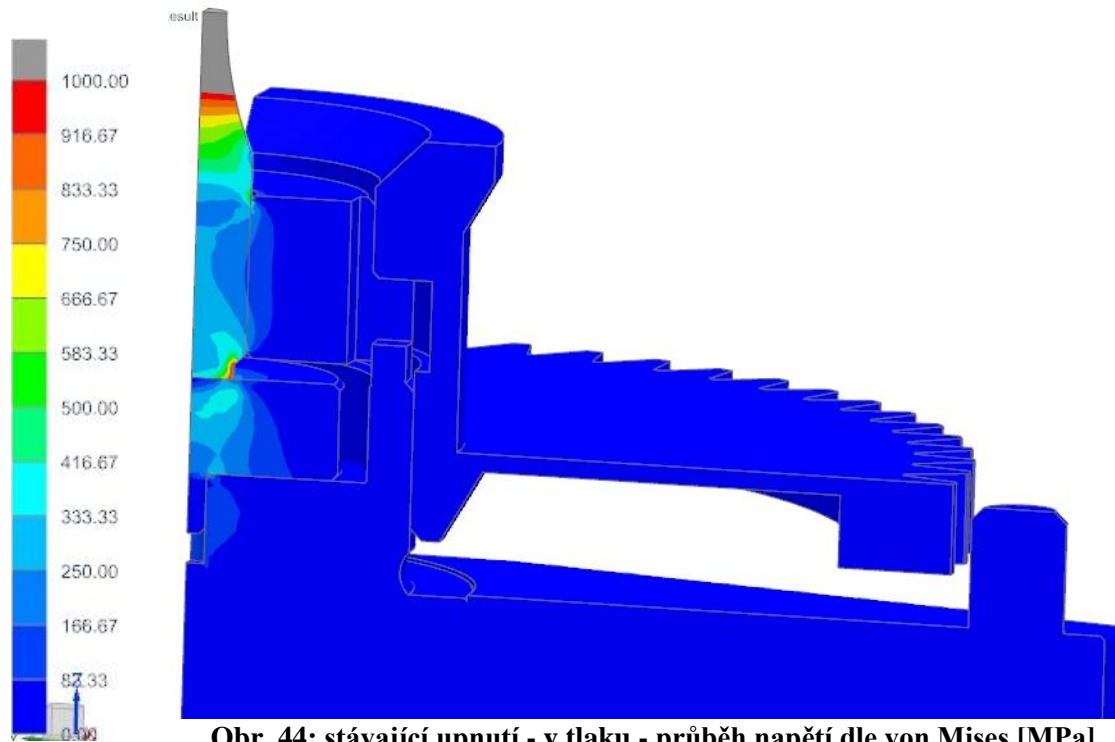


Obr. 42: stávající upnutí - v tahu - průběh napětí dle von Mises [MPa]

Na Obr. 42 je vidět, že při zatížení v tahu je největší napětí na konci vzorku a dále postupně klesá až k začátku upínací vložky a prvních závitů.

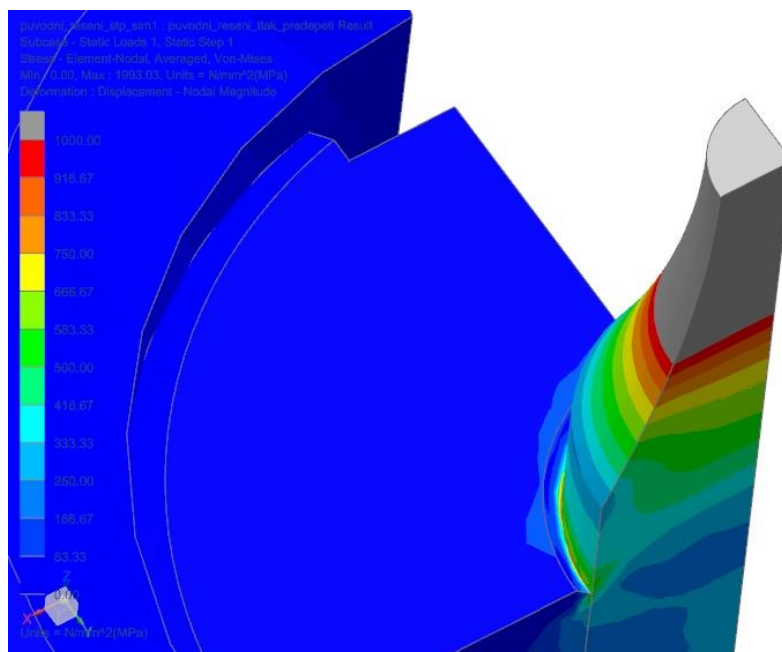


Obr. 43: detail napětí na začátku závitu vzorku (tah) - von Mises [MPa]



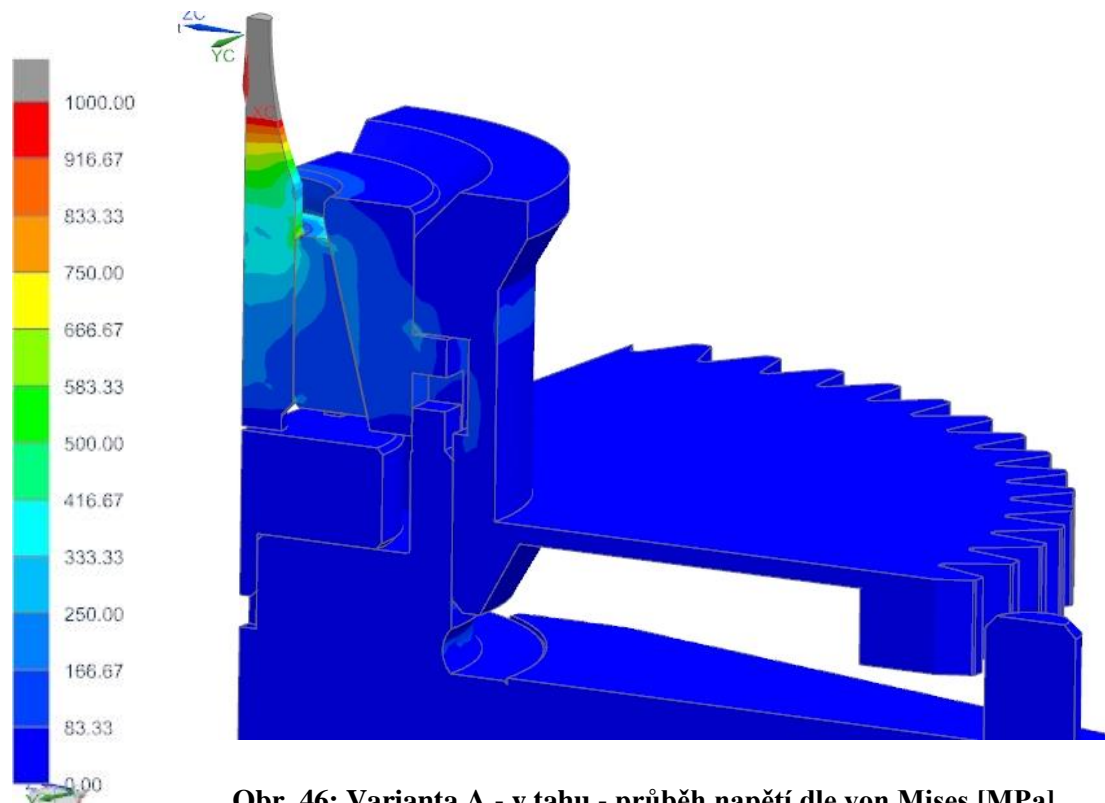
Obr. 44: stávající upnutí - v tlaku - průběh napětí dle von Mises [MPa]

V tlaku dosahuje maximální napětí také 1993 MPa, ale průběh je naprosto jiný. Při tlaku je vidět jak působí tlak i na distanční podložku a tvoří napětí i v ní na rozdíl od varianty v tahu. Na Obr. 44 je zřetelné napětí i na posledních závitech při zatížení tlakem, to je způsobeno vazbou „glue“, kdyby zde byl modelován závit nebo mezikruží, byl by průběh zobrazeného napětí relevantnější, ale výpočet o to složitější. Práce by tak musela zabíhat do větších detailů a přesahovala by rámec bakalářské práce.



