



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MKP SIMULACE TORMENTAČNÍCH VÝSTŘELŮ STŘELNÝCH ZBRANÍ

PRAHA 2017

RADEK SKÁCELÍK

Anotační list

Jméno autora:	Radek Skácelík
Název DP česky:	MKP simulace tormentačních výstřelů střelných zbraní
Název DP anglicky:	FEM simulation of overloading tests of hand guns
Rok:	2016
Ústav:	Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky
Zadavatel:	Česká zbrojovka Uherský brod a.s.
Studijní program:	Strojní inženýrství
Obor studia:	Aplikovaná mechanika
Vedoucí DP:	doc. Ing. Miroslav Španiel CSc
Počet stran:	58
Počet obrázků:	55
Klíčová slova:	Balistika, tormentace, metoda konečných prvků
Keywords:	Ballistics, overloading, final element method

Anotace:

Cílem této diplomové práce je stanovit vliv rozdílných tolerancí závitu hlavně na napjatost šroubového spojení. Posoudit vliv tormentační zkoušky a provozního zatížení na tomto spoji ve smyslu pravděpodobnosti lomu hlavně. Vytvořit funkční MKP model, který umožní věrné zachycení namáhání zbraně výstřely.

Annotation:

The aim of this thesis is to establish the effect of different overloading of screw-thread connection of the gunpoint and receiver on its tightness. The FEM simulation, which consists of assembling weapon and subsequent shoot, is used to assess this influence. There are also analysed common operational and overloading shoots. On the basis of the results it can be concluded that the screw-thread with overhang is more strained than the screw-thread without overhang.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci zpracoval samostatně, podle pokynů vedoucího práce a použil jsem literárních pramenů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použitých informačních zdrojů.

V Praze dne:.....

podpis:.....

Poděkování:

Rád bych tímto poděkoval vedoucímu práce doc. Ing. Miroslavu Španielovi, CSc. za jeho připomínky, náměty a především pomoc při vypracování této práce. Dále bych chtěl poděkovat i všem ostatním kteří mi poskytli konzultace a pomohli mi s řešenou problematikou.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Skácelík** Jméno: **Radek** Osobní číslo: **456190**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Aplikovaná mechanika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

MKP simulace tormentačních výstřelů střelných zbraní.

Název diplomové práce anglicky:

FEM simulation of overloading tests of hand guns.

Pokyny pro vypracování:

V případě tormentačních výstřelů (TV) není kladen požadavek na životnost, ale pouze na zachování integrity. Posouzení vyžaduje detailní znalost deformace a napjatosti v exponovaných místech. Experimenty ukazují, že jedním z kritických míst je závit mezi hlavní a lůžkem závěru. Cílem Vaší DP je posoudit výpočtově vliv utažení závitu na stav napjatosti při tormentačním výstřelu konkrétní zbraně zadané ČZ UB. K tomu:

1. Formou rešerše se seznamte s problematikou MKP modelování výstřelů a stručně popište aktuální stav poznání.
2. Navrhněte funkční způsob modelování sestavy hlaveň lůžko zatížené montážním předpětím a výstřelem. Uvažujte elasticko-plastické chování materiálů.
3. Proveďte srovnávací výpočty pro posouzení vlivu přesahu v závitu mezi hlavní a lůžkem na jeho namáhání při tormentačním výstřelu.
4. Vyhodnoťte a interpretejte získané výsledky z hlediska kvantifikace vlivu přesahu v závitu na pevnost a případně navrhněte způsoby detailního posouzení pevnosti.
5. Formulujte závěry.

Předpokládaný rozsah práce: do 80 stran.

Seznam doporučené literatury:

Carlucci, D.E. Jacobson, S.S.: Ballistics: Theory and design of guns and ammunition. 2nd Edition, CRC Press, 2014
Macko, M.: Teorie a výpočty loveckých, sportovních a obranných zbraní. VŠB TU Ostrava, skripta
Dokumentace k programu Simulia/Abaqus. Dassault Systemes.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Miroslav Španiel CSc., ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

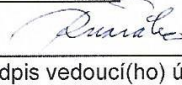
Datum zadání diplomové práce: **28.04.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **18.08.2017**

Platnost zadání diplomové práce:



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

25.4.2017

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Obsah

Seznam užitých symbolů	7
Seznam obrázků	9
Úvod	11
Řešená problematika.....	13
Východiska řešení.....	15
Měření tlaku v hlavni	15
Balistika	16
Vnitřní balistika.....	16
Přechodová balistika	20
Zpětný ráz zbraně	22
Komponenty zbraně	24
Závitové spojení hlavně a pouzdra závěru	25
Metoda konečných prvků.....	26
Submodeling.....	27
Kontakt s přesahem (interference fit)	27
Vazbové funkce (Coupling)	27
Výměna dat mezi implicitním a explicitním řešičem.....	28
Uživatelské programy (subrutiny)	29
Tvorba modelu	31
CAD model.....	33
Modelování závitu	33
Sítování.....	35
Submodeling modelu.....	37
Uložení modelu při implicitním řešení	37
Modelování zatížení hlavně při výstřelu.....	38
Modelování tlaku.....	38
Modelování zatížení od tření mezi střelou a hlavní	39
Modelování zpětného rázu.....	41
Modelování testovacího stendu	42
Vyhodnocení výsledků.....	43
Porovnání zatížení hlavně po montáži	43
Vyhodnocení zatěžování výstřelem.....	46
Lokalizace napěťových extrémů	46
Rozbor napěťových vlivů zatížení	50
Posouzení vlivu tormentace	53

Závěr	55
Výsledky analýz	55
Zdroje	57

Seznam užitých symbolů

P_t	Tormentační tlak	[MPa]
P_{max}	Obálkový tlak	[MPa]
m_k	Hmotnost střely	[Kg]
S_k	Plocha dna střely	[mm ²]
p_s	Tlak na dno střely	[MPa]
F_{Pr}	Odporové síly proti pohybu střely	[N]
p_d	Tlak v nábojové komoře	[MPa]
ω	Hmotnost střelného prachu	[Kg]
k_{torm}	Tormentační součinitel	
I_{zz}	Moment setrvačnosti střely	[Kg·mm ²]
k_r	Poloměr setrvačnosti střely	[mm]
μ	Koeficient tření v hlavni	
α	Úhel stoupání vývrту	[rad]
d	Průměr vývrту hlavně	[mm]
F_t	Tečná síla v hlavni	[N]
F_R	Síla na dno střely	[N]
l_0	Délka nábojnice	[mm]
l_{kom}	Dílka nábojové komory	[mm]
k	Poměr nábojové komory	
ρ	Expanzní poměr	
l	Délka hlavně za střelou	[mm]
\bar{V}	Rychlost výtoku plynů z hlavně	[m·s]
V_u	Ústová rychlost	[m·s]
β	Součinitel dodatečného účinku	
p_u	Ústovní tlak	[MPa]
t	Čas od počátku výtoku z hlavně	[s]
S_u	Plocha průřezu ústí hlavně	[mm ²]
Δ	Objemová hustota	[kg·m ⁻³]
c_u	Vnitřní objem hlavně	[m ⁻³]
M_u	Utahovací moment	[Nm]
d_2	Střední průměr závitů	[mm]
d_o	Střední průměr dosedací plochy	[mm]
f	Koeficient tření v závitě	
P	Závitová rozteč	[mm]
λ	Vrcholový úhel závitů	[°]

Seznam obrázků

Obr. 1 tlak v hlavni při různých provozních podmínkách [2].....	13
Obr. 2 toleranční pole závitu [6].....	14
Obr. 3 naměřený provozní tlak v hlavni	15
Obr. 4 měření tlaku v hlavni [7] Obr. 5 snímání pohybu střely [7]	15
Obr. 6 rozdělení balistiky [7]	16
Obr. 7 tvar prachového zrna [7]	17
Obr. 8 silové poměry při výstřelu [1].....	17
Obr. 9 rozmístění tlakových snímačů [3].....	18
Obr. 10 záznam průběhů tlaku [3].....	19
Obr. 11 poměr nábojové komory [3].....	19
Obr. 12 šíření rázových vln [7].....	20
Obr. 13 průběh koeficientu výtoku z hlavně [1].....	21
Obr. 14 průběh tlaků a rychlosti mimo hlaveň a v hlavni [7]	22
Obr. 15 silové poměry na zbrani při zpětném rázu [5].....	22
Obr. 16 balistické kyvadlo [5]	23
Obr. 18 průběh dráhy zákluзу zbraně zapřené do ramene střelce [4].....	24
Obr. 20 uchycení pouzdra k tělu zbraně šrouby (žlutá barva)	24
Obr. 21 uzamčená poloha závěru.....	25
Obr. 22 geometrie metrického závitu [8].....	26
Obr. 23 schéma realizace kontaktu interference fit [10]	27
Obr. 24 Propojení uzlových bodů pomocí techniky coupling [10]	28
Obr. 25 schéma vypočtu.....	32
Obr. 26 Porovnání závitového spoje s kroužky [11]	33
Obr. 28 síť globálního modelu	35
Obr. 29 Síť submodelu.....	36
Obr. 31 Síť na submodelu	37
Obr. 32 Umístění submodelingových řezů (červená barva)	37
Obr. 33 uložení sestavy globálního modelu	38
Obr. 34 Zatěžování nábojové komory	39
Obr. 35 distribuce síly a momentu do uzlových bodů v hlavni	40
Obr. 36 Zatížení hlavně zavedením sil přímo do uzlů.....	41
Obr. 37 umístění hmotného bodu (zelená barva)	41
Obr. 38 zjednodušený model dvojnožky	42
Obr. 39 Osová napjatost na hlavni s montážním přesahem	43
Obr. 40 osová napjatost hlavně bez montážního přesahu.....	44
Obr. 41 napětí na obvodu hlavně v jednotlivých zubových mezerách.....	45
Obr. 42 Misesovo napětí na hlavni s konstrukčním přesahem	45
Obr. 43 min principal hlavně s přesahem.....	46
Obr. 44 napětí na hlavni bez konstrukčního přesahu	46
Obr. 45 Analyzovaná místa na hlavni bez montážního přesahu	47
Obr. 46 Analyzovaná místa na hlavni s montážním přesahem	47
Obr. 47 osově napětí v kritických místech na hlavni bez konstrukčního přesahu	48
Obr. 48 osově napětí v kritických místech na hlavni s konstrukčním přesahem	49
Obr. 49 porovnání napětí v čase v místě C.....	50
Obr. 51 Průběh silové dvojce a osově síly v druhé fázi vnitro balistického děje.....	51

Obr. 52 kmitání hlavě.....	52
Obr. 53 oblast zatěžování hlavě při maximálním tlaku (shora tormentační tlak, provozní tlak)..	53
Obr. 54 celková napjatost hlavě s konstrukčním přesahem v čase 0,4 ms.....	54
Obr. 55 celková napjatost na hlavni bez konstrukčního přesahu v čase 0.4 ms.....	54

Úvod

Tato práce se zabývá tormentačním testováním hlavně dlouhé kulové zbraně z produkce České zbrojovky Uherský brod a.s. (dále už jen CZUB). Při této zkoušce existuje obava, že by mohlo docházet k lomu hlavně v místě závitového spojení hlavně s pouzdem závěru. Cílem práce je posouzení vlivů zatěžování na toto spojení hlavně a ručit možné důvody tohoto mezního stavu.

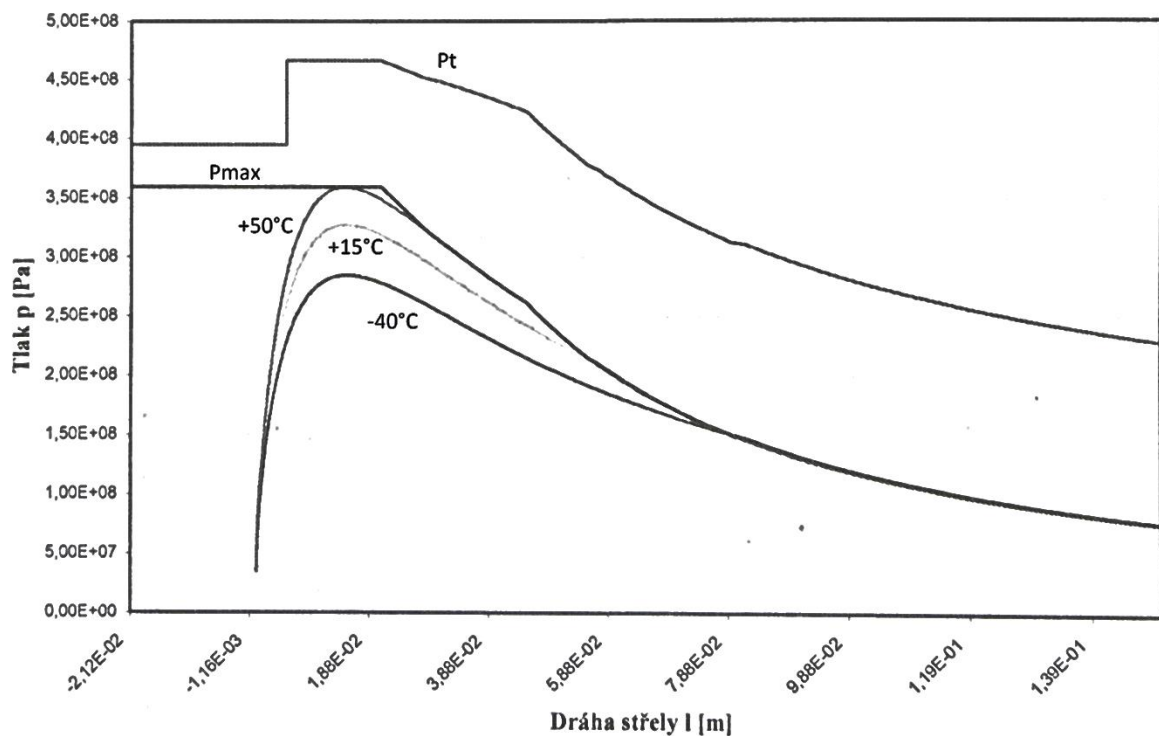
K posouzení byly určeny dva druhy závitového spojení. První druh obsahuje konstrukční přesah, který zaručuje nerozebíratelnost spojení, ale vnáší do spojení přídatná pnutí. Cílem práce je posoudit vliv tohoto pnutí na potenciální vznik lomu a co nejdříve nasimulovat metodou konečných prvků zátěžné stavy které během výstřelu nastávají a posoudit jejich vliv na napjatost závitového spojení. Pro porovnání bylo analyzováno i spojení bez konstrukčního přesahu tak, aby bylo možné určit zda výhody nerozebíratelnosti spojení dokáží vyvážit rizika vzniklá zvýšenou napjatostí.

Řešená problematika

Tormentační zkouška je ověřovací zkouška, která prověřuje schopnost nově vyrobených hlavních přenášet provozní zatížení. Hodnota tlaku v hlavni závisí na jakosti použitého střeliva a provozních podmínkách, především teplotě okolního prostředí, míře znečištění a přítomnosti vody v hlavni.

Podstatou této zkoušky je záměrné vystavení hlavně tlaku P_t vyššímu než je běžný provozní tlak v hlavni. Pro tyto účely je používán náboj s větším množstvím střelného prachu, který vyvine tlak o 30-50% větší než obálkový tlak P_{max} (viz. Obr. 1), ten je maximem provozních tlaků za různých provozních teplot. Takovýto náboj je následně během zkoušky ze zbraně vystřelen, při čemž pro úspěšné splnění musí být zachována celistvost zbraně. Tím je ověřena bezpečnost.

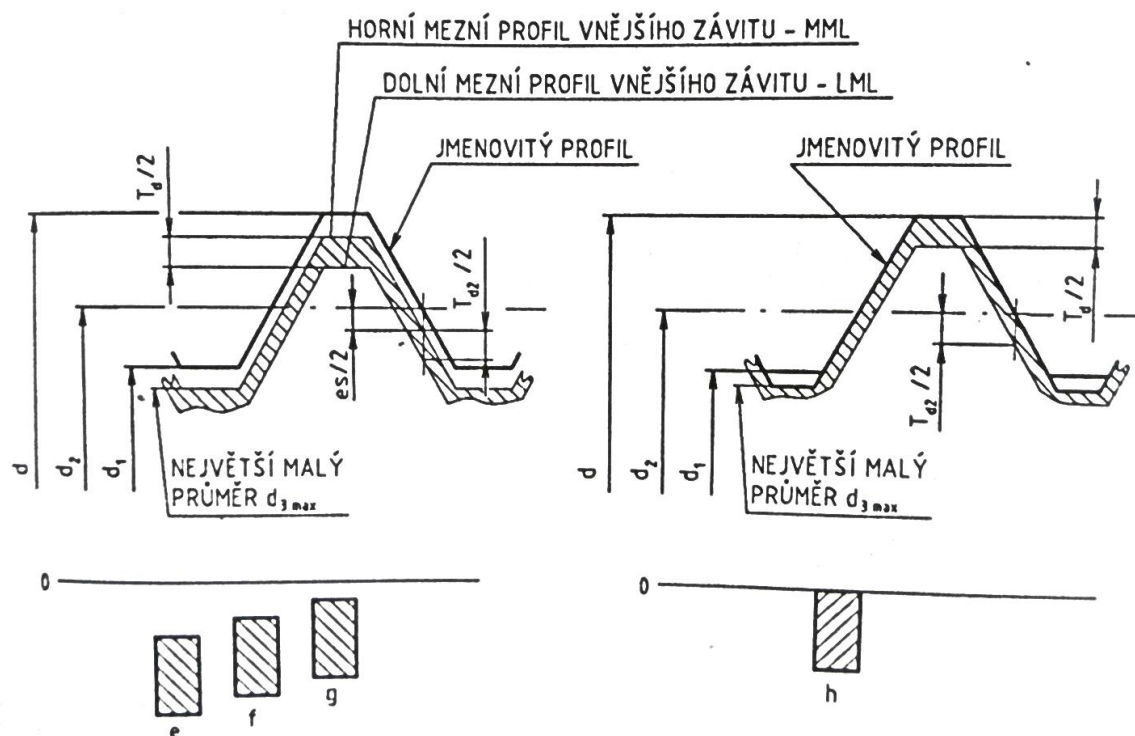
Tato zkouška je prováděna nezávislou státní zkušebnou v souladu s vyhláškou 335/2004 Sb. o zbraních a střelivu.



Obr. 1 tlak v hlavni při různých provozních podmínkách [2]

Na zadané zbrani je úkolem zmapovat vliv zatěžování provozními a tormentačními výstřely, na spojení hlavně se zbytkem těla zbraně. Toto spojení se provádí závitem, který má v řešených případech rozdílná toleranční pole (viz. Obr. 2). Zatím co jeden typ závitového spojení je proveden s montážním přesahem (toleranční pole maticového a šroubového profilu závitu zajišťují kolizi rozměrů obou součástí), druhý typ je proveden s běžnou montážní vůlí. Přesah prvního typu závitu je nutné při montáži překonat, čímž v závitu vzniká nejen napětí od utažení ale i napětí vzniklé překonáním tohoto přesahu. Druhý typ závitu je zatížen pouze silou od utažení hlavně. Je zřejmé, že první typ závitového spoje s přesahem zajistí mnohem větší bezpečnost proti uvolnění spoje hlavně se zbytkem těla pušky než typ druhý. Na druhou stranu lze u prvního typu očekávat větší montážní napětí v závitu, na která jsou superponována napětí vzniklá od zatížení výstřelem. Analýza prováděná v rámci této diplomové práce si klade za cíl

porovnat oba případy a kvalitativně posoudit snížení bezpečnosti v důsledku provedení závitového spoje s přesahem.



Obr. 2 toleranční pole závitů [6]

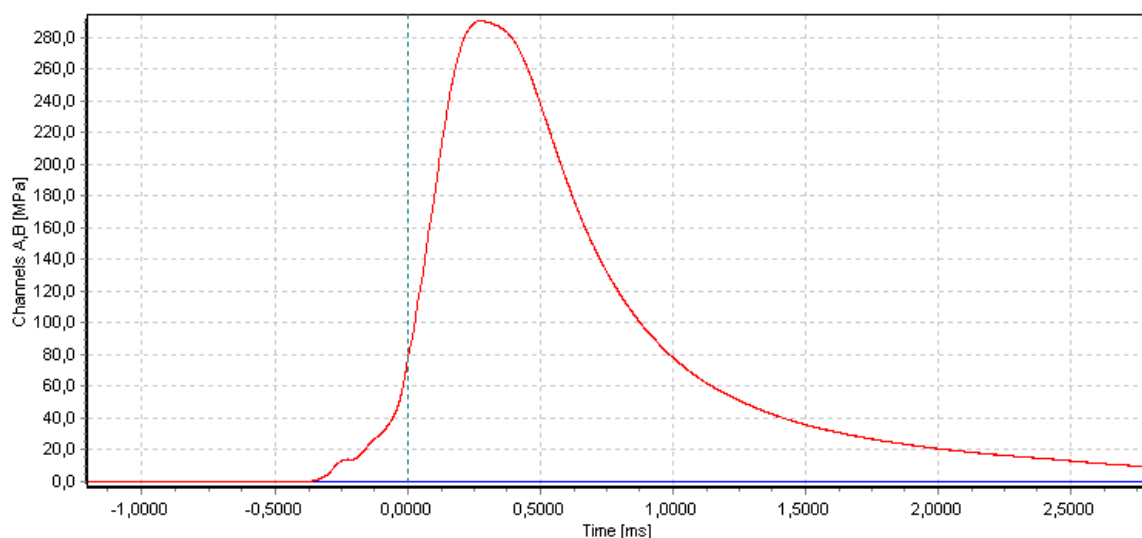
K řešení byl poskytnut naměřený provozní tlak, CAD model bez vymodelovaného závitu a geometrické a fyzikální parametry zbraně. Z těchto dat byl sestaven výpočetní model, který měl za cíl věrně reprezentovat zatěžující stav na hlavni i chování zbraně během výstřelu při uvažování dvou režimů střelby, kdy zbraň je pevně upnuta bez možnosti jakékoliv pohybu (simulace vývojové zkoušky) a režimu, který představuje střelbu z dlouhé kulové zbraně střelcem v pozici v leže.

Východiska řešení

Za účelem řešení zadané problematiky bylo nutné nejprve porozumět způsobu získání poskytnutých dat, problematice jejich aplikace a funkcím jednotlivých součástí zbraně.

