



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

PEVNOSTNÍ VÝPOČTY VYBRANÝCH SOUČÁSTÍ PALNÉ ZBRANĚ

STRESS-STRAIN CALCULATIONS OF SELECTED COMPONENTS OF
FIREARM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Pavlík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Slažanský

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Ondřej Pavlík
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Martin Slažanský
Akademický rok:	2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Pevnostní výpočty vybraných součástí palné zbraně

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Některé součásti zbraní jsou při výstřelu extrémně namáhané, což často vede k jejich zničení a nutné výměně za nové. U pistolí se jedná například o čep záchyty závěru a úderník. Student provede deformačně napěťovou analýzu těchto součástí pomocí metody konečných prvků.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Prozkoumat možná řešení problému z dostupné literatury.
- 2) Provést deformačně napěťovou analýzu pomocí MKP v programu ANSYS.
- 3) Diskutovat výsledky a omezení výpočtového modelu.

Seznam literatury:

Janíček, P., Ondráček, E., Vrbka, J., Burša, J.,: Mechanika těles, Pružnost a pevnost I, skriptum VUT Brno, CERM, Brno 2004.

Ondráček, E., Vrbka, J., Janíček, P., Burša, J.: Mechanika těles. Pružnost a pevnost II. Cerm Brno, 2006.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

PAVLÍK, O. *Pevnostní výpočty vybraných součástí palné zbraně*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Slažanský.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Martina Slažanského a s použitím uvedené literatury a zdrojů.

V Brně, dne 26. května 2016

.....

Ondřej Pavlík

ABSTRAKT

Práce se zabývá vytvořením výpočtového modelu čepu záchyty závěru používaného u pistolí kategorie CZ-75, vyrobených v České zbrojovce Uherský Brod, a následnou deformačně napěťovou analýzou.

Výsledky analýzy jsou významně ovlivněny obtížnou dostupností relevantních a spolehlivých informací k danému problému. Na základě výsledků bylo rozhodnuto o bezpečnosti součásti z hlediska její pevnosti, výsledky jsou však velmi závislé na volbě některých vstupních parametrů. Závěrem je předložen návrh dalšího postupu ke zpřesnění výpočtového modelu.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Pistole; CZ-75; čep záchyty závěru; metoda konečných prvků (MKP); deformačně napěťová analýza.

ABSTRACT

This thesis deals with the utilization of the finite element method (FEM) in the development of a computational model. The subject of the computational model is the slide stop pin of the CZ 75 pistol, designed and manufactured in the Czech Republic by Česká zbrojovka Uherský Brod. The computational model describes the strain stress analysis of the slide stop pin.

The results of the analysis are subject to the difficult sourcing of relevant and reliable input information. Based on the stress strain analysis results, the safety factor of the pin was determined. However, the results are influenced a lot by the selection of input parameters. At the conclusion, a summary of proposed further steps for increasing the accuracy of the computational model is proposed.

KEY WORDS:

Pistol; CZ-75; slide stop pin; finite element method (FEM); strain stress analysis.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat hlavně vedoucímu práce, Ing. Martinu Slažanskému, který mi ochotně poskytnul nejen konzultace, ale i cenné rady, připomínky a vždy mě dokázal správně nasměrovat k řešení problémů, se kterými jsem se při tvorbě této práce potýkal.

Poděkování patří také spolužákům, kteří byli ochotní o práci diskutovat a motivovat mě k usilovné práci při hledání řešení. V neposlední řadě chci poděkovat rodičům, kterým záleželo na tom, abych mohl studovat to, co mě zajímá a baví a vždy mě plně podporovali.

OBSAH

1 ÚVOD	9
2 ÚVOD DO STŘELNÝCH ZBRANÍ	10
2.1 KLASIFIKACE ZBRANÍ	10
2.1.1 Klasifikace dle předávání ranivého účinku	10
2.1.2 Klasifikace z právního hlediska	11
2.2 PALNÉ ZBRANĚ	11
2.3 PISTOLE	13
2.3.1 Hlavní a vedlejší části pistole	13
2.3.2 Mechanismy pistolí	15
2.3.3 Krátký zákluz hlavně s poklesem	15
3 REŠERŠE MOŽNÝCH ZPŮSOBŮ ŘEŠENÍ.....	17
3.1 PRASKÁNÍ ČEPU.....	17
3.2 ÚNAVOVÉ PORUŠENÍ	18
3.2.1 Stádia trhliny	19
3.2.2 Iniciační trhliny.....	19
3.2.3 Stabilní šíření trhliny	20
3.2.4 Nestabilní šíření trhliny	20
3.3 MOŽNÁ ŘEŠENÍ ÚNAVOVÉHO PORUŠENÍ.....	20
3.3.1 Základní způsoby oddálení únavového lomu	20
3.3.2 Chemickotepelné zpracování	20
3.3.3 Kuličkování, válečkování	20
3.3.4 Polymerový povlak	21
3.3.5 Ultrasonické impaktní ošetření.....	21
3.4 MOŽNÁ ŘEŠENÍ PRASKÁNÍ ČEPU	21
3.4.1 Vratná pružina závěru	21
3.4.2 Přetížení do plastických deformací	21
3.4.3 Upravení tolerancí	21
3.4.4 Zastavení hlavně zářázkou	22
4 VYTVÁŘENÍ VÝPOČTOVÉHO MODELU	23
4.1 HLAVNÍ MYŠLENKA MKP.....	23
4.2 VÝBĚR METODY ŘEŠENÍ.....	23
4.3 MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY.....	24

4.4	MODEL GEOMETRIE	24
4.4.1	Geometrie hlavně	25
4.4.2	Geometrie čepu.....	26
4.4.3	Geometrie rámu zbraně	27
4.5	KONTAKTY	28
4.5.1	Hlaveň – Čep.....	28
4.5.2	Čep – rám zbraně.....	29
4.6	MODEL OKRAJOVÝCH PODMÍNEK	30
4.6.1	Okrajové podmínky vyplývající z geometrické symetrie	30
4.6.2	Vymezení pohybu	31
4.6.3	Zatížení.....	32
4.6.4	Zpětné zatížení	34
4.7	SÍŤ KONEČNÝCH PRVKŮ	36
5	CITLIVOSTNÍ ANALÝZA SÍTĚ	37
6	ANALÝZA VÝSLEDKŮ	39
7	ZÁVĚR	42
8	SEZNAM OBRÁZKŮ	43
9	ZDROJE	44

1 ÚVOD

Zbraně provází člověka již od samotných počátků. Sloužily jak k získávání potravy, tak k zastrašování, či porážení nepřátel a samotný vývoj zbraní jde s technickým pokrokem ruku v ruce. Zbraně palné, o kterých budeme dále pojednávat, vstoupily do dějin s objevením černého, později bezdýmného, střelného prachu a jsou neustále zdokonalovány za použití nejmodernějších metod, technologických postupů i materiálů. Ve 20. století prošly zbraně větší revolucí než za celou jejich dřívější historii.

V České republice vlastnilo ke dni 31. 12. 2015 zbrojní průkaz (dále jen ZP) 292 022 osob [1], počet legálně držených zbraní tento rok překročil 800 000 a dále stoupá. Mezi tyto držitele ZP se řadí jak myslivci a příslušníci ozbrojených složek, tak i silně zastoupení amatérští a sportovní střelci. ZP si po složení zkoušek způsobilosti může pořídit každý bezúhonný zdravotně způsobilý občan. Jelikož v posledních letech myslivců spíše ubývá [2], zatímco počet držitelů zbrojních průkazů zůstává stejný, nejvíce Čechů si dnes kupuje zbraň k sebeobraně a sportovní střelba je na druhém místě [3]. Tyto podmínky více svědčí zbraním krátkým, mezi něž se řadí také pistole CZ-75 České zbrojovky (CZUB). Zejména varianty CZ-75B a SP-01, které se řadí mezi světovou špičku. To dokazuje i oblíbenost v IPSC střelbě (International Practical Shooting Confederation), kde se v popularitě řadí na 3. místě [4]. Právě variantou CZ-75B se tato práce dále zabývá.

Jelikož jsou v dnešní době na spolehlivost kladeny čím dál vyšší nároky, je potřeba dimenzovat zbraně na desetitisíce výstřelů. To vede k extrémnímu namáhání některých součástí. Jedná se především o opotřebování hlavně a tím sníženou přesnost, nebo únava pružin a tím sníženou spolehlivost, kdy se nemusí při výstřelu nabít další náboj. Další problémy týkající se životnosti pak souvisí s daným typem zbraně. Pro pistole kategorie CZ-75 se mezi problémy se spolehlivostí řadí především praskání čepu záchytu závěru, jehož funkcí je sklopení a zastavení hlavně při výstřelu.

Práce se zabývá právě zmiňovaným čepem záchytu závěru, přesněji jeho deformačně napět'ovou analýzou.

2 ÚVOD DO STŘELNÝCH ZBRANÍ

Podle legislativy můžeme za zbraň považovat jakýkoliv předmět, zbraní se stává v okamžiku jeho použití za účelem ublížení na zdraví. Nezáleží při tom, k čemu byl předmět původně určen [5].

2.1 Klasifikace zbraní

Zbraně je možné rozdělovat do skupin podle mnoha parametrů, zejména se tyto klasifikace liší podle způsobu jejich užití. Pro administrativu (klasifikace podle legislativy) bude zapotřebí jiné klasifikace než pro účely armádní (klasifikace podle kalibru). Jako jedno ze základních se dá uvést dělení podle principu předání ranivého účinku.

2.1.1 Klasifikace dle předávání ranivého účinku

Tučně jsou zvýrazněny kategorie pro model CZ-75B.

❖ *Chladné*

Úderné (kyj, palcát atd.): Velká hybnost zapříčiněná hmotností zbraně (často i improvizovaného předmětu). Fungování přímo úměrné fyzické síle jedince disponujícího zbraní.

Princip ostří čepel (Nůž, meč, sekera, kopí atd.): Ranivý účinek zajišťuje nejen schopnost a obratnost uživatele, ale také ostrost a provedení čepel.

❖ *Střelné*

Střele je udělena kinetická energie, která se jako dopadová energie předává cíli.

Střelné zbraně se dále dělí podle zdroje energie k pohybu střely:

Mechanické: Využití kumulované energie pružného prvku (luk, gumový prak), polohovou energii závaží (obléhač katapult), nebo také odstředivého pohybu (točivé praky).

Plynové: K vymrštění střely je využito stlačeného plynu, nejčastěji vzduchu nebo oxidu uhličitého (větrovky, vzduchovky, plynovky).

Palné: Střela je poháněna tlakem plynů, vzniklých hořením chemické látky.

2.1.2 Klasifikace z právního hlediska

V příloze č. 1) zákona o střelných zbraních a střelivu (č. 119/2002 Sb.) je uvedeno: „Střelná zbraň je zbraň, u které je funkce odvozena od okamžitého uvolnění energie při výstřelu, zkonstruovaná pro požadovaný účinek na definovanou vzdálenost.“ [2]

Podle zákona dělíme zbraně do 4 kategorií:

- Zakázané zbraně, zakázané střelivo nebo zakázané doplňky zbraní: **Kategorie A**
Jedná se o automatické zbraně, tlumiče atd.
- Zbraně podléhající povolení: **Kategorie B**
Především pistole a revolvery.
- Zbraně podléhající ohlášení: **Kategorie C**
Dlouhé zbraně jako opakovací kulovnice, brokovnice atd.
- Ostatní zbraně: **Kategorie D**
Luky, praky, některé plynovky (podle energie slabší), staré zbraně atd.

2.2 Palné zbraně

Princip palných zbraní spočívá ve využití tlaku plynů vzniklých hořením chemické složky k udělení kinetické energie střele. Nejčastěji se při tom jedná o střelný prach. Střela bývá např. pomocí drážkování hlavně pro lepší přesnost stabilizována rotací.

Klasifikace je možná podle několika přístupů. Pro požadavky armády bývá vhodné rozdělení dle velikosti, případně kalibru zbraně.

- ❖ *Těžké zbraně* (Houfnice, kanóny, lodní děla) – Z názvu je patrné, že jde o zbraně velké, ráže se obvykle pohybují nad 40 mm, velká lodní děla mohou dosahovat ráží nad 50 cm. Váha se pohybuje v tunách.
- ❖ *Lehké zbraně* (Těžké kulomety, minomety) – V rozloženém stavu se dají přemísťovat ručně, k jejich obsluze bývá několikačlenná obsluha. Ráže těchto zbraní může být také značná (120mm minomety pro nepřímou střelbu atd.)
- ❖ *Ruční zbraně* – Přenosné jedním člověkem. Horní hranice ráže je 20mm kdy se jedná o extrém převážně antimateriálových pušek. Účinný dostřel těchto zbraní může být až 3 km (výkonné náboje .338 Lapua magnum, nebo .50 BMG).

Ruční zbraně lze dále klasifikovat podle délky (členění na krátké a dlouhé zbraně je uvedeno i v zákoně 119/2001 Sb. o střelných zbraních a střelivu.):

- **Krátké** - Ruční palné zbraně s délkou hlavně maximálně 300 mm a celkovou délkou nepřesahující 600 mm. Konstrukce je primárně navržena ke střelbě jednou rukou. Krátké zbraně se dále dělí:
 - Revolvery* – Víceranné, náboje jsou umístěné v otočném válci, v dnešní době bývají nahrazovány pistolemi hlavně z důvodu malé kapacity zásobníku a nízké rychlosti střelby a přebíjení.
 - Pistole* – Nabití náboje se realizuje pohybem závěru. Díky energii od posledního výstřelu. Komplikovanější mechanismus oproti revolverům může ztížit odstranění poruchy na bojišti.
- *Dlouhé* - Dle zákona jiné zbraně než krátké (delší než 600mm). Konstrukce zbraně předpokládá držení při střelbě oběma rukama, často také opření pažby do ramene.

