



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 ANALÝZA FORMY PRO VYSOKOTLAKÉ
ODLÉVÁNÍ**

STRENGTH ANALYSIS OF MOLD FOR HIGH-PRESSURE CASTING

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Ferenc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	Bc. Filip Ferenc
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce:	Ing. Petr Vosynek, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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 diplomové práce:

Pevnostní analýza formy pro vysokotlaké odlévání

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Téma vychází z technické praxe. Při návrhu formy pro vysokotlaké odlévání se běžně používají přibližné analytické výpočty, z tohoto důvodu může docházet k předimenzování formy. Obsahem práce bude návrh a realizace pevnostní analýzy pomocí výpočtového modelování. První část práce se bude zabývat rešerší a popsáním stávající situace. Dále bude provedena analýza kritických míst a zatížení, k tomuto bude navrhnut odpovídající výpočtový model. V případě nevyhovujícího stavu budou v práci navrženy konstrukční změny.

Cíle diplomové práce:

- Rešerše v oblasti vysokotlakého odlévání.
- Analýza zkoumané součásti a tvorba výpočtového modelu.
- Deformačně napěťová analýza pevného rámu formy.
- Konstrukční úpravy na základě dosažených výsledků.

Seznam doporučené literatury:

- RAGAN, Emil. Liatie kovov pod tlakom. Prešov: Fakulta výrobných technológií, 2007.
- VALECKÝ, Jindřich. Lití kovů pod tlakem. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- LAUDÁR, Ján. Liatie pod tlakom. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1964.
- TUL - KATEDRA STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE. Výroba odlitků ze slitin hliníku [online]. 2012 [cit. 2015-03-21]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/ksm/obsah/vyuka/MV-cv_3.pdf
- MACHUTA, Jiří, NOVÁ, Iva. Slévárenské formy. V Liberci: Technická univerzita, 2014

NOVÁ, Iva. Přenos tepla ve slévárenských formách. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 154 s., 2014

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Práce byla vytvořena na podnět nářadovny Škoda Auto a.s, která navrhla novou koncepci lící formy, pro kterou bylo nutno zjistit její deformačně napěťové vlastnosti. Problémem bylo vytvoření deformačně napěťové analýzy pevného rámu formy, nalezení jeho kritických míst a navržení případných úprav geometrie. K řešení problému bylo vybráno výpočtové modelování, konkrétně metoda konečných prvků, přičemž deformačně napěťová analýza byla zpracována v programu ANSYS Workbench. Dále bylo vytvořeno několik úrovní výpočtových modelů, na základě kterých, byla odhalena kritická místa. Na závěr práce byly navržena opatření vedoucí ke snížení napětí v kritických místech. Výstup práce slouží zejména jako podklad k návrhu vysokotlakých lících forem firmy Š. A. a.s.

KLÍČOVÁ SLOVA

tlaková lící forma, pevný rám lící formy, deformačně napěťová analýza, ANSYS

ABSTRACT

This master thesis had been created at the instigation of Skoda Auto. a.s. tool design department, which designed a new concept of the diecast mold. For this new concept of construction mold was requested to describe its strain-stress behaviour. The main goal of this thesis was to run s-s analysis. According to results of s-s analysis the potentially risky location had been found and the recommendation of the design improvement had been made. The problem has been solved by Finite Element Method in software ANSYS Workbench. The output of the work is mainly used as a basis for the design of high-pressure casting molds of S. A. a.s.

KEYWORDS

die casting, die casting mold, fixed frame of die casting mold, Stress-strain analysis, ANSYS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FERENC, F. *Pevnostní analýza formy pro vysokotlaké odlévání*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 100 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Vosynek, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci na téma „Pevnostní analýza formy pro vysokotlaké odlévání“ vypracoval samostatně s využitím uvedených zdrojů, dále jsem vycházel z odborné literatury a konzultací s vedoucím práce a s firmou Škoda Auto a.s.
V Brně dne 24. května 2019

.....

Filip Ferenc

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych velice rád poděkoval především své přítelkyni Tereze Homolové za celkovou podporu během celého studia a zejména pak při vypracovávání diplomové práce. Velké díky také patří celé mé rodině, která ve mě věřila a celou dobu mě ve studiu podporovala.

Obrovskou zásluhu na tom, že tato práce vznikla a že je v takové podobě, má Ing. Jakub Fiala z firmy Škoda Auto a.s. Tímto bych mu chtěl poděkovat za uvedení do problematiky tlakového odlévání a za všechny konzultace v průběhu celého roku.

Rád bych poděkoval také vedoucímu této práce, panu Ing. Petru Vosynkovi, Ph.D., za ochotu a čas, který mi věnoval při konzultacích, a to zejména výpočtové části mé práce.

OBSAH

1	ÚVOD.....	1
2	ANALÝZA PROBLÉMU	2
2.1	Popis problémové situace.....	2
2.2	Formulace problému.....	2
2.3	Cíle, kterých má být dosaženo	2
2.4	Systém podstatných veličin	3
2.4.1	Podmnožina S0 – Okolí objektu	3
2.4.2	Podmnožina S1 – Geometrie a topologie objektu.....	3
2.4.3	Podmnožina S2 – Vazby mezi objektem, okolím a jednotlivými částmi	4
2.4.4	Podmnožina S3 – Aktivace objektu.....	4
2.4.5	Podmnožina S4 – Ovlivnění objektu okolím	4
2.4.6	Podmnožina S5 – Vlastnosti objektu	4
2.4.7	Podmnožina S6 – Procesy v objektu.....	4
2.4.8	Podmnožina S7 – Projevy a chování objektu	4
2.4.9	Podmnožina S8 – Důsledky projevů objektu.....	5
2.4.10	Stochastičnost	5
2.4.11	Dynamičnost	5
2.5	Volba metody řešení.....	5
3	REŠERŠE VYSOKOTLAKÉHO ODLÉVÁNÍ	6
3.1	Odlévání pod tlakem	6
3.2	Licí cyklus	7
3.3	Stroje pro vysokotlaké lití	8
3.3.1	Základní druhy mechanismů dopravy taveniny.....	8
3.3.2	Uzavírací systémy	9
3.3.3	Vstřikovací mechanismy.....	9
3.4	Schematické znázornění licího stroje.....	10
3.5	Formy pro vysokotlaké odlévání	10
3.5.1	Hlavní části formy.....	11
3.5.2	Namáhání forem.....	13
3.5.3	Chlazení a temperace formy	14
3.5.4	Materiály forem	15
3.6	Základní charakteristiky licího stroje	16
3.6.1	Uzavírací síla	16
3.6.2	Lisovací tlak.....	18
3.7	Výpočty v oblasti tlakového lití	18