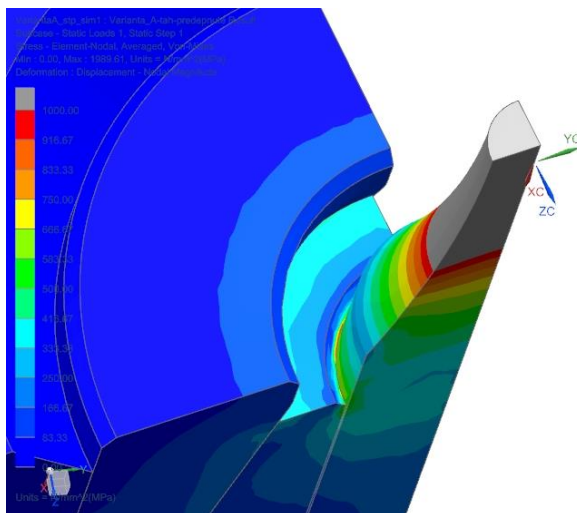
Obr. 45: detail napětí na začátku závitu vzorku (tlak) - von Mises [MPa]

4.2.2. Varianta A

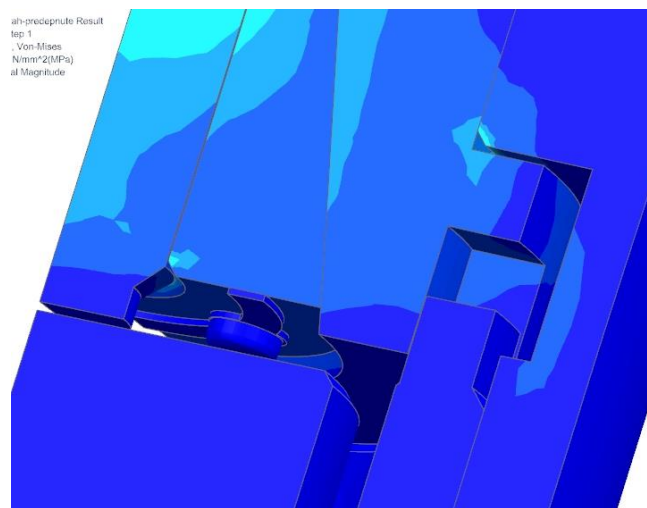


Obr. 46: Varianta A - v tahu - průběh napětí dle von Mises [MPa]

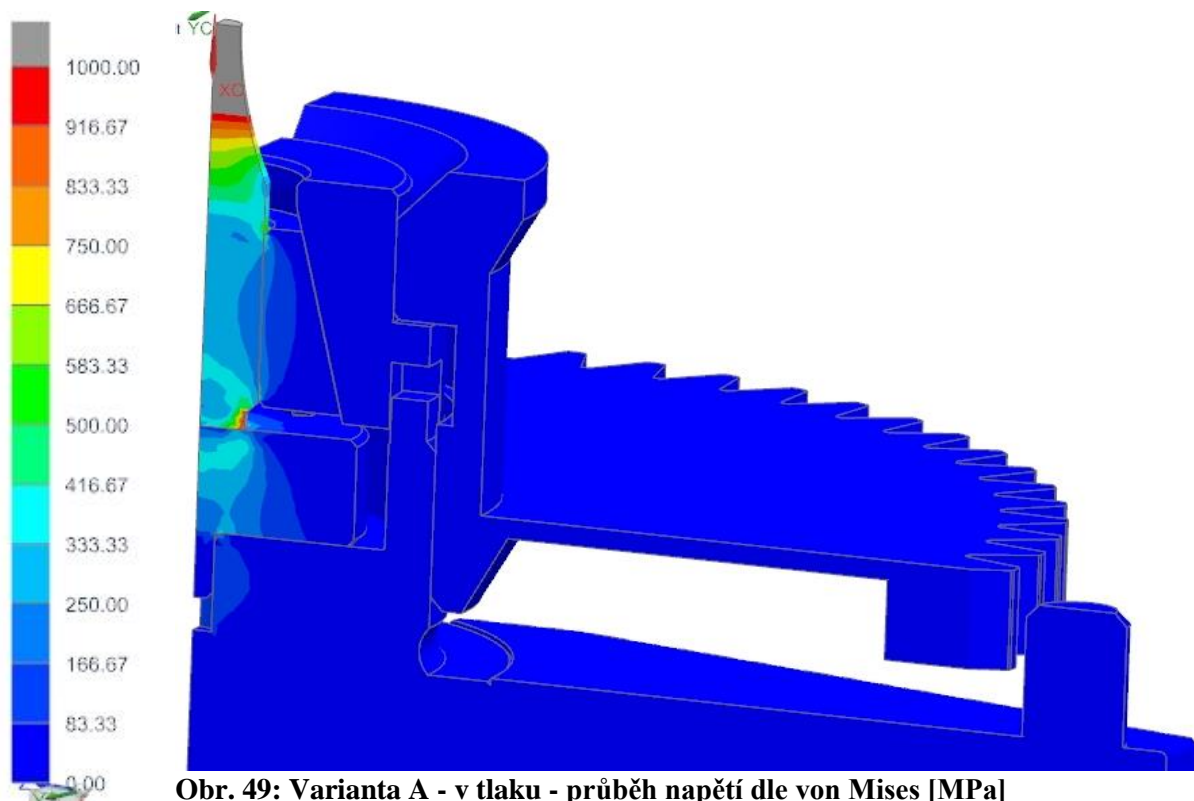
Maximální napětí této varianty je 1989 MPa, to jest napětí na vzorku v nejužším průřezu. Jak je vidět na Obr. 46, i na Obr. 47 a Obr. 48 je u této varianty úplně jiný průběh napětí v tahu. Tento průběh je výrazně příznivější než u stávající varianty, napětí je více rozloženo i na další části závitu včetně ostatních součástí, ve kterých je zkušební vzorek upnut.



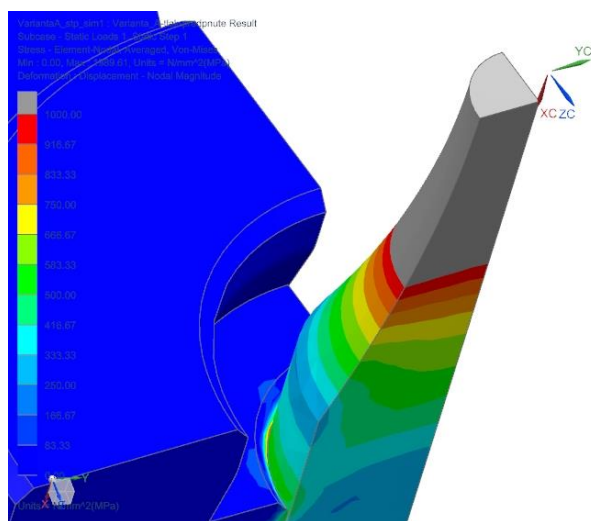
Obr. 47: Varianta A (tah) - detail začátku závitu - von Mises [MPa]



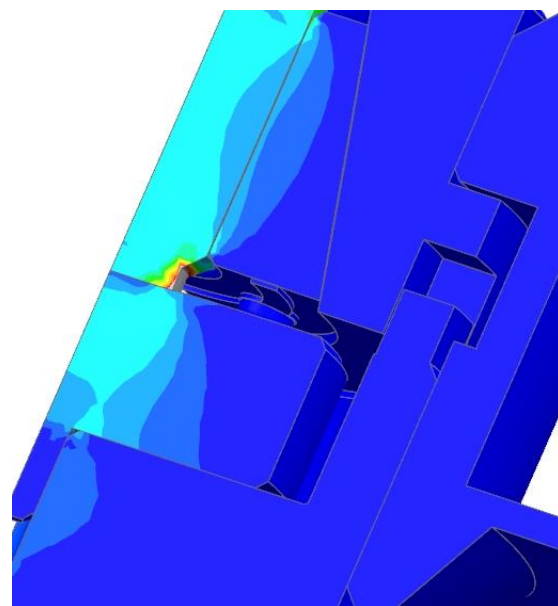
Obr. 48: Varianta A (tah) - detail 2 - von Mises [MPa]



Maximální napětí v tlaku je stejné jako u tahu, zvolená stejná síla jen opačně orientovaná a minimální průřez zkušební tyče zůstává. Na Obr. 49 je vidět, že průběh napětí v tlaku je téměř stejný jako u původní varianty a to z toho důvodu, že se pro zatížení v tlaku nezměnili žádné podmínky a nejsou tam žádné členy navíc, které by zadržovali zatížení v tomto směru. Působící zatížení v tlaku je zachycováno pouze distanční podložkou, kterou podpírá upínací hlava.