Z hlediska principu je možné palné zbraně klasifikovat podle stupně automatizace střelby:

- *Jednoranné*
- *Opakovací*
- **Samonabíjecí** – Pomocí energie od výstřelu se provede celý funkční cyklus zbraně a dojde k nabití nového náboje ze zásobníku do nábojové komory, na rozdíl od automatických již však nedojde k iniciaci dalšího výstřelu.
- *Automatické*

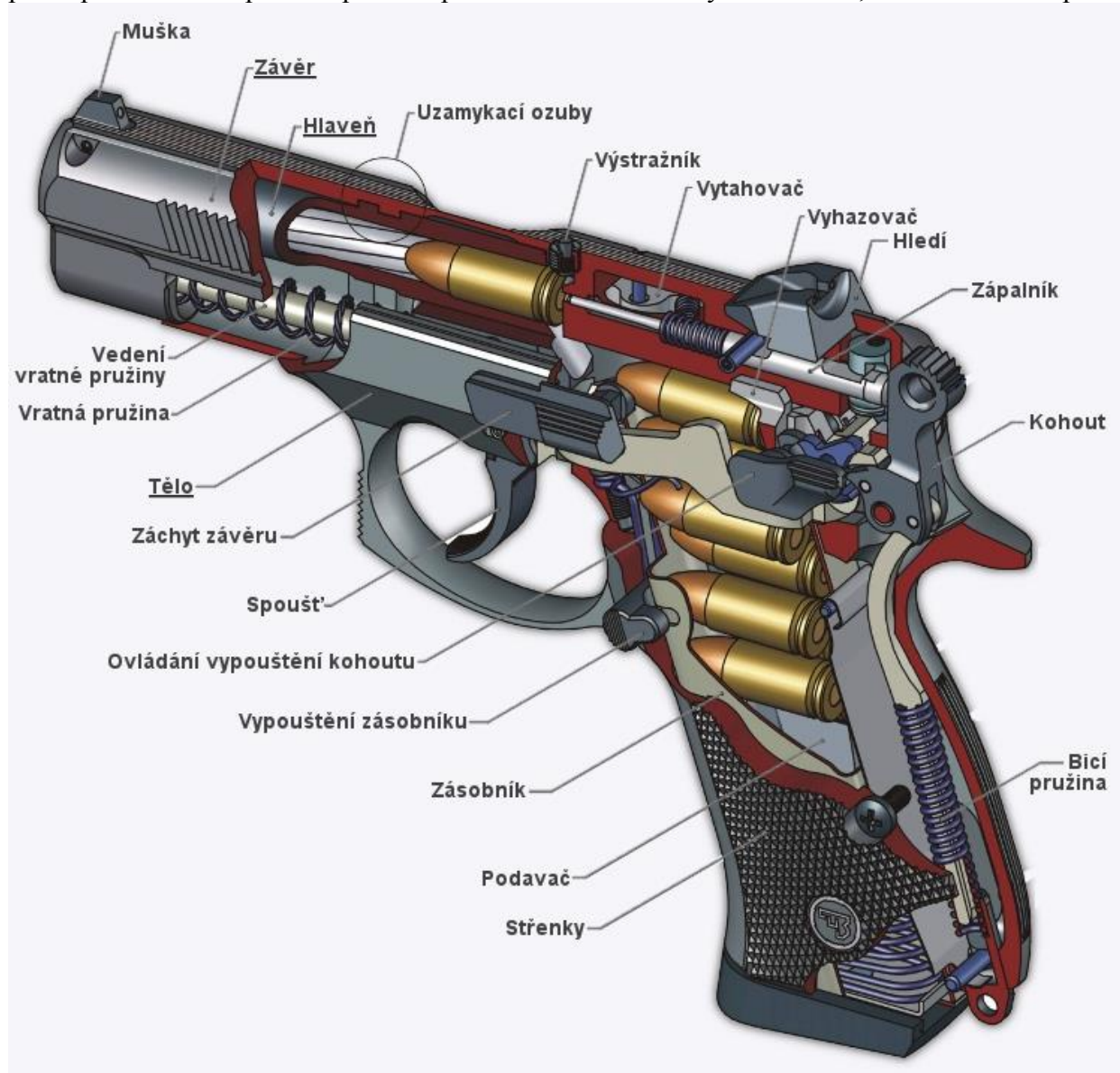
Další kapitola se detailněji věnuje konstrukci pistole, jelikož je předmětem této práce.

2.3 Pistole

Pistole je krátká palná zbraň spadající do kategorie B (zbraně podléhající povolení). Nejčastěji se jedná o zbraně samonabíjecí.

2.3.1 Hlavní a vedlejší části pistole

Hlavní části zbraně jsou klíčové k fungování a jejich náhrada je obtížná. To je ošetřeno i zákonem. Na každé hlavní části zbraně musí být vyraženo identifikační číslo. Spadají pod registraci a není možné je volně šířit či vyrábět. U vedlejších částí není registrace nutná, není proto problém si např. bicí pružinu při ztrátě funkčnosti vyrobit novou, nebo volně koupit.



Obr. 2-1 Části pistole, hlavní části podtrženy [13].

Hlavní části:

- *Tělo* – Základní část, nese části bicího i spoušťového ústrojí, drážky pro vedení závěru, rukojeť pak slouží jako vedení zásobníku.
- *Závěr* – Zejména slouží k uzamykání nábojové komory při výstřelu, natažení závěru tak způsobuje vyhození/zasunutí náboje, dále jsou na něm upevněny mířidla a úderník.
- *Hlaveň* – Vede střelu a za pomoci drážek ji stabilizuje (uděluje jí rotaci).

Další části:

- *Uzamykací ozuby* – Uzamykají spolu hlaveň a závěr při počátku výstřelu, které se následně chovají jako jeden celek, dokud nedojde k odemčení.
- *Čep záchytu závěru* – Řídí pohyb hlavě a závěru a zajišťuje tím jejich odemčení, důležité zejména pro samonabíjecí funkci pistole.
- *Podavač* – Pružná součást na spodu zásobníku, tlačí na náboje a podává je do nábojové komory, po vystřelení posledního náboje závěr zůstává v zadní poloze právě díky podavači. U modelů CZ-75 podavač tlačí na čep záchytu závěru, jež zůstane v horní poloze a drží závěr vzadu..
- *Muška a hledí* – Mířidla sloužící k zamíření zbraně.
- *Vytahovač* – Při pohybu závěru vzad se drážka zachytne o nábojnici a vytáhne je z nábojové komory.
- *Vyhazovač* – Vytahovačem tažená nábojnice narazí na vyhazovač, ten ji vyhodí ven ze zbraně.
- *Výstražník* – Upozorňuje na přítomnost náboje v komoře.
- *Kohout* – Po stisknutí spouště narazí na zápalník, ten dále narazí na zápalku náboje, ta iniciuje hoření střelného prachu.
- *Bicí pružina* – Uvádí do pohybu kohout.
- *Střenky* – Zajišťují lepší úchop zbraně.
- *Zásobník* – Zásobuje zbraň náboji.
- *Vypouštění zásobníku* – Vysouvá zásobník ze zbraně.
- *Vypouštění kohoutu* – Pokud je náboj v nábojové komoře, může se již natažený kohout bezpečněji vypustit a nehrozí nechtěný výstřel. Některé verze CZ-75 na jeho místě upřednostnily pojistku, jež v zajištěném stavu brání výstřelu.
- *Spoušť* – Ovládá spoušťový mechanismus, ten dále ovládá mechanismus bicí.
- *Záchyt závěru* – Umožňuje zajistit závěr v zadní pružině.
- *Vratná pružina* – působí proti zpětnému rázu, tlačí závěr do přední polohy.

2.3.2 Mechanismy pistolí

Mechanismy zajišťují fungování zbraně. Jedná se především o vratné a brzdící ústrojí, systém podávání nábojů, odpalovací mechanismus a vyhazovací mechanismus.

Tučným písmem jsou označeny mechanismy platné pro pistolí CZ-75, kterou se tato práce zabývá.

1. Klasifikace podle systému uzamčení závěru:

1. Uzamčený závěr při dlouhém zákluzu hlavně

2. Uzamčený závěr při krátkém zákluzu hlavně

- Dnes jednoznačně nejrozšířenější systém uzamčení samonabíjecích pistolí. Na rozdíl od dlouhého zákluzu koná hlaveň jen krátký pohyb. Nábojnice je vyhozena již při pohybu závěru do zadní polohy s využitím setrvačné energie.

i. Krátký zákluz hlavně s poklesem – viz *kap. 2.3.3*

Krátký zákluz hlavně s poklesem

ii. Krátký zákluz hlavně s rotací.

iii. Krátký zákluz hlavně s uzamčením pomocí systémů pák.

3. Neuzamčený - Dynamický závěr

4. Polo uzamčený - Bržděný závěr

2. Klasifikace podle spoušťového mechanismu:

a. Jednočinná spoušť (*Single action - SA*)

b. Výhradně dvojčinná spoušť (*Double action only - DAO*)

c. Dvojčinná spoušť (SA/DA)

- Umožňuje střelení v obou předchozích režimech, to umožňuje např. první výstřel v režimu *DAO*: Stisk spouště provede natáhnutí bicího mechanismu, na jehož konci dojde k jeho uvolnění. Následující výstřel již v režimu *SA*: Stisk spouště provede pouze uvolnění předem nataženého spoušťového mechanismu.

d. Přednatažená spoušť

2.3.3 Krátký zákluz hlavně s poklesem

Po výstřelu se závěr pohybuje horizontálně vzad, hlaveň je díky ozubům zaklesnutá v závěru a má stejnou rychlost, až jejím posunutím a poklesnutím zadní části (u CZ-75 díky kontaktu kulisy s čepem), je dosaženo odemčení z ozubů mezi závěrem a hlavní. Závěr se dále pohybuje vzad brzděn pouze vratnou pružinou závěru. Pohyb hlavně je zastaven v její krajní poloze čepem záchyty závěru.

Ukázka odemčení a následného poklesu hlavně je znázorněná na pistoli CZ-75 viz obrázky Obr. 2-2; Obr. 2-3; Obr. 2-4.



Obr. 2-2 CZ-75. Před výstřelem, natažené bicí ústrojí, náboj v komoře [12].



Obr. 2-3 CZ-75. Krátce po výstřelu, střela opustila hlavěň. Čep v krajní poloze, sklopením hlavně došlo k odemčení závěru, ten se dále pohybuje vzad. [12].



Obr. 2-4 CZ-75. Závěr v krajní (zadní) poloze. [12].

3 REŠERŠE MOŽNÝCH ZPŮSOBŮ ŘEŠENÍ

Analýzou problému praskání čepů u pistolí této kategorie se doposud nevěnuje žádný odborný článek ani studie. Byla-li v minulosti provedena podobná analýza, jedná se o firemní tajemství, jež není veřejně dostupná.

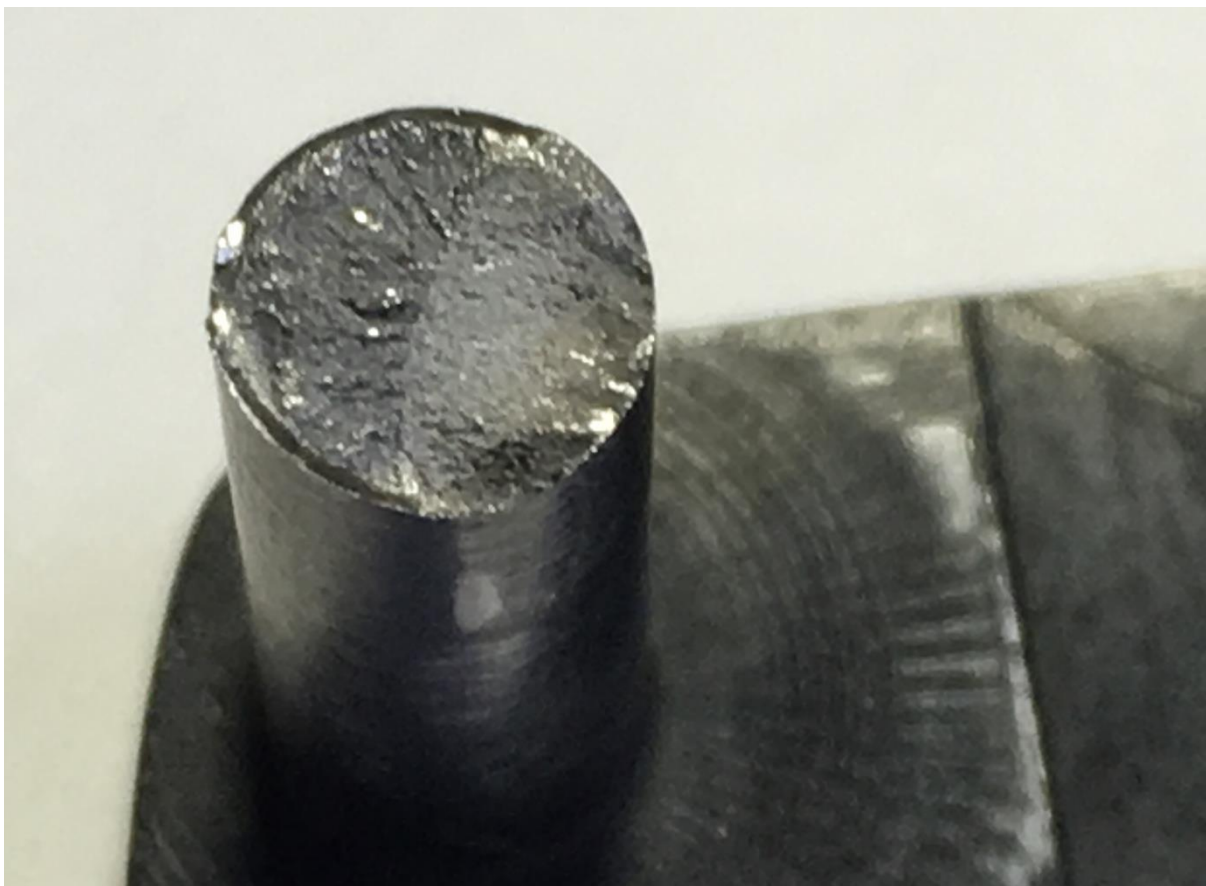
K zajištění nejvhodnějšího způsobu řešení je nejdříve nutné problém popsat. Dále bude provedena analýza problému a následující rešerše možných způsobů řešení.