3.7.1	Výpočet tlaku v dělicí rovině.....	19
3.7.2	Výpočet napětí v pohyblivém rámu formy	19
3.7.3	Výpočet tuhosti rámu	21
4	VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ	22
4.1	Vstupní parametry	22
4.1.1	Materiálové charakteristiky	22
4.1.2	Okrajové podmínky	24
4.1.3	Lisovací síla	25
4.2	Kritická místa	27
4.3	Uzavření formy.....	28
4.3.1	Model geometrie - 1. úroveň.....	28
4.3.2	Model geometrie - 2. úroveň.....	35
4.3.3	Model geometrie - 3. úroveň.....	39
4.3.4	Shrnutí úrovní modelů	42
4.4	Tepelné zatížení formy při uzavírací fázi.....	43
4.4.1	Teplotní pole	43
4.4.2	Okrajové podmínky	48
4.4.3	Výsledky	48
4.4.4	Porovnání zatížení s teplotou a bez teploty.....	52
4.5	Vstříknutí taveniny do dutiny formy	52
4.5.1	Zatížení teplotou	53
4.5.2	Zatížení tlakem.....	54
4.5.3	Zatížení kombinací teploty a tlaku.....	56
4.6	Zpřesnění modelu geometrie	58
4.6.1	Úprava modelu geometrie.....	59
4.6.2	Zatížení teplotou	60
4.6.3	Zatížení tlakem.....	60
4.6.4	Zatížení kombinací teploty a tlaku.....	60
5	NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ÚPRAV.....	61
5.1	Spojení spodních zaoblení (kritické místo V)	61
5.2	Spojení zaoblení v oblasti prostřední komory	63
5.3	Vodorovné zaoblení v oblasti zámků	64
5.4	Další potencionální změny	65
6	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ.....	66
6.1	Měření na slicovacím lisu.....	66
6.2	Měření v provozu	67
7	PEVNOSTNÍ POSOUZENÍ	68

7.1	MS pružnosti	68
7.2	MS únavy	69
8	ZÁVĚR	74
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	77
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	79
	SEZNAM OBRÁZKŮ.....	81
	SEZNAM TABULEK	84

1 ÚVOD

Vývoj hutnictví jako celku, zejména pak slévárenství, jsou pevně spjaty s vývojem lidstva. Odlévání kovů bylo používáno pro výrobu ozdobných předmětů, pracovních pomůcek či zbraní. První zmínky jsou zaznamenány již v 9. tisíciletí př. n. l., kdy byl objeven první měděný předmět. Dle typů používaných kovů dělíme také celé dekády, jako například doba bronzová (3. tisíciletí př. n. l.) nebo doba železná (7. – 8. stol. př. n. l.). Velký rozvoj v oblasti slévárenství se datuje od doby průmyslové revoluce, kdy se začala ve velké míře používat litina. Stejně jako průmysl zaznamenal i obor slévárenství největší pokroky na začátku 20. století, v průběhu dvou světových válek a během vesmírného závodu mezi USA a bývalým Sovětským svazem. V té době byly také poprvé použity materiály jako hliník, hořčík a titan. Součástí rozvoje slévárenství ve 20. století bylo také zavedení vysokotlakého odlévání, kterým se bude tato diplomová práce zabývat [1] [2].

Předkládaná diplomová práce se bude zabývat deformačně napěťovou analýzou pevného rámu formy pro vysokotlaké odlévání. Podnět k vypracování práce dala nářadovna firmy Škoda Auto a.s. (dále jen Škoda Auto nebo Š. A.).

Vysokotlaká licí forma je vysoce exponovaným nástrojem zajišťující finální tvar odlitku, odvod tepelné energie, zachycení sil vyvolaných tlakem taveniny aj. Z tohoto důvodu bude diplomová práce zaměřena právě na formu tlakového licího stroje. Licí forma je velmi exponovanou součástí a je vystavena hned několika druhům namáhání. Pro správné navržení tlakové licí formy se používají simulace proudění kovů v dutině a simulace průběhu chladnutí odlitku. Při návrhu forem vycházejících z koncepce používané v předchozích projektech jsou ve Š. A. využívány pouze jednoduché analytické výpočty, popřípadě jednoduché výpočty pomocí metody konečných prvků (dále jen MKP). Pro návrh forem nové koncepce je však nutné přistoupit k vypracování detailní pevnostní analýzy nosných částí forem, která zajistí jejich dostatečné a zároveň hospodárné dimenzování. Právě návrh nové koncepce licí formy je podnětem k vypracování této diplomové práce [3].

2 ANALÝZA PROBLÉMU

Kapitola bude věnována definování problémové situace, problému, cílům práce, systému podstatných veličin a volbě metody řešení. Všechny tyto části budou napsány v systémové podobě dle knihy Systémová metodologie brána do řešení problémů [4].

2.1 POPIS PROBLÉMOVÉ SITUACE

Jak již z úvodu vyplývá, práce se bude zabývat pevnostní analýzou lící formy používanou pro vysokotlaké odlévání bloků motoru ve firmě Škoda Auto. Kvalita formy přímo ovlivňuje kvalitu odlitku, jeho konečnou cenu, dobu výroby aj. Při jejím návrhu je tedy nezbytné, aby bylo dosaženo optimálního stavu mezi kvalitou odlitku, cenou formy a životností. Pro návrh se používají simulační programy vtékání kovů a tuhnutí odlitků, hlavní soustředění se tedy upírá zejména na tvarové části formy. Nosné části formy jsou navrhovány na základě zjednodušených výpočtů a zejména pak na základě zkušeností konstruktérského týmu.

Společně s novými projekty přišla i změna stávající koncepce formy, tedy i jiná konstrukce nosného rámu. Nestandardní situace spočívá v neznalosti deformačně napětového chování formy nové koncepce. Tato nestandardní situace má za následek snížení kvality návrhu nově navrhovaných forem, jelikož není známo, zda nejsou současné formy předimenzovány, či naopak poddimenzovány a k porušování nebude docházet postupem času. Vypracování deformačně napětové analýzy by mělo konstruktérům dát představu o namáhání formy a pomoci jim při návrhu nové tlakové lící formy.

2.2 FORMULACE PROBLÉMU

Problémem je vytvoření deformačně napětové analýzy nosné části formy pro dva zatěžovací stavy, kterými jsou úplné uzavření formy a konečná fáze plnění. Dále je nutno vytipovat kritická místa, provést pevnostní posouzení a navrhnout zlepšení geometrie.

2.3 CÍLE, KTERÝCH MÁ BÝT DOSAŽENO

Jak již z definování problému vyplývá, hlavním cílem diplomové práce je změna nestandardní situace na standardní. Abychom tohoto stavu dosáhli, je nutné si definovat dílčí cíle vedoucí k jeho úspěšnému řešení:

a) Rešerše v oblasti vysokotlakého odlévání

Úkolem rešerše je seznámit čtenáře s teorií vysokotlakého odlévání, s konstrukcí a funkcí lícího stroje. Dále bude čtenář seznámen s konstrukcí forem, s materiály používanými na jejich výrobu a s druhy namáhání, kterým je forma vystavena. Na závěr rešeršní části budou uvedeny základní analytické výpočty používané při návrhu forem.

b) Analýza zatěžovacích stavů

Cílem je definovat významné zatěžovací stavy. Zároveň budou definovány významné vlivy působící na součást a budou vyloučeny vlivy, které jsou z hlediska úrovně

řešení problému nepodstatné. Tímto se stanoví daná rozlišovací úroveň, na které se budeme pohybovat.

c) Deformačně napěťová analýza pevného rámu formy

Cílem tohoto bodu, je vytvoření výpočtového modelu, který bude věrně popisovat deformačně napěťové chování ve formě na dané rozlišovací úrovni. Dále bude následovat analýza výsledků.

d) Konstrukční úpravy na základě dosažených výsledků

V případě, že bude v určité části formy zjištěno vysoké namáhání způsobené daným konstrukčním návrhem, bude vytvořen návrh na zlepšení konstrukce formy.

e) Verifikace výpočtového modelu

Pro zajištění věrohodnosti výpočtového modelu bude využito experimentálního modelování. Cílem prováděných experimentů je verifikace výpočtových modelů.