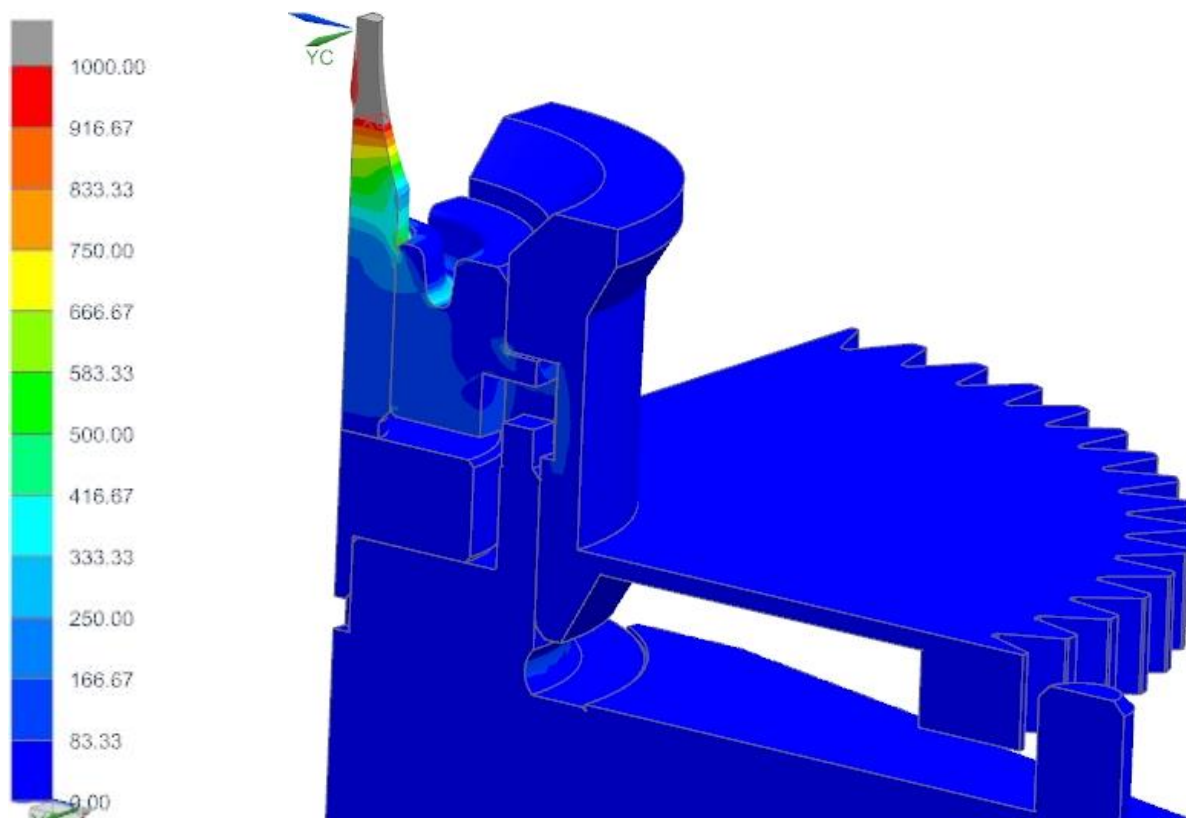


Obr. 50: Varianta A (tlak) - detail - von Mises [MPa]



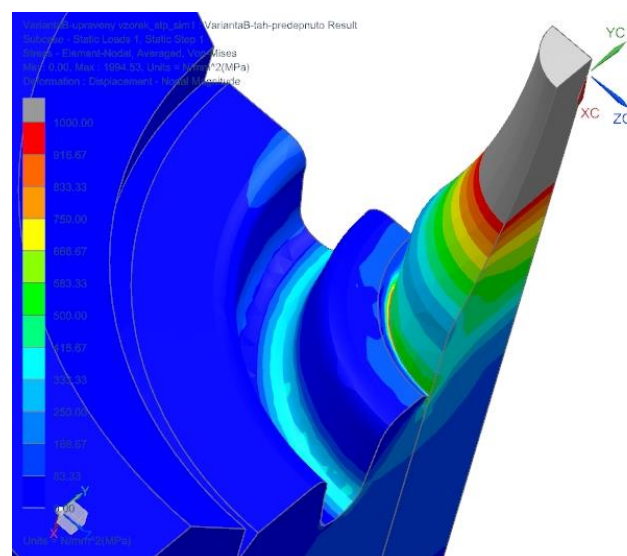
Obr. 51: Varianta A (tlak) - detail 2 - von Mises [MPa]

4.2.3. Varianta B

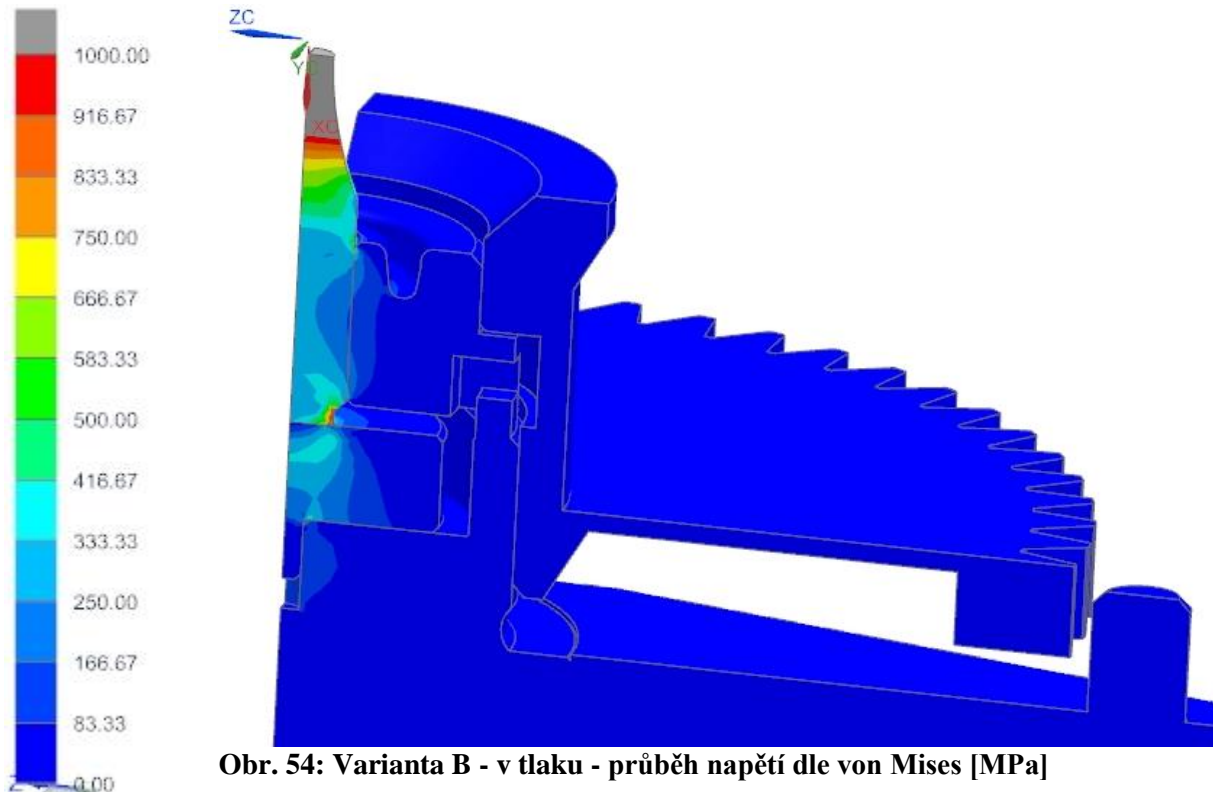


Obr. 52: Varianta B - v tahu - průběh napětí dle von Mises [MPa]