3.1 Praskání čepu

Čep je zatěžován cyklicky při každém výstřelu. Počet výstřelů do prasknutí se pohybuje v intervalu od 4000 do 30 000, viz tab. 3-1. Jedná se tedy o únavový lom v oblasti nízkocyklové únavy. Jde o experimentálně zjištěné hodnoty z dostupného souboru vzorků již prasklých čepů. Nejvyšší vypovídající hodnotu lze přisuzovat vzorkům dodaných střelnicí TRIGGER SERVICE, s.r.o. (15 000 - 29 000). Nejmenší hodnoty prasknutí (1000 - 1500 výstřelů) bylo dosaženo při použití nestandardního střeliva, ručně přebíjené s větší prachovou náplní, které nesplňuje normy na bezpečnost a není tedy dále uvažováno (viz Tab. 3-1).

Počet výstřelů	Zdroj	Počet vzorků
1000 - 1500	glocktalk.com (Hot)	1
4000	handgunsandammunition.com	1
6000	hipowersandhandguns.com	1
7000 - 11000	czfirearms.us	3
7000	czfirearms.us (New edition)	1
10000	hipowersandhandguns.com	1
11000	handgunsandammunition.com	1
15000 - 20000	czfirearms.us (Silnější pružina)	1
15000 - 29000	Trigger - střelnice	5

Tab. 3-1 Prasklé čepy, červeně označeno použití nestandardní munice s větší prachovou náplní.



Obr. 3-1 Prasklý čep, detail lomové plochy.

3.2 Únavové porušení

Při únavě materiálu dochází ke kumulaci plastických deformací, vzniku a šíření trhliny. Posledním stádiem únavového poškození je ztráta funkčnosti součásti způsobená zpravidla křehkým lomem. Únavovému poškození je možné předcházet a životnost lze prodloužit např. změnou konstrukce či volbou materiálu.

Problematikou trhlín a únavových porušení se zabývá lineárně elastická lomová mechanika (dále jen LELM). S využitím LELM lze analyticky popsat chování trhliny díky napjatosti v čele trhliny, pouze však pro 2D úlohy s nekonečně dlouhým tělesem. V tomto případě se však jedná o únavu v ohybu pro 3D těleso kruhového průřezu, nad rámec bakalářského studia.

Princip chování trhliny, i když jej nemůžeme popsat analyticky, je však stejný a dají se zde aplikovat poznatky získané z 2D úloh.

3.2.1 Stádia trhliny

Při únavové poruše se pohybuje ve třech stádiích poškození:

- I. Iniciace únavové trhliny
- II. Stabilní šíření trhliny
- III. Nestabilní šíření trhliny

3.2.2 Iniciace trhliny

Na vznik trhliny mají největší vliv konstrukční vruby, povrchové defekty, případně strukturní vady nebo nečistoty v materiálu, které fungují jako koncentrátoři napětí. Na oblasti čepu náchylné k prasknutí se žádné konstrukční vruby nevyskytují.

Na Obr. 3-2 je čep po cca 1000 výstřelech (cyklech). Okem je viditelné povrchové poškození otěrem v místě největšího namáhání (kontakt čep-kulisa). Nejsou patrné žádné okem viditelné trhliny v místě jejich předpokládaného vzniku, tedy v tahově namáhané části.



Obr. 3-2 Použitý, funkční čep. Viditelný otěr v tlakově namáhané části.

3.2.3 Stabilní šíření trhliny

Proces šíření trhliny se děje uvnitř materiálu. Jako možnost zvýšení únavové pevnosti se nabízí zlepšení vlastností materiálu, konkrétněji lomové houževnatosti.

3.2.4 Nestabilní šíření trhliny

Při nestabilním šíření trhliny dochází k lomu z pravidla během méně než deseti cyklů. Energie na čele trhliny dosáhne kritické hodnoty a trhlina se začíná šířit samovolně, dochází ke křehkému dolomení. Křehký charakter lomu je dobře rozeznatelný na lomové ploše viz Obr. 3-1.

3.3 Možná řešení únavového porušení

Některé z dále uvedených metod vzhledem k neznámému předchozímu zpracování součásti nemusí být vhodné. Např. u metody ultrasonického impaktního ošetření se s dostupnými prostředky, nedá s jistotou říct, zda součást nebyla v minulosti ultrasonicky ošetřena, stejně tak mohl být čep v minulosti vystaven chemickotepelnému zpracování.

3.3.1 Základní způsoby oddálení únavového lomu

Mezi základní způsoby oddálení únavového lomu patří zejména změna konstrukční, změna materiálu, nebo změna technologického postupu. To však vede ve většině případů k vytvoření prototypů. Tvorba prototypů je finančně i časově náročná, je proto vhodné využít výpočtového modelu, na kterém je možné změny v chování, zejména místo výskytu a velikosti maximálních napětí pozorovat. Model MKP nám umožní měnit jak materiálové charakteristiky tak upravovat konstrukční řešení.

3.3.2 Chemickotepelné zpracování

Úprava povrchové vrstvy chemickotepelnou cestou je vhodná zejména k dosažení tvrdých povrchů odolných vůči opotřebení a otěru. Současně je efektivním prostředkem k dosažení lepších únavových vlastností. Nejužívanějším procesem je cementace, při níž difunduje uhlík do povrchové vrstvy. Součást s takto nasycenou povrchovou vrstvou je dále kalena. Další možností získání tvrdé povrchové vrstvy je nitridace. Ta se provádí v atmosféře čpavku a dochází k nasycení povrchu dusíkem. Takto ošetřenou součást už není potřeba kalit [15].

Efekt takto vzniklé vrstvy může být tak výrazný, že ke vzniku únavových trhlin dojde až v přechodu mezi ošetřenou vrstvou a základní matricí a lze jím výšit mez únavy až o 95 % [15]. Pro případ čepu je však tato metoda vhodná, jelikož se jedná o namáhání na ohyb, kde se maximální hodnoty napětí nachází v povrchové vrstvě a kde se dá předpokládat i iniciace únavové trhliny.

3.3.3 Kuličkování, válečkování

Kuličkování je technologický proces, při kterém je povrchová vrstva podrobena plastické deformaci při dopadu proudu ocelových kuliček velkou rychlostí. Výsledkem je indukce tlakových pnutí a zpevnění povrchové vrstvy za studena. Kuličkování je vhodné zejména u součástí s hrubě opracovaným povrchem. Dochází ke zvýšení meze únavy až o 20 %. U leštěných povrchů však může mít kuličkování i negativní vliv na mez únavy [15].

Válečkování je vzhledem ke zpevnění povrchové vrstvy efektivnější, jelikož můžeme přítlačnou sílu regulovat. Z experimentálních příkladů je zjištěno zlepšení meze únavy o 20 až 80 % [15].

3.3.4 Polymerový povlak

Další možností zlepšení vlastností zejména ve stádiu iniciace trhliny (viz 3.3.2 Inicie trhliny) se nabízí potažení čepu vrstvou vysoce pevnostních plastů, případně polymerů. Vrstva na povrchu by měla zabránit otěru a případnému vzniku trhliny [11]. Mezi přednosti takové úpravy by pak patřila zejména finanční úspora a jednoduchost případného obnovení, mezi nevýhody pak možná nutná konstrukční úprava zbraně.

Při volbě materiálu na potah je nutné počítat s vysokými teplotami, kterým je čep vystaven při opakované střelbě, kdy dochází k nedokonalému chlazení hlavně, která jej následně ohřívá.

3.3.5 Ultrasonické impaktní ošetření

Jako další se nabízí ošetření povrchu metodou ultrasonického impaktního ošetření. Takto aplikované ošetření kritického místa způsobí předepnutí materiálu a dá se předpokládat posun únavového lomu až o desítky procent. Je nutno podotknout že metoda je vysoce závislá na materiálovém složení a nemůžeme ji použít u všech ocelí [14].

3.4 Možná řešení praskání čepu

Nutno podotknout, že současný stav poznání je interní know-how firmy (CZUB) a stejně jako přesné materiálové složení podléhá utajení. V dostupné literatuře není tento konkrétní problém řešen. Zde uvedené možnosti se vztahují ke konkrétnímu problému praskání čepu záchyty závěru, jejich ověření by ve většině případů vyžadovalo konstrukci prototypu.

3.4.1 Vratná pružina závěru

Z principu činnosti pistole CZ-75 vyplývá, že síla je ze závěru na hlaveň přenášena nejen díky ozubům uzamykajících hlaveň, ale také díky vratné pružiny závěru, která hlaveň a závěr spojuje. Síla přenášena přes pružinu působí z hlediska čepu pod vhodnějším úhlem, a má při vhodně zvolené tvrdosti pružiny mírnější průběh bez nechtěných rázů.

Použití silnější pružiny by teoreticky mělo mít za následek větší životnost čepu. Nutno podotknout že po překročení určité tvrdosti pružiny bude mít tato úprava negativní vliv na spolehlivost. V extrémních případech nemusí dojít k dokončení funkčního cyklu pistole (např. nemusí dojít k natažení bicího ústrojí).

3.4.2 Přetížení do plastických deformací

V průběhu výroby je čep jednorázově přetížen až do oblasti plastických deformací. Očekávaným výsledkem je předepnutí vrchní, nejvíce namáhané vrstvy a vnesení tlakových zbytkových pnutí. Další zatěžování při provozu musí zátěžná síla nejdříve překonat předepnutí. Při stejné amplitudě zatěžování pak bude v kritickém místě zmenšená maximální hodnota tahového napětí.

3.4.3 Upravení tolerancí

Mezi jednu z možností jak oddálit lom, může patřit vzájemné upravení jak tvaru kulisy na hlavni, ve které se čep pohybuje, tak i samotného těla zbraně za účelem lepšího kontaktu a rozdělení sil. Při špatném slícování komponentů může být čep namáhán na stříh. V takovém případě by mohl mít konstrukční zásah za následek snížení síly působící na čep.

3.4.4 Zastavení hlavně zarážkou

Konstrukční úpravou zkusit zajistit, aby po sklopení hlavně nedocházelo k dalšímu namáhání čepu. Toho by se dalo docílit zarážkou, na kterou by hlaveň narazila, jakmile dojde k jejímu sklopení. Na čep by tak působila jen menší síla nutná ke sklopení hlavně a většina zbývající energie hlavně by byla neškodně svedena do těla zbraně.

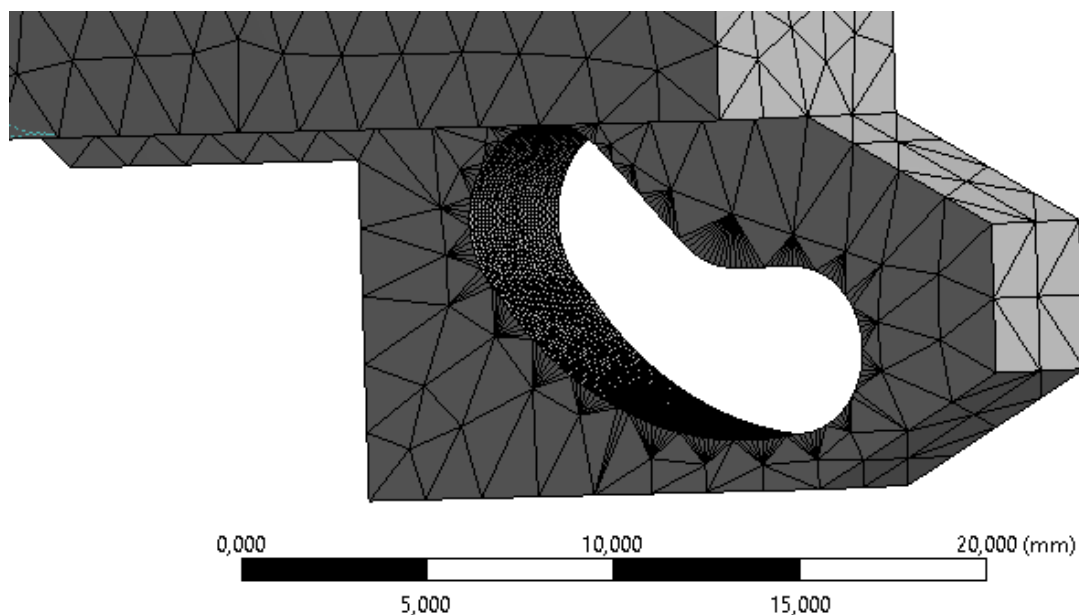
4 VYTVÁŘENÍ VÝPOČTOVÉHO MODELU

V následující kapitole je popsán výpočtový model, na kterém byla provedena deformačně napěťová analýza.

4.1 Hlavní myšlenka MKP

Metoda konečných prvků (MKP) byla vytvořena na základě nutnosti řešit složitější úlohy pružnosti pevnosti. Její princip spočívá v rozdělení geometricky složité oblasti na jednodušší podoblasti, viz Obr. 4-1 Ukázka sítě na modelu hlavně. Využívá tzv. Lagrangova principu, neboli snahy tělesa zaujmout stav s minimální potenciální energií.