2.4 SYSTÉM PODSTATNÝCH VELIČIN

Jak již z nadpisu vyplývá, tato část práce se zabývá určením množiny podstatných veličin vzhledem k řešenému problému. Jelikož je práce věnována pevnostní analýze pevného rámu formy, bude vyšetřovaným objektem pevná část licí formy, nikoliv celá licí forma či stroj. Pro úplné a přehledné popsání parametrů ovlivňujících řešení problému bude systém podstatných veličin rozložen do 9 podmnožin, díky kterým si určíme podstatné veličiny a zvolíme tak úroveň modelování. Dále bude věnován odstavec stochastičnosti a dynamičnosti objektu.

2.4.1 Podmnožina S0 – Okolí objektu

Okolí licí formy se dá rozdělit na vnější, vnitřní a chladicí systém.

Vnější okolím označujeme konstrukci licího stroje, ve které je forma upevněna. Deformace licího stroje je vzhledem ke své robustní konstrukci z hlediska tuhosti nepodstatná. Konstrukci považujeme tedy za dokonale tuhou. Dalším vnějším okolím bychom mohli označit vzduch obklopující formu. Licí stroj je ustaven v areálu slévárny Škoda Auto, tedy ve výrobní hale. Z tohoto důvodu můžeme počítat, že v hale je přibližně konstantní teplota, která se samozřejmě v průběhu změny ročního období mírně mění.

Vnitřním okolím formy označujeme taveninu působící na vnitřní (tvarovou) část formy. K vnitřnímu okolí bychom také mohli přiřadit chladicí systém formy, který zajišťuje hlavní odvod tepelné energie.

2.4.2 Podmnožina S1 – Geometrie a topologie objektu

Nejdůležitějším parametrem ovlivňující geometrii licí formy je velikost odlitku. V našem případě se jedná o formu pro blok motoru, tedy vnitřní geometrické vlastnosti

jsou pevně dány rozměry odlitku a nelze je nijak měnit. Z finančních důvodů je cílem navrhnout vnější rozměry formy co nejmenší, forma však musí splňovat všechny předpoklady nutné pro danou funkci. Vnější rozměry formy jsou omezeny pouze velikostí licího stroje.

2.4.3 Podmnožina S2 – Vazby mezi objektem, okolím a jednotlivými částmi

Licí forma se obecně skládá ze dvou částí, a to pevné a pohyblivé. Pevná část formy je pevně uchycena do pevného třmene (desky) licího stroje a stejně tak pohyblivá část je pevně připevněna k pohyblivému třmeni. Pevná a pohyblivá část formy jsou v průběhu licího procesu spojeny uzavírací silou vyvolanou kloubovým mechanismem licího stroje. Při uzavření formy dochází k tzv. nalisování zámků, jedná se tedy o uložení s přesahem.

2.4.4 Podmnožina S3 – Aktivace objektu

K aktivaci formy dochází ve dvou hlavních fázích. První fází je uzavření formy, kde, jak je již popsáno v kapitole 2.4.3, dojde k pevnému spojení pevné a pohyblivé části formy. Druhou fází aktivace objektu je přivedení taveniny do dutiny formy, která pak následně pod vysokým tlakem chladne.

2.4.5 Podmnožina S4 – Ovlivnění objektu okolím

Vnitřní okolí formy (tavenina) na formu působí hned několika druhy namáhání. Na naší rozlišovací úrovni a pro potřeby našeho zkoumání budeme brát v úvahu pouze tlak taveniny a tepelnou energii, kterou má forma za úkol odvést.

Odvod tepelné energie je zajištěn dvěma způsoby. Okolním vzduchem, který přímo působí na vnější povrch formy a vnitřním chladícím systémem. Jelikož však není zajištěna cirkulace vzduchu v blízkém okolí formy, bude vzduch v okolí formy rychle ohřát a odvod tepelné energie okolním vzduchem se velmi sníží. Z tohoto důvodu bereme ovlivnění okolním vzduchem za zanedbatelné.

2.4.6 Podmnožina S5 – Vlastnosti objektu

Hlavními vlastnostmi objektu jsou geometrie a materiálové charakteristiky. Dále pak schopnost zabránit prostříknutí taveniny skrz dělicí rovinu.

2.4.7 Podmnožina S6 – Procesy v objektu

Po dobu chladnutí odlitku dochází k tepelným pochodům (ochlazování). Největší zatížení formy vznikne při nejvyšší teplotě. Z tohoto důvodu je možné zanedbat fázi chladnutí a počítat pouze s nejhorším možným stavem ihned po vstříknutí taveniny do formy.

2.4.8 Podmnožina S7 – Projevy a chování objektu

Při uzavření formy dojde k deformaci kontaktních míst, hlavně tedy zámků formy, které jsou uloženy s přesahem a jsou do sebe vzájemně nalisovány. Dojde také k vytvoření kontaktního tlaku v dělicí rovině.

Hlavními projevy objektu v průběhu lícího cyklu bude deformace formy ve směru od odlitku a zvýšená napjatost zejména v rámu formy.

2.4.9 Podmnožina S8 – Důsledky projevů objektu

Důsledkem projevů objektu může být dosažení MS pružnosti, únavy a v krajním případě dokonce MS lomu.

2.4.10 Stochastičnost

V reálném světě existuje pouze mizivé procento procesů, parametrů, charakteristik, které se chovají deterministicky. Přesto bude problém řešen jako deterministický, a to zejména z důvodu neznalosti stochastického chování daných veličin. Ty parametry, u kterých je známo stochastické chování, např. materiálové charakteristiky, budou převedeny na deterministické parametry pomocí statistických metod.

2.4.11 Dynamičnost

Již několikrát byl zmíněn termín vstříknutí taveniny do dutiny formy, z čehož vyplývá, že se jedná o velmi rychlý děj. Dynamika vstříknutí kovu do formy by tedy mohla hrát svou roli. Je však pravděpodobné, že z časových důvodů bude problém řešen pouze jako statická úloha, kdy budeme vyšetřovat nejhorší možný stav.

2.5 VOLBA METODY ŘEŠENÍ

Vzhledem k charakteru úlohy bude analýza řešena pomocí výpočtového modelování. Z důvodů komplexnosti problému a složitosti geometrie jsou diferenciální metody nepoužitelné. K deformačně napětovému výpočtu tedy použijeme metodu variační, konkrétně metodu konečných prvků.

Geometrie a pre-processing budou vytvářeny v programu PTC Creo 3.0 a v modulu SpaceClaim programu ANSYS [5]. Výpočet bude realizován v systému ANSYS 19.2. K analýze bude využito prostředí Workbench. Tento software je použit zejména z důvodu velké rozšířenosti, kvality zpracování a uživatelské příjemnosti.

Pro ověření výpočtu bude použito experimentálního modelování. Experiment bude spočívat v měření přetvoření na vytipovaných kritických místech. K měření bude využito tenzometrických snímačů, a to zejména z důvodů velké rozšířenosti a jednoduchosti z hlediska plánování a provedení experimentu.