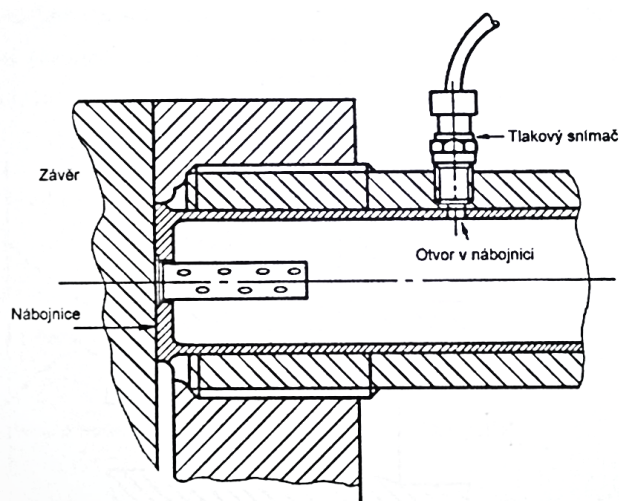
Měření tlaku v hlavni

Měření tlaku je prováděno na hlavni s tlakovým snímačem zavedeným přímo do nábojnice (viz. Obr. 4). Takto získaný průběh provozního tlaku (viz. Obr. 3). ukazuje první a druhou fázi vnitřní balistiky (viz dále). Časová osa je popsána tak, aby čas $t=0$ byl okamžik kdy se střela dává do pohybu. Do času $t=0$ tlak roste pouze v nábojnici. K určení tohoto okamžiku slouží druhý tlakový odběr umístěný před střelou (viz. obr. 5).

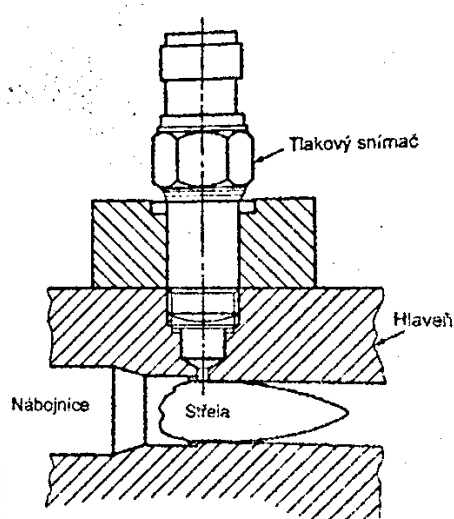


Obr. 3 naměřený provozní tlak v hlavni

Při stanovení tlaku se vychází z předpokladu, že zkouška probíhá při stejné teplotě jako měření tlaku. Zkouška se provádí na studené hlavni a za těchto podmínek je naměřen i tlak.



Obr. 4 měření tlaku v hlavni [7]



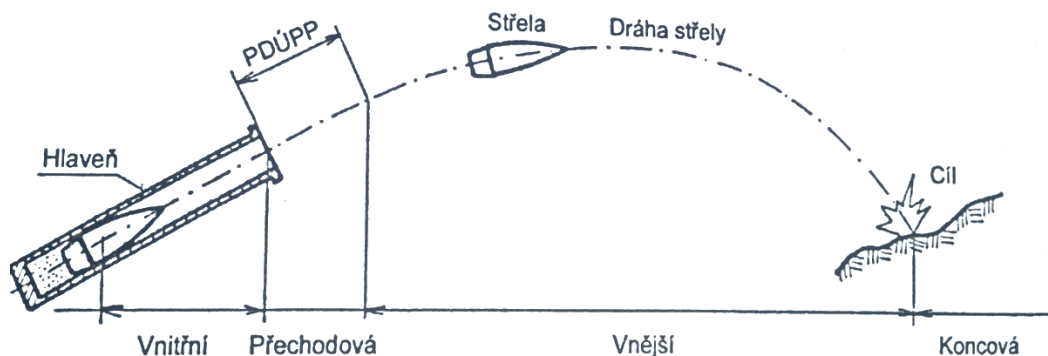
Obr. 5 snímání pohybu střely [7]

Za těchto předpokladů lze průběh tormentačního tlaku P_t vyjádřit rovnicí 1 z [4], kde tormentační součinitel k_{torm} nabývá hodnot v rozmezí 1,3-1,5. V případě naměřených tlakových dat p_n se obvykle se používá hodnota 1,3.

$$P_t = k_{torm} \cdot p_n \quad (1)$$

Balistika

Balistika popisuje jevy během výstřelu a dělí se na 4 základní fáze [7] (viz Obr. 6):



Obr. 6 rozdělení balistiky [7]

- **vnitřní balistika** – řeší zdroje a příčiny pohybu střely v hlavni.
- **přechodová balistika** – popisuje pohyb střely bezprostředně před ústím hlaveň, kdy na střelu působí expandující prachové plyny.
- **vnější balistika** – studuje dráhu střely od okamžiku opuštění hlaveň (po oblasti přechodové balistiky) až po její dopad na cíl.
- **koncová balistika** – zkoumá pohyb a chování střel v prostředí cíle v souvislosti s jejich ničivými účinky.

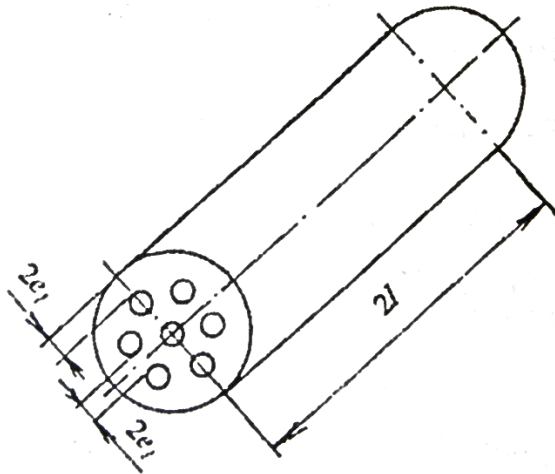
Vnější a koncová balistika nejsou v této práci řešeny, protože nemají vliv na namáhání hlaveň.

Vnitřní balistika

Hlavním úkolem vnitřní balistiky je na základě daného průběhu tlaku v čase stanovit pohyb střely v hlavni. Rozdělujeme ji do tří fází:

1. Prachová nálož hoří uvnitř nábojnice a střela ještě není v pohybu. Tlak v nábojové komoře roste.
2. Střela je v pohybu, hoření prachové nálož probíhá ve zvětšujícím se objemu za střelou. Tlak i přes nárůst objemu roste. V této fázi kdy dochází k hoření v proměnném objemu se také říká pyrodynamika.
3. Vlivem rychlého zvětšování objemu za střelou a dohořívání prachové nálož dochází k poklesu tlaku. Kvůli poklesu tlaku už není střela tolik urychlována, a proto by v této fázi mělo dojít k opuštění hlaveň.

Snahou výrobců střeliva je vytvořit nálož, která bude mít co nejpomalejší pokles tlaku ve třetí fázi. Toho se dosahuje chemickým složením a vhodnou konstrukcí zrn prachu (zvětšení plochy). Tohoto jevu se dá dosáhnout využitím dutinových zrn (viz. obr. 7), kde hoření uvnitř zrna zvětšuje plochu, na které dochází k zahoření. [7]



Obr. 7 tvar prachového zrna [7]

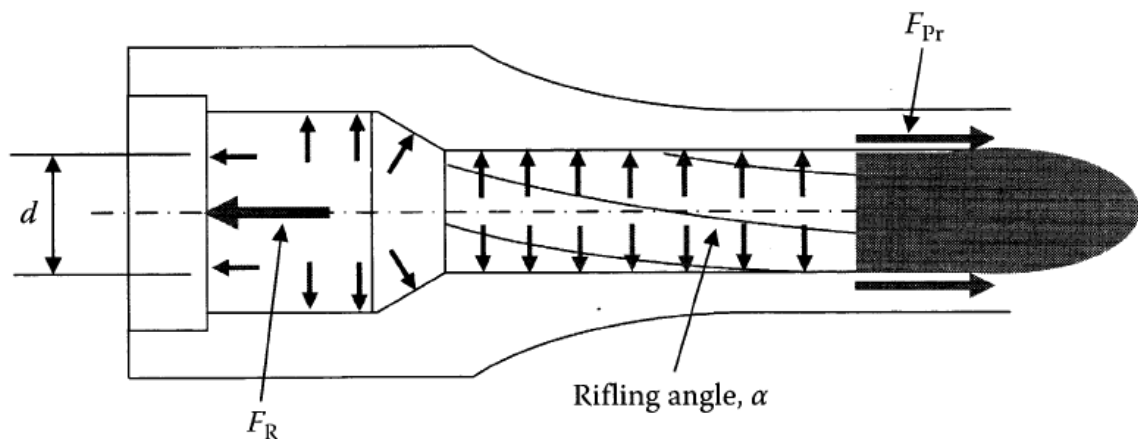
Při obecném řešení pohybu střely v hlavni se vychází ze zákona zachování energie. Za předpokladu, že změny tlaku vlivem přestupu tepla do hlavně a proudění plynu v hlavni jsou zohledněny pouze zjednodušenými fenomenologickými modely (viz níže) pohybové rovnice (2),

$$m_k \cdot \frac{dv}{dt} = s_k \cdot p_s - \sum F_{Pr} \quad (2)$$

kde m_k je hmotnost střely, s_k plocha dna střely, na kterou působí tlak plynu p_s , F_{Pr} jsou odporové síly. Podle [3], kde jsou porovnány různé modely poměru mezi tlakem na dno kulky a tlakem naměřeným tlakem v komoře je pro nám známá data nejvhodnější model popsán rovnicí (3), kde p_d je tlak v nábojové komoře a ω hmotnost prachové nálože.

$$\frac{p_d}{p_s} = 1 + \frac{\omega}{2 \cdot m_k} \quad (3)$$

Pomocí (2) a (3) byl stanoven pohyb střely v hlavni.



Obr. 8 silové poměry při výstřelu [1]

Odpor proti pohybu střely

Byla uvažována rotace střely vynucená stoupáním vývrtní hlavně a třením kulky v něm. Deformace střely od zalisování do drážek vývrtní ve výpočtu není uvažována. Pak podle [1] byl z momentu setrvačnosti střely vypočten její poloměr rotace k_r , viz rovnice (4) a odporová síla v ose hlavně byla pro hlavě s vývrtem uvažována jako (rov. 5),

$$I_{zz} = m_k \cdot k_r^2 \quad (4)$$

$$F_{Pr} \approx (\mu + \tan \alpha) \cdot F_T \quad (5)$$

kde F_T je tečná síla z (rov.7). Po dosazení (7) do (5) dostaneme rovnici (8), která vyjadřuje sílu přenášenou v ose hlavně (viz obr. 8) [1].

$$F_R = s_k \cdot p_s^2 \quad (6)$$

$$F_T = \left(\frac{k}{\frac{d}{2}} \right) \cdot F_R \cdot \tan \alpha \quad (7)$$

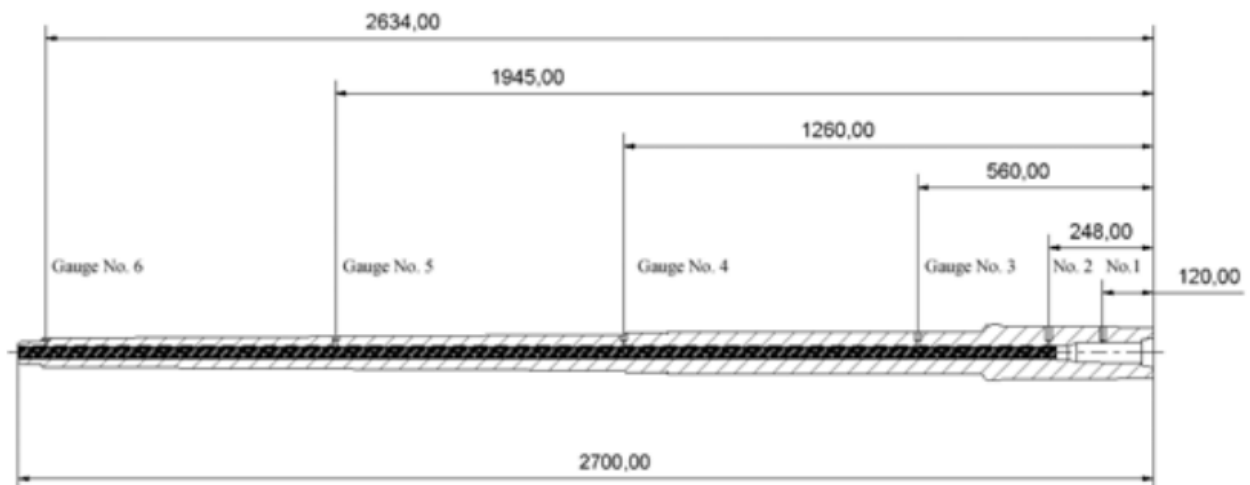
$$F_{Pr} = \left(\frac{k}{\frac{d}{2}} \right)^2 \cdot (\mu + \tan \alpha) \cdot \tan \alpha \cdot F_r \cdot \left(\frac{m_k}{m_k + \frac{\omega}{2}} \right) \quad (8)$$

Koeficient tření ale nebyl znám. Při jeho odhadu byla využita znalost naměřené ústové rychlosti a pomocí pohybové rovnice při znalosti délky hlavně byl přibližně určen jako konstanta. To vše na základě předpokladu, že střela se do vývrtu zařízne již v první fázi balistického děje, kdy je ještě nedošlo ke změně na předním tlakovém odběru. Poté již lze uvažovat kulku v pohybu, tudíž postačí odhadnout jedinou hodnotu dynamického koeficientu tření. Pro toto zjednodušení byla uvažována třecí plocha ve šroubovici vývrtu. Normálová síla byla získána rozkladem sil do stoupání vývrtu.

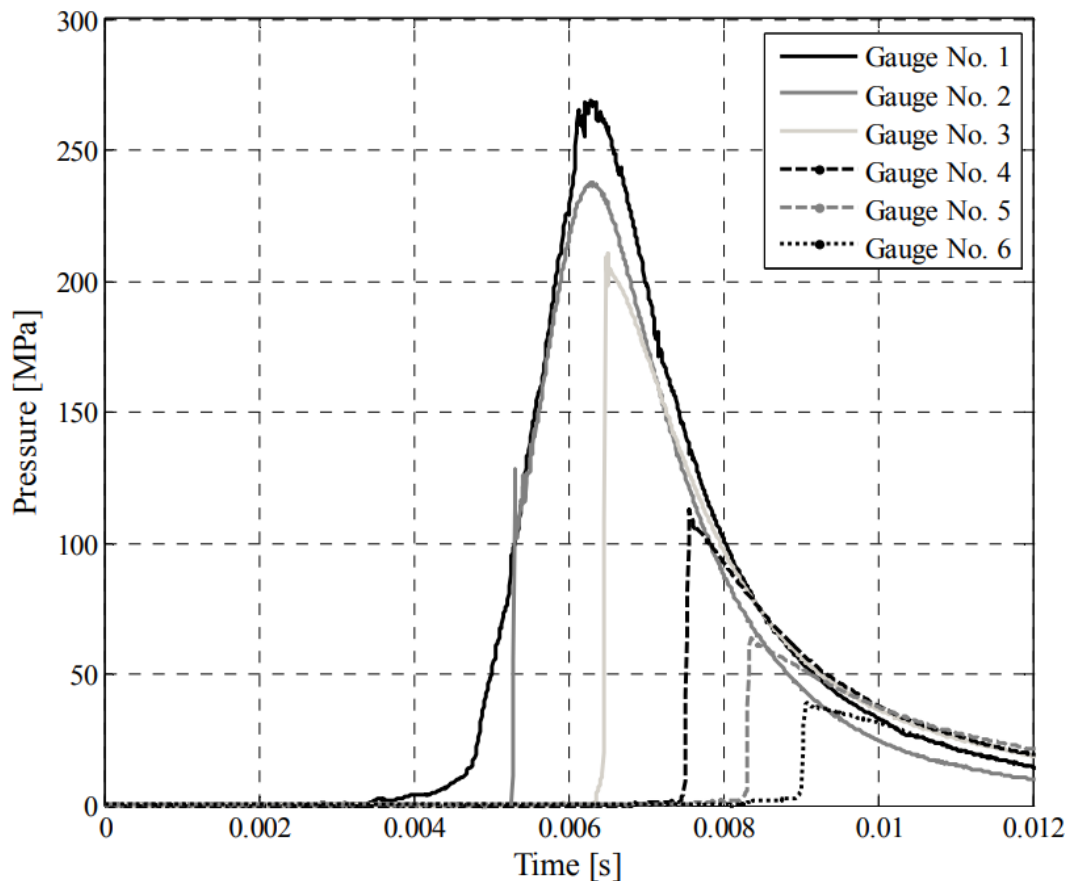
Za těchto předpokladů bylo stanoveno i namáhání hlavně silovou dvojicí od rotace střely způsobenou třením ve vývrtu.

Díky přibližné znalosti pohybu kulky v hlavni bylo možno použít i složitější model pro šíření tlaku v hlavni. Jelikož při hoření prachu dochází i k jeho vymetení z nábojnice a k hoření zrn v různé fázi zahoření v různých vzdálenostech v hlavni, je vhodné uvažovat i prostorovou distribuci tlaku podélce hlavně.

Zde byly využity výsledky experimentu z [3], ve kterém byly pomocí několika tlakových odběrů získány hodnoty tlaku v různých vzdálenostech od dna nábojové komory (viz obr. 7,8) pro návrh závislosti šíření tlaku pomocí několika různých modelů.

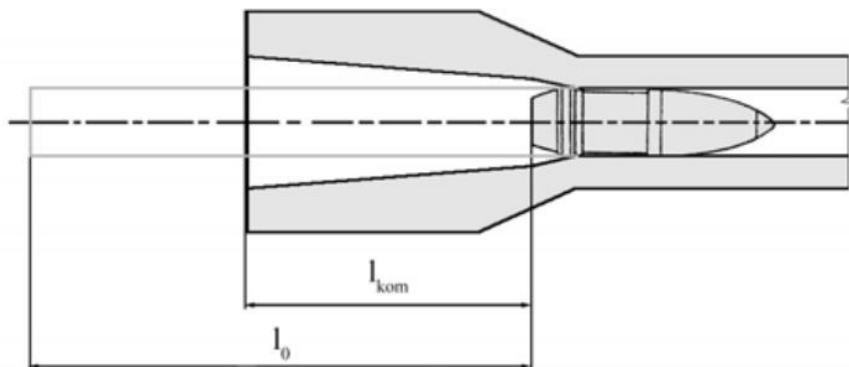


Obr. 9 rozmístění tlakových snímačů [3]



Obr. 10 záznam průběhů tlaku [3]

Pro tyto účely byl využit model 4 z [3] který z rozměrů hlavně a tlaku v něm. Umožnil získat představu o rozložení tlaku v hlavni. Pomocí několika geometrických závislostí tvaru hlavně: poměrem nábojové komory a dna nábojnice χ (viz obr.11)



Obr. 11 poměr nábojové komory [3]

$$\kappa = \frac{l_0}{l_{kom}}$$

- Expanzním poměr ρ objemu nábojové komory ku objemu hlavně za střelou.

$$\rho = \frac{s_k \cdot l}{c_o}$$

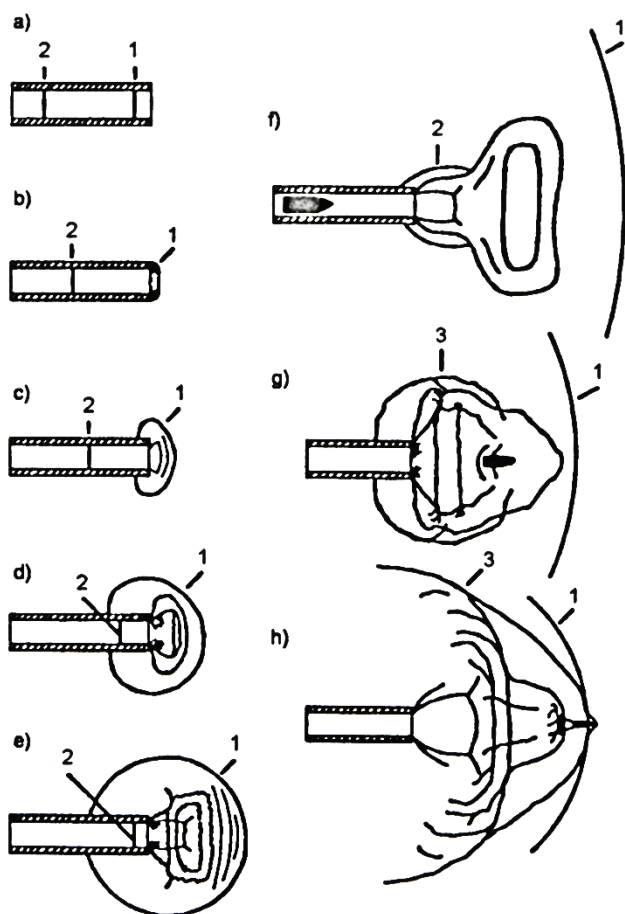
Čímž byla získána změna tlaku v prostoru a výsledný tlakový poměr rov.9.

$$\frac{p_d}{p_s} = 1 + \frac{\omega}{2 \cdot \varphi \cdot m_k} \cdot \left(1 - \frac{1}{\kappa^2}\right) \quad (9)$$

Přechodová balistika

Popisuje oblast výtoku plynů z hlavně a jejich interakci se střelou. Tato oblast dosahuje délky až desítek ráží. Jde o doposud ne zcela prozkoumanou oblast balistiky, kterou ovlivňuje velké množství parametrů. Průběh výtoku je ovlivněn ústovým zařízením, to s plyny z hlavně různým způsobem pracuje, například tlumič plamene, zvuku nebo případně různé druhy pro redukci účinků zpětného rázu. Velký vliv má i otevření závěru u automatických zbraní, což není tento případ.

Vlivem nadkritického proudění, dochází ke vzniku primární a sekundární rázové vlny. Příčinou jejich vzniku je vytlačování vzduchu z hlavně střelou a současným pronikáním plynu netěsnostmi mezi vývrtem a střelou. Tyto rázové vlny vznikají, když je kulka ještě v hlavni a utvoří kulovou rázovou vlnu po jejím opuštění, tím je způsoben ústový třesk. Následná interakce plynů z hlavně s okolním vzduchem tvoří další rázové vlny [4]. (obr 12).