I když byla filosofie rozdělení zkoumané oblasti na malé podoblasti publikována již v období druhé světové války, k jejímu rozmachu došlo teprve v 70. letech minulého století, a to teprve s nástupem dostatečně výkonné výpočetní techniky.



Obr. 4-1 Ukázka sítě na modelu hlavně.

V dnešní době představuje MKP možnost řešení komplexních problémů v mnoha inženýrských oborech, jako pružnost a pevnost, hydromechanika, termomechanika, nebo fluidní inženýrství, což dosvědčuje i značné množství publikací a konferencí věnujících se právě MKP (např. *Automotive Simulation World Congress 6-7 June 2016, Munich, Germany.*) a příznivá prognóza vzhledem ke stále rostoucí síle dnešní výpočetní techniky.

4.2 Výběr metody řešení

Analytické metody lze aplikovat na jednoduché případně zjednodušené úlohy, nebo jako mezivýpočty pro jiný přístup. V zadání práce je aplikace numerického řešení pomocí metody konečných prvků (MKP), konkrétně ve výpočetním systému ANSYS, což je zde díky složité geometrii kulisy a kontaktní úloze plně na místě.

Pro práci bylo zvoleno prostředí ANSYS Workbench verze 16.2. Zatímco verze Classic disponuje více možnostmi a dovoluje detailnější nastavení analýzy, zde je postačující uživatelsky přijatelnější verze Workbench.

Z modelu geometrie viz Obr. 4-2, je patrné, že se jedná o úlohu kontaktní. Úlohy je možné dělit na dynamické a statické. Vzhledem k charakteru úlohy by bylo vhodnější řešit problém jako úlohu dynamickou, to by však kladlo vyšší nároky nejen na výpočetní techniku, ale vyžadovalo i hlubší pochopení celého výpočtového i reálného procesu při korelaci vstupních parametrů a konečných výsledků analýzy. V této práci byla s jistými omezeními zvolena analýza statická (*static structural*). Jedná se o zjednodušení, které může mít velký vliv na výsledky, které bude nutno posoudit při závěrečném vyhodnocování, viz kapitola 7 ZÁVĚR.

4.3 Materiálové charakteristiky

Přesné materiálové charakteristiky podléhají utajení a výrobci je běžně nezveřejňují. Je zde kladen důraz hlavně na pevnost a otěruvzdornost. V minulosti se používaly převážně oceli třídy 13, dnes jsou rozšířenější kvalitnější oceli tříd 15 např. nejčastěji používaná ocel 15230 s obsahem chromu a vanadu [8]. Rozšiřují se také oceli třídy 17 s vysokým obsahem chromu a niklu [8].

Pro výpočtový model je zvolen materiál 15 230.7 podle ČSN 41 5230. Jedná se o ocel třídy 15 s obsahem Chromu a Vanadu vhodnou k zušlechťování. Ocel je za tepla dobře tvárná a ve stavu žíhaném na měkko dobře obrobitelná, vhodná na velmi namáhané strojní součásti. Ideálně splňuje požadavky pro použití jako čep záchytu závěru.

Materiálové vlastnosti zmiňované oceli jsou:

- Smluvní mez kluzu: $R_e = 835 \text{ MPa}$
- Mez pevnosti: $R_m = 980\text{--}1180 \text{ MPa}$

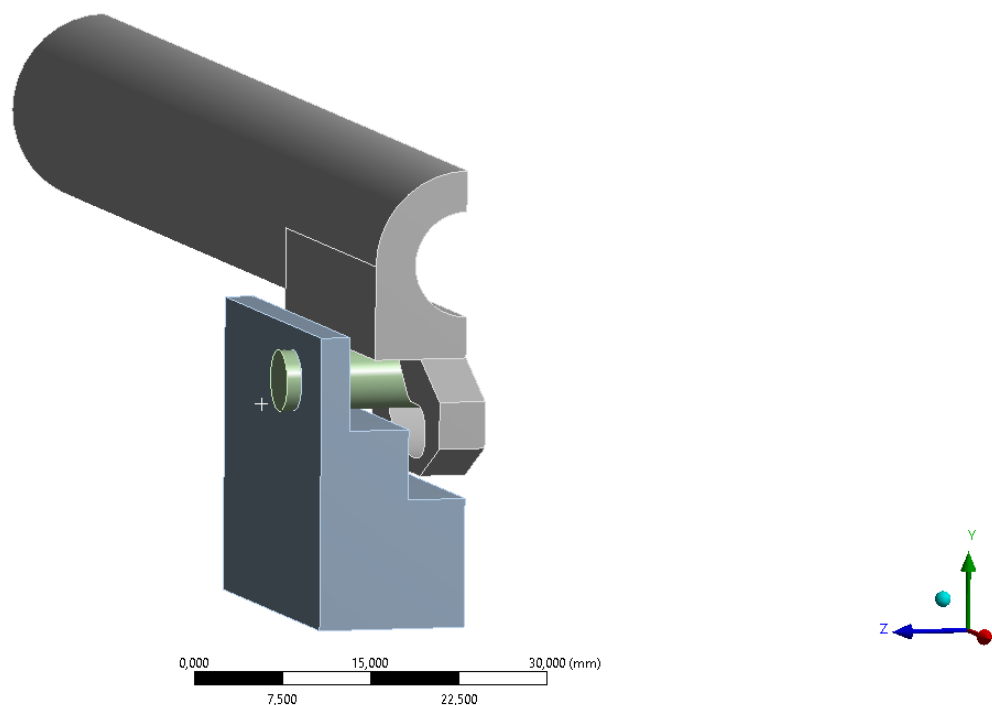
Pro výpočet je použit model materiálu s čistě elastickým chováním. Výskyt plastických deformací je ošetřen podle výsledku numerické části porovnáním redukovaného napětí s materiálovými charakteristikami.

4.4 Model geometrie

Prostředí *ANSYS design modeller* bylo zvoleno již při tvorbě geometrie. I když programy Inventor nebo Solidworks disponují uživatelsky příznivějším prostředím, byla dána přednost „živé“ geometrii, a to hlavně z důvodů častých zásahů a nutnosti měnit detaily geometrie bez poškození již nastavené parametrizace uvnitř prostředí ANSYS.

Pro samotnou analýzu čepu bude zapotřebí použití tří součástí: Čepu záchytu závěru, na kterém v praxi dochází k lomu. Dále pak *hlavně* a *rámu* zbraně, které jsou s čepem v kontaktu.

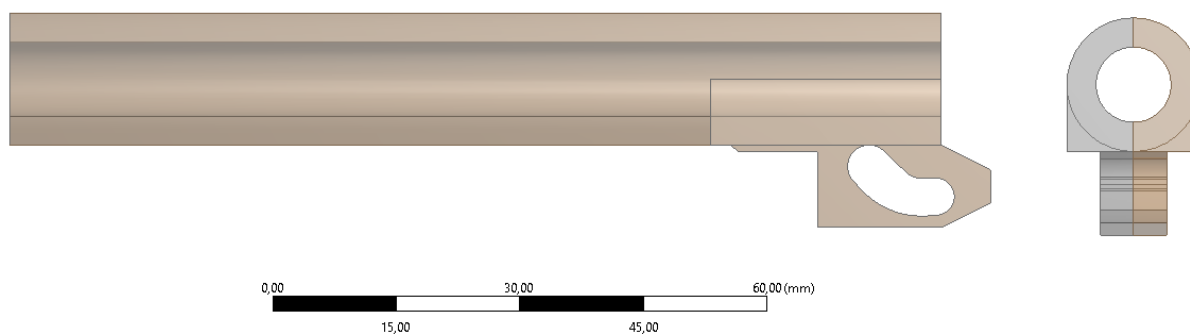
Model vznikl na základě proměření geometrie jednotlivých součástí konkrétní zbraně. Na základě okrajových podmínek je následně model zjednodušován s cílem dosáhnout co nejjednodušší geometrie s co nejmenším počtem prvků při zachování hodnověrnosti výpočtu (viz kapitola 5 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA SÍTĚ).



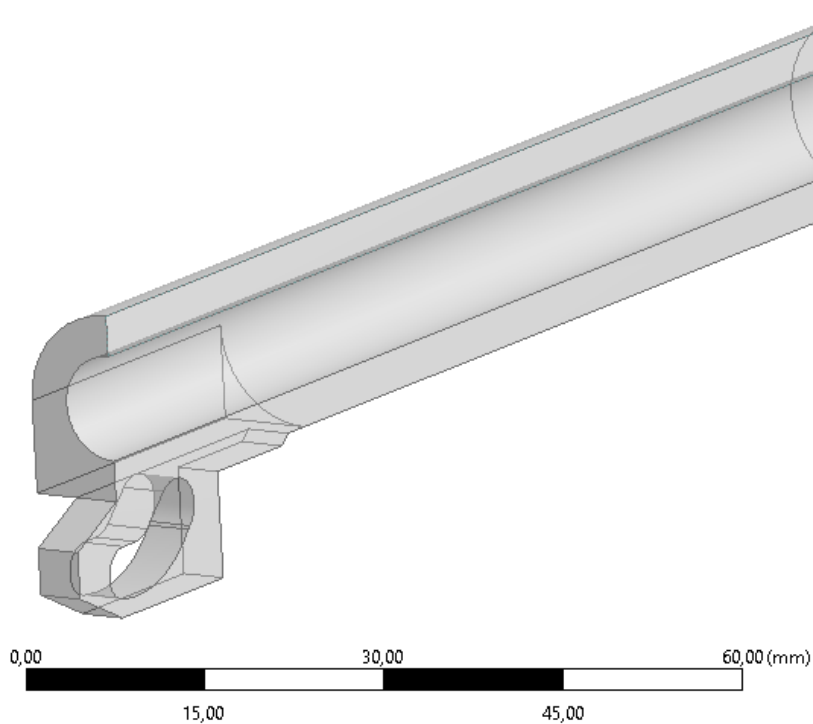
Obr. 4-2 Geometrie soustavy, polovina - řez veden osou symetrie.

4.4.1 Geometrie hlavně

Podle postupu uvedeného výše je, jako první, vytvořen model hlavně viz Obr. 4-3. Největší důraz je přitom kladen na kulisu, kde dochází ke kontaktu s čepem. Po aplikování okrajových podmínek, viz Kapitola Okrajové podmínky vyplývající z geometrické symetrie, byl následně zjednodušen, viz Obr. 4-4.



Obr. 4-3 Geometrie hlavně

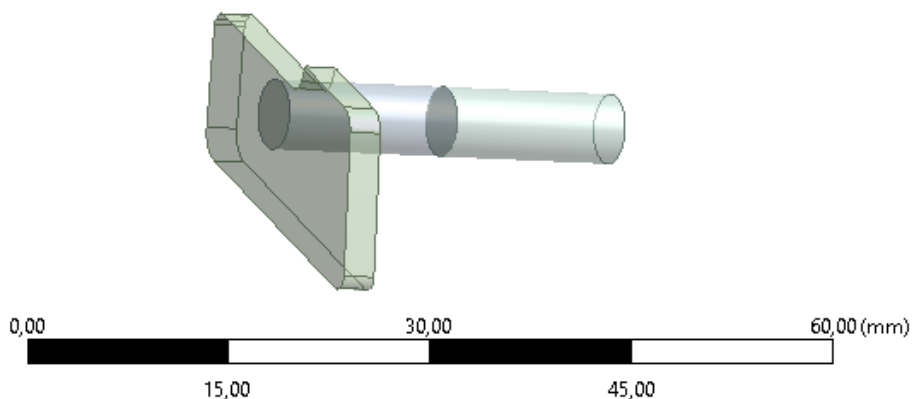


Obr. 4-4 Zjednodušená geometrie hlavně: polovina díky symetrii.

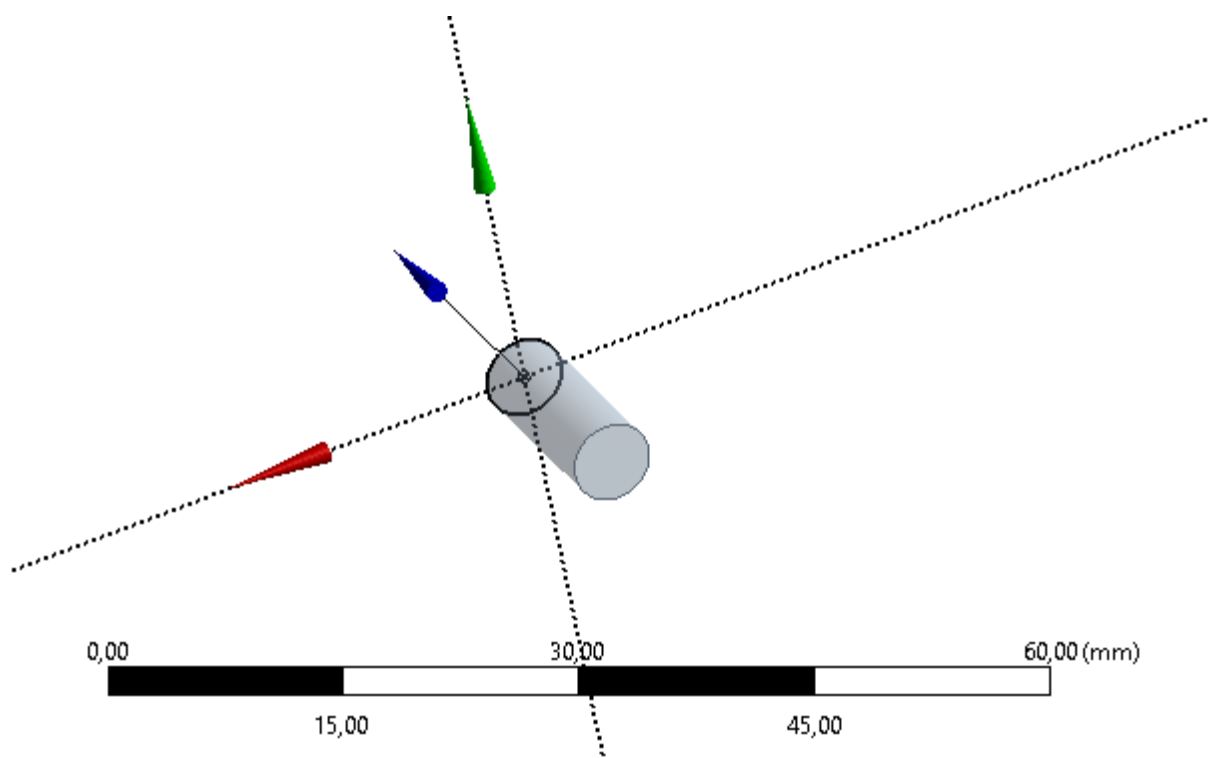
4.4.2 Geometrie čepu

Geometrii čepu lze zjednodušit za použití náležitých okrajových podmínek (dále jen OP). Plochou část čepu (na pistoli venkovní část), která je připnutá k rámu a zabraňuje rotaci, není nutné modelovat. Dá se použít OP na zamezení rotace (*remote displacement*). Vynechaná část nepředstavuje riziko vzhledem k porušení.