3 REŠERŠE VYSOKOTLAKÉHO ODLÉVÁNÍ

V této kapitole se nachází základní poznatky týkající se vysokotlakého odlévání, forem a jejich zatěžování. Úkolem je objasnit čtenáři problematiku a vlastnosti vysokotlakého odlévání. Čtenář bude seznámen s postupem vysokotlakého lité, s typy strojů a forem a dále s jednotlivými typy namáhání, chlazením a temperací formy. V závěru kapitoly se budeme věnovat materiálům používaným pro výrobu forem.

3.1 ODLÉVÁNÍ POD TLAKEM

Vysokotlaké odlévání neboli „high pressure die casting“ spadá do metod near net shape („na hotovo“) [6]. Odlévání pod tlakem se používá zejména u odlévání slitin kovů při sériové výrobě. Výhodou tlakového odlévání oproti gravitačnímu lité je, že tavenina není do formy dostávána vlastní vahou, nýbrž je do formy vtlačena (vstříknuta). Na vstřikovacím zářezu (vstup do dutiny formy) tavenina dosahuje rychlosti 60–70 m/s. Vysokou vtokovou rychlostí je zajištěno, že tavenina neztuhne dříve, než je požadováno. Pro dosažení lepší kvality odlitku je ihned na konci vstřikovacího procesu odlitek zatížen dodatečným tlakem až 100 MPa. I během krátké doby tuhnutí zůstává kov pod tlakem. Vysoká rychlost plnění spolu s vysokým tlakem umožňují odlévat tenkostěnné a tvarově vysoce komplikované odlitky a zároveň zachovat jemnozrnou strukturu [7] [8].

Výhody lité pod tlakem [7]:

- Možnost výroby odlitků v nízkých rozměrových tolerancích, a to často bez nutnosti obrábění
- Hladký povrch odlitků
- Dobré mechanické vlastnosti odlitků s ohledem na jemnozrnou strukturu
- Možnost výroby tenkostěnných odlitků
- Menší náklady na materiál
- V odlitcích se dají předlévat otvory i velice malých rozměrů s pouze malým dodatečným opracováním
- Možnost výroby součástek složitých tvarů
- Větší přesnost a rychlost než při odlévání do pískových forem

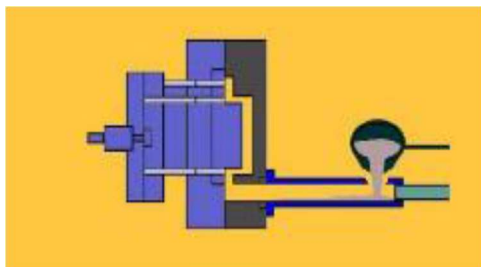
Nevýhody lité pod tlakem [7]:

- Vysoké náklady na výrobu formy
- Velké počáteční investice do strojů a zařízení
- Odlévané slitiny mají menší tažnost
- Lité pod tlakem vyžaduje velké zkušenosti na přípravu pracovního postupu

V porovnání s litem do písku či do kokil je lité pod tlakem ekonomicky výhodnější. Při odlévání pod tlakem je možno dosáhnout úspory materiálu o 10–20 % a úspory na výrobních nákladech o 15–30 %. Z důvodu vysokých pořizovacích nákladů je však tato metoda používána pouze v případě sériové výroby [7].

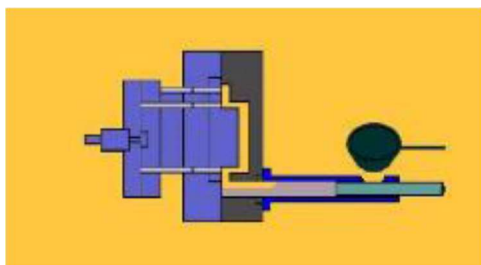
3.2 LICÍ CYKLUS

V následující kapitole bude popsán licí cyklus vysokotlakého odlévání skládající se z šesti fází [9].



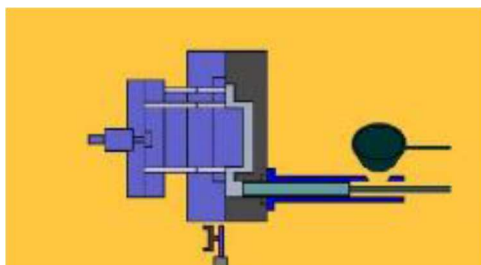
Obrázek 1: První fáze licího cyklu [9]

V první fázi licího cyklu dochází k uzavření formy, usazení jader a uzavření zámků. Tímto se vytvoří potřebná dutina pro odlitek. Zároveň dochází pomocí dávkovacího zařízení k nalití taveniny z udržovací pece do plnicí komory.



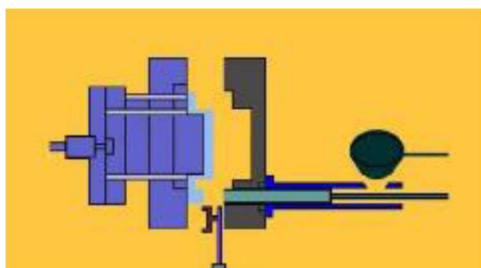
Obrázek 2: Druhá fáze licího cyklu [9]

V okamžiku, kdy lisovací píst překročí hranici nalévacího otvoru, dochází ke zvýšení rychlosti, přičemž tavenina je následně vstříknuta do dutiny formy.



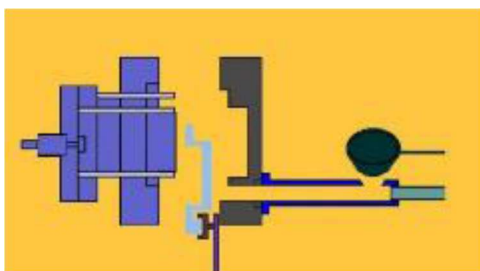
Obrázek 3: Třetí fáze licího cyklu [9]

V další části cyklu je již dutina plně vyplněna taveninou a dochází k přechodu tepelné energie z taveniny do formy. Tento tepelný přechod má za následek tuhnutí odlitku, přičemž na tuhnoucí taveninu působí po celou dobu tzv. dotlak, který nabývá hodnot až 100 MPa.



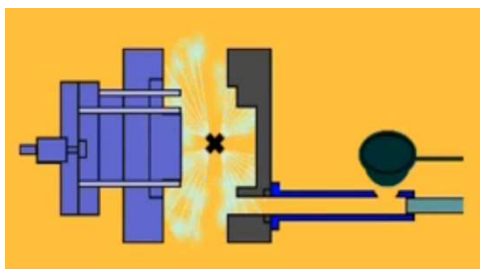
Obrázek 4: Čtvrtá fáze licího cyklu [9]

Pokračuje se odsunutím pohyblivé části formy včetně pohyblivých jader. Odlitek je i s vtokovým systémem vysunut z pevné části formy a je uchycen na pohyblivé části formy.



Obrázek 5: Pátá fáze liciho cyklu [9]

V předposlední fázi cyklu dochází k uchopení odlitku manipulačním robotem. Pomocí vyhazovacího systému uloženého v pohyblivé části formy dochází k vysunutí odlitku. Následuje kontrola odlitku a odstranění vtokového systému.



Obrázek 6: Šestá fáze liciho cyklu [9]

V poslední fázi dochází k ošetření formy a plnicího pístu separační látkou.