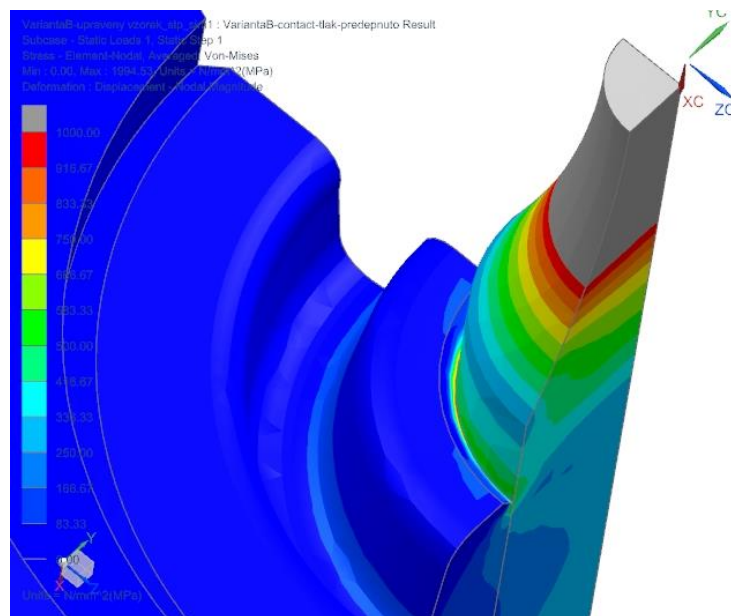
Maximální napětí v tahu této varianty je 1994 MPa, jak se i zde potvrdilo, napětí zůstává téměř stejné těsně pod hranicí 2000 MPa, z důvodu použití síly o stejné velikosti a nejmenší průřez vzorku také zůstává. Chování této varianty je podobné původnímu řešení z důvodu konstrukční podobnosti, kdy je využita změna tvaru upínací vložky pro lepší rozložení napětí podél závitu. Na Obr. 52 je vidět, že průběh napětí je vhodnější než původní řešení, ale rozdíl není příliš výrazný.



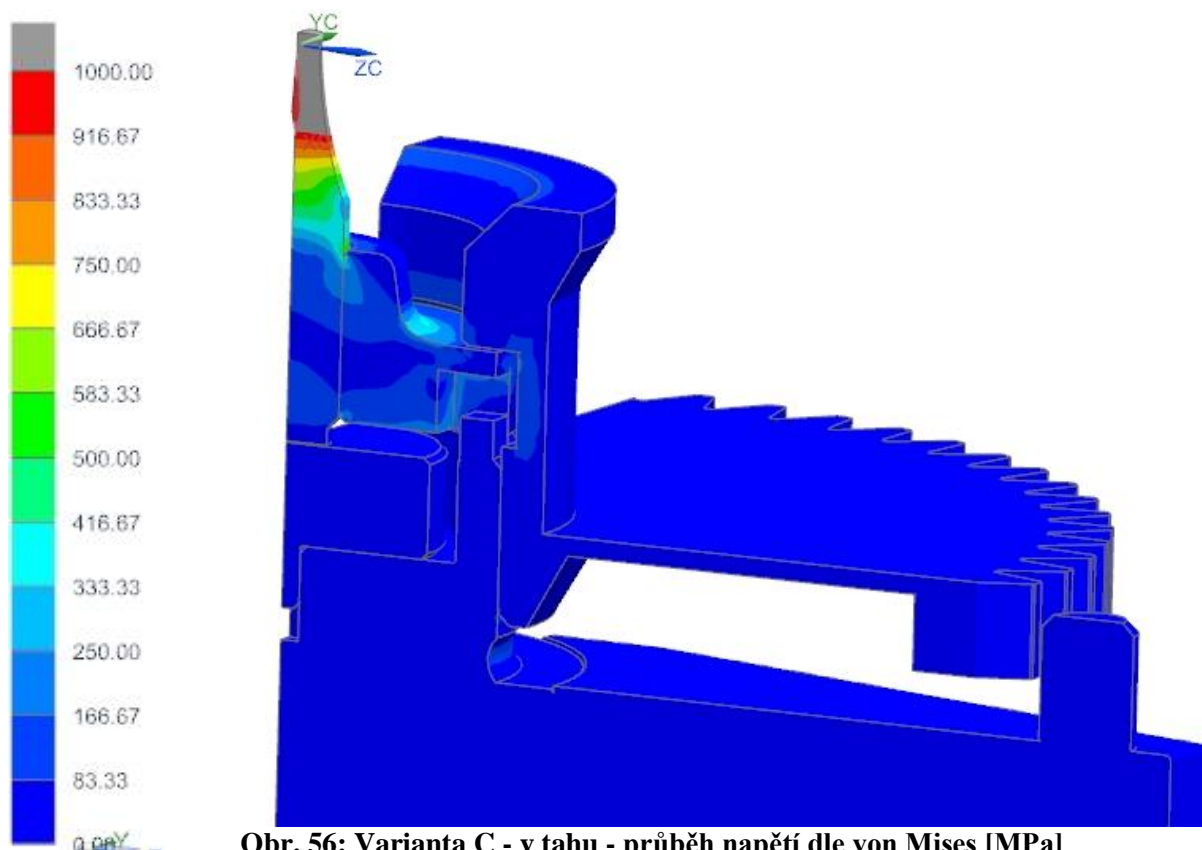
Obr. 53: Varianta B (tah) - detail - von Mises [MPa]



Maximální napětí v tlaku je stejné jako v tahu, důvody byly již několikrát uvedeny. Průběh napětí v tlaku (Obr. 54) na všech součástech je prakticky stejný jako u předchozích variant, protože se pro zadržení síly v tlaku u variant nic nezměnilo.