Druhá válcovitá část je na modelování jednoduchá, pro snížení počtu prvků je v modelu použita jen půlka díky symetrii.



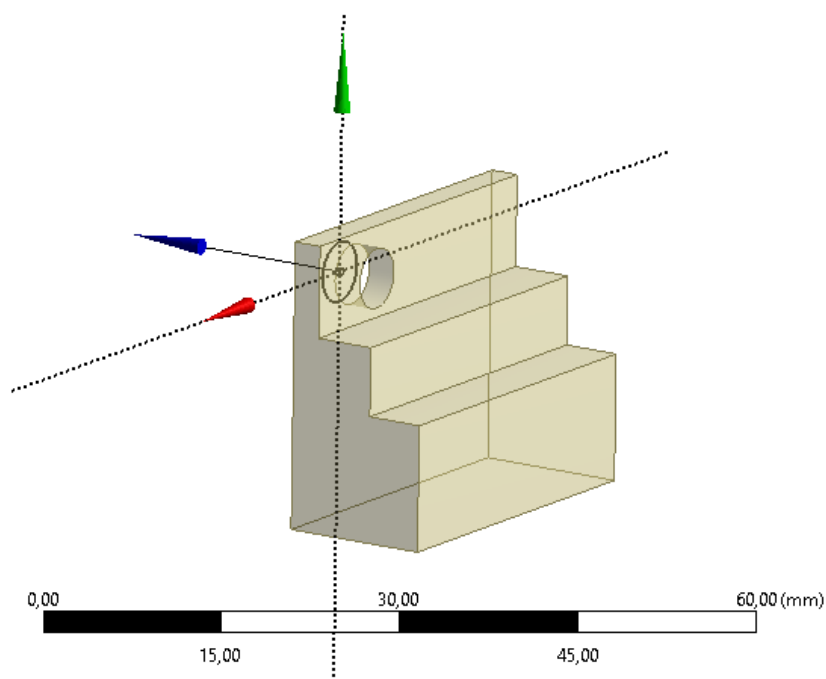
Obr. 4-5 Geometrie čepu



Obr. 4-6 Geometrie zjednodušeného čepu

4.4.3 Geometrie rámu zbraně

Nakonec je vytvořena geometrie rámu zbraně (tělo zbraně). Díky statické analýze nemusí být zachovány parametry jako hmotnost, které jsou důležité v případě dynamické analýzy. Pozornost je tak věnována hlavně kontaktu čepu s rámem, kde rám slouží jako podpora pro zachování věrohodnosti uložení čepu.



Obr. 4-7 Zjednodušená geometrie rámu zbraně

4.5 Kontakty

Dalším krokem na modelu je vytvoření kontaktních dvojic u těles, jež se vzájemně dotýkají. Prostředí ANSYS umožňuje automatickou tvorbu kontaktů, která se však obecně nedoporučuje. Hrozí zejména vytvoření neexistujících kontaktů nebo kontakty na nevhodných plochách. Kontakty je vždy nutné zkontrolovat (to však u modelu s větším počtem kontaktů způsobuje nepřehlednost), nebo jako v tomto případě automaticky vytvořené kontakty ručně doplnit.

S čepem jsou v kontaktu dvě další tělesa, kde je nutno uvažovat kontakty.

Jako nejvhodnější v obou případech je použit kontakt *frictional*, tedy kontakt, kde je možné prokluzování s daným koeficientem tření (Coulombovský součinitel suchého tření). Kontakt *frictional* umožňuje normálový i tečný posuv a nelineární řešení.

Za účelem správného nastavení funkčnosti a případného odstranění chyb jsou stejné parametry aplikovány nejdříve na triviální úloze, u které je výsledek známý.

4.5.1 Hlaveň – Čep

Automaticky vybrané kontaktní plochy neodpovídaly skutečnosti, bylo tedy nutné ručně upravit pomocí *scoping method*.

Jedná se o kontakt se třením, koeficient tření je zvolen 0,15.

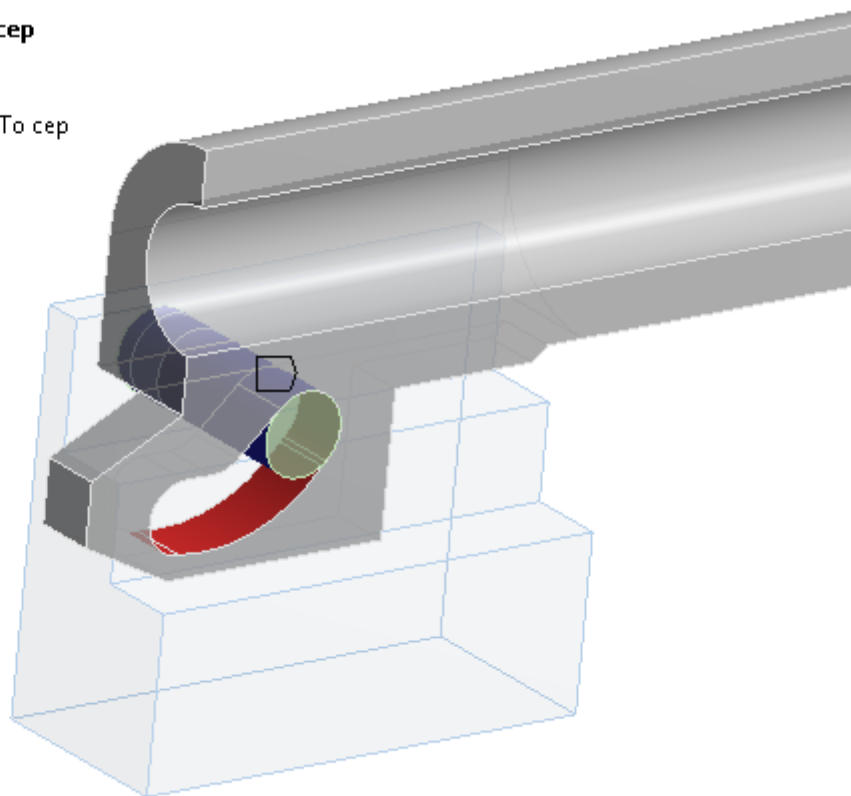
V pokročilém nastavení, při výběru matematického formulování kontaktu je zvoleno *Augmented Lagrange*.

Normal Stiffness factor je zvolen manuálně, na hodnotu 10 s agresivním chováním a aktualizací při každém opakování (Normal stiffness: manual, Factor: 10, Update stiffness: Each iteration, Aggressive). Je zaveden Pinball region a definován pomocí poloměru: 2 mm. Nakonec je upraveno časování kroků (Time steps controls -> Automatic bisection).

Frictional - hlaven To cep

25. 4. 2016 19:26

■ Frictional - hlaven To cep



Obr. 4-8 Kontakt hlaveň čep.

4.5.2 Čep – rám zbraně

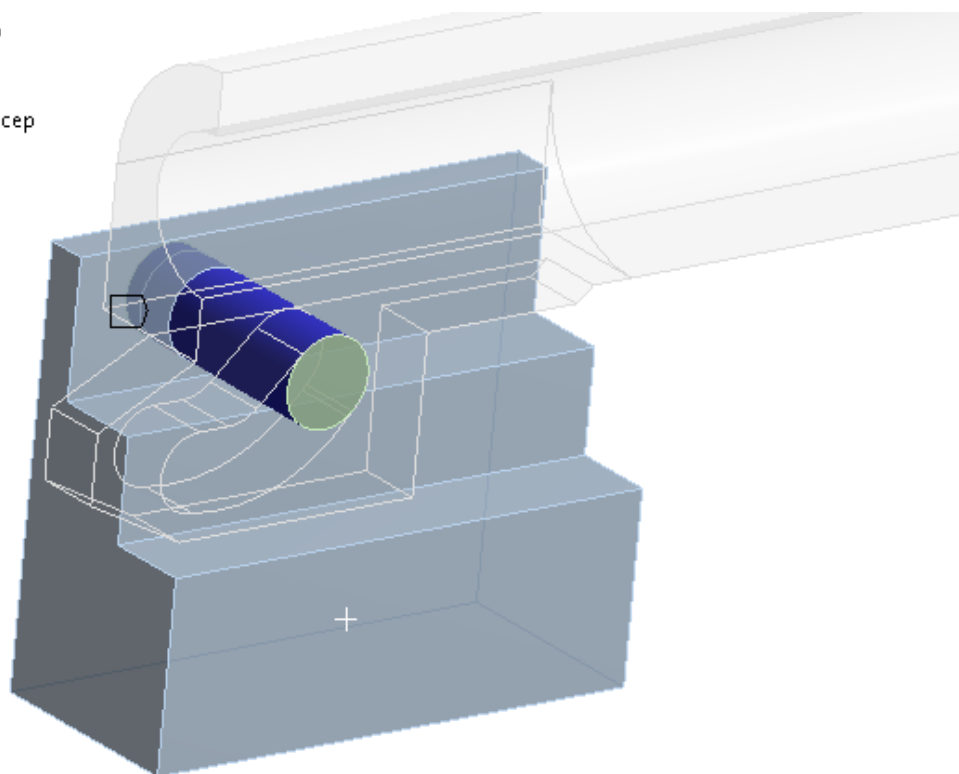
V tomto případě program vybral dotykové plochy správně, je pouze nastaveno, že se jedná o kontakt se třením, i zde byl zvolen koeficient tření 0,15.

Oproti předešlému kontaktu viz Hlaveň – Čep, je zde ponecháno pokročilé nastavení výchozí, kontrolované programem: *Advanced settings - Program Controlled*.

Frictional - Telo To cep

25. 4. 2016 19:27

Frictional - Telo To cep



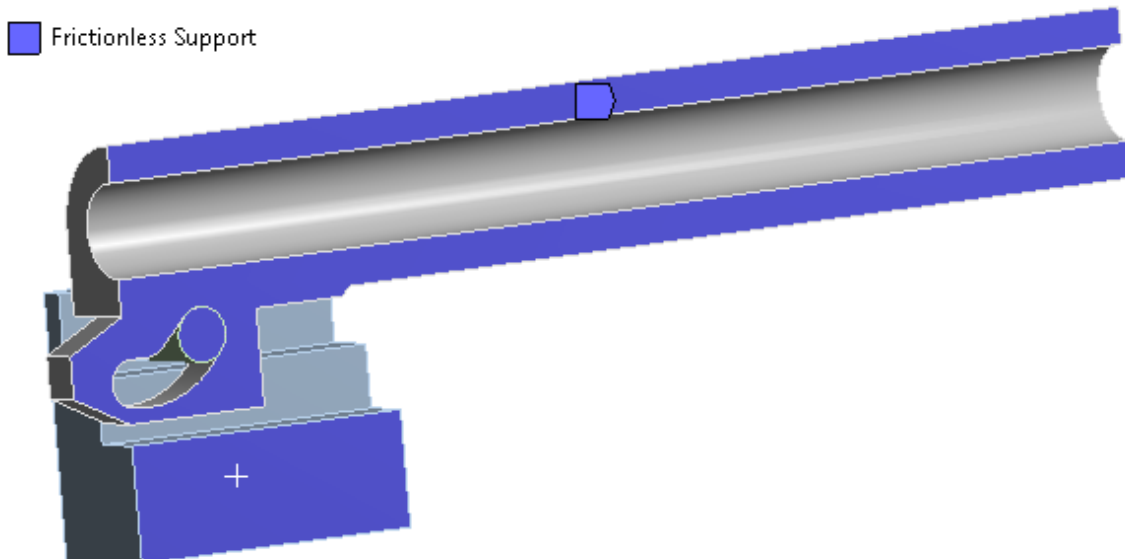
Obr. 4-9 Kontakt čep rám.

4.6 Model okrajových podmínek

Čep a související tělesa jsou zatížena tak, aby podmínky odpovídaly skutečnosti. Je nutné si uvědomit princip fungování pistole a umístit objekty do správné polohy.