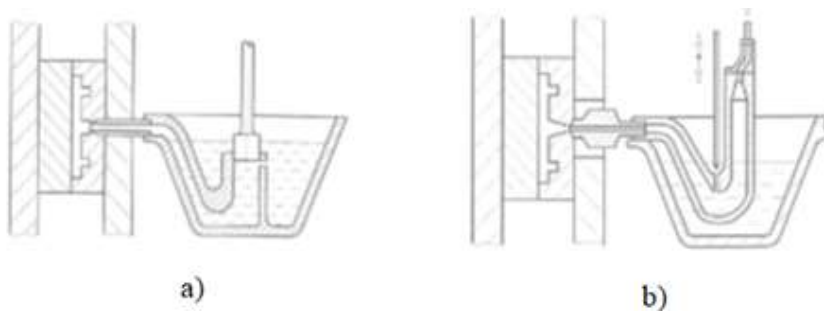
3.3 STROJE PRO VYSOKOTLAKÉ LITÍ

V průběhu vývoje strojů pro vysokotlaké odlévání byly vytvořeny spousty druhů, a to v závislosti na typu odlévaného kovu, na velikosti odlitku atd. Obecně se stroje dělí zejména dle typu dopravy taveniny do dutiny formy. Dále se mohou dělit podle způsobu vyvození a velikosti uzavírací síly, nebo mechanismu vytvoření vstřikovací síly [7].

3.3.1 Základní druhy mechanismů dopravy taveniny

a) Stroje s teplou komorou

Základním znakem strojů s teplou komorou je, že udržovací pec je součástí stroje a plnicí komora je tedy v trvalém styku s taveninou. Tento typ se používá zejména pro odlévání slitin s nízkou teplotou tání (cín, olovo, zinek, případně hořčík). Stroje s teplou komorou se dále dělí podle principu dopravy taveniny do formy, a to na lisování kovu pístem nebo vzduchem, viz obrázek 7 [7].

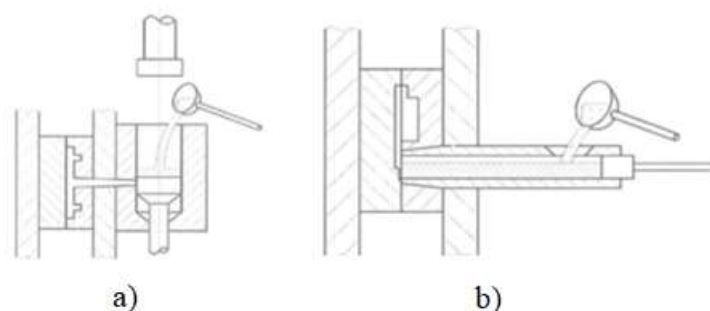


Obrázek 7: Lisovací zařízení s teplou komorou [6]

a) tavenina je lisována pístem, b) tavenina je lisována vzduchem

b) Stroje se studenou komorou

Tento druh se vyznačuje tím, že na rozdíl od strojů s teplou komorou, udržovací pec není součástí stroje. Kov se tedy dopravuje do komory lžící nebo přidavným plnicím zařízením. Stroje se studenou komorou taktéž můžeme rozdělit dle uložení lisovacího zařízení do dvou základních skupin, a to na stroje s vertikálním či s horizontálním lisovacím zařízením, viz obrázek 8 [7].



Obrázek 8: Lisovací zařízení se studenou komorou [7]
a) s vertikální komorou, b) s horizontální komorou

3.3.2 Uzavírací systémy

Pro správný provoz licího stroje je dostatečné uzavření formy nezbytnou součástí. V případě nedokonalého uzavření může dojít k nedodržení geometrických tolerancí a v nejhorším případě k prostříknutí dělicí roviny taveninou. Danému problému se dá předejít použitím jednoho ze dvou základních druhů uzavíracích mechanismů [10]:

a) Hydraulické

„U hydraulických mechanismů je uzavírací síla dána tlakem kapaliny působící na plochu uzavíracího pístu“. Výhodou tohoto mechanismu je regulace uzavírací síly. Za hlavní nevýhodu se považuje nižší tuhost uzavření, a to zejména z důvodů stlačitelnosti kapaliny [10].

b) Tuhé uzavírací mechanismy

U tuhých mechanismů je uzavírací síla vyvolána poměrně malou vnější silou, která je dále přes určitý druh mechanismu zvětšena na maximální sílu, viz obrázek 9. Nejčastěji je využit kloubový mechanismus, dále se používají klínové nebo pákové mechanismy [10].

3.3.3 Vstřikovací mechanismy

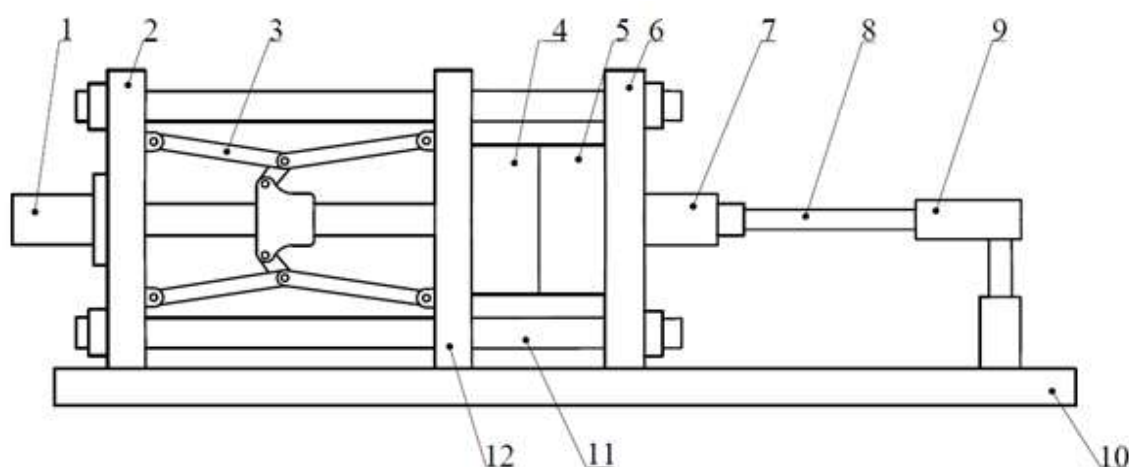
Vstřikovací nebo také lisovací mechanismus je druhou hlavní částí stroje, jehož hlavním úkolem je dopravit taveninu do dutiny formy. Pro správné plnění formy je důležité dodržet požadovaný tlak a rychlost plnění. Dalším důležitým úkolem vstřikovacího mechanismu je vytvořit dotlak na odlitek v průběhu fáze tuhnutí [10].

Vstřikovací mechanismy se dají rozdělit do dvou základních skupin [10]:

- Vstřikovací mechanismy s plynulou regulací rychlosti vstřikovacího pístu a stupňovitou změnou vstřikovací síly
- Vstřikovací mechanismy s plynulou regulací rychlosti vstřikovacího pístu a plynulou změnou vstřikovací síly

3.4 SCHEMATICKÉ ZNÁZORNĚNÍ LICÍHO STROJE

V této části bude rozebrána konstrukce licích strojů používaných ve slévárně Š. A., kde se používají výhradně stroje se studenou horizontální komorou s kloubovým uzavíracím mechanismem, s plynulou regulací rychlosti vstřikovacího pístu a plynulou změnou vstřikovací síly od výrobců Idra, Frech, Italpresse, Müller-Weingarten a Bühler [11].