Obr. 12 šíření rázových vln [7]

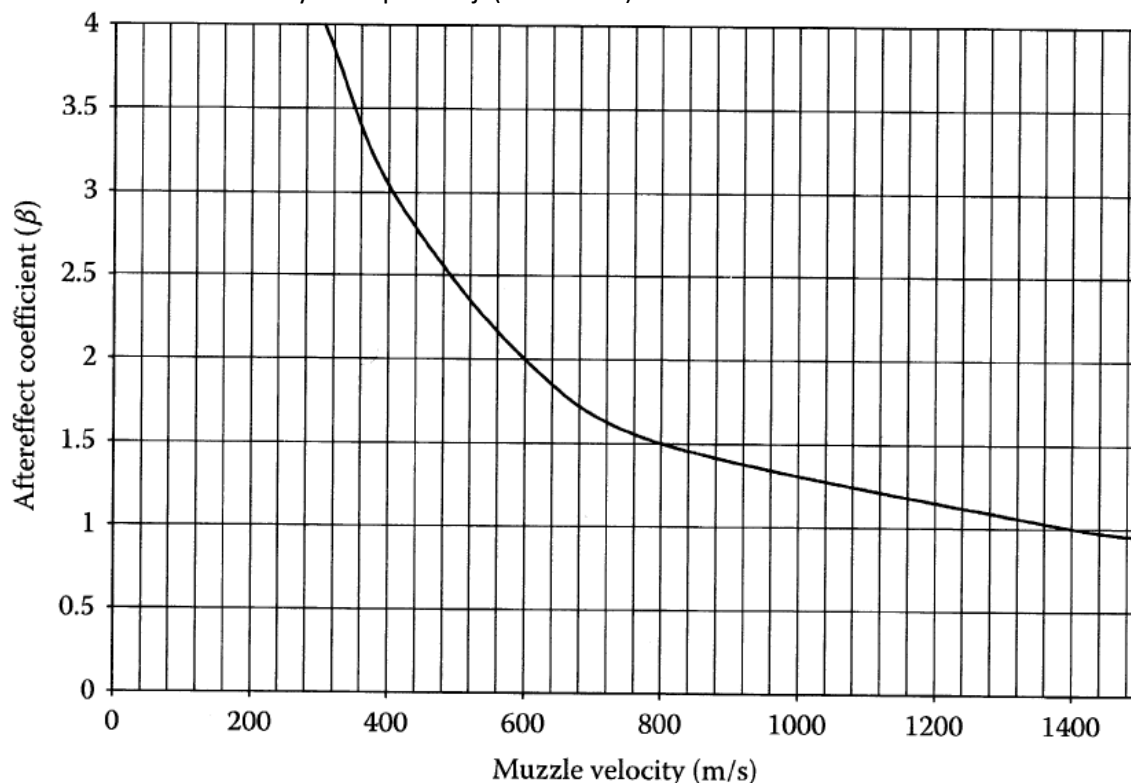
Střela je po opuštění hlavně ještě urychlována do vzdálenosti 20 až 40 ráží výtokem plynu z hlavně na rychlost \bar{V} . Literatura [1] udává přibližné vztahy (10) a (11), které za pomoci závislosti na koeficientu β (viz obr. 13) nebo rychlosti zvuku c linearizuje působení plynu na střelu na základě ústové rychlosti V_u .

$$\bar{V} = \sqrt{V_u^2 + c^2} \quad (10)$$

$$\bar{V} = \beta \cdot V_u \quad (11)$$

Součinitel dodatečného účinku β je získáván experimentálně nebo pro jeho matematickou formulaci existuje několik interpretací (francouzská, ANII, Krupp). Všechny tyto interpretace pracují se závislostí rychlosti střely v ústí hlavně a jejich rozdíly jsou malé. [7]

Vlivem expanze plynu dochází v okolí ústí hlavně k poklesu tlaku plynu vytékajícího z hlavně ven, tlak uvnitř hlavně klesá výrazně pomaleji (viz obr. 14).



Obr. 13 průběh koeficientu výtoku z hlavně [1]

Pro případ této aplikace byl ale převážně důležitý tlak v hlavni. Ten byl vypočítán pomocí níže uvedených vztahů ze [2] pro kritický výtok z hlavně (12). Výpočet proběhl na základě znalosti tlaku uvnitř hlavně těsně před opuštěním střely p_u , s předpokladem adiabatického děje. S pomocí opravných koeficientů:

Expanzní poměr

$$\rho_c = \frac{c_u}{c_o}$$

Nábojová hustota

$$\Delta = \frac{\omega}{c_o}$$

Součinitel reaktivnosti

$$K = \sqrt{k} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)$$

Kde c_u představuje vnitřní objem hlavně, c_o objem nábojové komory a k adiabatický součinitel.

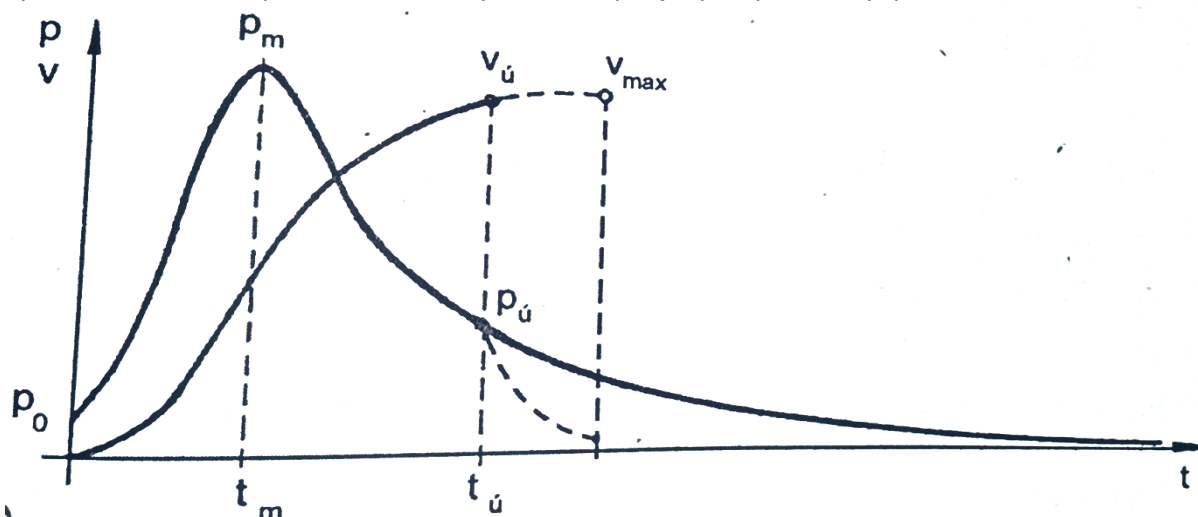
Výtok plynu z hlavně trvá až po dosažení tlaku 0,18 MPa a je funkcí času $p(t)$, pak již ho lze zanedbat. Z tohoto předpokladu byla získána doba výtoku plynu z hlavně (13). [4]

$$A = \frac{k-1}{2} \cdot \frac{S_u \cdot K}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{p_u \cdot \Delta}{\rho_c}}$$

$$p(t) = p_u \cdot \frac{1}{(1 + A \cdot t_v)^{\frac{2k}{k-1}}} \quad (12)$$

$$t_v = \frac{1}{A} \cdot \left[\left(\frac{p_u}{0,18 \cdot 10^6} \right)^{\frac{k-1}{2k}} - 1 \right] \quad (13)$$

Pro zadanou zbraň nebylo uvažováno použití tlumiče nebo ústového zařízení, které by upravilo výtok z hlavně, tím průběh tlaku a rychlosti kopíruje předpokládaný průběh (viz obr. 10).

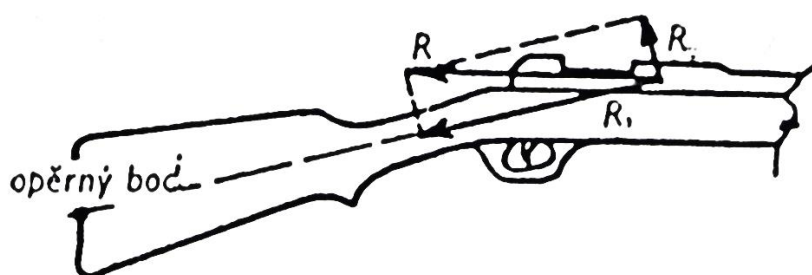


Obr. 14 průběh tlaků a rychlosti mimo hlaveň a v hlavni [7]

Zpětný ráz zbraně

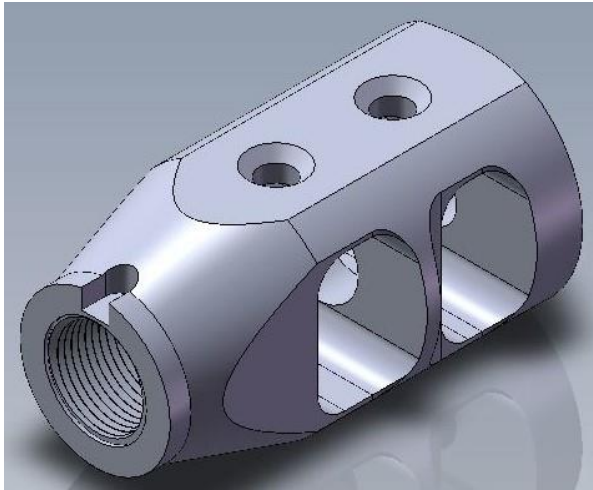
Zbraň během výstřelu koná obecný prostorový pohyb, který je způsoben působením tlaku v hlavni, ten působí na všechny součásti v nábojové komoře. Složka působící na dno nábojové komory vytváří během výstřelu impuls síly, který dostává zbraň do pohybu. [4]

Impuls síly se rozkládá do složek ve směru spojnice tvořené opěrným bodem, středem dna nábojové komory a směrem na tuto spojnici kolmým, který tvoří klopný moment zbraně při výstřelu (viz Obr.15).



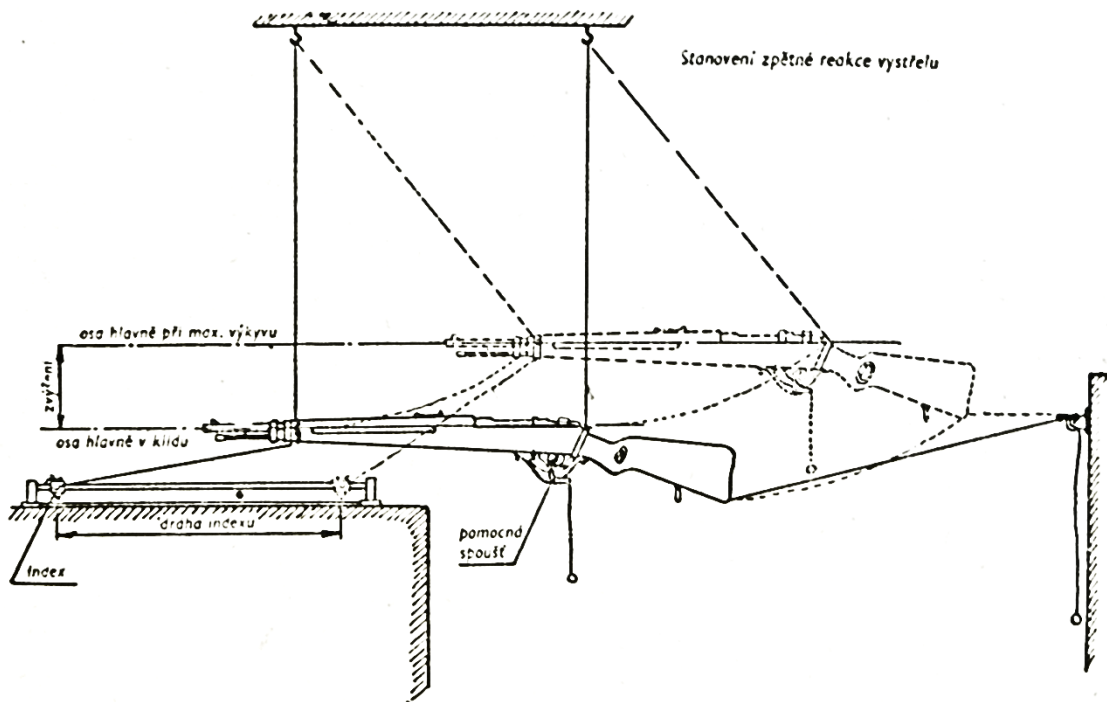
Obr. 15 silové poměry na zbrani při zpětném rázu [5]

Efekt zvedání zbraně je možné konstrukčně snížit vhodným uspořádáním opěrného bodu a osy hlavně. Jako tomu je třeba u modelů AR. Oproti tomu jiné zbraně musí používat ústový kompenzátor, který je umístěn na ústí hlavně tak aby pomocí usměrnění výtokových plynů snížil klopný efekt zbraně. Podobné ústové zařízení může sloužit i pro snížení zpětného rázu odvodem plynu do stran (viz obr.17)



Obr.17 Ústový kompenzátor zpětného rázu i klopného efektu

Velikost zpětného rázu lze určit na balistickém kyvadle (viz obr.16) na základě převodu kinetické energie na potenciální. Zbraň je pověšena za lanka v takových místech, aby nevznikal klopný moment a zbraň konala pouze pohyb vzad. Odpálení musí proběhnout tak aby nedošlo k ovlivnění pohybu zbraně. Měří se maximální výchylka zbraně. [5]

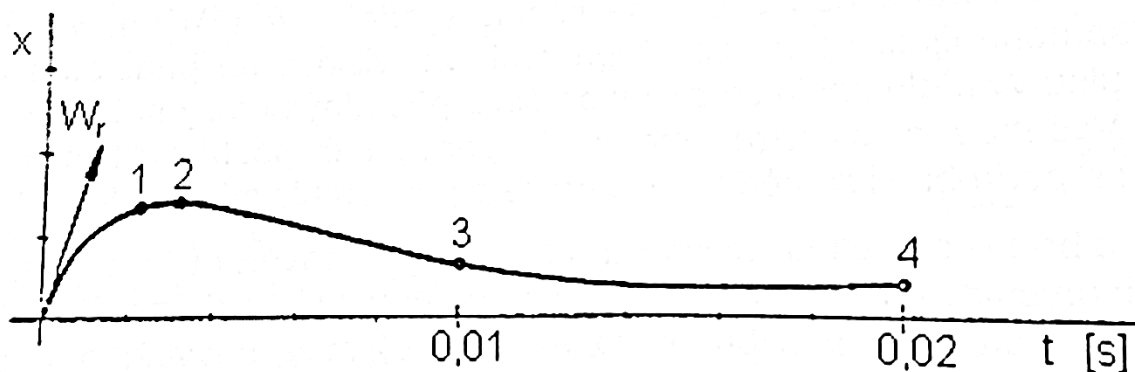


Obr. 16 balistické kyvadlo [5]

Takto získané hodnoty je ale problematické interpretovat ve vztahu interakce se střelcem, pocit při zpětném rázu je velice subjektivní. Data o chování střelce se dají získat jen na základě experimentu a jsou závislé na pozici střelby a síle zapření do ramene.

„Síla zákluzového odporu se zvětšuje během v průběhu zákluzu v důsledku tuhosti svalstva ramene a trupu. Její největší hodnota na konci vyvolá překluzný pohyb s poměrně značným zrychlením“ [4] (viz obr. 18).

Při uvažování síly zapření zbraně do ramene a z vyhodnocení pohybu zbraně byla experimentálně zjištěna střední tuhost ramene v rozmezí 75-85 N·mm⁻¹. [4]

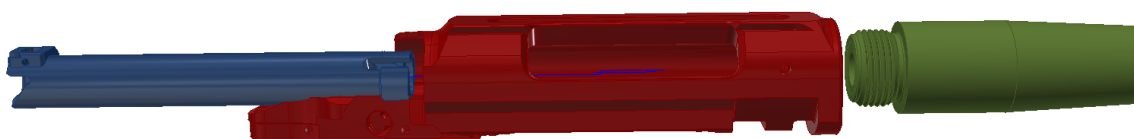


Obr. 178 průběh dráhy zákluzu zbraně zapřené do ramene střelce [4]

Komponenty zbraně

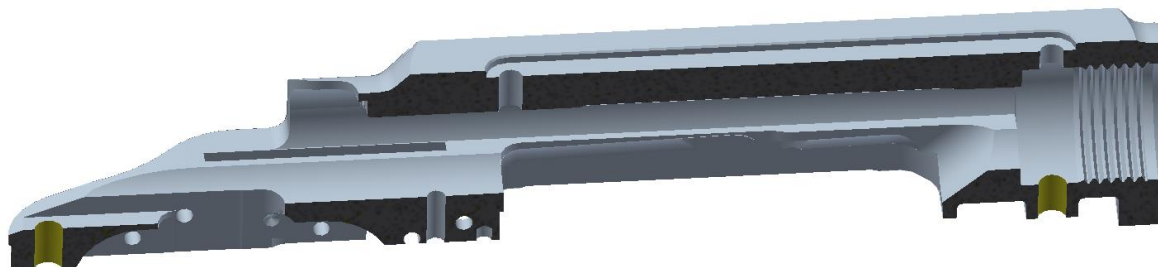
Kromě seznámení se s již zmíněnými obecně známými komponentami zbraně jako je hlaveň, pažba nebo závěr, bylo potřeba porozumět jejich funkcím a poznat jak pracují.

- Pouzdro závěru zastává hlavní úlohu po konstrukční stránce (obr.19), slouží jako uzlový bod pro většinu komponent zbraně. Právě tímto dílem je celý mechanismus a komponenty zbraně připojen k nosnému rámu zbraně s pažbou. Připojení na rám zbraně je realizováno ve dvou místech spodní části (viz obr. 20). V této části je také otvor pro přívod nábojů a na jedné straně v horní části je vyhazovací okénko na prázdné nábojnice. V zadní části je velké množství děr sloužících pro uchycení spoušťového mechanismu. V této součásti je realizováno zkoumané spojení s hlavní.

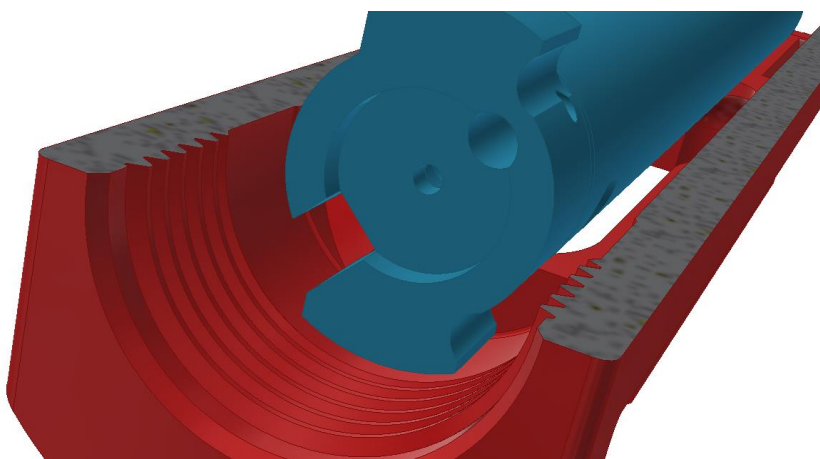


Obr. 19 hlavní komponenty zbraně pouzdro (červená) závěr (modrá) hlaveň (zelená)

- Závěr obsahuje bicí mechanismus s pružinou a také zajišťuje přívod a vytažení nábojů z nábojové komory a zásobníku pod zbraní. Závěr je uzamykán do pouzdra pomocí ozubu, což jsou zva zuby, které se potočením závěru uzamknou proti opěrným plochám na pouzdře závěru, tím dojde k uzavření nábojové komory (viz obr. 21).



Obr. 20 uchycení pouzdra závěru k tělu zbraně šrouby (žlutá barva)



Obr. 21 uzamčená poloha závěru

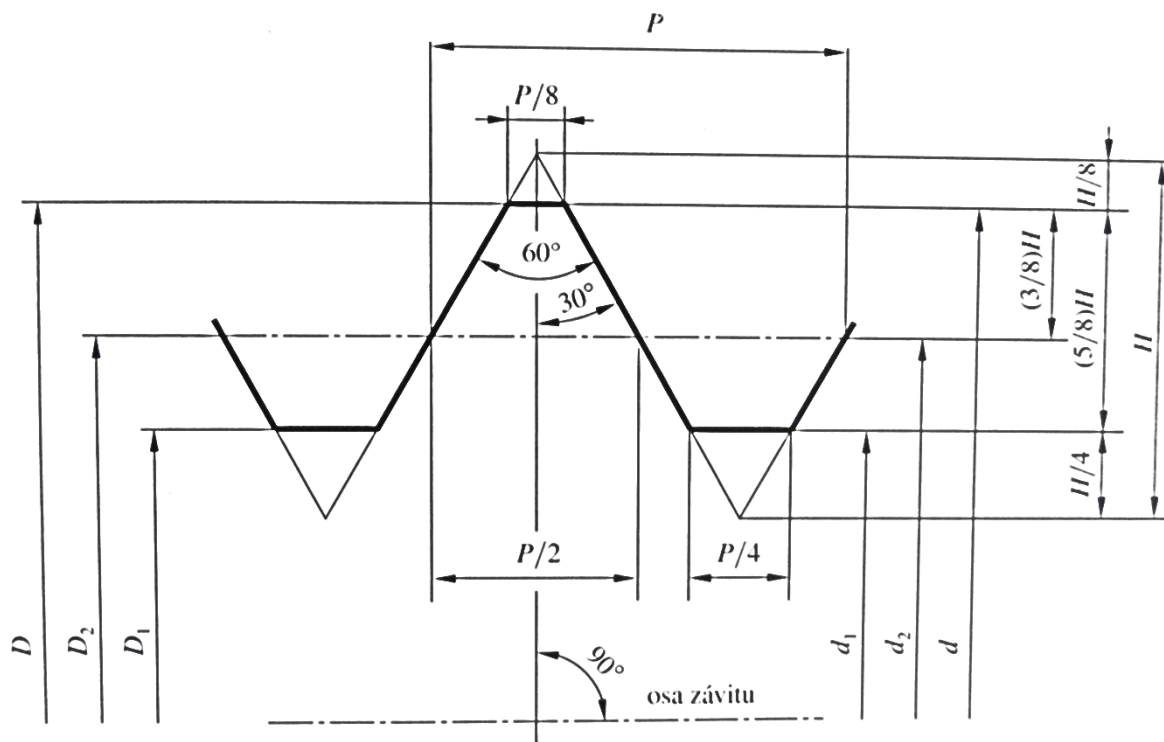
- Hlaveň je ke zbrani v jednom místě připjena šroubovým spojem. V tomto případě se jedná o hlavě dlouhé kulové zbraně s uzamčenou nábojovou komorou, bez odběru plynu z hlavě pro ovládání závorníku.