4.6.1 Okrajové podmínky vyplývající z geometrické symetrie

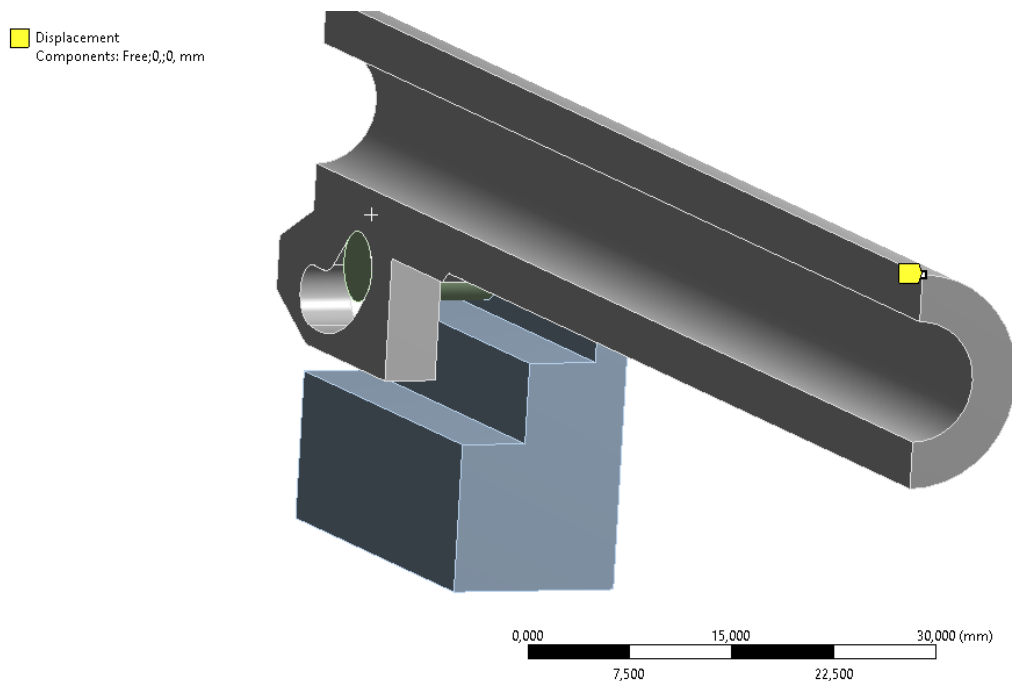
Velkého zjednodušení s ohledem na množství prvků lze dosáhnout „rozpůlením“ geometrie podél osy symetrie. V místě řezu je využito okrajové podmínky *frictionless support* viz Obr. 4-10, tedy blokáce posunu v ose kolmé na rovinu symetrie. Touto úpravou je možné použít pouze půlku modelu a významně tak snížit počet prvků a s tím související výpočtový čas.



Obr. 4-10 Model geometrie: Symetrie: Friction less support.

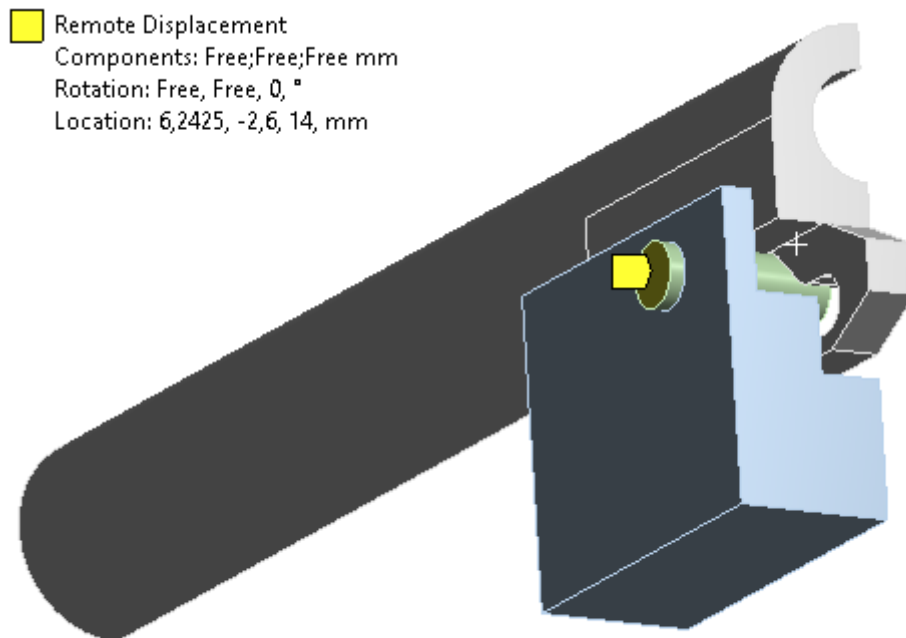
4.6.2 Vymezení pohybu

Displacement: zabraňuje vertikálnímu pohybu ústí hlavně. Tímto je zabráněno rotaci hlavně kolem čepu, pořád je však dovoleno sklopení zadní části. U skutečné zbraně je toho docíleno díky opření o závěr.

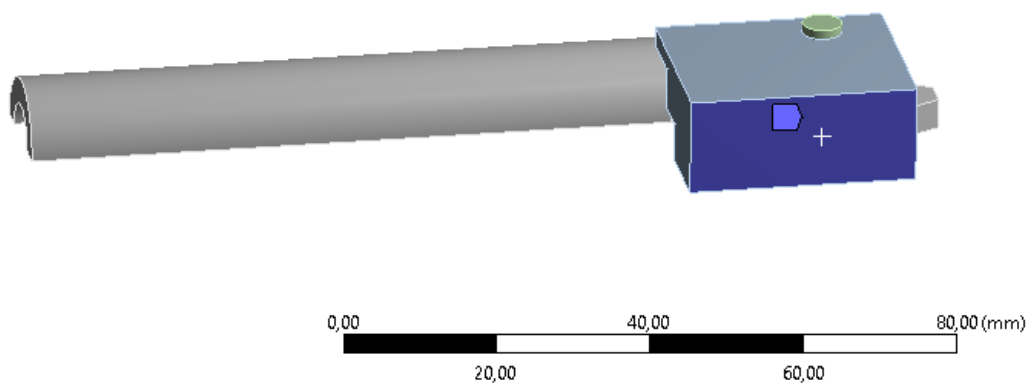


Obr. 4-11 Okrajová podmínka Displacement na komponentu hlavně.

Remote displacement: zabraňující rotaci čepu, u skutečné zbraně je zajištěno připnutím čepu k rámu zbraně viz Obr. 4-12.



Obr. 4-12 Remote displacement zabráňující rotaci na ploše čepu.



Obr. 4-13 Fixed support, nehybná podpora pro celkové ukotvení modelu

4.6.3 Zatížení

Na skutečné zbrani dojde k přenesení impulzu síly od unikajících plynů do stěn a dna nábojnice, ta je uzamčená v nábojové komoře a působí tak na závěr. Závěr se okamžitě začíná pohybovat vzad a přes ozuby umístěné na hlavní přenáší sílu i na hlaveň. Ta se až do okamžiku sklopení pohybuje stejnou rychlostí jako závěr. Pro účely modelu je zvoleno zatížení hlavně v přední části, viz Obr. 4-14. Jedná se o zjednodušení, u kterého se nepředpokládá podstatný vliv na výsledky analýzy.

Počáteční rychlost závěru a hlavně jde zjistit pomocí zákona zachování hybnosti. Hybnost vystřelené kulky spolu s hybností unikajících plynů (shořelé prachové složce) je rovna hybnosti hlavně se závěrem. Při výpočtu je pro zjednodušení zanedbán vliv vratné pružiny závěru, jelikož se sklopení hlavně odehrává na relativně krátké dráze vzhledem k délce chodu závěru a nedojde k podstatnému stlačení pružiny.

$$m_k \cdot v_k \cdot 1,05 = (m_h + m_z) \cdot v_1 \quad (4.1)$$

m_k	Hmotnost kulky [g]	7,45 ~ 9,5 g
v_k	Rychlost kulky [m/s]	360 ~ 426 m/s
1,05	Koeficient unikajících plynů [-]	5% hybnosti střely
m_h	Hmotnost hlavně [g]	80 g
m_z	Hmotnost závěru [g]	300 g
v_1	Rychlost hlavně a závěru [m/s]	

Nejjednodušší model zatěžování vychází z lineární aproximace zátěžné síly. Po odemčení hlavně a závěru dojde k postupnému zpomalení, hlavně do zadní úvrati narazí s minimální kinetickou energií a vliv rázu je zde zanedbán. U skutečné zbraně je lineární průběh nepravděpodobný a extrém zátěžné síly se dá předpokládat větší. Jako vstupní parametr lze nejnázve určit brzdou dráhu, uvažuje se při tom pouze dráha po odemčení hlavně.

Jako další možnost se nabízí zjištění času s využitím rychlostní kamery, vzhledem k zakrytí sledované oblasti by byla nutná speciální úprava sledované zbraně.

$$s_b = \frac{1}{2} a_b \cdot t_b^2 \quad (4.3)$$

$$v_1 = a_b \cdot t_b \quad (4.4)$$

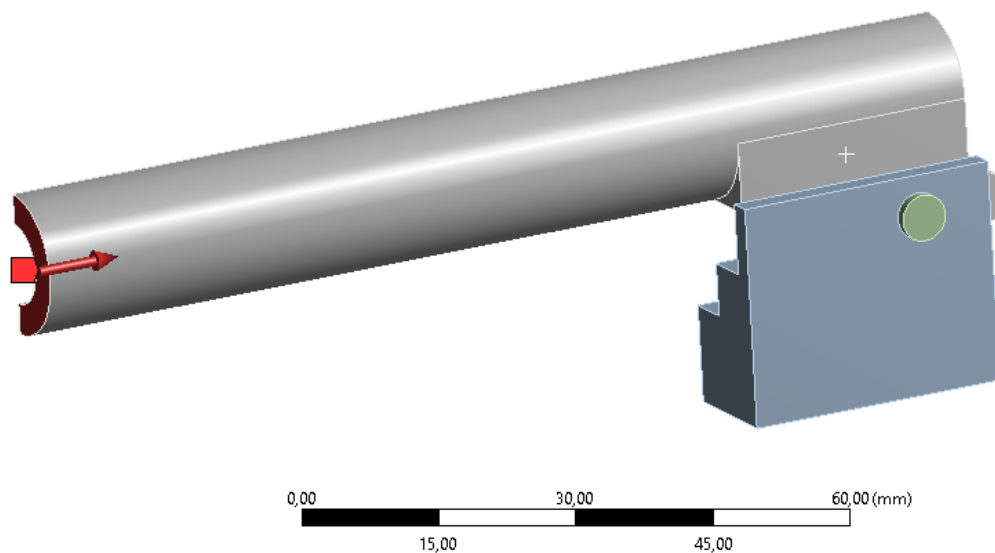
$$F = m_h \cdot a_b = \frac{m_h \cdot v_1^2}{2 \cdot s_b} \quad (4.5)$$

s_b	Brzdná dráha hlavně [mm]	3 mm
a_b	Aproximace zpomalení hlavně [m/s ²]	
t_b	Brzdný čas [s]	

Výsledná zátěžná síla pak závisí na hmotnosti střely a úst'ové rychlosti, která se pro různé typy munice a výrobce liší.

$$F = 740 \sim 1004 \text{ N}$$

Uvažovat zatěžování jako lineární je velké zjednodušení, jde o optimističtější odhad a skutečná síla se dá předpokládat větší. Z toho důvodu je pro model použita síla z kraje spektra tedy 1000 N. Vzhledem k použití symetrie vychází aplikovaná zátěžná síla pro statickou analýzu 500 N.



Obr. 4-14 Zátěžná síla.

4.6.4 Zpětné zatížení

Jako jeden z možných přístupů k přesnějšímu zjištění okrajových podmínek, je analýza dostatečného vzorku již prasklých čepů. Pomocí aproximace Wöhlerovi křivky je vypočtena maximální hodnota napětí, která je v daném místě vstupem do analýzy, výstupem analýzy je pak zátěžná síla.

Uplatnění tohoto postupu by bylo na místě, pokud by byl znám materiál. Takto vytvořený model by pak byl vhodnější vzhledem k testování konstrukčních změn.