Obrázek 9: Schematické znázornění licího stroje [6]

1 – Pohyblivý člen s hydraulickým čerpadlem, 2 – Zadní třmen, 3 – Uzavírací mechanismus, 4 – Pohyblivá část formy, 5 – Pevná část formy, 6 – Pevný třměn, 7 – Plnicí komora, 8 – Lisovací píst, 9 – Lisovací mechanismus, 10 – Rám, 11 – Vodící sloup, 12 – Pohyblivý třměn

K uzavření pevné a pohyblivé části formy (4, 5), dochází pomocí uzavíracího mechanismu (3), který je ovládán hydraulickým čerpadlem (1). Ve chvíli, kdy je forma uzavřena, dochází k naplnění lisovací komory (8) taveninou, která je následně vstříknuta skrz plnicí komoru (7) do dutiny formy.

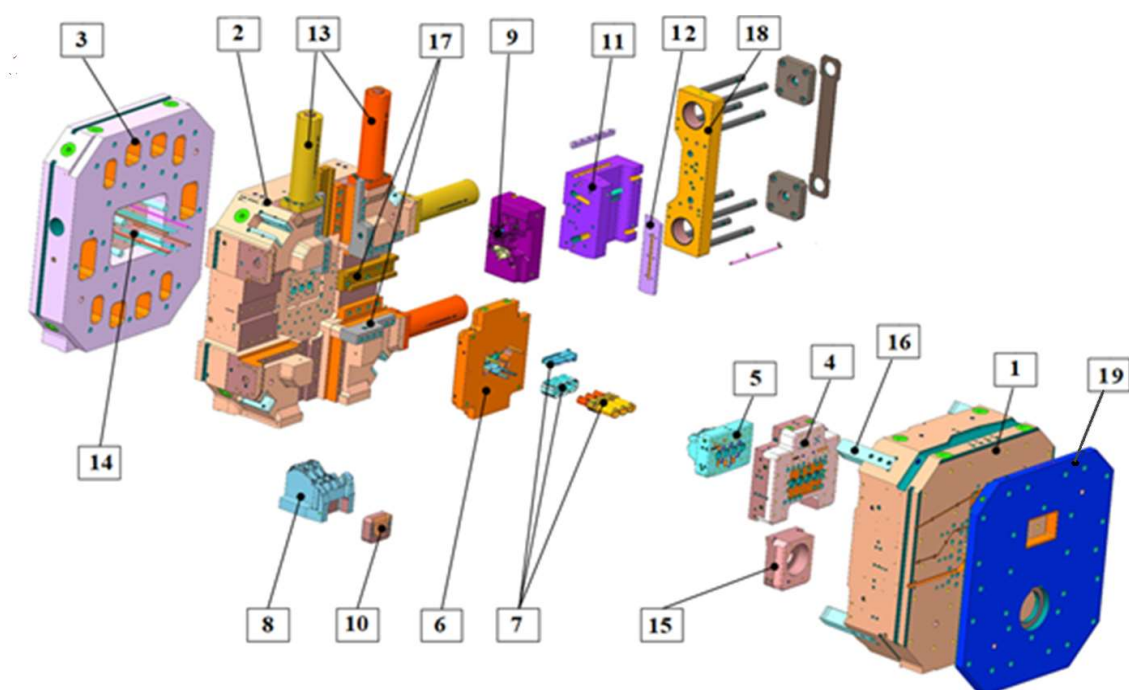
3.5 FORMY PRO VYSOKOTLAKÉ ODLÉVÁNÍ

Slévárenská forma je pracovní nástroj vyrobený ze žáruvzdorného materiálu, ve kterém je dutina odpovídající tvarem opaku (negativu) budoucího odlitku. Přivedením taveniny do dutiny, následným zhutněním a ochlazením získáme odlitek. Pro vysokotlaké odlévání se používají výhradně formy trvalé. Do těchto forem se odlévají slitiny s mnohem nižší teplotou tání, než je materiál formy. V případě společnosti Škoda Auto jsou odlévány součásti pouze z hliníkových slitin [7].

3.5.1 Hlavní části formy

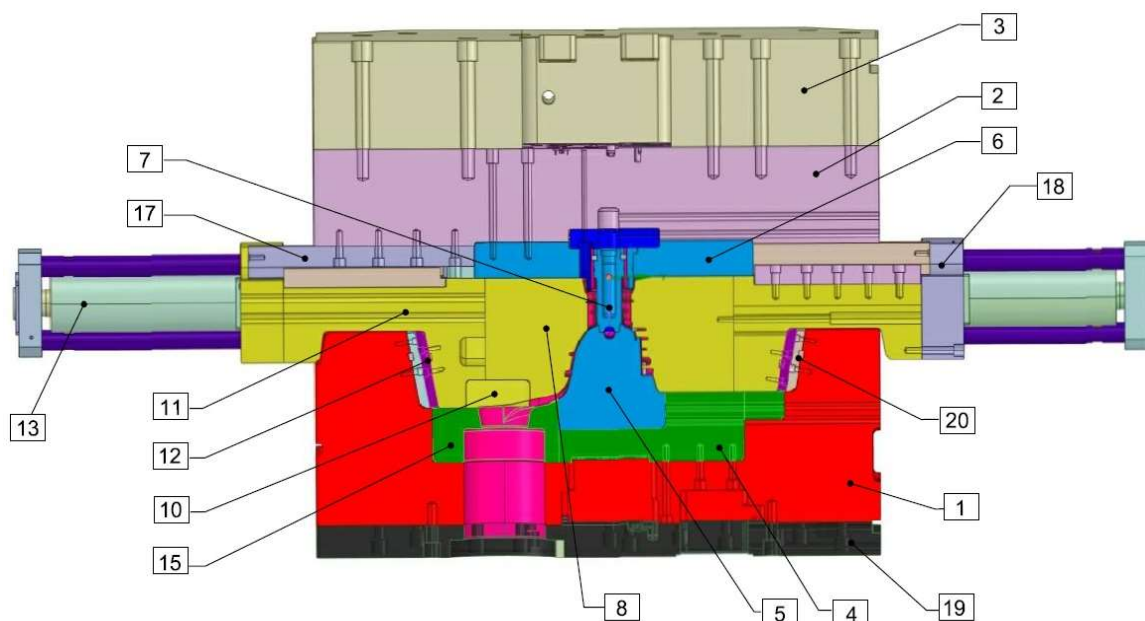
Analyzovaná forma sloužící k odlévání bloků motorů Š. A., je velmi komplikovaný a složitý nástroj skládající se z 19 základních dílů, viz obrázek 10.

Formy pro vysokotlaké lití se nejčastěji skládají ze dvou částí, a to z pevné a pohyblivé. Pro složitější součásti se používají odtahovaná jádra, která jsou součástí pohyblivé části formy a spoluutvářejí dutinu formy. Konstrukce formy je zpravidla také opatřena hydraulickou technikou zajišťující odtahování a uzavírání již zmíněných pohyblivých jader. Z důvodu zvýšení živostnosti se pro více exponované části ve všech formách Š. A. využívá tzv. vložkování, které v případě poškození určité části formy zajišťuje jednoduchou výměnu. Dále je forma tvořena tvarovými prvky zajišťující výsledný tvar odlitku [3] [12].