Závitové spojení hlavě a pouzdra závěru

Spojení mezi pouzdrém a hlavě se realizuje nenormalizovaným závitem s metrickým profilem (viz obr. 22), u kterého bylo potřeba se znalostí rozteče a nominálního průměru určit jeho ostatní rozměry. Pro montáž hlavě je používáno dvou variant závitových uložení. Jedna z těchto variant obsahuje konstrukční přesah závitu (obr.1). Tento přesah vnáší do spoje nemalé napětí a zvyšuje požadavky na utahovací moment. Tento druh uložení neumožňuje analytický výpočet síly předepnutí spoje dle (14).

$$F_o = \frac{2 \cdot M_u}{d_2 \cdot \left(\frac{P + f \cdot d_2 \cdot \sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\pi \cdot d_2 - f \cdot P \cdot \sec\left(\frac{\alpha}{2}\right)} + f \cdot d_o \right)} \quad (14)$$

Kvůli velkému sevření není možné vyhodnotit utažení hlavě ani měřením úhlu pootočení hlavě po kontaktu dosedacích ploch, z důvodu že utažení probíhá skokově a nedá se stanovit okamžik doteku kontaktních ploch. Zjištění svěrné síly a tím i momentu potřebného pro překonání bylo předmětem zjištění ve výpočtovém modelu.



Obr. 22 geometrie metrického závitu [8]

Metoda konečných prvků

K realizaci výpočtů byly použity program Abaqus který je založen na aplikaci metody konečných prvků.

Pod pojmem metoda konečných prvků si lze představit způsob diskretizace kontinua, založené na rozdělení tělesa na topologicky jednoduché podoblasti tzv. elementy, ve kterých je posuv vyjádřen přibližně interpolací z hodnot v takzvaných uzlových bodech, obvykle situovaných ve vrcholech, na hranách nebo ve stěnách elementů. Uzlové posuvy figurují v diskretizovaném systému jako hledané hodnoty. Podmínka statické rovnováhy diskretizovaného systému se nejčastěji vyjadřuje ve formě variačního principu minima celkové potenciální energie nebo jemu ekvivalentního principu virtuálních posuvů. Celková potenciální energie se pak vyjadřuje jako součet celkových potenciálních energií jednotlivých elementů.[9]

Na základě D'Alembertova principu lze vyjádřit pohybovou rovnici kontinua přidáním setrvačných sil, respektive sil od pasivních odporů jako specifických sil, které závisí na zrychlení, respektive rychlosti a rychlosti deformace bodu kontinua. Po prostorové diskretizaci MKP máme

$$[M]\{\ddot{Q}\} + [C]\{\dot{Q}\} + [K]\{Q\} = \{F\}$$

„Implicitní integrace pohybových rovnic využívá diferenční schémata, která vyžadují posuvy, rychlosti a zrychlení uzlů v čase t_{k+1} pomocí hodnot v čase t_k i v čase t_{k+1} . Z implicitních schémat se dnes prakticky používá schéma navržené Hilbertem, Hughesem a Tazlorem. Schéma je nepodmíněně stabilní, to znamená že, to znamená že stabilita nezávisí na délce kroku. V každém kroku je nutno provést několikanásobně rozklad soustavy lineárních rovnic o dimenzi MKP modelu. Implicitní integrace je vhodná pro řešení pomalých a středně rychlých nelineárních dynamických nestacionárních problémů.“[9]

„Explicitní integrace pohybových rovnic využívá centrální diferenční schéma, které vyjadřuje posuvy rychlosti a zrychlení uzlů v čase t_{k+1} pouze pomocí hodnot v čase t_k . Ve spojení s nekonzistentní maticí hmotnosti, ve které jsou veškeré hmoty soustředěny na diagonále, vede toto schéma na řešené soustavy rovnic, která je diagonální a vyžaduje tudíž pouze zlomek operací oproti implicitnímu schématu. Schéma je ale podmíněně stabilní. Stabilita je dosažena pouze tehdy je-li splněno.

$$\Delta t \leq \frac{1}{\pi \cdot f_{max}} (\sqrt{1 + \xi^2} - \xi)$$

Kde f_{max} je maximální vlastní frekvence diskretizovaného systému a ξ je poměrný útlum v módu s největší frekvencí. Tedy čím menší prostorová diskretizace, tím menší je největší přírůstek času který, ještě zaručuje stabilitu řešení. Explicitní řešení potřebuje velké množství výpočtových kroků při extrémě nízké výpočtové náročnosti kroků.“ [9]

Submodeling

Technika submodelingu slouží k detailnímu modelování malých oblastí analyzované soustavy s užitím jemnější diskretizace. Propojení s globálním modelem je realizováno na rozhraní submodelu a globálního modelu. Do uzlů sítě submodelu jsou na základě jejich polohy (submodel i globální model jsou zadány ve společném souřadnicovém systému) interpolovány posuvy z globálního modelu. Tato technika je často vhodnější než extrémní zjemňování sítě v oblasti zájmu, protože jednak může v důsledku koexistence velkých a malých elementů v jednom modelu docházet k numerickým problémům, jednak mohutnost takto vzniklého modelu může být neúnosná s ohledem na nárůst výpočtového času. Techniku submodelingu lze použít u obou výpočtových schémat.

Submodeling funguje jako oddělená analýza a z globálním modelem převádí pouze hodnoty krajních uzlových bodů v daném časovém kroku. Program Abaqus umožňuje dvě formy submodelingu submodel řízený posuvy, přenášející posuvy z globálního modelu do uzlů na rozhraní submodelu a submodel řízený napětím, který převádí napětí z globálního modelu a do stěn elementů na rozhraní submodelu. Velikost podmnožiny globálního modelu, která se podílí na řízení submodelu se nastavuje jako parametr. Detailní popis způsobů interpolace hodnot z globálního modelu je uveden v [10].

Kontakt s přesahem (interference fit)

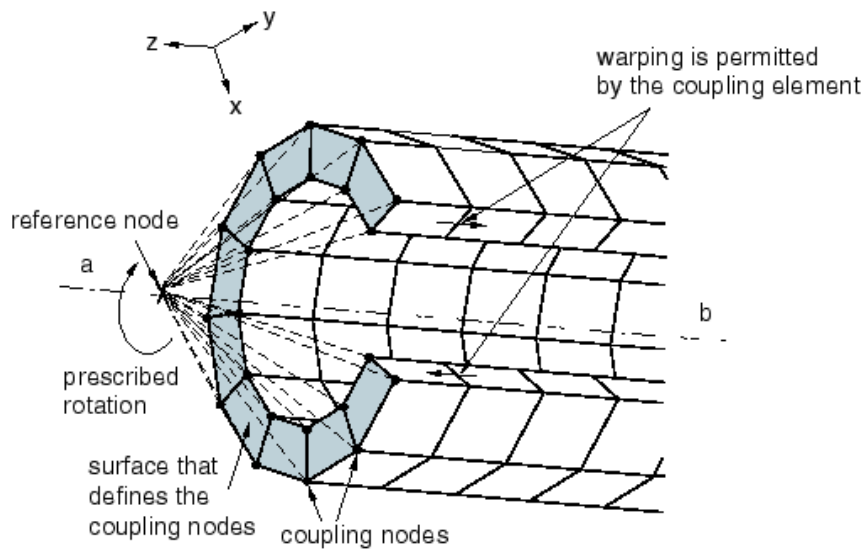
Pro modelování kontaktů s přesahem je program Abaqus vybaven funkcí interference fit. Tato funkce v prvním kroku výpočtu určí přesah sítě (h) a následně dojde k odstranění posuvem uzlů do kontaktní polohy. Posuvy uzlových bodů se projeví změnou napjatosti v daném místě (viz obr.23).



Obr. 23 schéma realizace kontaktu interference fit [10]

Vazbové funkce (Coupling)

Jedná se o techniku propojující zvolené uzlové body modelu a zajišťuje interakci zvolených veličin. Zprostředkovává přenos zatížení z referenčního bodu do vybraných uzlových bodů (viz obr. 24) (Distributing coupling) nebo pohybu a natočení jakož to (Kinematic coupling). Rozdělení přenášené veličiny do jednotlivých uzlových bodů je zajištěno automaticky.



Obr. 24 Propojení uzlových bodů pomocí techniky coupling [10]

Výměna dat mezi implicitním a explicitním řešičem

Převod dat z implicitního na explicitní řešení umožňuje vyřešit nejprve statickou část výpočtu a poté její dynamické namáhání. Tento převod má jistá omezení jak ve volbě druhu elementů, tak například konektory lze převést pouze z implicitního řešení do explicitního a ne naopak.

- Převod mezi výpočty se realizuje pomocí načtení instancí nebo importováním jednotlivých komponent. Takto je načtená pouze síť a je potřeba rededínovat plochy.
- Kontakty v implicitním a explicitním řešiči nemají stejnou formulaci, proto je třeba upravit definici kontaktu. Kompatibilní kontakty jsou obecný master-slave kontakt a kontaktní páry.
- Napětí je možné přenášet buďto přímo z uzlu na uzel což vyžaduje užití stejné sítě pro oba výpočty, nebo prostorovou interpolací napětí do uzlů nové sítě. Toto řešení ovšem vnáší do modelu chybu interpolace.

Uživatelské programy (subrutiny)

Program Abaqus umožňuje uživatelům přizpůsobit některé funkce užitím vlastních programů, tyto programy se nazývají subrutiny. Zahrnují jen omezené množství funkcí, které jsou popsány v [10]. V tomto případě byla použita funkce VDLOAD která slouží k vytvoření tlakového zatížení na stěny zvolých elementů. Uživatel může pro svůj podprogram použít pouze některé parametry, které řešič užívá.

V případě VDOAD:

- Nblock – počet elementů v setu pro který je subrutina volána
- Ndim – rozměr prostoru ve kterém je zpuštěno řešení
- Steptime – čas v daném stepu
- Totaltime – čas od počátku výpočtu
- Amplitude – amplituda zatížení
- curCoords – souřadnicový systém na každém elementu
- velocity – rychlost každého elementu
- dirCos – směr tlakového zatížení elementu
- jltyp – slouží k identifikaci zatížení tlakového nebo silového

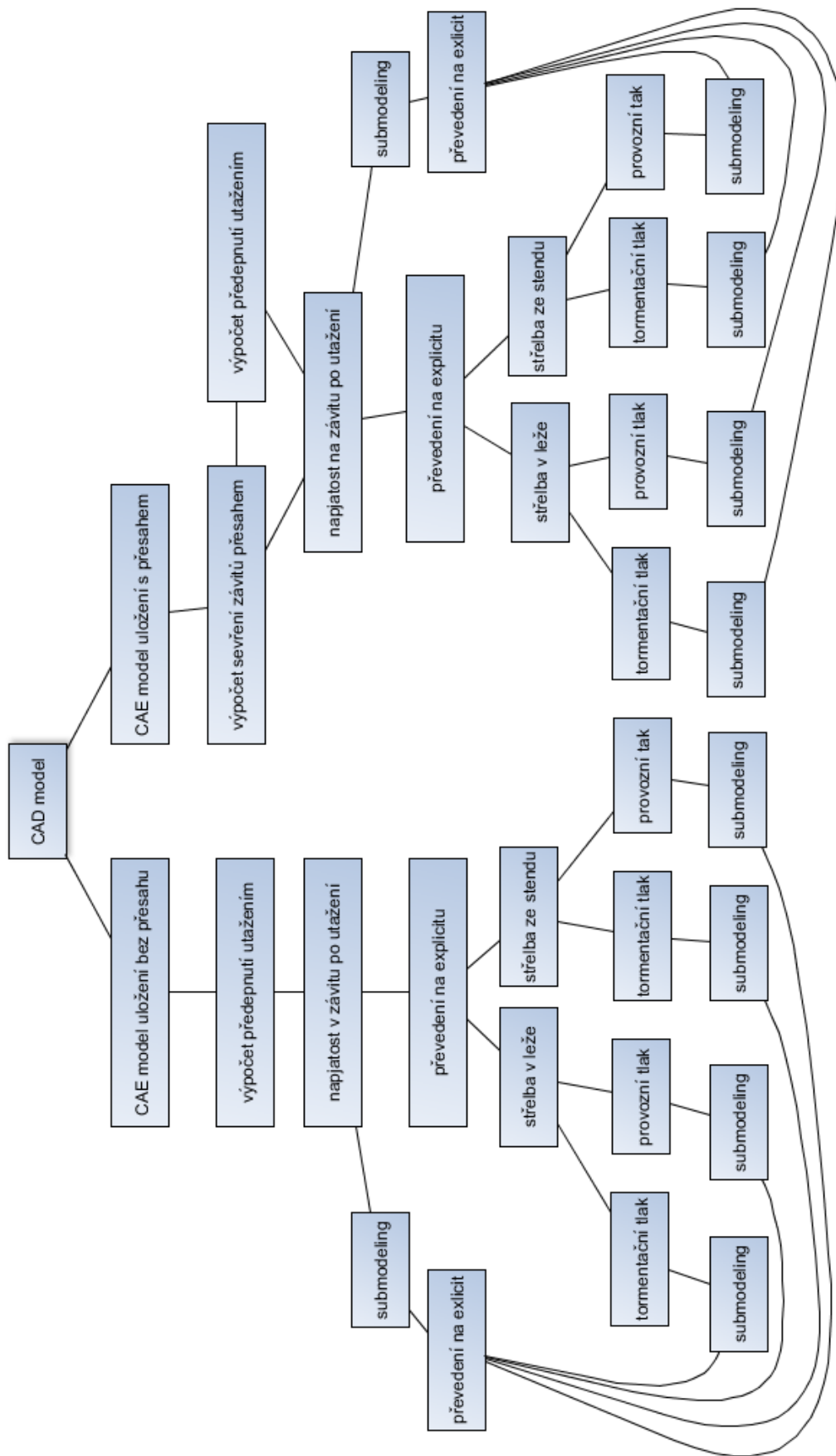
Kombinací těchto proměnných lze v jazyku Fortran, který je pro tyto subrutiny nejvhodnější (protože nedochází k předkladu do jiného programovacího jazyka při užití jazyku C/C++) sestavit vlastní funkci zatěžování.

Tvorba modelu

Pro tvorbu modelu byly k dispozici pouze omezené nástroje programu Abakus, výpočet byl limitován výpočetními možnostmi škodního servu a počtem licencí pro celou školu.

Z předchozích kapitol vyplývá, že nejprve muselo být modelováno sestavení zbraně, tedy zašroubování a dotažení závitového spoje hlaveň-pouzdro závěru (implicitní statická úloha v Abaqus/Standard) a poté byl modelován vlastní výstřel (explicitní dynamická úloha v Abaqus/Explicit). Tomu bylo potřeba přizpůsobit geometrii modelu tak, aby byla vhodná jak pro implicitní tak pro explicitní schéma výpočtu. Což znamenalo minimalizovat množství uzlů pro implicitní řešení a využívat co největších elementů pro explicitní řešení. Oba tyto požadavky jsou neslučitelné s vysokou přesností řešení. Toto vedlo k použití víceúrovňového modelování a zjednodušení modelu za účelem snížení výpočtových časů a udržení přesnosti.

Modelováním byly posuzovány dva uživatelské stavy a to střelba v leže a střelba z pevného stendu. V obou těchto stavech byla provedena zkouška tormentačním tlakem i provozním tlakem při výstřelu (viz obr. 25).



Obr. 25 schéma výpočtu

CAD model

Česká zbrojovka poskytla model hlavně, pouzdra a část sestavy závěru. Hlavně ani pouzdro nebylo opatřeno závitem. Ten bylo potřeba domodelovat ze znalosti průměru a geometrických parametrů metrického profilu (viz obr. 22).

Pro správnost výpočtu bylo také nutné správné určení polohy zubů závitu. Data o poloze kde se zařezává první závit nebyly řešiteli známa, proto pomocí variace posunutí závitového profilu bylo určeno, že závitové výběhy jsou udělány tak aby neúplné závitové profily nebyly zatěžovány, proto byl závit vymodelován v poloze tak aby co nejlépe vystihl rozložení plných zubů v záběru.

Hlaveň byla zbavena vývrtu, který není pro analýzu závitu potřeba a na tuhost hlavně má zanedbatelný vliv.

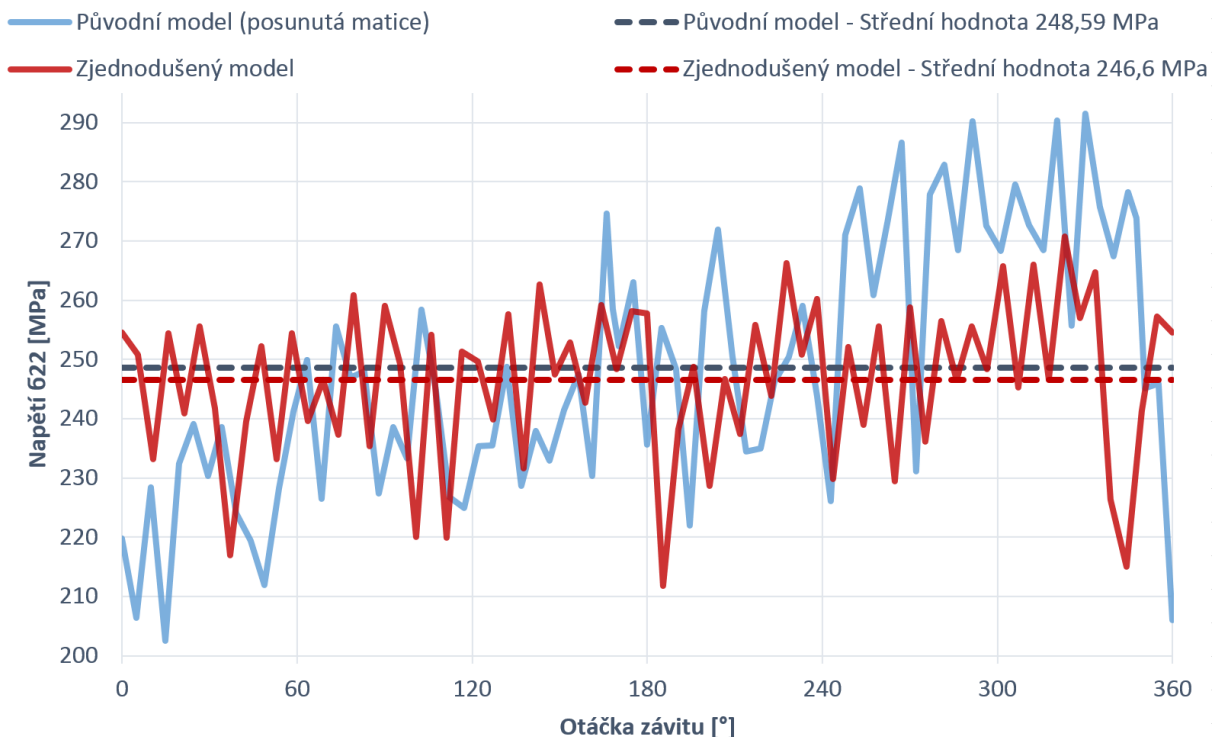
Z modelu pouzdra a závěru jsou odstraněny detaily, které nemají vliv na poměry v závitě. S ohledem na proces síťování, a tak aby nedošlo k protnutí geometrii součástí. Což ve stísněných prostorech v pouzře není příliš možné aby nedošlo k penetracím sítí.

Z takto upravených součástí byla vytvořena sestava pro následnou analýzu.

Modelování závitu

V rámci zjednodušení modelu byl upraven i závit odstraněním stoupání závitu, tím vznikly kroužky které reprezentují závit. Tato úprava je přijatelná dle [11], kde se autor zabýval porovnáním závitového spojení modelovaného jako šroubovici a zjednodušenou formou (kroužky). S výsledným srovnáním kde rozdíl v napjatosti byl menší jak 1% (viz obr. 26).

Porovnání modelů

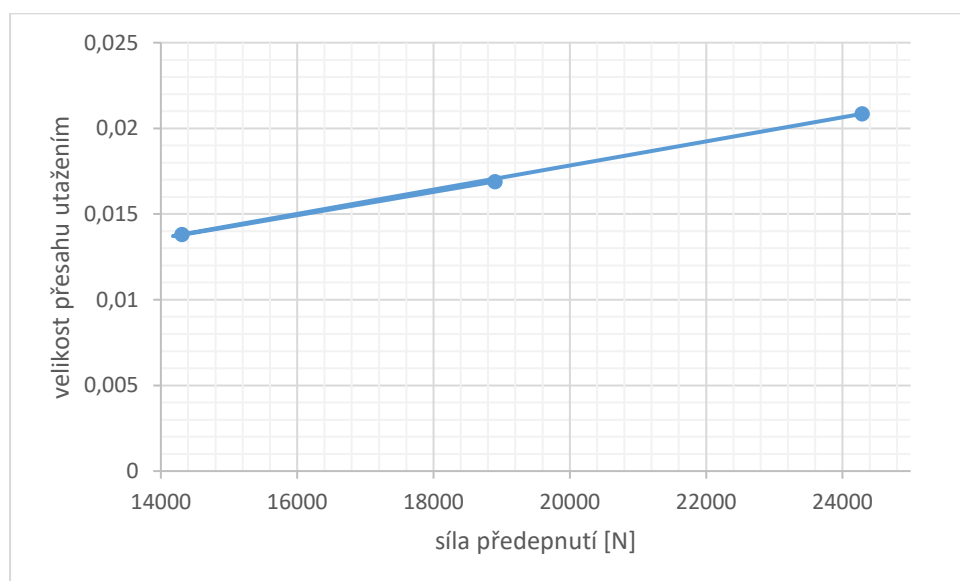


Obr. 26 Porovnání závitového spoje s kroužky [11]

Po vytvoření kroužků již nebylo možno vytvořit předepnutí závitu pomocí utahovacího momentu, ale bylo potřeba ze znalostí utahovacích momentů pro obě hlavně vypočítat napětí v ose hlavně.

Předepnutí v ose hlavně bylo nutné vyvodit tak aby odpovídalo vypočítaným silám. Tohoto předepnutí bylo docíleno přesahem dosedacích ploch, tedy tvrdým zatěžováním. Program Abaqus toto umožňuje provést dvěma způsoby: Virtuálně-předepsáním přesahu přímo do kontaktu pomocí amplitudy nebo na úrovni geometrického modelu, vytvořením fyzického přesahu přímo v modelu a pomocí příkazu *contact interference, shrink*. Ten daný přesah vytlačí do kontaktní pozice a tím vytvoří předepnutí.

Takto vyvozená síla byla vyhodnocena v místě dosednutí hlavně na pouzdro a Ad-hoc metodou byla určena závislost mezi velikostí přesahu a vyvozenou silou předepnutí obr.27.