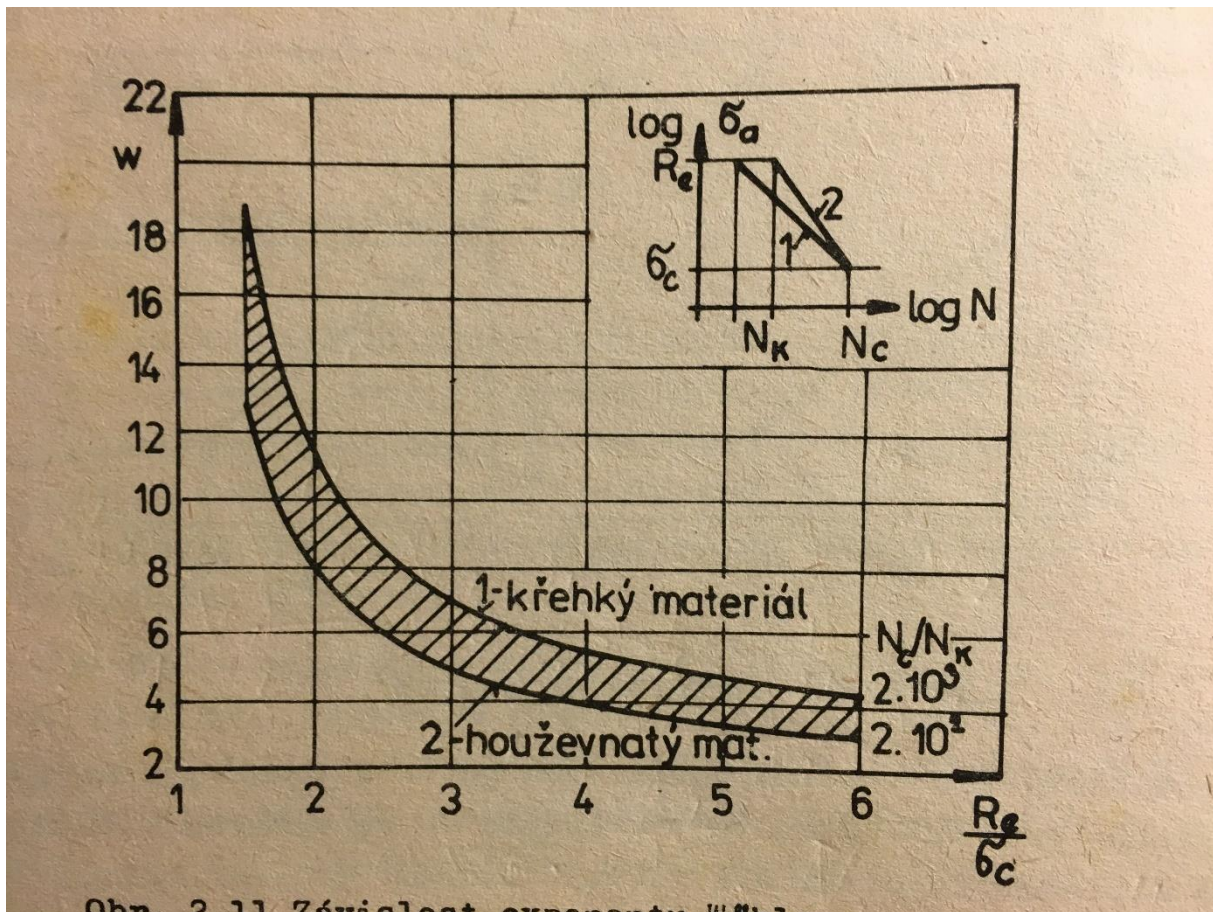
K analytickému popisu Wöhlerovi křivky uvádí literatura celou řadu modelů, nejjednodušší a často plně dostačující je lineární popis šikmé větve křivky v logaritmických souřadnicích [17].

$$\log(N) + w \cdot \log(\sigma_a) = konst. \quad (4.6)$$

Není-li mez únavy známá, lze přibližně stanovit z meze pevnosti pro dané namáhání (ohyb).

$$\sigma_c = 0,45 \cdot R_m \quad (4.7)$$

Konstantu určíme statistickým vyhodnocením experimentálních výsledků, exponent w pak z grafu viz Obr. 4-15.



Obr. 4-15 Závislost exponentu Wöhlerovi křivky na poměru meze kluzu k mezi únavy, hodnoty voleny vzhledem k charakteru namáhání - ohyb [17].

Pro zvolený materiál viz kapitola Materiálové charakteristiky:

$$\frac{Re}{\sigma_c} = \frac{Re}{0,45 \cdot Rm} = < 1,6 \sim 1,9 > \quad (4.8)$$

Což odpovídá $w = 9 \sim 12$ (materiál je uvažovaný jako houževnatý)

Tím získaná rovnice přímky má pak tvar:

$$\sigma_a^w \cdot N = konst. \quad (4.9)$$

Konstanta je pak zjistitelná z meze únavy materiálu, při volbě $N = 10^7$ cyklů [17].

Očekávané napětí v místě lomu podle výše uvedeného postupu by mělo odpovídat 780 MPa.

Tímto postupem lze zpětně stanovit zatěžující sílu, případně použít pro kontrolu výpočtového modelu při známém materiálu.

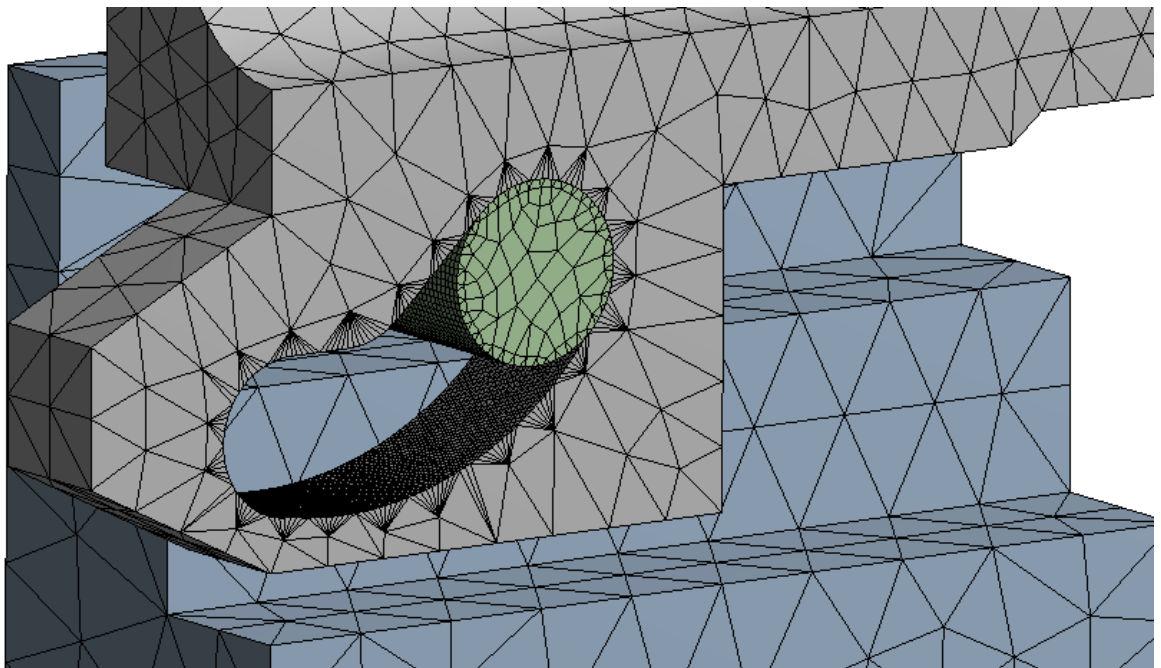
4.7 Síť konečných prvků

S počtem elementů a kvalitou sítě roste také výpočetní čas, proto byla jemnější síť aplikována pouze v bodech zájmu a z důvodů přesnosti řešení také v kontaktních plochách, vlivu jemnosti sítě jak na výpočetní čas, tak na chybu výsledku se dále věnuje kapitola 5 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA SÍTĚ.

Při diskretizaci modelu bylo vzhledem k prostorové geometrické úloze použito objemových prvků, konkrétně typ SOLID 187.

Pro statickou analýzu se jako nejvhodnější volí varianta, kdy bylo použito tří různých velikostí prvků:

- Nejhrubější byla použita pro model těla zbraně, který do modelu zasahuje pouze jako vhodná podpora, a nezasahuje do bodů zájmu.
- Pro model hlavně byla použita síť jemnější, jelikož dochází k přenosu zatěžující síly, stejná síť pak byla použita na většinu čepu
- Nejjemnější síť byla použita na plochu čepu a plochy s ní v kontaktu, na kterých je pozorováno maximální napětí



Obr. 4-16 Diskretizace modelu.

5 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA SÍTĚ

Pro numerické řešení je nutno provést analýzu vlivu volby sítě na hodnoty vybraných důležitých napětí. Jako pozorovaná veličina (výstupní parametr) bylo zvoleno maximální napětí na ploše čepu, kde je předpokládané místo lomu. Jako vstupní parametry pro test konvergence byly zvoleny:

- P2 - *face sizing*: Velikost prvku na ploše čepu a dotykových plochách.
- P3 – *body sizing*: Velikost prvku na modelu hlavně.
- P4 – *body sizing*: Velikost prvku na modelu rámu.

Výstupním parametrem pak byl P1: *Equivalent stress – maximum*: Maximální hodnota napětí na dané ploše, sledovaná veličina.

P2 [mm]	P3 [mm]	P4 [mm]	P1 [MPa]	Nodes [-]	Elements [-]
0,2	6	1	270,5	205651	113425
0,2	4	2	270,6	107128	47350
0,2	2	4	273,8	96899	42902
0,3	6	1	273,5	158727	93357
0,3	4	2	271,2	58992	27190
0,3	2	4	273,6	52425	24226
0,4	6	1	276,3	140224	85623
0,4	4	2	280,2	37565	18898
0,4	2	4	278,6	33810	16724
0,5	6	1	276,0	132437	82689
0,5	4	2	278,0	32934	16257
0,5	2	4	280,9	30321	14548
0,8	6	1	289,1	122307	78890
0,8	4	2	289,0	24024	12774
0,8	2	2	297,8	32943	18660

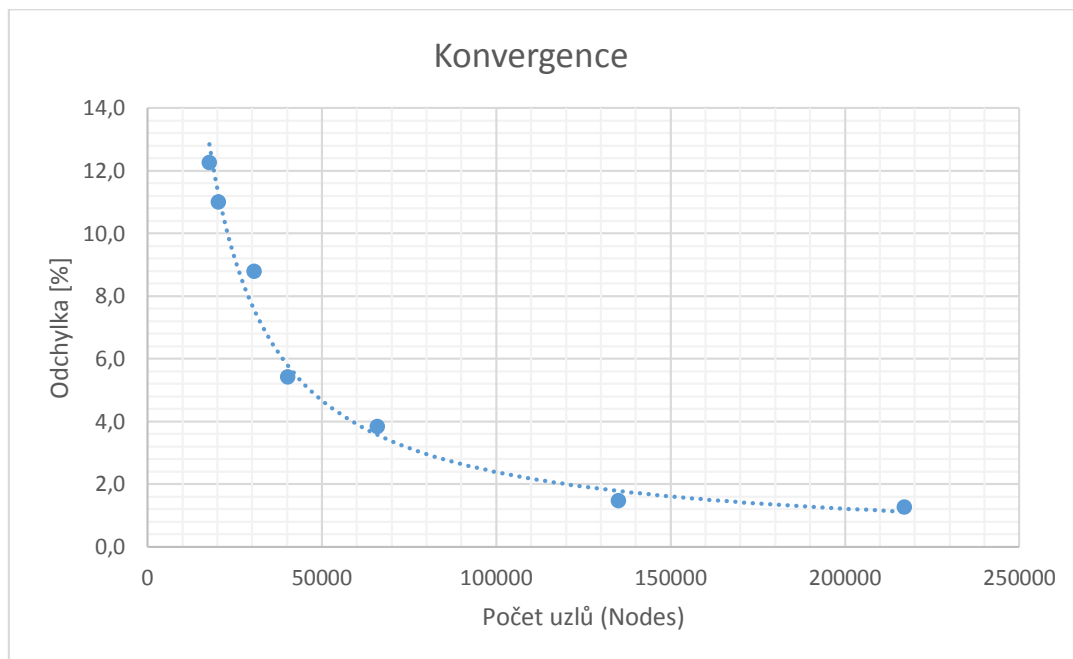
Tab. 5-1 Konvergence sítě.

Z tabulky konvergence viz tab. 5-1 a tab. 5-2, lze vyvodit, že na přesnost výsledku má největší vliv jemnost sítě právě v místě kontaktů a v místech předpokládaného lomu.

Při výpočtu procentuální odchylky šlo o srovnání s nejpřesnějším možným řešením, nutno podotknout že i to je zatíženo chybou, jedná se tedy pouze o relativní odchylku. Absolutní odchylka se dá předpokládat větší. Vzhledem k parametrům a výpočtovému času byla zvolena síť 2, viz tab. 5-2.

	<i>Face Sizing</i> [mm]	<i>Stress</i> [Mpa]	<i>Stress</i> [%]	<i>Nodes</i>	<i>Elements</i>
1.	0,15	389,86		367002	217048
• 2.	0,2	394,74	1,3	237679	135047
3.	0,3	395,57	1,5	111750	65931
4.	0,4	404,77	3,8	70715	40137
5.	0,5	410,95	5,4	53623	30597
6.	0,7	424,11	8,8	35831	20292
7.	0,8	432,71	11,0	30920	17680
8.	0,9	437,58	12,2	29642	16833

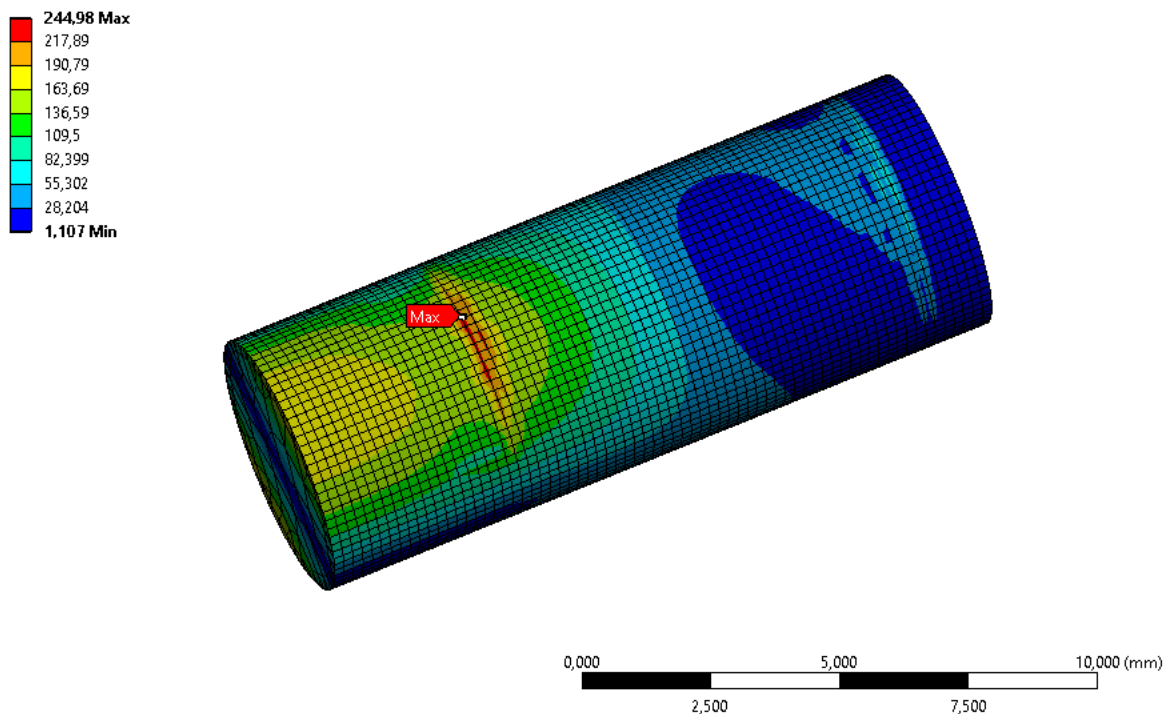
Tab. 5-2 Konvergence sítě.