Obrázek 10: Konstrukce analyzované lící formy [11]

1 – Pevný rám, 2 – Pohyblivý rám, 3 – Stolička, 4 – Pevná vložka, 5 – Karter, 6 – Pohyblivá vložka, 7 – Vložky pohyblivého dílu, 8 – Odtahované jádro, 9 – Vložené jádro, 10 – Vtoková deska, 11 – Vedení odtahovaného jádra, 12 – Úkosový zámek pohyblivé formy, 13 – Hydraulické válce odtahovaných jader, 14 – Vyhazovací systém, 15 – Vložka komory, 16 – Vodící kolíky, 17 – Vodící lišty odtahovaných jader, 18 – Vodící deska odtahovaného jádra, 19 – Podložná deska



Obrázek 11: Řez uzavřenou formou

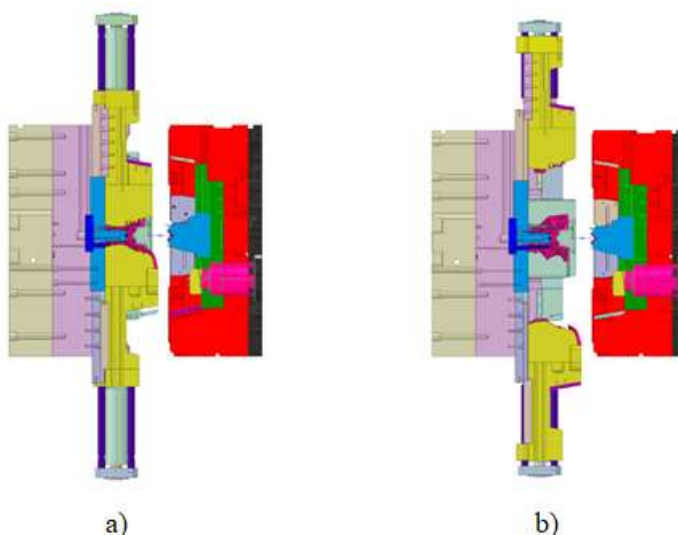
1 – Pevný rám, 2 – Pohyblivý rám, 3 – Stolička, 4 – Pevná vložka, 5 – Karter, 6 – Pohyblivá vložka, 7 – Vložky pohyblivého dílu, 8 – Odtahované jádro, 10 – Vtoková deska, 11 – Vedení odtahovaného jádra, 12 – Úkosový zámek pohyblivé formy, 13 – Hydraulické válce odtahovaných jader, 15 – Vložka komory, 17 – Vodící lišty odtahovaných jader, 18 – Vodící deska odtahovaného jádra, 19 – Podložná deska, 20 – Úkosový zámek pevné formy

Pevná část formy je zpravidla tvořena rámem (1), tvarovými vložkami a vyplňovacími vložkami (4, 6), které tvoří dělicí rovinu. Další částí pevné formy je vložka karter (5), který společně s jádry pohyblivé části (7) udává vnitřní tvar odlitku. Tavenina vtéká do formy skrz pevnou část licího stroje a podložnou desku (19), dále pokračuje skrz vložku komory (15) a vtokovou desku (10) až do dutiny formy.

Pohyblivá část formy je oproti pevné části doplněna o pohyblivé členy, např. odtahovaná jádra neboli šupáky (8, 9), které z velké části udávají tvar odlitku, stoličku (3) obsahující vyhazovací systém (14) a ovládací systém odtahovaných jader (13, 18). Konstrukce je koncipována tak, aby odlitek po otevření formy zůstal v této části formy [3].

V řezu formou na obrázku 11 můžeme vidět plné uzavření formy, přičemž růžovou barvou je označena vtoková soustava a dutina formy. Řez je veden rovinou symetrie, která bude rovněž využita v modelu geometrie. Forma je osazena čtyřmi odtahovanými jádry (8), a to horním, spodním a spojčovým, které je v pozadí za karterem. Čtvrtým odtahovaným jádrem je tzv. čelové jádro, které je v druhé polovině roviny symetrie a nebude se tedy v modelu geometrie vůbec vyskytovat.

Při otvírání formy se nejdříve oddělí pohyblivá část od pevné, viz obrázek 12 a), kdy odlitek zůstane v pohyblivé části. Dále jsou odtaženy pohyblivá jádra a odlitek je odejmut, viz obrázek 12 b). Důležitým poznatkem je, že forma je uložena **vertikálně**. Forma je připevněna pomocí podložné desky k pevnému třmeni stroje a reálně je tedy forma pootočená o 90° v protisměru hodinových ručiček, viz obrázek 12.



Obrázek 12: Otevření formy
a) oddělení pevné části od pohyblivé, b) odtažení pohyblivých jader

3.5.2 Namáhání forem

V průběhu licího cyklu je forma namáhána různými vlivy, přičemž největší význam se přikládá namáhání mechanickému, tepelnému a chemickému. Tato tři základní namáhání budou dále podrobněji rozebírána.

a) Mechanické namáhání

Mechanické namáhání lze rozdělit na namáhání tvarových a netvarových částí.

Tvarové části formy jsou zatíženy zejména brzděným smršťováním odlitku v dutině, kdy ochlazující se odlitek tuhne (smršťuje se) a je přidržován tvarovými částmi. Při vyhazování odlitků z formy dochází k přidržování odlitku na formě a tím dochází k namáhání formy na otěr.

Netvarové části formy (rámy, stolička, zámkové plochy atd.) jsou především namáhány silou uzavírací a silou od tlaku kovu, přičemž hrozí dosažení mezního stavu pružnosti, únavy a může dojít i k poruše soudržnosti [7].

b) Tepelné namáhání

Tepelné namáhání je jedním ze zásadních problémů. Při návrhu forem je nutné zohlednit, že v průběhu odlévání dochází k ohřívání a následnému ochlazování formy, přičemž teplotní rozdíl tvarových částí může být 200–300 °C. Avšak díky dobrému chlazení jsou ve většině částí formy změny pozvolné a relativně malé. Přesto díky tepelné dilataci dochází k deformačnímu zatížení, a to zejména pevných částí formy.

Teplotní zatížení rovněž snižuje mechanické vlastnosti formy, jelikož vysoká teplota společně s působícím zatížením má za následek degradaci materiálů [7].

c) Chemické namáhání

Vlivem chemické agresivity slitin hliníku dochází na povrchu forem k opotřebení.

Největší chemické opotřebení je způsobeno tzv. nalepováním. Jedná se o nalepování slitiny hliníku na kovovou formu vytvořením intermediální fáze formy s taveninou. Tento jev nepříznivě ovlivňuje povrch formy, tím pádem i odlitku. Vzniká zejména tam, kde je vysoká rychlost vlévání taveniny a zároveň vysoká lící teplota.

Ke snížení chemického opotřebení tlakové lící formy se na formu nanáší povrchové vrstvy k vytvoření bariéry mezi hliníkem a oceli, které spolu jinak intenzivně reagují. Zároveň dochází k zvýšení tvrdosti povrchu, mazání, chlazení a temperace formy [7].

3.5.3 Chlazení a temperace formy

Jak již bylo zmíněno, ke správné funkci formy a zaručení co nejdelší životnosti, je zapotřebí zajistit co nejlepší odvod tepelné energie, čehož se dosáhne pomocí chlazení a temperace formy.