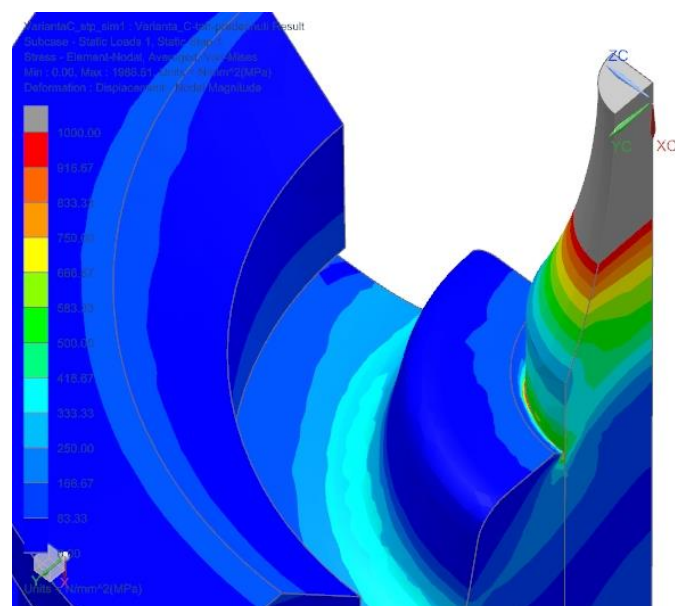


4.2.4. Varianta C

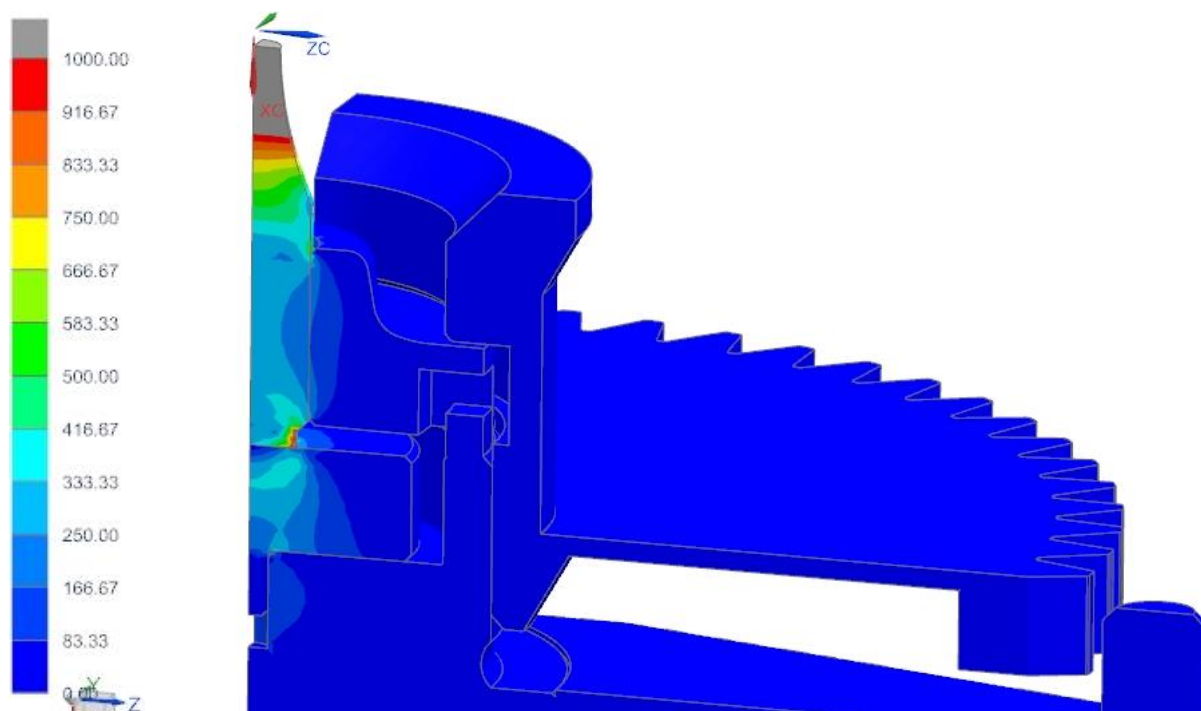


Obr. 56: Varianta C - v tahu - průběh napětí dle von Mises [MPa]

Maximální napětí je 1988 MPa, jeho hodnota se tedy téměř nemění a to ze stejných důvodů, jaké byly uvedeny u předchozích variant. Z Obr. 56 je zřejmé, že průběh napětí podél závitů zkušební vzorku je výhodnější oproti původnímu řešení i variantě B.

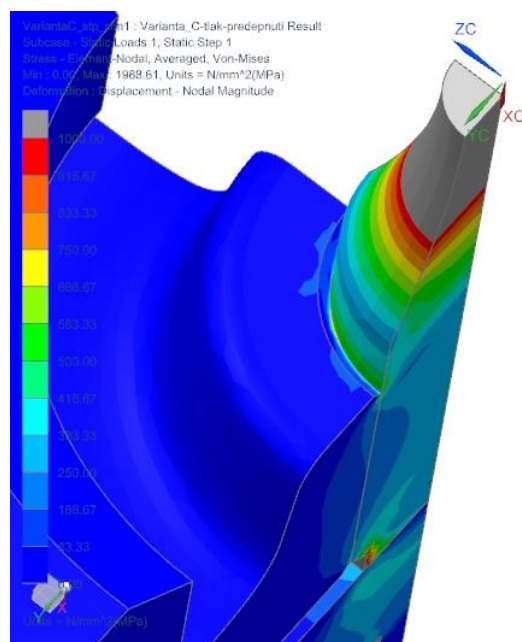


Obr. 57: Varianta C (tah) - detail - von Mises [MPa]



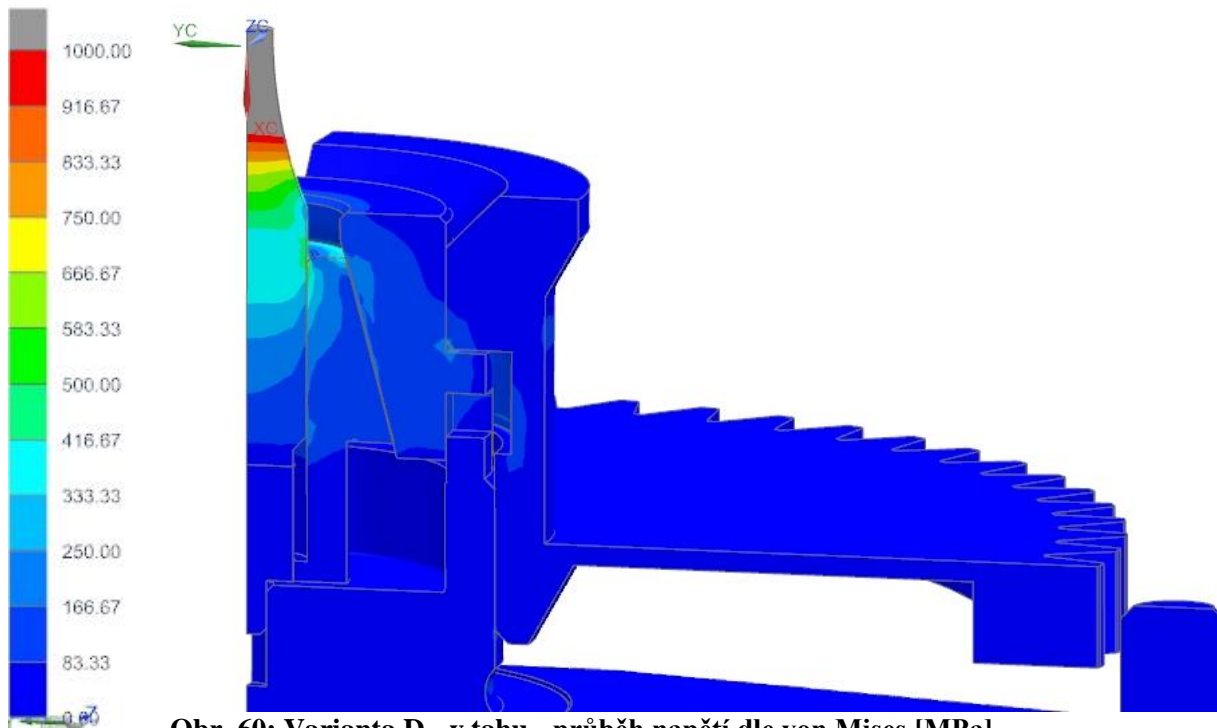
Obr. 58: Varianta C - v tlaku - průběh napětí dle von Mises [MPa]

Na Obr. 58 je patrné, že průběh napětí v tlaku se nezměnil ani u varianty C. Příčinou je stejný důvod jako u variant A i B, kterým jsou chybějící členy, které by zachytily sílu v opačném směru.