Obr. 5-1 Závislost relativní odchylky na počtu prvků.

6 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

Celkového maximálního napětí je dosaženo na hraně s kulisou a to 245 MPa, viz Obr. 6-1. Důkazem tohoto extrému může být i viditelně deformovaná hrana na kulise, na místě kontaktu s čepem právě v tomto místě viz Obr. 6-2, nebo otěr na čepu viz Obr. 3-2. Absence vzorků čepu s únavovým lomem právě v tomto místě se dá vysvětlit velikostí zóny, jedná se o relativně malou plochu s extrémem pouze v tlakově namáhané zóně, z hlediska vzniku trhlin jsou nebezpečnější špičky namáhání v tahu.

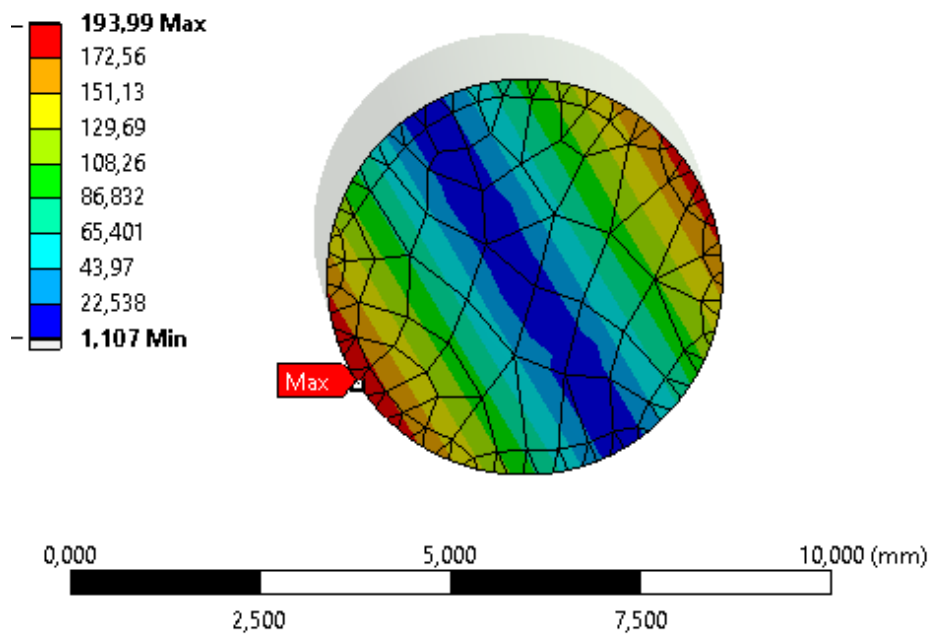


Obr. 6-1 Maximální redukované napětí podle podmínky HMM.



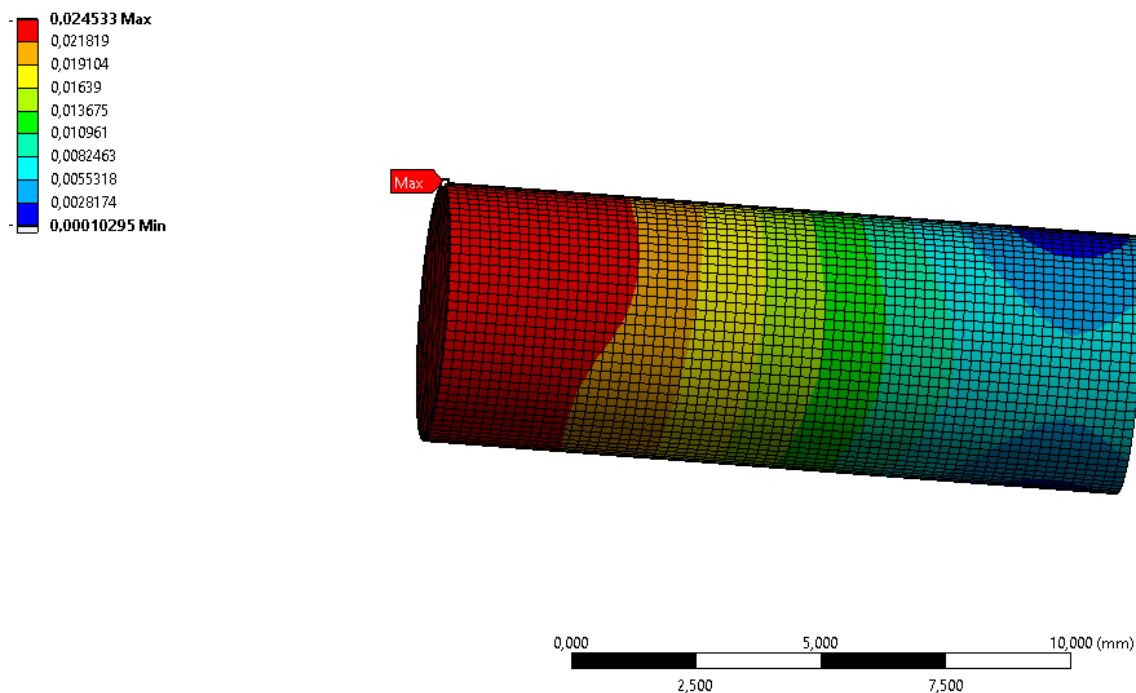
Obr. 6-2 Otláčení na kulise.

Maximální hodnota redukovaného napětí v oblasti tahového namáhání se nachází v místě lomu skutečných součástí, viz Obr. 6-3 Obr. 6-4, maximum v nebezpečné tahově namáhané oblasti 194 MPa.



Obr. 6-3 Maximální redukované napětí podle podmínky HMM v místě obvyklého lomu čepu, uprostřed délky čepu v rovině symetrie.

Na Obr. 6-4 je znázorněn průhyb komponenty čepu. Maximální průhyb na rovině symetrie.



Obr. 6-4 Celková deformace komponenty čepu.

Výsledky numerického modelování vykazují maximální hodnoty napětí v předpokládaném místě lomu $\sigma_{max} = 194 \text{ MPa}$, tedy hluboko pod mezí únavy materiálu. Hodnota meze únavy je stanovena na základě meze pevnosti zvoleného materiálu:

$$\sigma_c = 0,504 \cdot R_m = 494 \text{ MPa}$$

Na základě nejmenší udávané hodnoty meze pevnosti v tahu.

Takto vytvořeným výpočtovým modelem je stanovena bezpečnosti k únavovému porušení:

$$k = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} = 2,5$$

Hodnota bezpečnosti vzhledem k únavovému porušení je dostatečně vysoká, k únavovému lomu by docházet nemělo. Vzhledem ke skutečnosti, že k výskytu únavových lomů dochází, musí být skutečné namáhání čepu větší. Ke zpřesnění výpočtového modelu bude nutné uvažovat při namáhání vliv rázu těles v okamžiku, kdy čep dosáhne krajní polohy v kulise.

7 ZÁVĚR

Na základě rešerše a změření geometrie skutečné zbraně je vytvořen výpočtový model v systému ANSYS Workbench 16.2. Úloha je řešena jako statická, kontaktní, výsledkem analýzy jsou maximální hodnoty napětí. Poloha extrému tahového napětí se shoduje s místem obvyklého únavového lomu čepu.

Výsledky výpočtového modelu jsou ovlivněny volbou vstupních parametrů a okrajových podmínek. Výpočet je proveden v poloze čepu a kulisy v předpokládaném nejnebezpečnějším místě, které je v zadní úvrati. Vypočtená bezpečnost vzhledem k únavovému lomu $k = 2,5$ nevysvětluje únavové praskání u skutečných součástí. Skutečné namáhání čepu je zřejmě mnohem větší a je pravděpodobně způsobeno špičkou napětí vznikající při rázu těles. V předloženém výpočtovém modelu není pro zjednodušení ráz uvažován.

V rámci dalšího postupu analýzy a zjištění příčin únavového poškození čepu, bude nutné do výpočtového modelu zahrnout vliv rázu těles, případně upustit od statického modelu namáhání a provést komplexní dynamickou analýzu. Pro zpřesnění některých vstupních parametrů by bylo vhodné vycházet z experimentálního měření, případně i získat přesnější data o použitých materiálech.

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2-1 Části pistole, hlavní části podtrženy [13].....	13
Obr. 2-2 CZ-75. Před výstřelem, natažené bicí ústrojí, náboj v komoře [12].....	16
Obr. 2-3 CZ-75. Krátce po výstřelu, střela opustila hlaveň. Čep v krajní poloze, sklopením hlavně došlo k odemčení závěru, ten se dále pohybuje vzad. [12].	16
Obr. 2-4 CZ-75. Závěr v krajní (zadní) poloze. [12].....	16
Obr. 3-1 Prasklý čep, detail lomové plochy.	18
Obr. 3-2 Použitý, funkční čep. Viditelný otěr v tlakově namáhané části.....	19
Obr. 4-1 Ukázka sítě na modelu hlavně.	23
Obr. 4-2 Geometrie soustavy, polovina - řez veden osou symetrie.	25
Obr. 4-3 Geometrie hlavně.....	25
Obr. 4-4 Zjednodušená geometrie hlavně: polovina díky synetrii.	26
Obr. 4-5 Geometrie čepu.....	26
Obr. 4-6 Geometrie zjednodušeného čepu	27
Obr. 4-7 Zjednodušená geometrie rámu zbraně	27
Obr. 4-8 Kontakt hlaveň čep.	29
Obr. 4-9 Kontakt čep rám.....	30
Obr. 4-10 Model geometrie: Symetrie: Friction less support.....	31
Obr. 4-11 Okrajová podmínka Displacement na komponentu hlavně.	31
Obr. 4-12 Remote displacement zabraňující rotaci na ploše čepu.	32
Obr. 4-13 Fixed support, nehybná podpora pro celkové ukotvení modelu.....	32
Obr. 4-14 Zátěžná síla.	34
Obr. 4-15 Závislost exponentu Wöhlerovi křivky na poměru meze kluzu k mezi únavy, hodnoty voleny vzhledem k charakteru namáhání - ohyb [17]......	35
Obr. 4-16 Diskretizace modelu.	36
Obr. 6-1 Maximální redukované napětí podle podmínky HMM.	39
Obr. 6-2 Otláčení na kulise.....	40
Obr. 6-3 Maximální redukované napětí podle podmínky HMM v místě obvyklého lomu čepu, uprostřed délky čepu v rovině symetrie.	40
Obr. 6-4 Celková deformace komponenty čepu.....	41

9 ZDROJE

- [1] – BAMBAS, Zdeněk. POLICEJNÍ PREZÍDIUM ČR. [online]. [cit. 2016-03-20]. Dostupné z: <http://www.policie.cz/clanek/reditelstvi-sluzby-pro-zbrane-a-bezpecnostni-material-266175.aspx>
- [2] – KAHUDA, Josef. Oddělení statistiky zemědělství a lesnictví ČSÚ (Český Statistický Úřad). Lesy pokrývají třetinu Česka, myslivců ale ubývá. Dostupné také z: <https://www.czso.cz/csu/czso/lesy-pokryvaji-tretinu-ceska-myslivcu-ale-ubyva>
- [3] – Firearms in the European Union: Survey co-ordinated by the European Commission, 70. Dostupné také z: http://ec.europa.eu/public_opinion/flash/fl_383_en.pdf
- [4] – Which handgun: Poll results. Dostupné také z: <http://www.practicalhandgun.com/which-handgun-poll-results.html>
- [5] – § 118, zák. č. 40/2009 Sb., trestní zákoník
- [6] – Zákon č. 119/2002 Sb., o střelných zbraních a střelivu, ve znění pozdějších změn
- [7] – ONDRÁČEK, Emanuel. Mechanika těles: pružnost a pevnost II. Vyd. 4., přeprac., Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-3260-8.
- [8] – STEJSKAL, Vladimír, Jiří KNĚŽŮ a Jiří BŘEZINA. Mechanika I. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-010-1888-1.
- [9] – Janíček, P., Ondráček, E.: Řešení problémů modelováním. Téměř nic o téměř všem. FS VUT, Brno, 1998
- [10] – Kratochvíl C, Ondráček E.: Mechanika těles - Počítače a MKP. VUT, Brno, 1986
- [11] – Engineering Structures, 84 stran, 1. Únor 2015, str. 29-41. fatigue crack prevention.
- [12] – Star-firearms [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.star-firearms.com/firearms/guns/283031/images/m31-animated.gif>
- [13] – Česká Zbrojovka Uherský Brod [online]. [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://www.czub.cz/?lang=cz>
- [14] – Materials Science and Engineering. Str. 119-129. Improved fatigue behavior by applying ultrasonic impact treatment. B.N. Mordyuk.
- [15] - BOHÁČEK, František. Části a mechanismy strojů: Zásady konstruování. Druhé doplněné. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1984. ISBN 55-574-84.
- [16] - EPSILON FEA. Contact Analysis: ANSYS. 2015. Dostupné z: http://www.epsilonfea.com/wp-content/uploads/2015/05/Contact_Update.pdf
- [17] – RŮŽIČKA, Milan, Miroslav HANKE, Milan ROT. Dynamická pevnost a životnost. Vydání 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1987.