Obr. 27 Předpínání závitu

Pro předepnutí proběhlo několik iteračních cyklů s opětovnou modifikací tvaru hlavně tak, aby bylo dosaženo přesného předepnutí následným vytlačáním. Modelování přesahu na úrovni geometrie bylo nutné z důvodu následného přepnutí na explicitní výpočet.

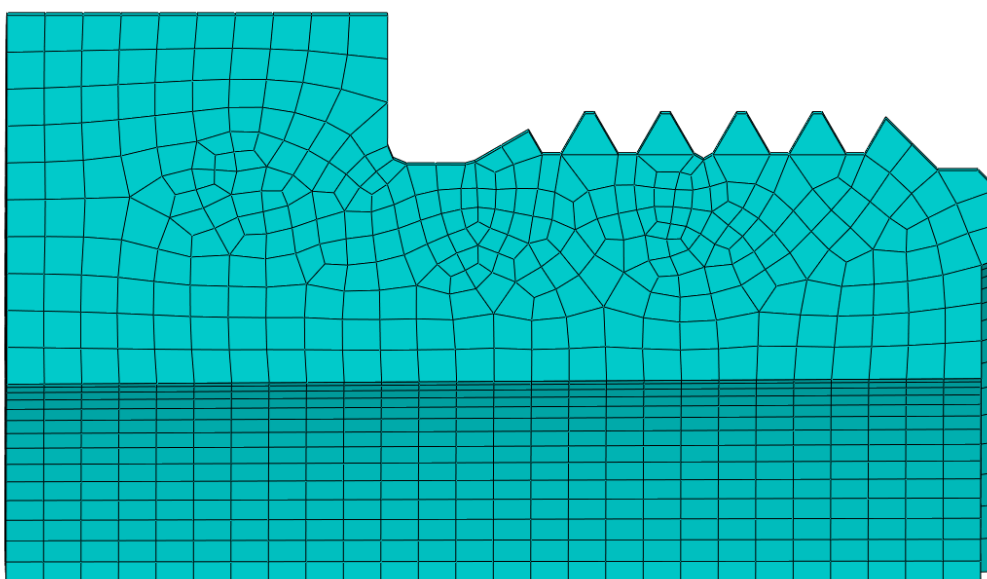
U hlavně s konstrukčním přesahem bylo napřed nutné zjistit svěrné síly na plochách závitu, pro simulaci byl užít maximální možný přesah v rámci tolerančních polí. Pro určení sevření bylo nutné sestavit MKP model, který umožní odečtení kontaktních tlaků, proto byly vytvořeny kontaktní páry tak, aby byly plochy závitu zvlášť. Jelikož se jedná o rotačně symetrické plochy, bylo nezbytné získávat tlaková data podél vhodně umístěných křivek. Následnou integrací byla získána svěrná síla na konkrétní ploše závitu a celkový svěrný moment, který je nutné překonat při otočení závitem. Takto bylo určeno, že zbylý utahovací moment po překonání tolerančního pole činí pouhých 9 N·m.

Při následném výpočtu síly v ose hlavně byl u této hlavně použit dynamický koeficient tření, jenž má lépe reflektovat stav při skokovém utahování.

Sítování

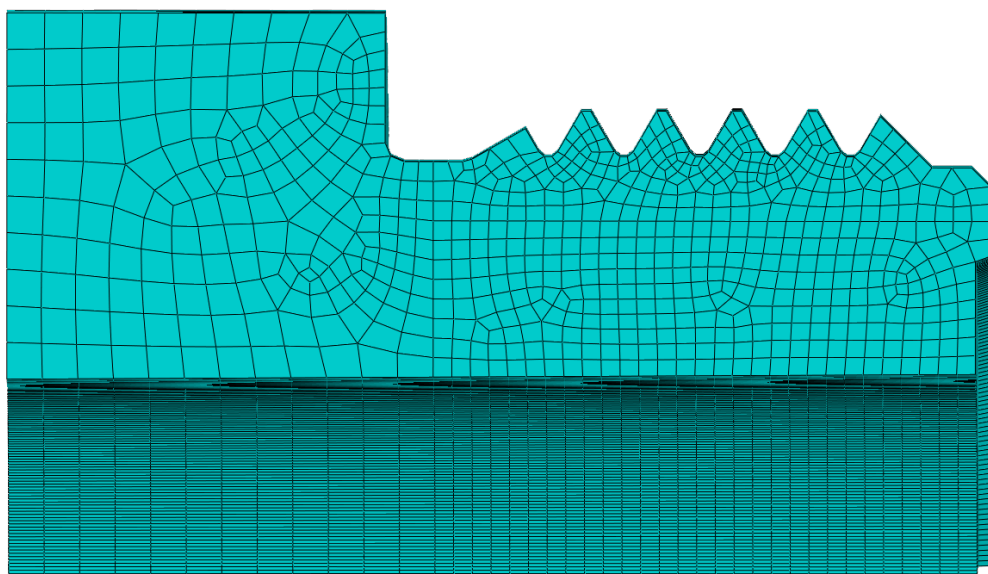
Při sítování součásti byl limitující rozměr závitů, tedy plocha na vrcholu zubu závitů reprezentovala nejmenší možný rozměr elementu v celé sestavě, tak aby nedocházelo ke zbytečným nárokům na dobu výpočtu. Na této úvaze byla postavena celá strategie sítování sestavy.

Odstranění vývrtu a použití kroužků místo závitů umožnilo z hlavně vytvořit rotačně symetrickou součást, což se pozitivně projevilo na tvorbě sítě tím, že získáme rotačně symetrickou síť, tvořenou elementy typu C3D8R, což jsou šestistěnové elementy s lineární interpolací posuvu umožňující převod do explicitního řešiče. Pro globální model byly použity prvky o rozměru 1 mm, které zajišťují dostatečnou přesnost i v explicitním řešení, kde bylo potřeba zajistit distribuci zatížení uvnitř hlavně. Při sítování hlavně byly využity dvě sítovací strategie, okolo závitů síť kopíruje povrch a v ostatní části už utváří vrstvy elementů (viz obr. 28), které zajistily větší přesnost pro určení obvodových napětí.



Obr. 28 síť globálního modelu

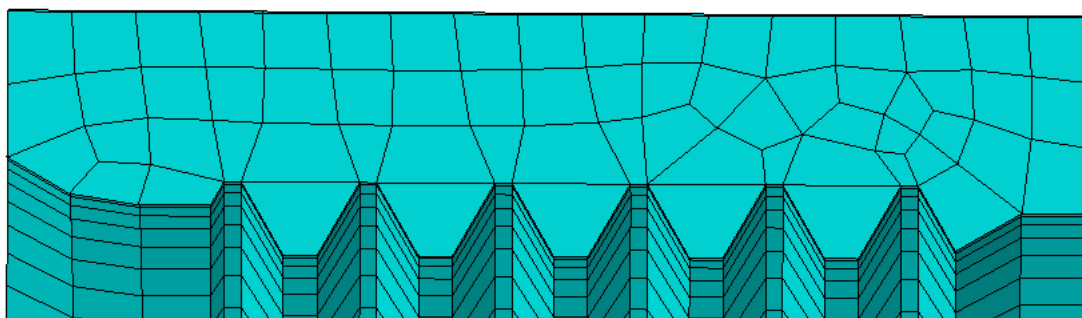
Při modelování submodelu byl použit stejný druh elementů s tím, že základní rozměr elementů byl snížen na rozměr hlavy zubu což je 0.25 mm (viz obr. 29). Tím bylo dosaženo většího počtu elementů po straně zubu závitu, tím došlo k zlepšení na přesnosti řešení.



Obr. 29 Síť submodelu

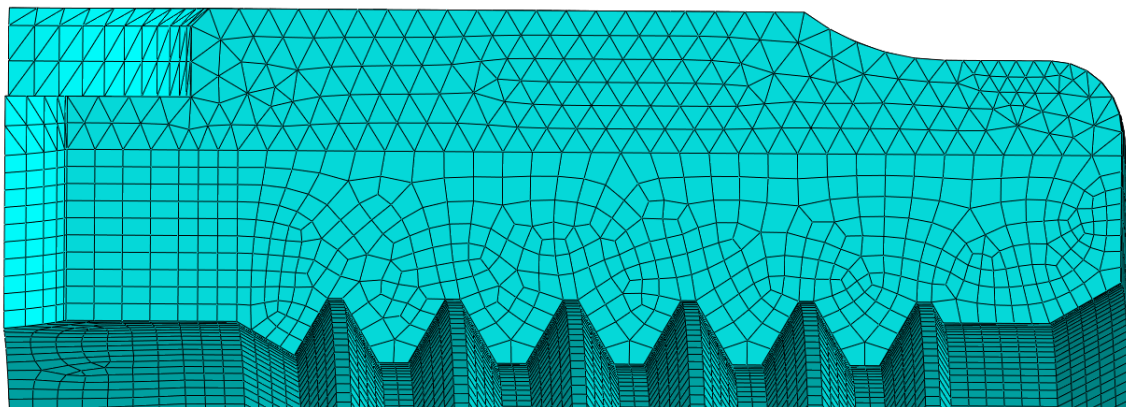
Uzly v místě napojení submodelingu na hlaveň jsou umístěny ve stejné výšce jako u globálního modelu což má snížit chybu v rozložení napětí napříč hlavní.

V případě pouzdra se nejedná o symetrické těleso a tvar geometrie neumožnil použití stejných elementů jako v případě hlavní. Proto byla z pouzdra vyříznuta oblast obsahující inkriminovaný závit, tak aby daná oblast byla rotačně symetrická (viz obr. 30-31), ostatní oblasti jsou vysířovány pomocí elementů C3D4, které vytváří síť čtyřstěnných elementů, která má globální rozměr 1 mm a v oblasti mimo závit je prořídla což snížilo počet elementů, které nemají vliv na chování závitu.



Obr. 30 oblast pouzdra s hexagonální sítí v globálním modelu

V případě submodelu byl opět globální rozměr elementů nastaven na 0.25 mm a síť zůstala rozdělena na část tetragonálních a část hexagonálních elementů (viz obr. 31).

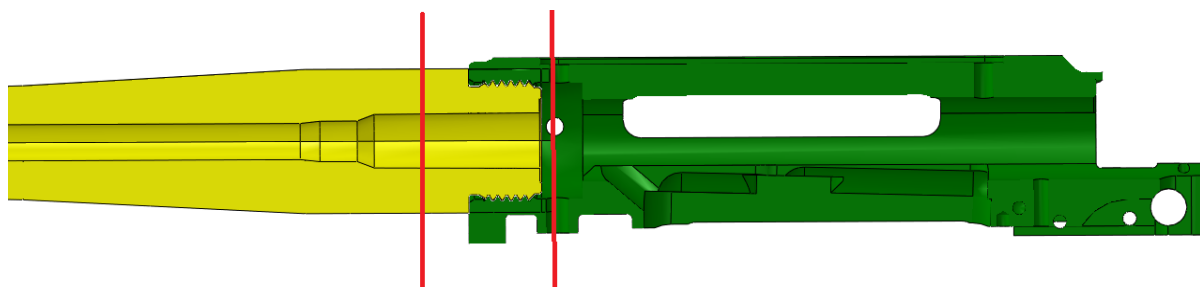


Obr. 31 Síť na submodelu

Submodeling modelu

Z důvodu velikosti a snahy o zlepšení výpočtových časů a přesnosti, byla oblast závitů analyzována pomocí submodelu

Tvorba submodelu proběhla formou výřezu z globální geometrie, což zajistilo správnou polohu submodelu v prostoru. Řezy definující rozhraní submodelu jsou umístěny v dostatečné vzdálenosti od zkoumaného místa tak aby nedošlo k ovlivnění výsledků interpolací v krajních uzlových bodech, kde byl napojen globální model (viz obr. 32).

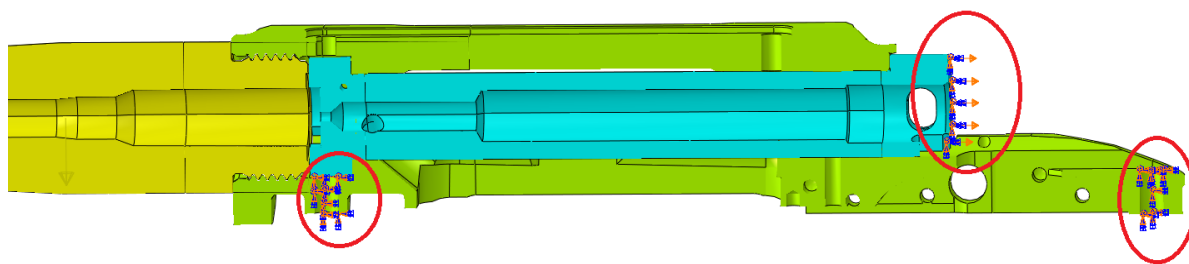


Obr. 32 Umístění submodelingových řezů (červená barva)

Uložení modelu při implicitním řešení

Pro všechny varianty sestavy bylo uložení pro implicitní řešení zvoleno tak, že model byl vetknut za pouzdro v místě šroubů napojujících pouzdro na zbytek zbraně (viz obr. 33). Závěr který je do zbraně vsunut v uzamčené poloze, byl vetknut za koncovou část tak že ve směru osy hlavně

byl vynucen posuv o 0.001 mm. Toto řešení bylo zvoleno vzhledem nutnosti aktivovat kontakty mez závěrem a pouzdrém.



Obr. 33 uložení sestavy globálního modelu

Modelování zatížení hlavně při výstřelu

Zplodiny hoření střelného prachu namáhají vývrt hlavně, a to nejen tepelně ale i tlakem v řádech megapascalů. Střela svým v hlavni zatěžuje vývrt silou v ose hlavně ale i silovou dvojicí. Zdrojem dalšího zatížení může být i pohyb zbraně během a těsně po výstřelu. Jedná se o nestacionární dynamický děj, proto je potřeba použít explicitní schéma řešení.

Modelování tlaku

Tlak v hlavni byl modelován ve dvou krocích. První krok představoval první fázi balistiky, tedy kdy je tlak pouze v nábojové komoře a roste. Tato oblast je modelována za předpokladu, že nábojnice má několikanásobně menší tuhost než nábojová komora ve které je vsunuta. Vliv deformování nábojnice nebyl do modelu zahrnut, čímž je tlak přiveden přímo na stěnu nábojové komory (viz obr.34). Zvyšování tlaku v nábojové komoře bylo zajištěno pomocí amplitudy tlakového zatížení, která je tvořena body odečtenými z grafu. V druhé fázi balistiky bylo potřeba zajistit distribuci tlaku v hlavni a to jak v čase, tak v prostoru. K tomuto již nebylo možné použít standardní zadání zatížení pomocí amplitudy, ale bylo nutné využít uživatelskou subrutinu.

Při sestavování subrutiny bylo třeba brát na zřetel enormní počet volání této subrutiny programem v explicitním výpočtu. Proto užitě řešení obsahuje předem vyřešené hodnoty tlaků a polohy ve formě polynomů, zatěžování probíhalo třízení elementů na základě polohy a přiřazení funkční hodnoty v daním časovém okamžiku.

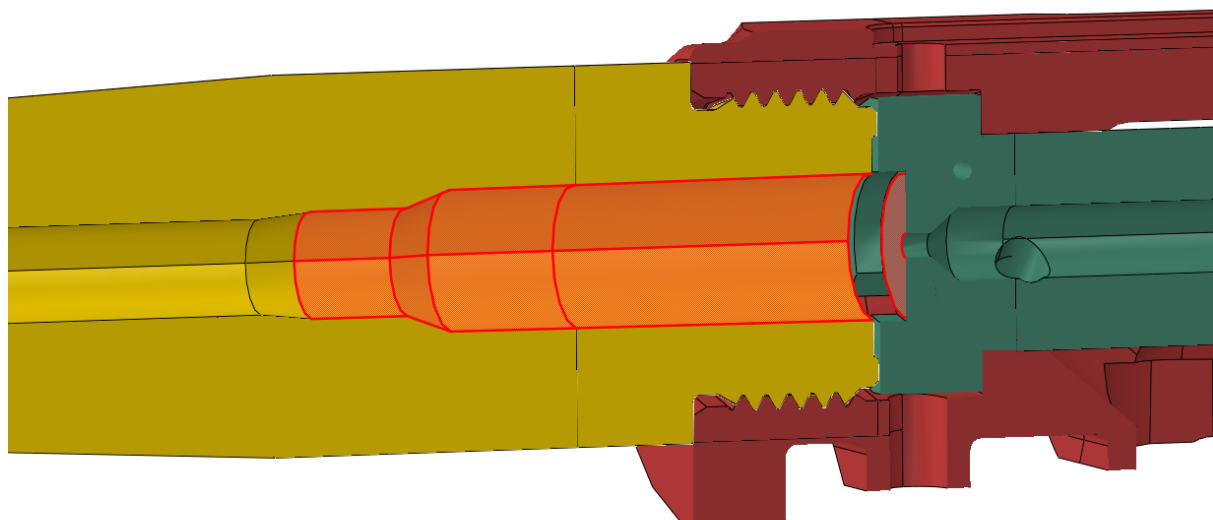
Hlavička subrutiny je dána a uživatel tedy modifikuje jen tělo programu subrutiny.

```
subroutine vdload (  
C Read only (unmodifiable) variables -  
  1 nblock, ndim, stepTime, totalTime,  
  2 amplitude, curCoords, velocity, dirCos, jltyp,  
sname,  
C Write only (modifiable) variable -  
  1 value )  
C  
  include 'vaba_param.inc'  
C  
  dimension curCoords(nblock,ndim),  
velocity(nblock,ndim),  
  1 dirCos(nblock,ndim,ndim), value(nblock)  
  character*80 sname
```

Výstupem této subrutiny bylo že každé ploše elementu, která byla obsažena v množině surface na kterou je zavolána tato rutina přiřadí hodnotu tlaku. Zatížení bylo realizováno hodnotou Value která je přiřazována každému elementu smyčkou DO.

```
do i= 1, nblock
  if (mez >= curCoords(i,2)) then
    if (0 < curCoords(i,2)) then

value(i)=(tlak*amplitude)/(1+(3.3/(2*1.1*9.55))*(1-((1-
(1/(1.43004978001777**2)))/(1+((37.20038401021111*curCoord
s(i,2))/3860.994)**2)))
    else
    value(i)=(tlak*amplitude)
    end if
  else
    value(i)=0
  end if
end do
```



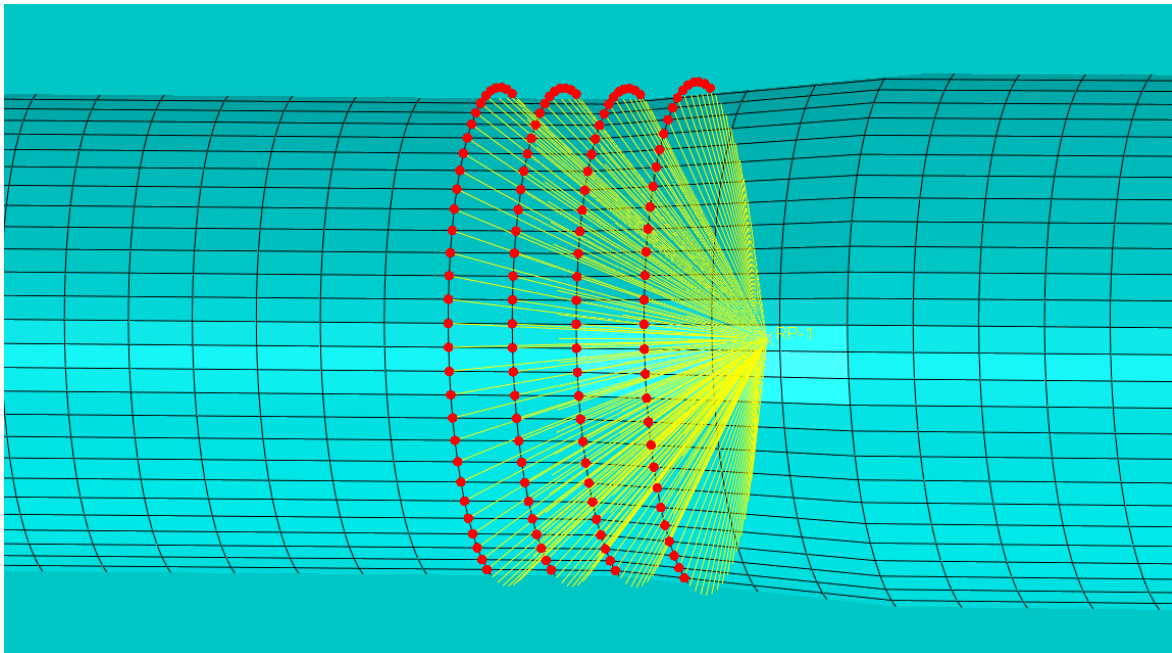
Obr. 34 Zatěžování nábojové komory

Modelování zatížení od tření mezi střelou a hlavní

Vlivem tření střely při pohybu dochází k zatížení hlavně silou v ose hlavně a silovou dvojicí. Pro distribuci síly v čase a prostoru neobsahuje program Abaqus žádnou funkci nebo subrutinu. Funkce VDLOAD umožňuje šířit pouze tlak na hrany elementů. Což by pro přibližné zavedení síly v ose hlavně stačilo, není ale možné zajistit, aby síla byla rovnoměrně rozdělena do zatěžované oblasti. Při výběru totiž dochází k přidělení hodnoty bez rozlišení množství hran, do kterých je distribuována.

Tento problém se dá odstranit pomocí funkce coupling, která při zavedení dané síly do referenčního bodu v ose hlavně a užití této funkce k propojení této síly s uzly na povrchu hlavně, rovnoměrně zavede tuto sílu do těchto uzlů (viz obr.35). Pro užití tohoto řešení potřebuje velké

množství těchto couplingů aby byla zajištěna kontinuita zatížení v čase, aby došlo k reprezentaci pohybu střely.