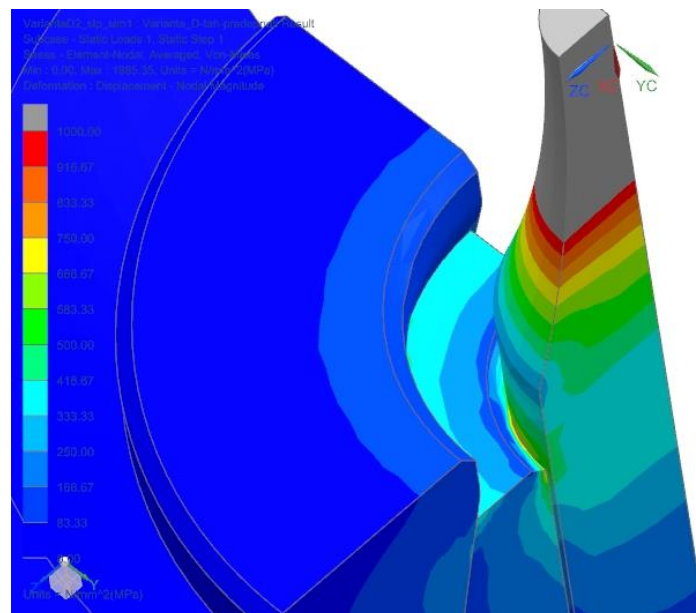
Obr. 59: Varianta C (tlak) - detail - von Mises [MPa]

4.2.5. Varianta D

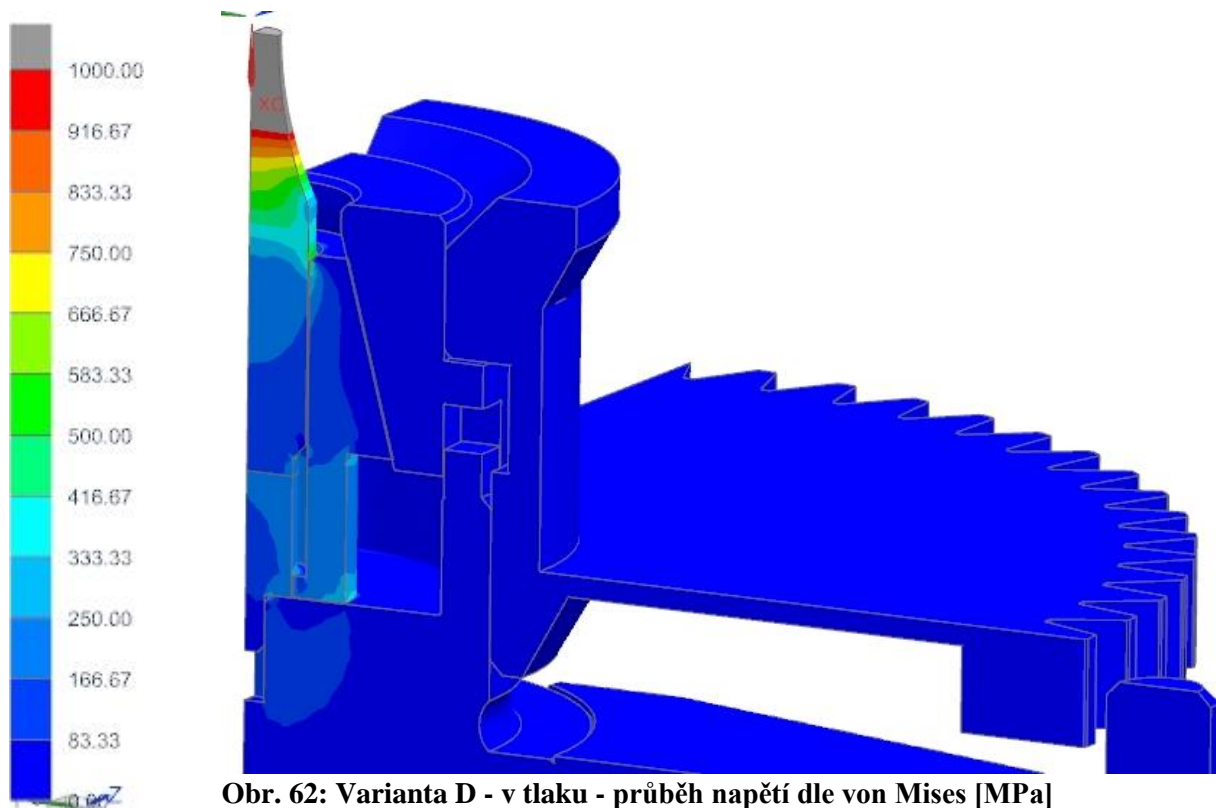


Obr. 60: Varianta D - v tahu - průběh napětí dle von Mises [MPa]

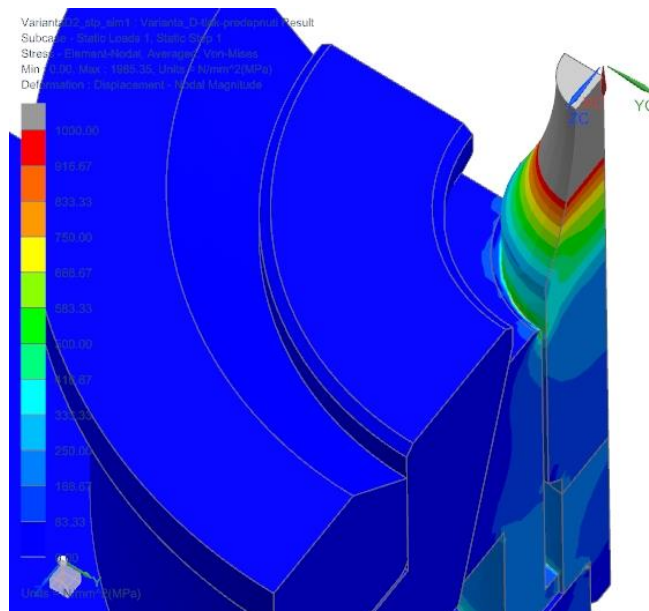
Maximální napětí je 1985 MPa, tedy pořád téměř stejné jako u všech ostatních variant. Podle vyhodnocení varianty D na Obr. 60 je zřetelně lepší průběh napětí než u varianty B a C a srovnatelný s variantou A, z důvodu podobného principu.



Obr. 61: Varianta D (tah) - detail - von Mises [MPa]



Z Obr. 62 je patrné, že varianta D je ze všech variant nejlepší, co se týče průběhu napětí ve zkušební vzorku při zatížení v tlaku. To je způsobeno tím, že síla je přenášena nejen dosedací plochou mezi vzorkem a distanční podložkou (musí být v kleštině našroubován do konce), ale i přes závit zkušební vzorku a tělo kleštiny, která je opřena o vnitřní plochu upínací hlavy stroje.



Obr. 63: Varianta D (tlak) - detail - von Mises [MPa]

4.3. Zhodnocení a výběr vhodné varianty

Tato podkapitola je zaměřena na volbu nejvýhodnější varianty podle vybraných kritérií, kterým byla přiřazena jejich důležitost – váha kritéria. Kritéria jsou zpracovány do tabulky s jednotlivými variantami a ohodnoceny známkou podle vhodnosti. V závěru jsou body sečteny a vyhodnocena výsledná nejvhodnější varianta.

Nejdůležitějším požadavkem je zajištění rovnoměrného rozložení napětí podél závitu a to buď snížením tuhosti upínacího členu, nebo sevřením závitu. Dalším důležitým kritériem byla jednoduchost upínání zkušební vzorku, aby bylo rychlé, snadné a odolné vůči chybnému upnutí. Pro volbu varianty je také vhodné přihlídnout ke složitosti výroby upínacích členů a složitost demontáže přetrženého vzorku po zkoušce.

Kritérium	Váha kritéria	Varianta A	Varianta B	Varianta C	Varianta D	Ideální varianta
Rovnoměrné zatížení závitu	5	4	2	3	5	5
Jednoduchost upínání	4	3	5	5	4	5
Jednoduchost výroby	3	2	4	5	3	5
Demontáž vzorku	2	4	5	5	3	5
Součet	-	46	52	60	56	70

Tab. 3: kritériální rozhodovací tabulka výběru varianty

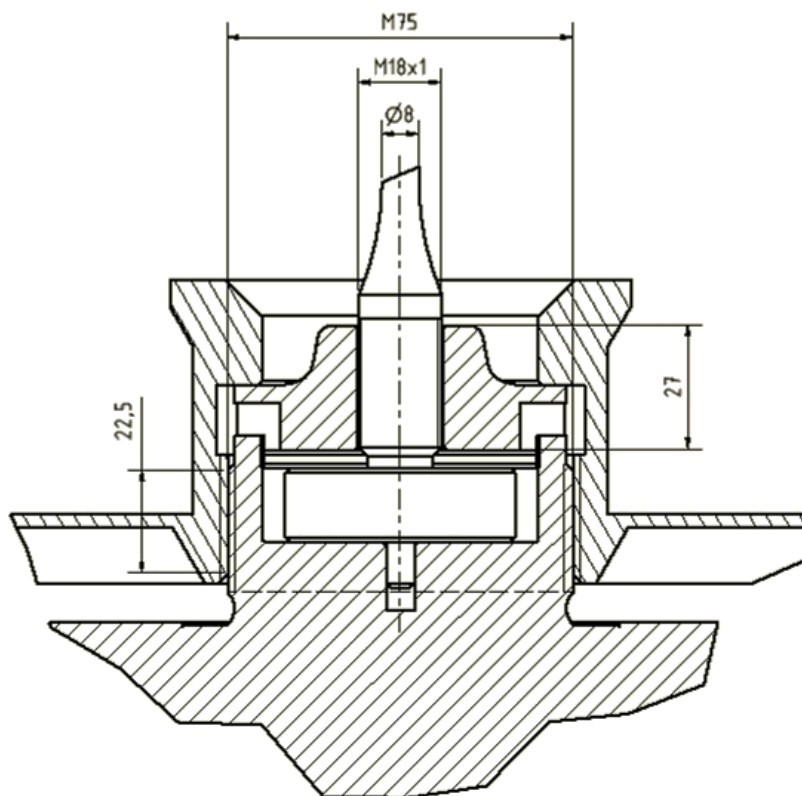
Nejvhodnější variantou je varianta C (Obr. 36), která má oproti ostatním variantám určité výhody, například jednoduchou výrobu, upínání vzorku i demontáž vzorku po přetržení a především podobnost konstrukce s původním řešením. Naopak oproti variantám, u kterých je napětí rozkládáno na závit pomocí sevření (A i D) má tuto schopnost horší. Varianta D byla zavrhnuta především proto, že po přetrnutí vzorku by mohl být problém demontovat vzorek z kleštiny a složitost výroby. Varianta A byla zase zavrhnuta pro svou složitou výrobu a obtížné upínání vzorků. V závěru je potřeba dodat, že ideální varianta, která by všechna kritéria splňovala na 100%, by v bodovém hodnocení obdržela 70 bodů. Varianta C získala 60 bodů, z čehož plyne, že je variantou, která je nejvhodnější kombinací uvedených řešení.

4.4. Materiál konstrukčních součástí přípravku

Materiál zůstává u většiny součástí přípravku stejný jako u původního řešení, jelikož všechny součásti není třeba měnit. Jedná se o utahovací kotouč a distanční podložku. U upínací vložky proběhla změna tvaru, to ale neznamená, že je potřeba měnit i materiál. Je vhodné, aby materiál měl větší pevnost než zkušební vzorek, aby nemohlo docházet k vymačkání nebo jinému poškození závitu ve vložce. Ve styku vložky s ostatními součástmi by nemělo docházet k velkým deformacím a tudíž ani k poškození ploch a v případě, že by k nějakému vymačkání došlo, je možné tyto plochy opravit, protože výška vložky se může v malé míře změnit a tato změna je vymezena utáhnutím kotouče. Nejvhodnějším materiálem by byla nástrojová ocel s vysokou mezí pevnosti v tahu i tlaku, vhodná k povrchovému kalení.

5. Doplnková kontrola pevnosti společných konstrukčních uzlů

Vzhledem ke kapitole 4.2., kde byla na všech variantách provedena analýza pevnosti pomocí metody konečných prvků (MKP), kterou lze považovat za kontrolu pevnosti vybrané varianty, již není nutné provádět další kontrolu pevnosti všech součástí. Proto je tato kapitola určena jen pro ověření maximální hodnoty napětí na vzorku získané MKP analýzou a pro určení pevnosti použitých závitů, protože právě ty byly při MKP analýze nahrazeny vazbou „glue“ a kontaktní tlak v závitech byl zanedbán. Na Obr. 64 je detail sestavy se zakótovanými potřebnými rozměry.



Obr. 64: detail poloviny sestavy s rozměry

5.1. Výpočet napětí zkušební vzorku

Při zatížení silou $F = 100\,000\text{ N}$, která byla požadována na výdrž čelistí. Vzorek je s nejmenším $\varnothing d = 8\text{ mm}$.

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{\frac{\pi \cdot d^2}{4}} = \frac{100\,000}{\frac{\pi \cdot 8^2}{4}} = 1\,989,44\text{ MPa}$$

Napětí vypočtené analyticky, se shoduje s napětím, které vykazují varianty vypočtené pomocí MKP analýzy.

5.2. Výpočet závitů

Kontrola použitých závitů na zkušebním vzorku M18x1 o délce 27 mm a na upínací hlavě M75x3 o délce 22,5 mm.

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{0,5 \cdot \pi \cdot d_2 \cdot H_1 \cdot \frac{L_m}{p_H}} \quad (4)$$

$$p_{18} = \frac{F}{S} = \frac{100\,000}{0,5 \cdot \pi \cdot 17,675 \cdot 0,541 \cdot \frac{27}{1}} = 246,58 \text{ MPa}$$

$$p_{75} = \frac{F}{S} = \frac{100\,000}{0,5 \cdot \pi \cdot 73,051 \cdot 3,248 \cdot \frac{22,5}{3}} = 35,77 \text{ MPa}$$

Vzhledem k hodnotám tlaku, by závity při použití jakékoliv vysoko pevnostní oceli měly vyhovovat a splňovat bezpečnost závitů.

6. Závěr

Tato bakalářská práce je soustředěna na téma zkoušení materiálu, konkrétně na dynamické zkoušky. Hlavním zaměřením je zkoušení únavy materiálu střídavým zatížením v tahu a tlaku u vzorků se závitem a problematika, která tyto zkoušky provází. Jedná se o zkoušky prováděné na magnetořonančním zkušebním stroji, jinak označovaným jako vysokofrekvenční pulzátor.

Hlavním cílem práce je návrh čelistí pro upínání vzorků se závitem (Obr. 20) při zkoušce meze únavy v magnetořonančním stroji – Vibrophoru. Požadavkem na nové čelisti je eliminovat nedostatky stávajícího řešení, zachování jeho předností a samozřejmě dosažení lepších výsledků při zkoušce, tzn. přesné výsledky bez nežádoucích odchylek a chyb.

Součástí práce je zpracování teorie o zkouškách únavy a zkušebních strojích, které se pro tyto zkoušky využívají. Dále je provedena specifikace problému a požadavků kladených na nové čelisti. Na základě požadavků jsou shrnuty technické a upínací možnosti stroje, průzkum trhu z hlediska upínání tvarově podobných zkušebních vzorků a následný návrh možných variant. S návrhem variant je spojena modelová dokumentace všech navržených variant včetně stávajícího řešení a vytvoření modelu celého zkušebního stroje, zpracovaná v programu Autodesk Inventor 2012.

Další důležitou částí stroje byla pevnostní analýza v tlaku a tahu stávajícího řešení a všech navržených variant pomocí metody konečných prvků (MKP) v programu Siemens NX 8.5. Výsledky výpočtů byly zpracovány a porovnány. V tahu se výsledky MKP analýzy lišily u všech variant v závislosti na tuhosti upnutí vzorku a síle sevření závitu, nejlépe dopadly varianty, které ke zvýšení rovnoměrnosti napětí podél závitu využívají většího sevření závitu pomocí kuželového tvaru čelistí a protikusů, vyvozujícího při zatížení tlak na závit. V tlaku výsledky MKP analýzy vycházely v podstatě stejně kromě varianty D, u které je síla v tlaku zachycena pomocí celistvé konstrukce čelisti. Zachycení zatížení v tlaku není prioritou, protože při zatížení tlakem není rizikové porušení zkušebního vzorku právě v problémové oblasti prvních závitů zkušebního vzorku jako při zatížení v tahu, ale je důležité znát i napětí při zatížení tlakem z hlediska zjišťování střední hodnoty kmitu, protože pro jeho určení je potřeba znát horní i dolní napětí kmitu.

Při následné rozhodovací analýze pomocí bodového hodnocení variant (Tab. 3) byla vybrána jako nejvhodnější varianta C, i přes to, že varianta A i D mají lepší vlastnosti při rozložení napětí. Varianta C je výrobně podstatně jednodušší, díky podobnosti s původním řešením lze říci, že bude fungovat a upínání vzorku je také snadné.