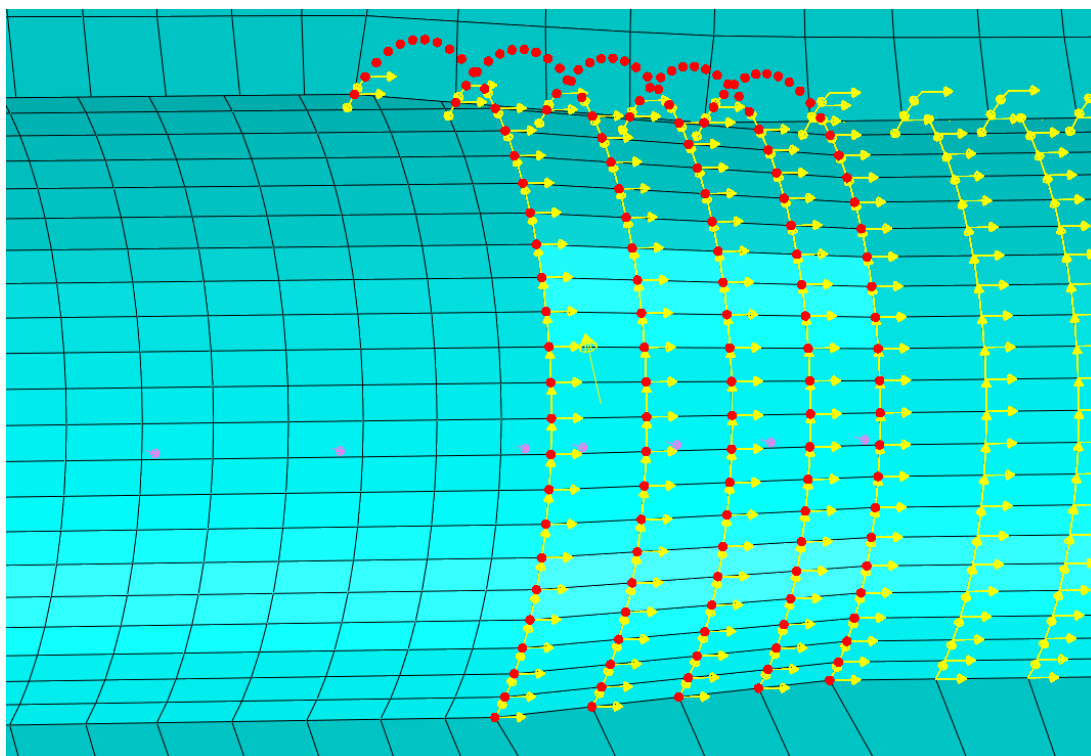


Obr. 35 distribuce síly a momentu do uzlových bodů v hlavni

Velké množství těchto couplingů neúměrně zatěžovalo výpočet a proto nebylo použito z důvodu nízké výkonosti školních výpočetních serverů.

Proto při snaze zachovat toto zatížení hlavně zahrnuto ve výpočtu musela být provedena změna a síly musely být namapovány pomocí skriptu přímo do uzlů v hlavni. Pro zavedení silové dvojce bylo ale potřeba transformovat souřadnicový systém do cylindrických souřadnic, aby bylo možné zavést sílu v tečném směru (obr.36).

Posouvání těchto zatížení spolu se střelou v hlavni je zajištěno pomocí intervalů, ve kterých je zatížení na daný uzel aktivováno s přiřazenou hodnotou zatížení.



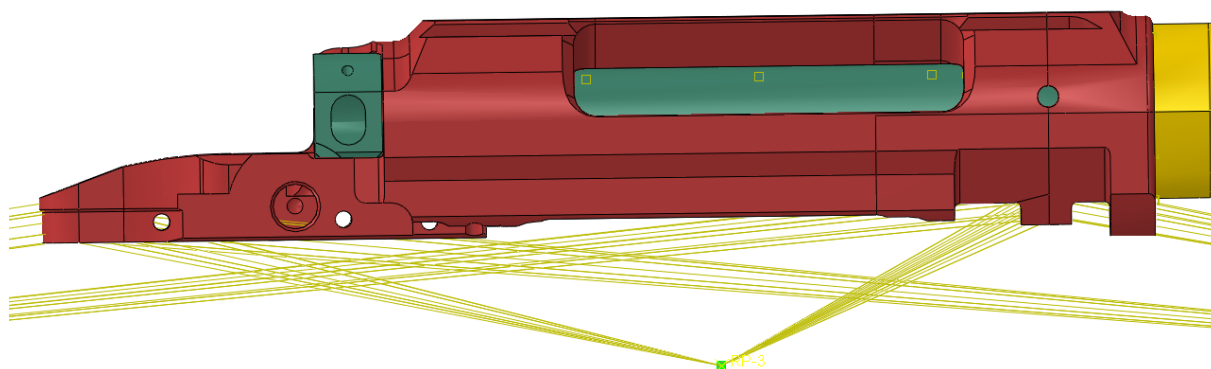
Obr. 36 Zatížení hlavně zavedením sil přímo do uzlů

Modelování zpětného rázu

Při modelování zpětného rázu bylo potřeba nejprve doplnit model o zbytek zbraně, tak aby bylo možné věrohodně řešit pohyb a setrvačnost zbraně. Proto bylo potřeba zjistit charakteristiky modelu jako jsou hmotnost a tenzor setrvačnosti a ten následně pomocí Steinerovy věty (15) posunout z těžiště modelu do počátku souřadnicového systému.

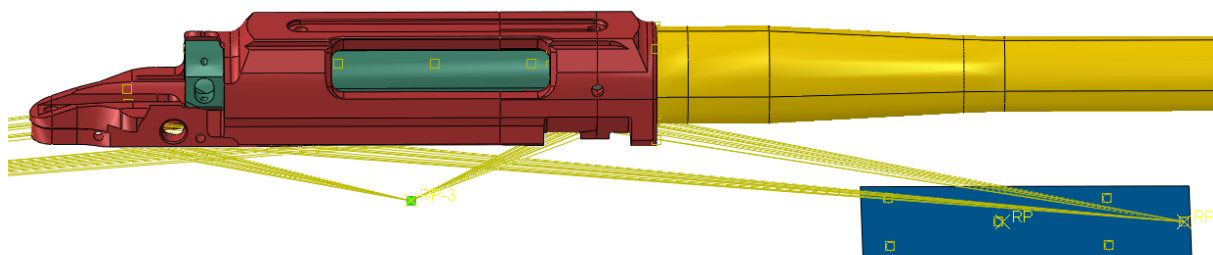
$$J = \begin{bmatrix} m \cdot (y^2 + z^2) & -m \cdot x \cdot y & -m \cdot x \cdot z \\ -m \cdot x \cdot y & m \cdot (x^2 + z^2) & -m \cdot y \cdot z \\ -m \cdot x \cdot z & -m \cdot y \cdot z & m \cdot (y^2 + x^2) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Následným odečtením od globálního tenzoru byl získán tenzor setrvačnosti součástí nezahrnutých do modelu. Tento tenzor pak byl následně transformován do těžiště součástí nezahrnutých v modelu, kde jakožto hmotný bod byl vymodelován. Tento bod je následně připojen pomocí couplingu k místům přišroubování pouzdra závěru ke zbytku zbraně (viz obr. 37).



Obr. 37 umístění hmotného bodu (zelená barva)

Pro kinematiku zpětného rázu je důležité i zapření zbraně, které bude určovat velikost ramene klopného momentu. Proto budeme uvažovat střed pažby jakožto opěrný bod, který je spojen s místy uchycení pouzdra ke zbytku zbraně pomocí couplingu. Pro tuto analýzu je zajímavý i dopad zbraně zpátky na dvojnožku. Dvojnožka je také zjednodušeně vymodelována pomocí bodu propojeného couplingem s místy uchycení pouzdra ke zbytku zbraně. Tento bod je navíc v kontaktu s podložkou, která je modelována jako analyticky formulovaný dokonale tuhý povrch (analytical rigid surface). Kontaktem mezi dvojnožkou a podložkou bylo realizováno to, že se zbraň může zvednout, ale při dopadu narazí do země (viz obr. 38).



Obr. 38 zjednodušený model dvojnožky

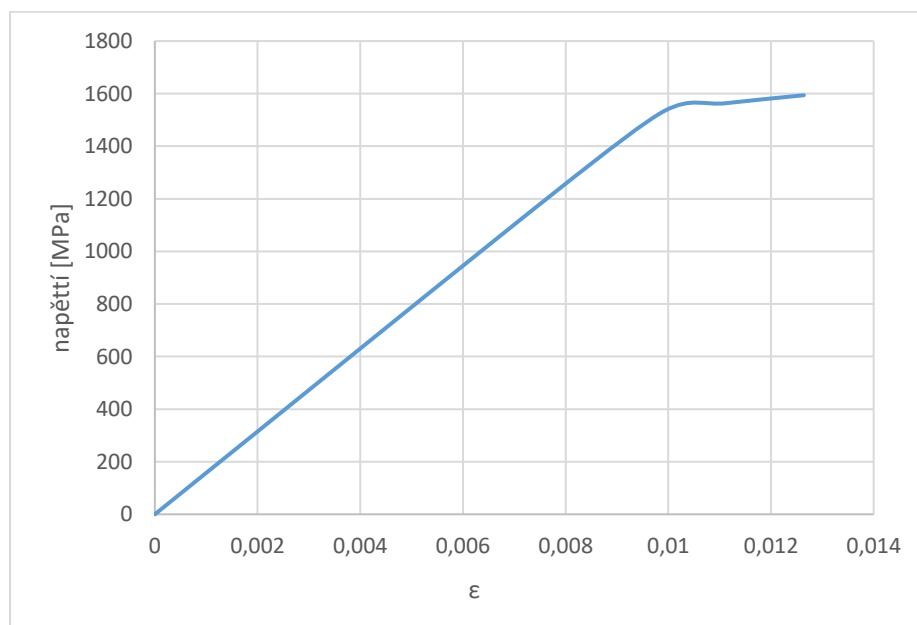
Pro modelování interakce těla se zbraní byla použita pružina, která reprezentuje odpor střelce. Ukotvena je mezi dva body, kterými byly omezeny posuvy pouze na posuv vzad, což reprezentuje střelbu s tripointem, kdy pažba nemůže klesnout směrem k zemi, ale může se naklopit.

Modelování testovacího stendu

Testovací stend je zařízení, ve kterém je zbraň pevně upnuta bez možnosti pohybu, proto v tomto případě bude pouzdro vetknuto za otvory pro šrouby k uchycené ke zbrani.

Materiál

Všechny analyzované součásti mají stejné materiálové vlastnosti, které vychází z tahové zkoušky zkušební vzorku. Jedná se o materiál s nevýraznou mezí kluzu, proto byla použita hodnota smluvní meze kluzu (1224 MPa).



Vyhodnocení výsledků

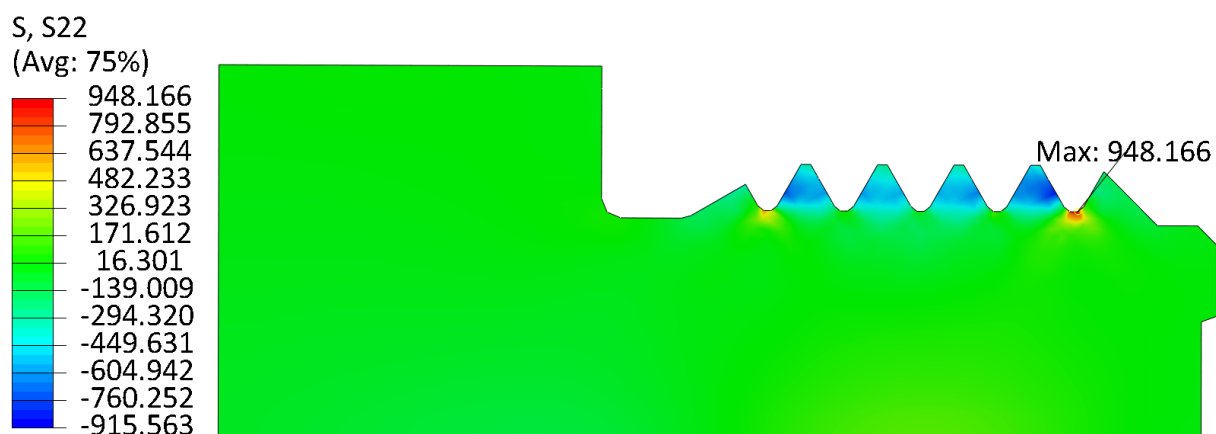
Vyhodnocení bylo zaměřeno na rozdíly v napjatosti mezi hlavní s montážním přesahem a bez tohoto přesahu v závitě. Následně došlo k rozpoznání kritických míst u jednotlivých zátěžných stavů a vzájemným porovnáním vůči mezi pevnosti, cílem vyhodnocení bylo také vytypovat místa kde by vzhledem k orientaci napětí mohlo docházet k růstu trhlin nebo inicializaci lomu.

Výpočet byl proveden v jednotkách megapascal, milimetr, sekunda a tuna, tedy i všechny stupnice jsou podřízeny těmto jednotkám.

Porovnání zatížení hlavně po montáži

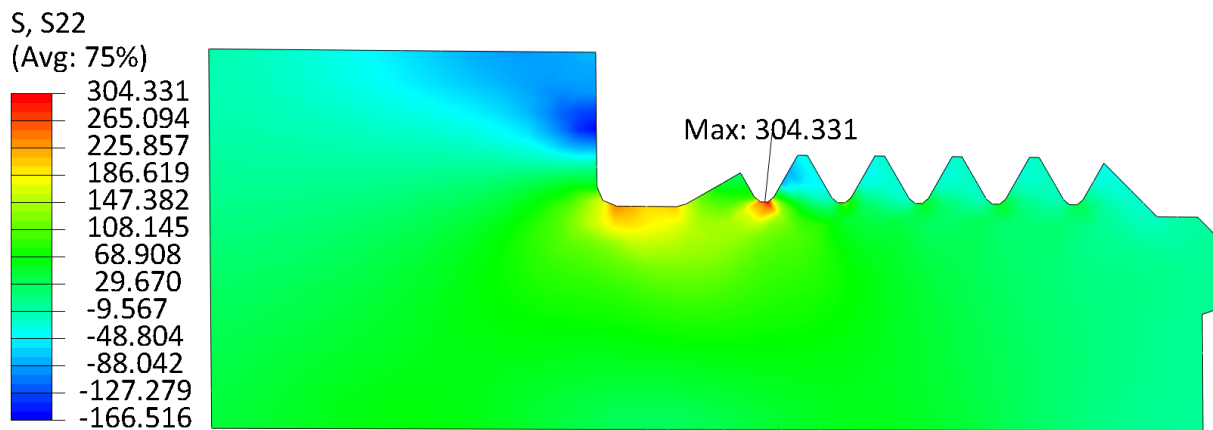
Při posuzování zatížení závitu bylo nutné posoudit stav napjatosti již po montáži, pro toto porovnání byly zvoleny jako parametry hlavní osově napětí S22 z důvodu otevírání případných trhlin a redukované napětí pro posouzení celkové napjatosti.

Výpočet potvrdil předpoklad zvýšené napjatosti v prvním zubu závitu u obou variant hlavně. Jedná se o koncentrátor napětí stejně jako přechod závitové části a dosedací plochy, tento přechod se ale výrazněji projevuje pouze u hlavně bez konstrukčního přesahu (viz obr. 40), a to vlivem většího utážení. Oproti tomu ve variantě s přesahem (viz obr. 39) byla zjištěna nejvyšší napjatost v poslední zubové mezeře. To bylo zapříčiněno tím, že tato hlaveň je převážně namáhána samotným překonáním konstrukčního přesahu. Zuby samotné jsou pak namáhány tlakovým zatížením, které není pro případ růstu trhlin nebezpečné.



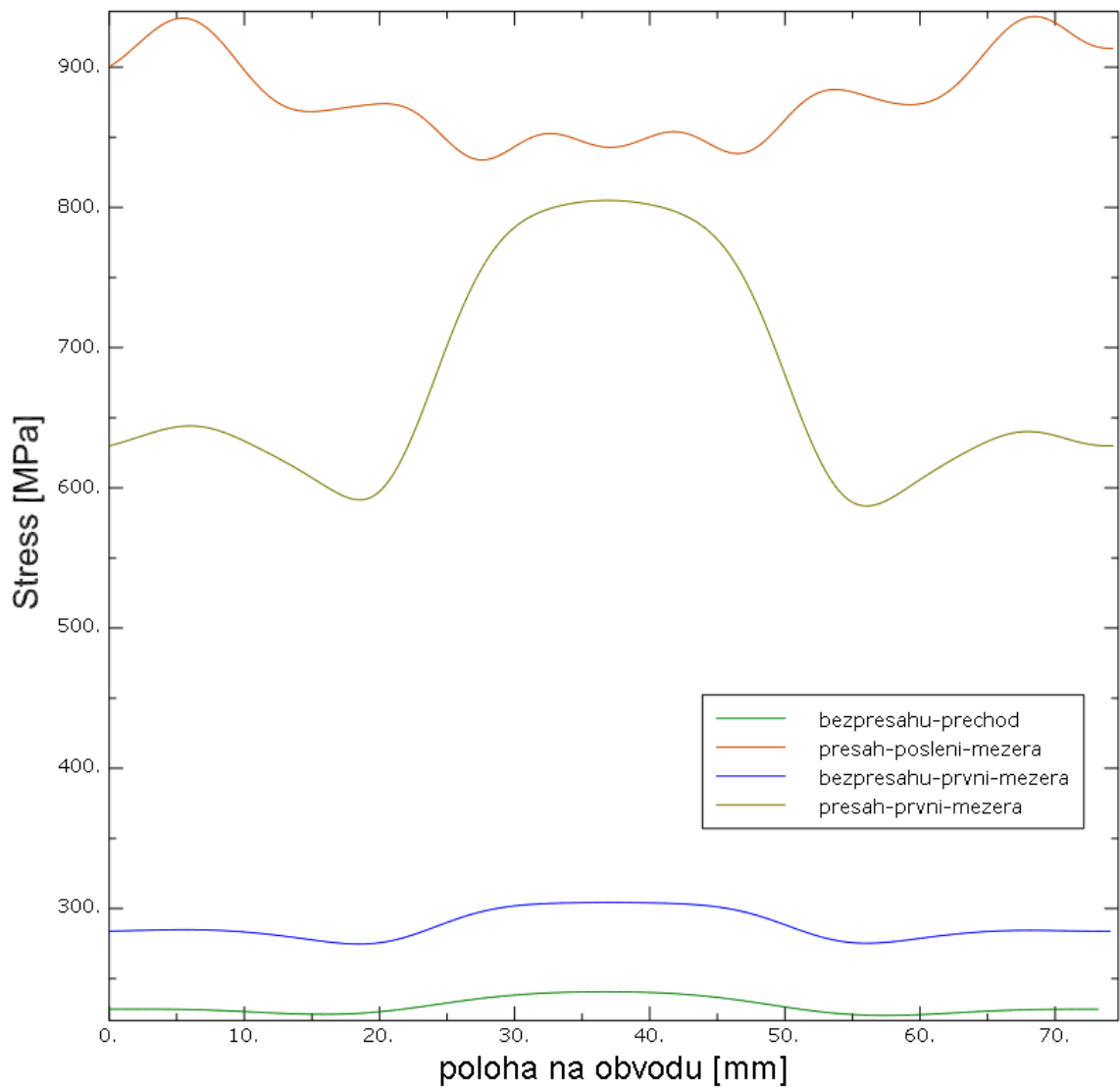
Obr. 39 Osová napjatost na hlavní s montážním přesahem

Hlaveň s přesahem vykazuje trojnásobně vyšší napětí ve vrubech. Vzhledem k malé hustotě sítě, musíme tato napětí brát jako srovnávací, skutečné špičky napětí v konstrukčních vrubech mohou být významně vyšší. Lze ale očekávat, že v takovém případě dojde k plastickému přizpůsobení. Na obou variantách hlavně má koncentrátor napětí stejný tvar a síť má stejné dělení, proto je možné usoudit z tohoto výpočtu, že po samotném zašroubování bude mít hlaveň s přesahem větší předpoklady k šíření trhlin nebo inicializaci křehkému lomu.



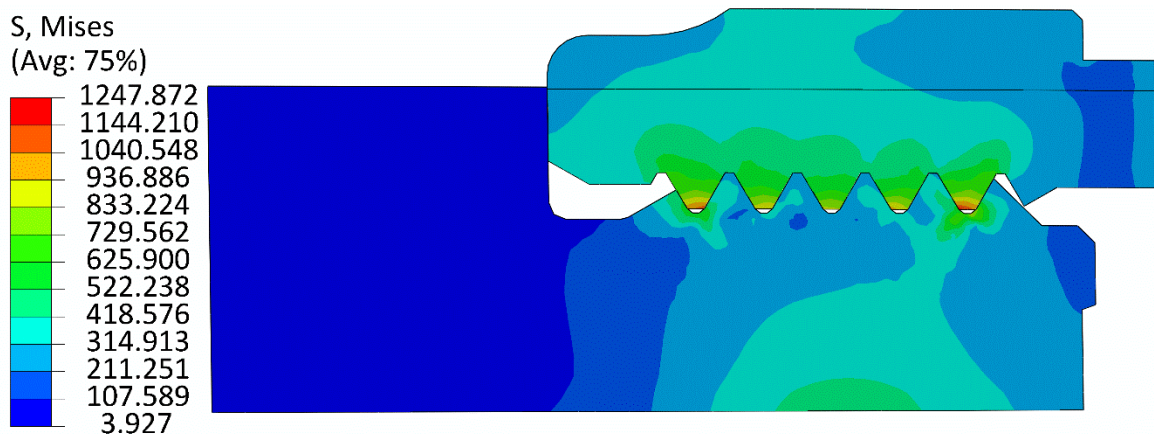
Obr. 40 osová napjatost hlavně bez montážního přesahu

Napětí v takto určených vrubech bylo analyzováno podél obvodu (viz obr. 41) tak, aby bylo lokalizováno místo s největším napětím v těchto vrubech. Data v grafu začínají ve vrchní části hlavně a vykreslují největší napětí ve vrubu na povrchu hlavně. U hlavně bez konstrukčního přesahu je patrný rozdíl napjatosti v horní a dolní části hlavně, ten je způsoben ohybem vlivem gravitačního zatížení



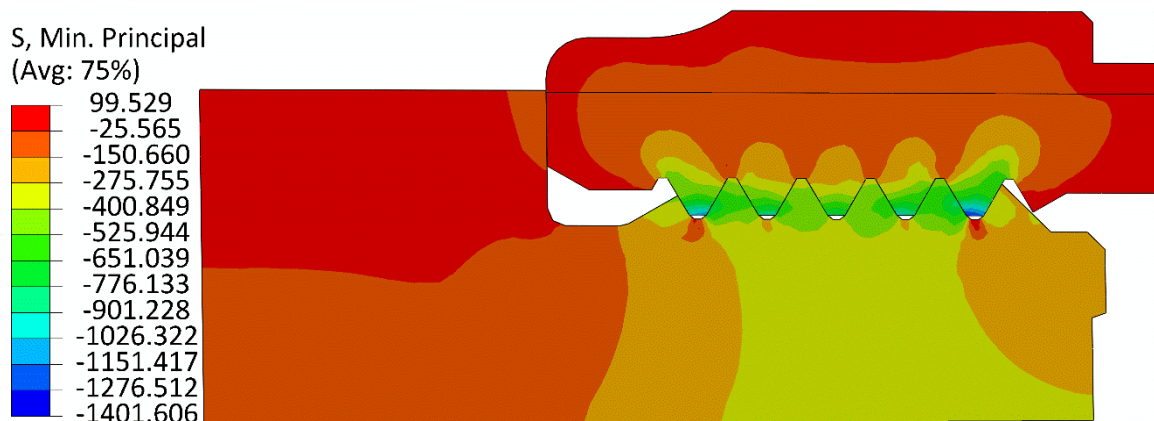
Obr. 41 napětí na obvodu hlavně v jednotlivých zubových mezerách

Celkové zhodnocení napjatosti bylo provedeno pomocí Misesova napětí, které dosahovalo v případě hlavně s montážním přesahem až do oblasti plasticity. Toto napětí se vyskytuje na vrcholech zubů v pouzdře závitu (viz obr. 42)



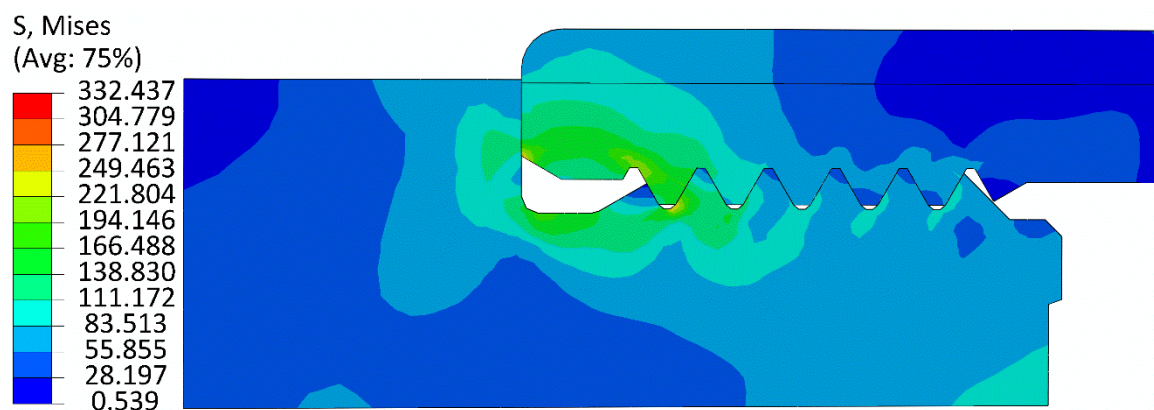
Obr. 42 Misesovo napětí na hlavni s konstrukčním přesahem

To napětí ale vzhledem k lomové mechanice není nebezpečné jelikož tyto napětí jsou převážně tlaková a tedy dochází k uzavírání potencialních trhlin (viz obr. 43).