Na závěr byla provedena kontrola tlaku v závitech, protože ty byly v MKP zanedbány, jinak lze považovat MKP analýzu za pevnostní kontrolu navrženého přípravku.

Seznam použitých zdrojů

- [1] DYLAĞ, Z., ORŁOS, Z. *Únava materiálu a její zkoušení*. PRAHA: SNTL, 1968.
- [2] SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R., BENEDIKT, V. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: ZČU v Plzni, 2005. ISBN 80-7043-417-1.
- [3] SILBERNAGEL, A., HRUBÝ, V., GREGER, M., NĚMEC, J. *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*. 1.vydání. Ostrava: Kovosil Ostrava, 2011, 284 s. ISBN 978-80-903694-6-7.
- [4] HÖSCHL, C. *Únava materiálu při periodickém zatěžování*. Praha: Dům techniky ČSVTS Praha, 1981.
- [5] BOLEK, A., KOCHMAN, J. a kol. *Části strojů*. 5.vydání. Praha: SNTL, 1989.
- [6] *Zwick Roell: Servohydraulické zkušební stroje* [online]. [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <<http://www.zwick.cz/cs/produkty/stroje-pro-dynamicke-zkouseni/servohydraulicke-zkusebni-stroje/vyrobnirada-ha-od-50-do-500-kn.html>>
- [7] *Zwick Roell: Vysokofrekvenční pulzátory* [online]. [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <<http://www.zwick.cz/cs/produkty/stroje-pro-dynamicke-zkouseni/vysokofrekvencni-pulzatory-od-5-do-550-kn.html>>
- [8] *Zwick Roell: Upínací přípravky* [online]. [cit. 2014-11-22]. Dostupné z: <<http://www.zwick.cz/cs/produkty/upinaci-pripravky/upinaci-celisti-pro-zkouseni-vzorku-s-osazenim-nebo-zavitovymi-hlavami.html>>
- [9] *LABTECH: Čelisti a přípravky pro Criterion 60* [online]. [cit. 2014-11-24]. Dostupné z: <<http://www.zkusebni-stroje.cz/pripravky-pro-zkousky-vzorku-s-vnejsim-nebo-vnitrim-zavitem-nebo-s-valcovou-hlavou.html>>
- [10] *SHIMADZU: Hydraulický zkušební stroj typu UH-X/FX série* [online]. [cit. 2014-11-24]. Dostupné z: <<http://www.testsysteme.cz/cz/produkty/univerzalni-zkusebni-stroje-materialu/zkusebni-trhaci-stroje-pro-staticke-zkousky-pevnosti-materialu/hydraulicky-zkusebni-stroj-typu-uh-x-fx-serie.html>>

Vzorce

- (1) SILBERNAGEL, A., HRUBÝ, V., GREGER, M., NĚMEC, J. *Struktura, vlastnosti, zkoušení a použití kovů*. 1.vydání. Ostrava: Kovosil Ostrava, 2011, 284 s. ISBN 978-80-903694-6-7.
- (2),(3) DYLAĞ, Z., ORŁOS, Z. *Únava materiálu a její zkoušení*. PRAHA: SNTL, 1968.
- (4) ... Hosnedl, S. *Podklady k přednáškám z CMSI*.

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1: vlivy na materiál [4].....	3
Obr. 2: Wöhlerův diagram [3].....	4
Obr. 3: Wöhlerův diagram – polologaritmický [3]	4
Obr. 4: časovaná mez únavy [2].....	4
Obr. 5: kmit napětí [2].....	5
Obr. 6: typy kmitů [3]	6
Obr. 7: vznik únavových trhlin podle Cotrella a Hulla [3]	7
Obr. 8: vzhled únavového lomu [2]	7
Obr. 9: Smithův diagram [2]	7
Obr. 10: rozdělení únavy podle počtu kmitů [2]	8
Obr. 11: výsledek zkoušky vysokokmitové únavy [2].....	9
Obr. 12: výsledek zkoušky nízkokmitové únavy [2].....	9
Obr. 13: zkouška únavy ohybem za rotace [3].....	12
Obr. 14: zjednodušené schéma oboustranného hydraulického pulsátoru [1].....	12
Obr. 15: servohydraulický zkušební stroj (fy Zwick Roell) [6].....	13
Obr. 16: princip rezonančního stroje se setrvačným buzením [1].....	14
Obr. 17: princip rezonančního stroje s el. mag. buzením [1]	15
Obr. 18: schéma vysokofrekvenčního rezonančního pulsátoru fy Amsler [1].....	16
Obr. 19: vysokofrekvenční pulzátor Amsler 30 HFP 5100 (fy Zwick Roell) [7]	16
Obr. 20: zkušební vzorek fy COMTES FHT č. v. C-000-116	17
Obr. 21: vysokofrekvenční pulzátor ve firmě COMTES FHT.....	18
Obr. 22: vytvořený model pulzátoru s popisem (Inventor 2012).....	19
Obr. 23: stávající způsob upnutí vzorku.....	20
Obr. 24: upínání vzorku se závitem [8].....	21
Obr. 25: detail [8]	21
Obr. 26: upínání vzorku se závitem pomocí čelistí s klínem [9].....	21
Obr. 27: klínové čelisti s dvěma vložkami pro vzorek se závitem [10]	22
Obr. 28: detail čelistí [10]	22
Obr. 29: rozdíly průběhu napětí v závitech [5]	23
Obr. 30: úpravy matice pro rovnoměrnější rozložení síly na jednotlivé závity [5]	23
Obr. 31: Varianta A.....	25
Obr. 32: čelist varianty A	26
Obr. 33: vložka varianty B	26
Obr. 34: Varianta B	27

Obr. 35: vložka varianty C	27
Obr. 36: Varianta C	28
Obr. 37: Varianta D	29
Obr. 38: kleština varianty D	29
Obr. 39: zjednodušení varianty stávajícího řešení pro výpočet.....	30
Obr. 40: vazba "contact" - definované předpětí	31
Obr. 41: nasíťovaný a zavazbený model stávajícího řešení upnutí vzorku.....	31
Obr. 42: stávající upnutí - v tahu - průběh napětí dle von Mises [MPa]	32
Obr. 43: detail napětí na začátku závitu vzorku (tah) - von Mises [MPa]	32
Obr. 44: stávající upnutí - v tlaku - průběh napětí dle von Mises [MPa].....	33
Obr. 45: detail napětí na začátku závitu vzorku (tlak) - von Mises [MPa]	33
Obr. 46: Varianta A - v tahu - průběh napětí dle von Mises [MPa].....	34
Obr. 47: Varianta A (tah) - detail začátku závitu - von Mises [MPa]	34
Obr. 48: Varianta A (tah) - detail 2 - von Mises [MPa]	34
Obr. 49: Varianta A - v tlaku - průběh napětí dle von Mises [MPa].....	35
Obr. 50: Varianta A (tlak) - detail - von Mises [MPa]	35
Obr. 51: Varianta A (tlak) - detail 2 - von Mises [MPa]	35
Obr. 52: Varianta B - v tahu - průběh napětí dle von Mises [MPa]	36
Obr. 53: Varianta B (tah) - detail - von Mises [MPa]	36
Obr. 54: Varianta B - v tlaku - průběh napětí dle von Mises [MPa]	37
Obr. 55: Varianta B (tlak) - detail - von Mises [MPa]	37
Obr. 56: Varianta C - v tahu - průběh napětí dle von Mises [MPa]	38
Obr. 57: Varianta C (tah) - detail - von Mises [MPa]	38
Obr. 58: Varianta C - v tlaku - průběh napětí dle von Mises [MPa]	39
Obr. 59: Varianta C (tlak) - detail - von Mises [MPa]	39
Obr. 60: Varianta D - v tahu - průběh napětí dle von Mises [MPa].....	40
Obr. 61: Varianta D (tah) - detail - von Mises [MPa]	40
Obr. 62: Varianta D - v tlaku - průběh napětí dle von Mises [MPa].....	41
Obr. 63: Varianta D (tlak) - detail - von Mises [MPa]	41
Obr. 64: detail poloviny sestavy s rozměry.....	43