Obr. 43 min principal hlavně s přesahem

U hlavně bez přesahu nedochází k takovému jevu protože zuby jsou namáhány pouze silou způsobenou utažením a ta vyvolá jen zlomek napětí které se nachází v lineární oblasti chování materiálu (viz obr. 44). Proto při posuzování napjatosti byl brán zřetel převážně na namáhání hlavní, z důvodu hrozící možnost otevírání trhlin ve vrubech.



Obr. 44 napětí na hlavní bez konstrukčního přesahu

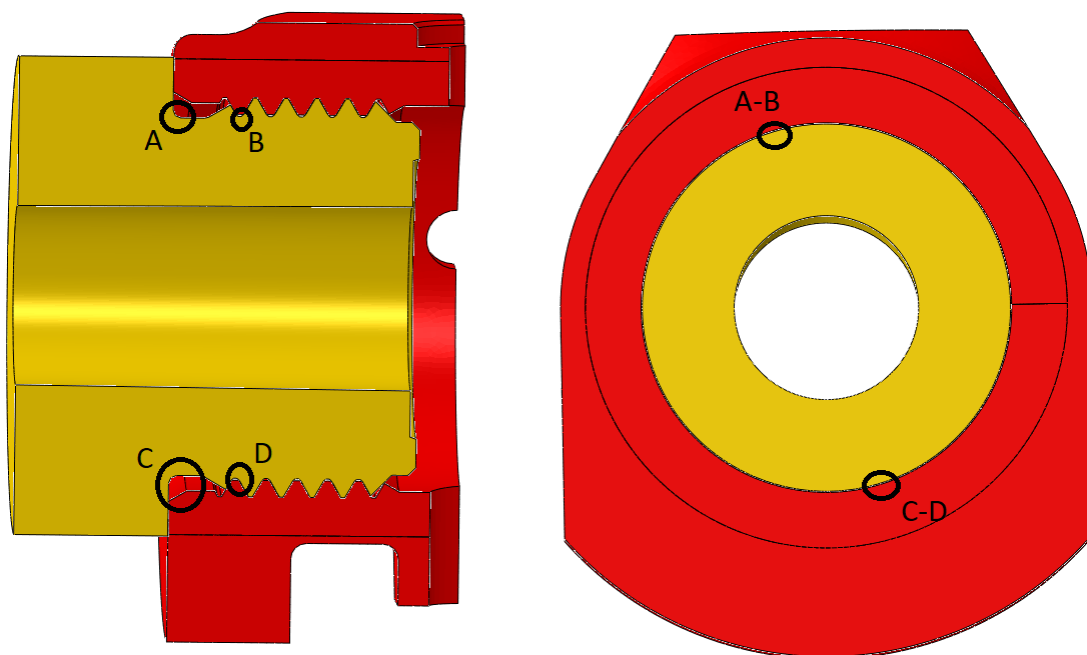
Vyhodnocení zatěžování výstřelem

Jelikož výstřel je dynamický děj a jako takový je funkcí času, bylo nutné nalézt čas ve kterém dochází k největšímu namáhání hlavní, pro tyto účely by děj na vzorkován frekvencí 0.00001 [s]. Z takto vzniklého záznamu byla vytypována místa, ve kterých dochází k největšímu namáhání. V těchto místech byl následně proveden výpis hodnot v čase tak aby bylo možné určit, který okamžik výstřelu je pro namáhání hlavní kritický.

Lokalizace napěťových extrémů

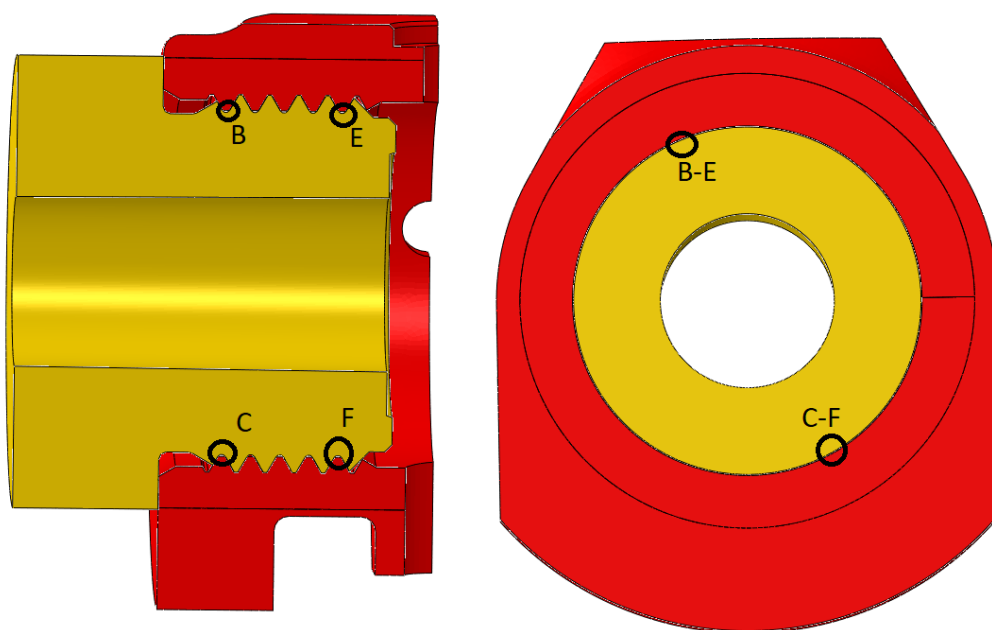
Vyhodnocení proběhlo na povrchu závitových ploch a vrubu v rámci osového napětí S22. Plochy nábojové komory pro případ osového napětí nebyly vyhodnocovány. Nedá se zde očekávat, že by v těchto plochách docházelo k tvorbě trhlin a vrubů vlivem montáže.

- Varianta bez konstrukčního přesahu obsahuje kritická místa v místě první závitové mezery a na přechodu závitové a dosedací plochy (viz obr. 45). Tato místa byla předpokládána na základě vyhodnocení napětí v závitě po utažení.



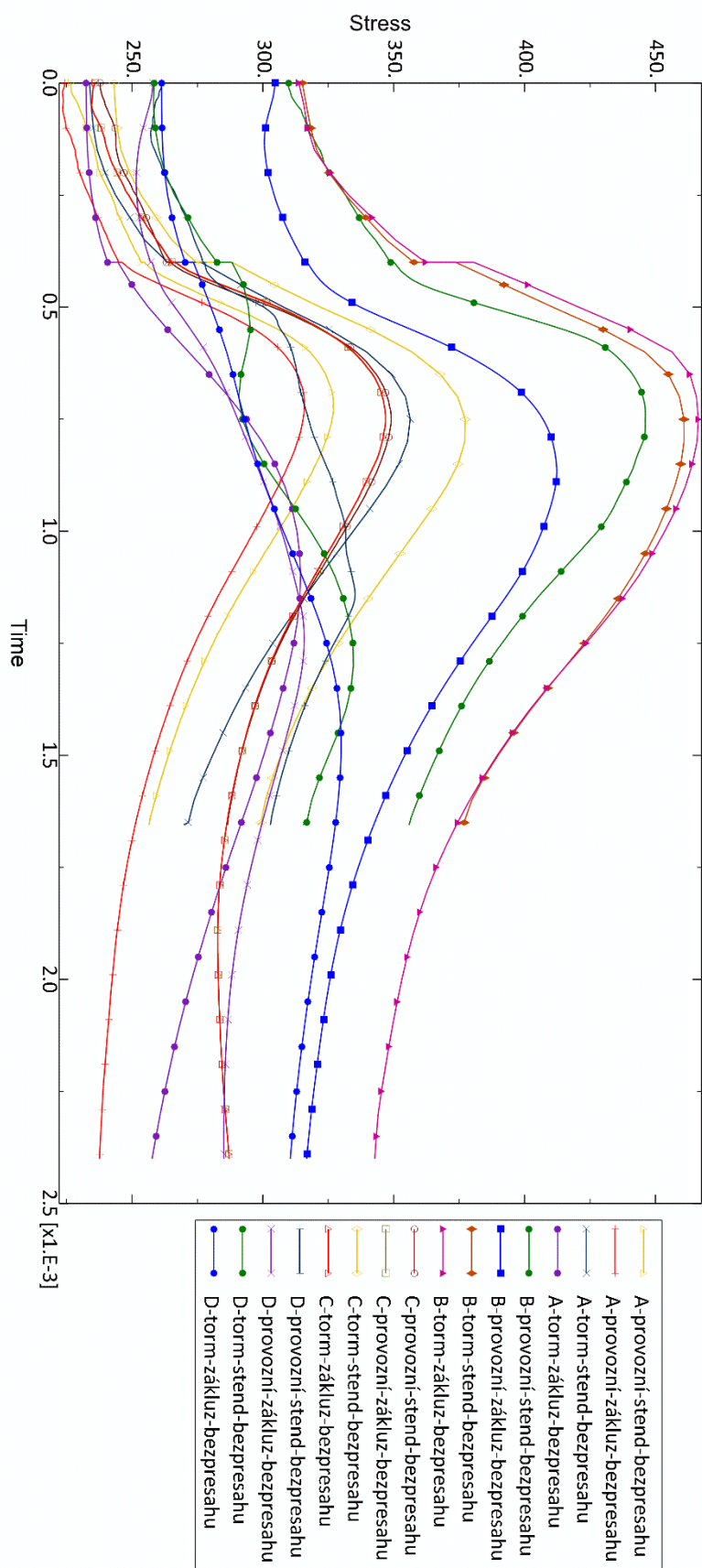
Obr. 45 Analyzovaná místa na hlavni bez montážního přesahu

- Varianta s konstrukčním přesahem oproti předchozí variantě nemá shodné umístění kritický míst se statickou částí po utažení. K první a poslední zubové mezeře přibyl i přechod závitové a dosedací plochy. Toto místo ale vykazuje nižší napětí, než jaké se vyskytuje v závitěch, proto nebylo vykresleno.

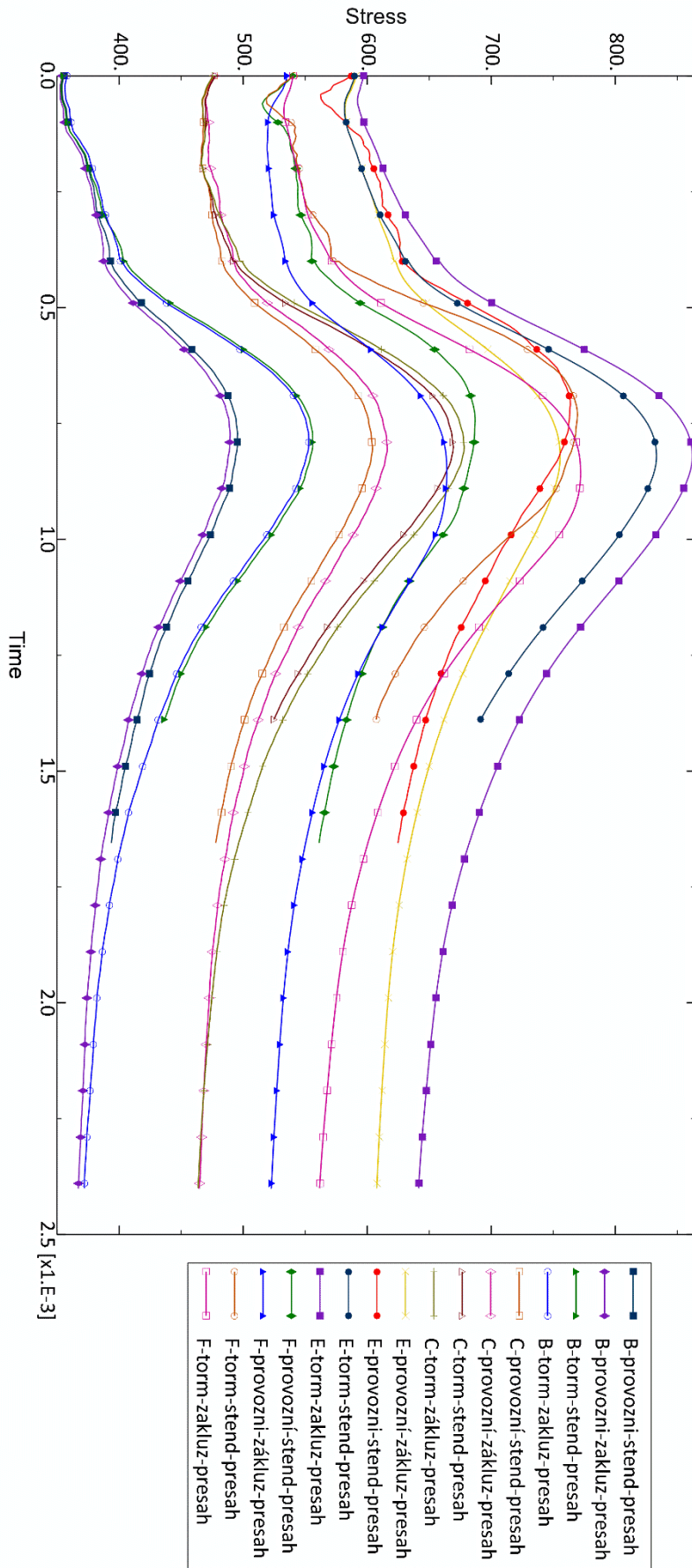


Obr. 46 Analyzovaná místa na hlavni s montážním přesahem

V těchto kritických místech byly hledány jednotlivé uzlové body obsahující extrémní hodnotu napětí v dané lokalitě. Poloha těchto bodů se neměnila v obou variantách tlakového i montážního zatížení, proto se dá předpokládat, že tlakové zatížení nemá na polohu kritických míst vliv. Konkrétní hodnota napětí v uzlovém bodu je však funkcí tlaku a jevů vzniklých dynamikou zatěžování. Poloha kritických uzlů byla ve spodní a horní části závitu, v těchto uzlech byl proveden výpis hodnot v čase pro všechny varianty zatížení (viz obr. 47 a 47).

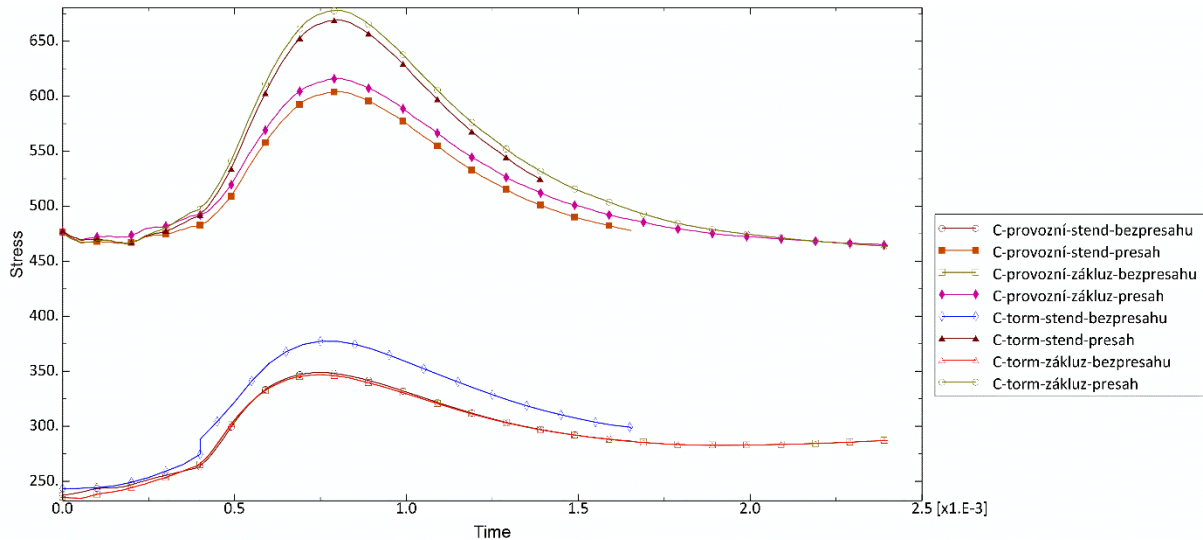


Obr. 47 osového napětí v kritických místech na hlavni bez konstrukčního přesahu



Obr. 48 osového napětí v kritických místech na hlavní s konstrukčním přesahem

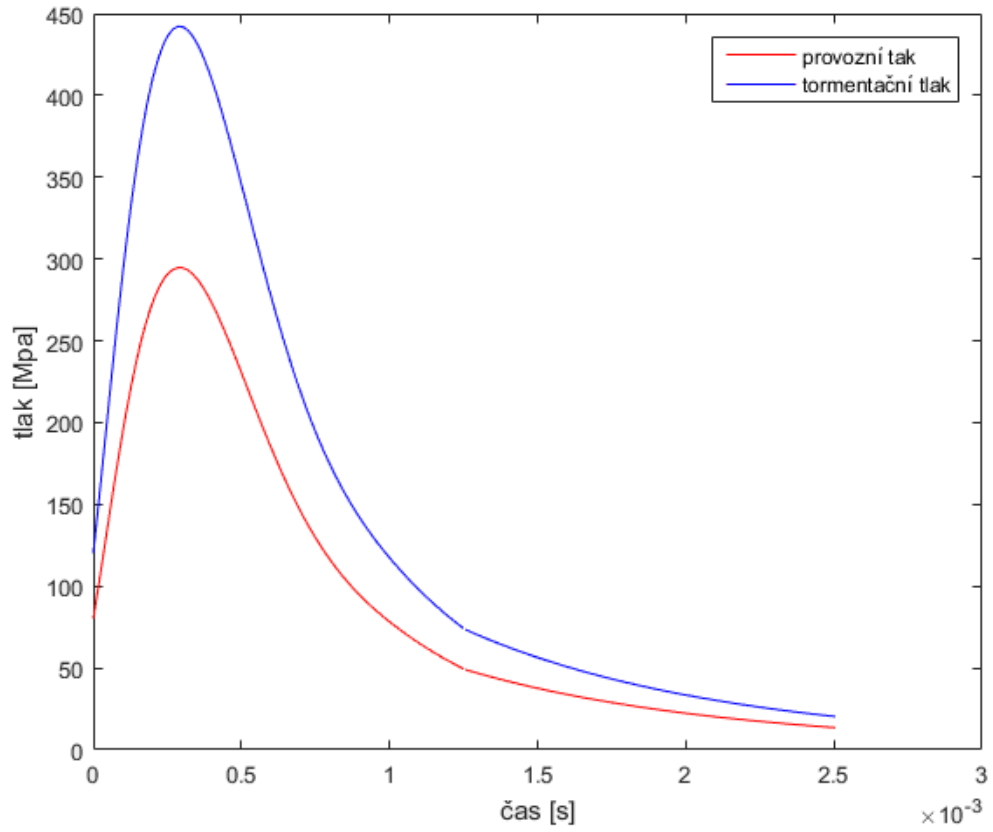
Z vykreslených hodnot je zřejmé i přes napěťový pokles způsobený přechodem na explicitní schéma výpočtu, že napjatost je výrazně vyšší v případě hlavně s přesahem (viz obr. 49). Toto lze dokázat porovnáním napětí v místě C, které ale není v případě hlavně s přesahem místem s největší hodnotou napětí, ale umožňuje přímé srovnání ve stejné lokalitě závitů. V tomto místě rozdíl napětí činí 321 MPa ve variantě tormentačního tlaku v kombinaci se zákluzem hlavně.



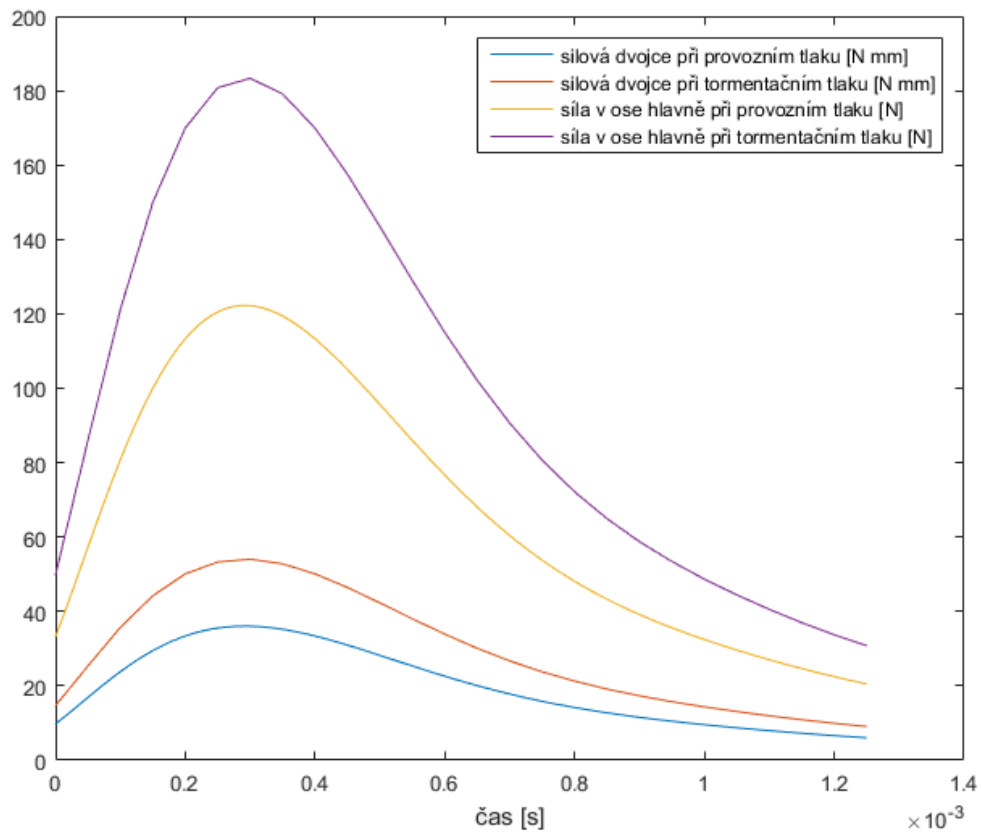
Obr. 49 porovnání napětí v čase v místě C

Rozbor napěťových vlivů zatížení

Maxima napěťových hodnot jsou způsobena tlakovým ztížením, vlivem rozkmitání hlavně nebo rázovými vlnami v materiálu. Ze znalosti způsobu zatěžování lze vyhodnotit vliv jednotlivých jevů na napěťová maxima v uzlových bodech. Hodnoty tlaků (viz obr.50), sil a silové dvojce (viz obr. 51) v hlavní v čase jsou známy z okrajových podmínek modelu. Hodnoty ohybu hlavně byly získány z globálních modelů výpisem posuvu v několika místech, tak aby bylo možné bezpečně určit kmitání hlavně během výstřelu.

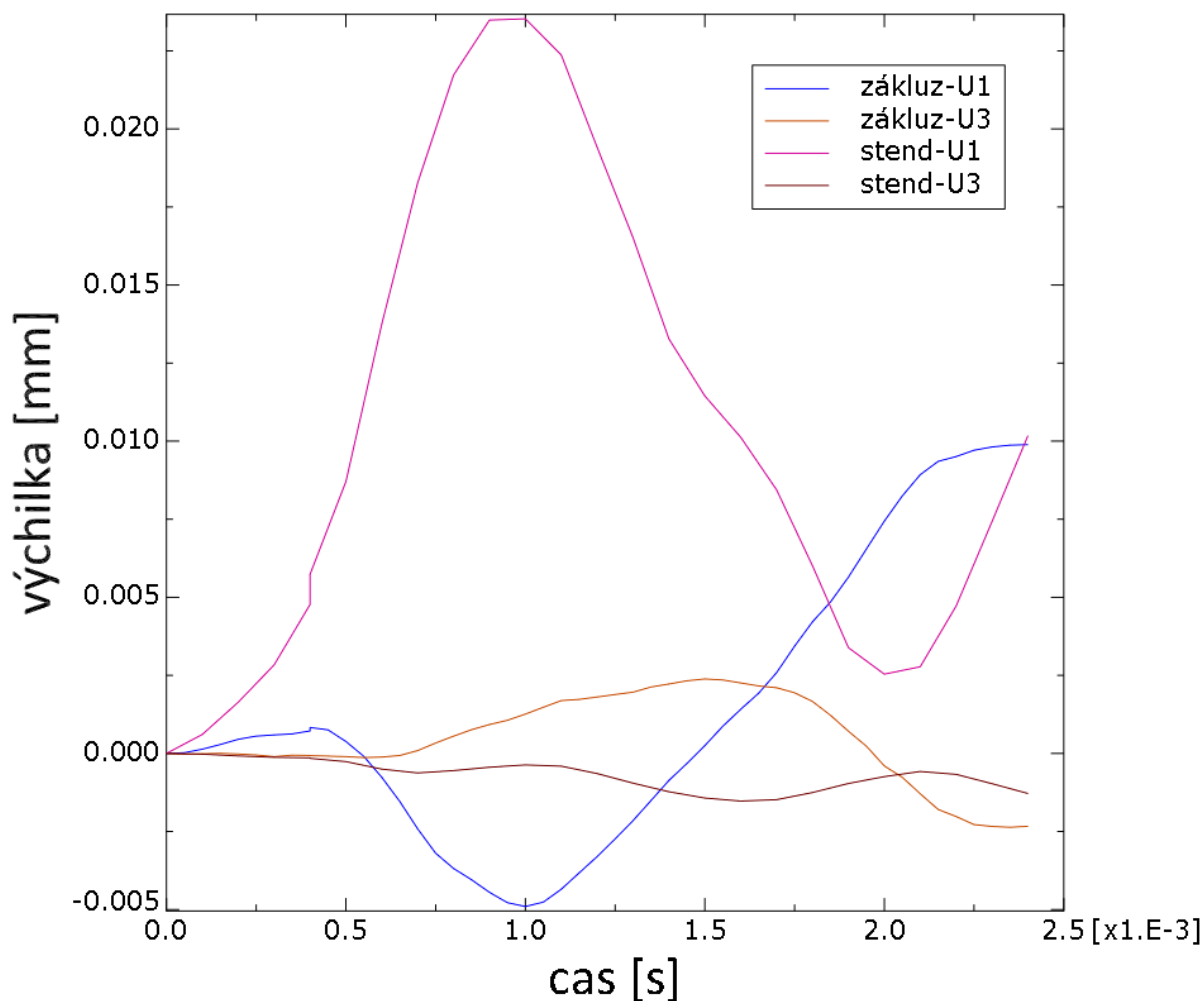


Obr. 50 průběh tlaků v hlavni v druhé fázi vnitro balistického děje



Obr. 51 Průběh silové dvojce a osové síly v druhé fázi vnitro balistického děje

Z takto získaných hodnot posuvů byl následně identifikován vlastní tvar a kmitání hlavní při všech variantách uložení a zatěžování. Pro určení směru ohybu v závitu ale postačily hodnoty z místa před nábojovou komorou. V případě varianty střelby v leže bylo nutné od takto získaných dat pohyb celé zbraně. Z výsledků (viz obr. 52) vyplynulo že hlaveň kmitá ve dvou osách, což vysvětluje, proč spojnice kritických míst namáhání A-D není kolmá na zem. Rozdíly v kmitání mezi hlavní s přesahem a bez přesahu nebyli rozpoznány. Lze tedy usoudit že předepnutí závitu nemá na modální vlastnosti hlavní vliv. Rozdílné kmitání bylo pozorováno pouze při změně uložení hlavní (stend, střelec). Toto rozkmitání se projevuje pouze v místě přechodu závitové části a dosedací plochy a to zploštěním průběhu napětí.

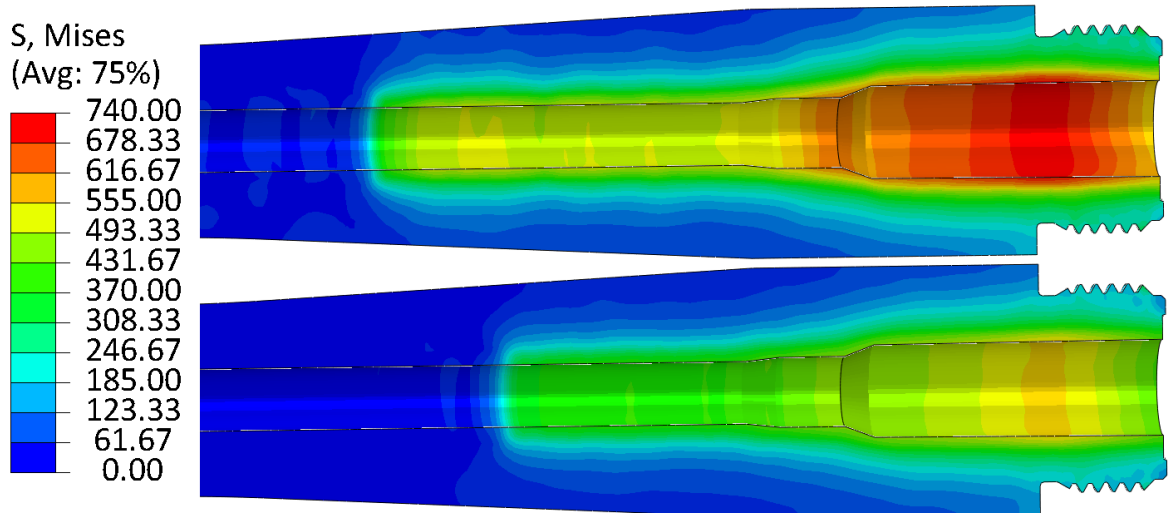


Obr. 52 kmitání hlavní

Vliv rozkmitání je patrný v porovnání napětí při střelbě se záklužem dochází k zvýšení napětí v řádu jednotek megapascal ve všech variantách tlakového zatížení. Zavedení silové dvojce a osově síly se projevuje především skokovým zvýšením napětí v čase 0,4 [ms]. Rozdíl napětí při tormentační zkoušce je v rozmezí do 100 MPa, zbylé rozdíly v napětí mezi variantou s přesahem a bez přesahu jsou způsobeny právě vlivem montážního předpětí a činí 406 MPa.

Posouzení vlivu tormentace

Vyhodnocení celkové napjatosti hlavně bylo uskutečněno pomocí Misesova napětí. Byla posuzována celková napjatost na součástech nikoli jen kritická místa v závitě. Při tormentaci dochází vlivem většího tlaku k rozdílné rychlosti pohybu střely v hlavni. Tedy maximální tlak plynů působí na větší plochu hlavně ale, vzhledem k rozdílu tormentačního a provozního tlaku je tento vliv zanedbatelný (viz obr. 53).

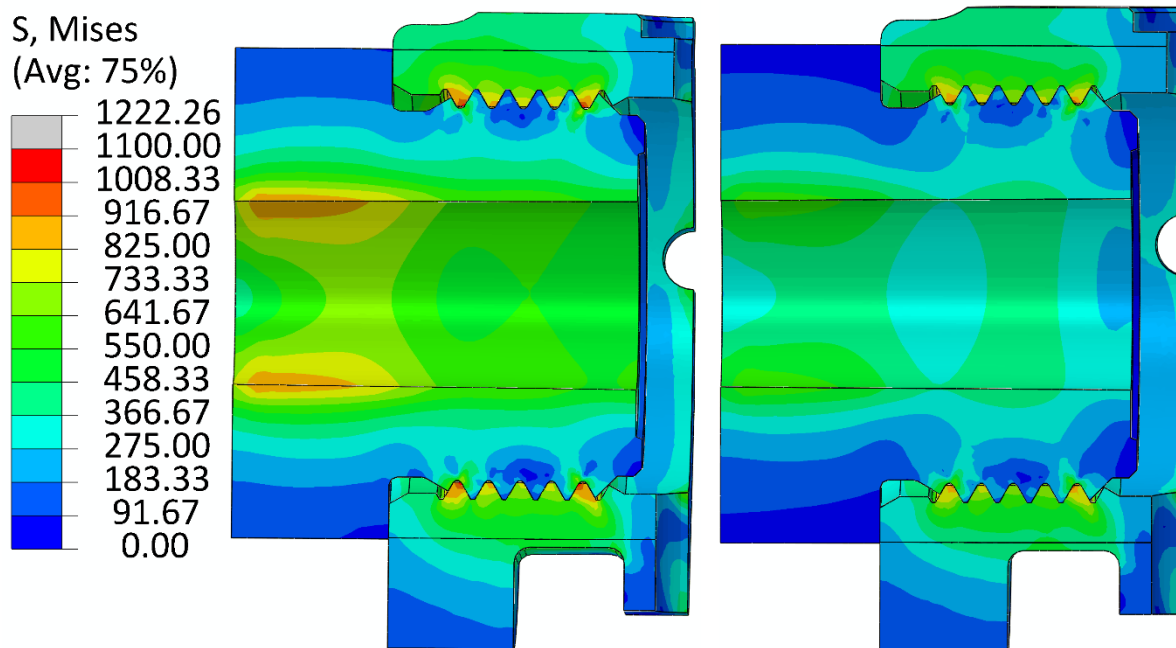


Obr. 53 oblast zatěžování hlavně při maximálním tlaku (shora tormentační tlak, provozní tlak)

Z globálního modelu a jak je i z obr. 53 patrné, tlak namáhá hlavěň nejvíce v nábojové komoře v místě přechodu závitové a dosedací části hlavně, která je zahrnuta v submodelingu. Poroto bylo provedeno porovnání na těchto modelech s jemnější diskretizací. Vzájemné porovnání bylo provedeno na variantách upnutých ve standu. Z porovnání plyne že na hlavních nedochází k plastizaci při maximálním tlaku v hlavni v žádné z variant.

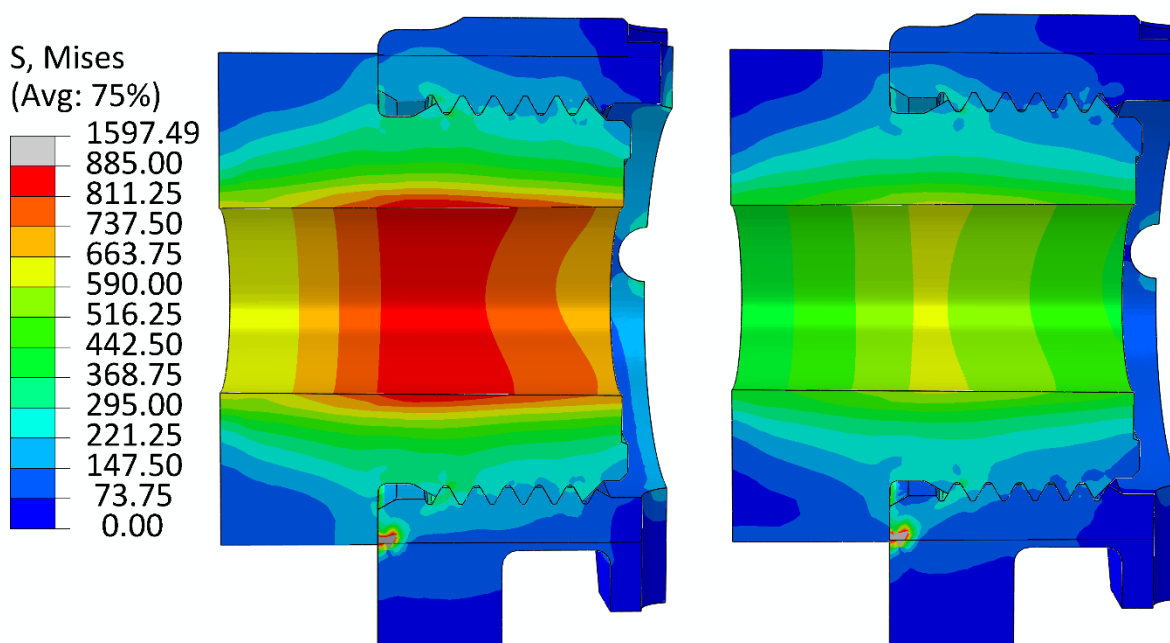
Závitové spojení s přesahem obsahuje místa na prvním a posledním závitovém zubu, kde napětí dosahuje hodnoty 991 a 1142 MPa v případě tormentačního tlaku, 1030 a 1027 MPa v případě provozního tlaku. Tyto hodnoty musíme brát opět jako srovnávací. Jak již implicitní výpočet naznačil hodnoty vrubových napětí model s touto

diskretizací v explicitním výpočtu nedokáže postihnout. Skutečné hodnoty napětí budou vyšší než tyto hodnoty a pravděpodobně dojde k plastickému přizpůsobení.



Obr. 54 celková napjatost hlavně s konstrukčním přesahem v čase 0,4 ms

- Závitové spojení bez přesahu vykazuje nižší napětí ve všech součástech i zde se ale jedná o srovnávací hodnoty napětí. Lze ale předpokládat plastizaci v menší rozsahu. Hodnoty mimo stupnici jsou v lokalitách napojení elementů typu šestistěny a čtyřstěny, a lze je jednoznačně interpretovat jako umělou poruchu napjatosti. Tak vysoká napjatost v uvedených lokalitách (které jsou z obrázku oříznuty) není..



Obr. 55 celková napjatost na hlavní bez konstrukčního přesahu v čase 0.4 ms.

Závěr

Tato diplomová práce představuje porovnání dvou závitových spojení s rozdílnou tolerancí a mapuje vliv těchto tolerancí na napjatost hlavně s ohledem na možnost ztráty celistvosti vlivem lomu při tormentační zkoušce.

Nejprve je popsáno stanovení tlaku v hlavni. Následuje výpočtové stanovení pohybu střely a namáhání hlavně tímto pohybem způsobené. Na základě takto stanoveného pohybu střely je s využitím složitějších reologických modelů určeno prostorové tlakové zatížení v oblasti za střelou. Tlakem způsobeným pohybem před střelou se práce nezabývá. Ale k naznačení problematiky rázových vln dochází v kapitole přechodové balistiky. Následně je rozebrán princip a problematika určení a aplikace zpětného silového účinku zbraně v interakci s člověkem.

Další část se zabývá konstrukcí a funkcí zbraně s ohledem na řešený děj. Jsou připomenuta základní východiska metody konečných prvků a vysvětleny specifické pojmy související s použitými technikami modelování v této práci.

Následně jsou popsány modely reprezentující střelbu z vývojového stendu a střelcem v poloze v leže. Tyto modely byly vytvořeny pro oba druhy závitového spojení. Ze znalosti utahovacích momentů bylo vytvoření předepnutí těchto spojení a následně bylo na takto předepnuté hlavně aplikováno provozní a tormentační tlakové zatížení. Pro detailní zmapování závitových spojení bylo použito více úrovně modelování

Výsledky analýz

U hlavně s konstrukčním přesahem musely být rozpoznány složky utahovacího momentu potřebné k překonání tolerančního pole a složka vyvozující osově napětí vlivem utahování. Zde bylo odhaleno že po překonání tolerance je závit dotažen silou pouhých 9 N·m oproti tomu hlavěň bez konstrukčního přesahu byla utahována silou 60 N·m

Z porovnání osových napětí je ale zřejmé že hlavěň s konstrukčním přesahem vykazuje trojnásobnou hodnotu maximálního osového napětí oproti hlavni bez tohoto přesahu. Obě tyto varianty se liší i místem výskytu maximálního napětí. Hodnota těchto napětí ale není konečná z důvodu špatného postihnutí koncentrátorů napětí ve vrubech.

Zatěžování takto předepnutých hlavní různými tlaky byly výsledky obdobné ve smyslu polohy lokalit s maximálním osovým napětím. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo při tormentačním tlaku v režimu střelby střelcem v pozici v leže v případě obou variant hlavní. Plastizaci materiálu se při tormentaci nepodařilo na zvolené hustotě sítě prokázat.

Z výsledků plyne, že závit bez konstrukčního přesahu i přes chybu diskretizace vykazuje ve všech parametrech nižší hodnoty napětí během všech tlakových zatížení. Rozdíly mezi střelbou z vývojového stendu a pozicí střelce v leže jsou pro tento typ analýzy v řádu jednotek megapascalů a lze je tedy zanedbat. Síla v ose hlavně do výpočtu vnáší nespojitost z důvodu že není zahrnuta v první fázi vnitřní balistiky a vliv ohybu hlavně způsobeným dopadem zbraně zpátky na dvojnožku se v rámci této analýzy nepodařilo prokázat.

Tato práce může posloužit jakožto předloha pro další detailnější posuzování napjatosti na závitech. V místech touto prací nastíněných tak, aby bylo možné s určitostí posoudit pravděpodobnost lomu.

Aby bylo možné detailněji posuzovat napjatost v závitu je potřeba znát tyto parametry:

- Místo zařiznutí prvního závitu pro přesnou lokalizaci kritických míst.
- Určit vrubovou houževnatosti materiálu
- Vytypovaná místa na hlavní podrobit větší diskretizaci
- Znat poloměry zaoblení jednotlivých závitových ploch případně zaoblení obráběcího nástroje
- Vycházet z naměřených hodnot tormentačního tlaku
- Posoudit vliv absence nábojnice ve výpočtovém modelu

Zdroje

1. CARLUCCI, Donald E. a Sidney S. JACOBSON. *Ballistics: theory and design of guns and ammunition*. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, c2014. ISBN 978-1-4665-6437-4.
2. MACKO, Martin. *Teorie a výpočty loveckých, sportovních a obranných zbraní*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1255-X.
3. *Advances in military technology*. Brno: University of Defence, 2006-. ISSN 1802-2308.
4. FIŠER, Miloslav. *Konstrukce loveckých, sportovních a obranných zbraní*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1021-2.
5. ŠVEJK, Vladimír. *Pěchotní zbraně*. Praha: Naše vojsko, 1957. Velká vojenská knihovna.
6. SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování*. Vyd. 3., upr. a dopl. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-7204-633-1.
7. BEER, Stanislav. *Vnitřní balistika loveckých, sportovních a obranných zbraní: vnitřní balistika LSOZ*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1022-0.
8. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-2142629-0.
9. ŠPANIEL, Miroslav a Zdeněk HORÁK. *Úvod do metody konečných prvků*. Praha: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04665-4.
10. Abaqus 6.14 user manual
11. NOSEK, Martin. *Porovnání stavu napjatosti klasického a vinutého šroubového spoje*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Karel Vítek, CSc.