Chlazení probíhá soustavou vyvrtaných kanálků, kterými proudí tekutina (voda, olej, vzduch) o mnohem nižší teplotě, než je teplota formy v okolí odlitku. Během lícího cyklu lze regulovat interval chlazení, popřípadě teplotu média. Počet chladících kanálků a jejich rozmístění je dimenzováno dle tepelné bilance tak, aby byl odvod co nejefektivnější a teplotní pole co nejrovnoměrnější.

V případě přerušení lícího cyklu dochází k ochlazení formy na okolní teplotu přibližně 25–30 °C. Pokud by byl cyklus náhle obnoven a bezprostředně by bylo zahájeno odlévání, nastaly by skokové teplotní rozdíly mezi jednotlivými částmi formy, což může dále vést k nenávratnému poškození. Velkým teplotním šokům se předchází předehřátím formy na určitou teplotu před započítím výroby. Jedná se o tzv. temperaci formy [13].

Ve společnosti Škoda Auto se jako chladící médium používá demineralizovaná voda a olej. Pro zajištění rovnoměrného teplotního pole se reguluje vstupní teplota a interval chlazení pro určité díly dle potřeby [11].

Pro odtahovaná jádra, vložky, karter a rámy [11]:

- Teplota média: 80–160 °C
- Tlak média: 0,5–1 MPa

Pro jádra, vtokovou desku a méně rozměrné vložky [11]:

- Teplota média: 20–70 °C
- Tlak média: 0,5 MPa

3.5.4 Materiály forem

V závislosti na typu primárního zatížení se používá pro každou skupinu dílů odlišný druh materiálu, čímž se dosáhne nejlepší kombinace požadovaných vlastností formy. Jedním z hlavních požadavků na materiály je teplotní stálost, což znamená že materiál nesmí skokově měnit své vlastnosti se zvyšující se teplotou. Je však zároveň nutné, aby materiál odolával vysokým pevnostním, chemickým a tepelným zatížením a zároveň byl odolný proti opotřebení.

Pro nejvíce namáhané součásti, které jsou přímo ve styku s taveninou, se používají nástrojové chromové oceli, které se vyznačují vysokou pevností, tvrdostí a odolností proti opotřebení, a to i za vysokých teplot. Pro snížení namáhání vysoce exponovaných součástí se používají nanopovlaky (např. nitridu titanu, karbonitrid titanu aj.) [14]. Nanosením povlaku na povrch součásti dojde k vytvoření bariéry mezi hliníkovou slitinou a kovovou formou. Tímto se docílí snížení koeficientu tření, zlepšení tribologických vlastností, zvýšení odolnosti proti tepelné únavě a snížení chemického působení slitiny hliníku na materiál formy. Rovněž dochází ke snížení spotřeby mazadel a separačních látek, což snižuje finanční nároky na údržbu [13].

W.Nr	ČSN	Tepelné zpracování	Díl
1.2343	19 552	Mez pevnosti 1375 +- 50 MPa	Pevná a pohyblivá vložka
			Vložka karteru
			Jádra
			Tvarové vložky
			Sondy chlazení
			Razník a vložka komory
			Odtahovaná jádra, vtokové desky
			Zámek pevný a pohyblivý
1.8159	15 260	Mez pevnosti 900 + 150 MPa	Rám formy
1.2311 1.2312	19 520	Mez pevnosti 900 + 150 MPa	Stolička, podložná deska
1.7131	14 220	Cementováno do hl. 0,6 mm Kaleno 57-60 HRC	Vedení odtahovaných jader
	16 220		Zámkové vložky vyplňovací
			Licovací kolík a lic. destičky
1.057	11 523	Bez tepelného zpracování	Pěra pohyblivých jader
			Středící čepy
			Chlazení komory
			Rozvodné kostky
			Desky, příruby tahače

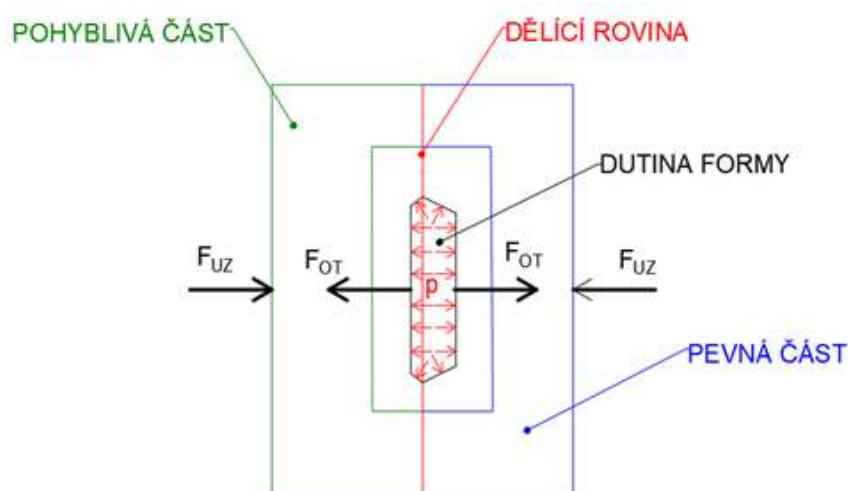
Tabulka 1: Materiály používané k výrobě forem ve Š. A. [11]

3.6 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY LICÍHO STROJE

Hlavními charakteristikami stroje jsou uzavírací síla a lisovací tlak. Dalšími charakteristikami jsou např. velikost, vstřikovací tlak, druh uzavírání formy aj., které jsou přímo závislé na velikosti a složitosti odlitku.

3.6.1 Uzavírací síla

Bezprostředně po vstříknutí roztaveného kovu do dutiny formy začne na taveninu působit dotlak o velikosti 100 MPa. V důsledku působení tlaku na dutinu vzniká síla ve směru kolmém na dělicí rovinu, jež má tendenci oddělit pevnou a pohyblivou část formy, viz obrázek 13, na kterém je zobrazen řez formou.



Obrázek 13: Silové poměry při vstříknutí taveniny do dutiny

Další silou přispívající k otevření formy je síla přenášená přes pohyblivá jádra. Tlak kovu působící na pohyblivá jádra vytváří sílu F_J , která je přenášena přes úkosové zámky na pevný rám formy. Jelikož jsou zámky vůči sobě usazeny pod úhlem 10° , přispívá síla F_{JY} k otevření formy, viz obrázek 14.

Celkovou sílu působící ve směru otevření formy nazýváme otevírací síla F_{OT} , a vypočte se pomocí vztahu (4). Z podstaty funkce je jasné, že k otevření formy nesmí dojít, aby se tak nestalo, je ve formách vytvářeno předpětí. Síla lisovacího stroje udávající velikost předepnutí formy se nazývá uzavírací síla F_{uz} a spočte se dle vztahu (5). Z důvodu tepelných dilatací vzpěrných sloupů a tření mezi jednotlivými součástmi může dojít k poklesu uzavírací síly. K zajištění formy proti otevření je použita uzavírací síla vyvolaná kloubovým mechanismem, která je o 5–10 % vyšší než síla otevírací [7].

$$F_{JD,JS,JH,JČ} = p \cdot S_{JD,JS,JH,JČ} \quad (1)$$

$$F_{YJD,YJS,YJH,YJČ} = \tan(10^\circ) \cdot F_{JD,JS,JH,JČ} \quad (2)$$

$$F_{DR} = p \cdot S_{DR} \quad (3)$$

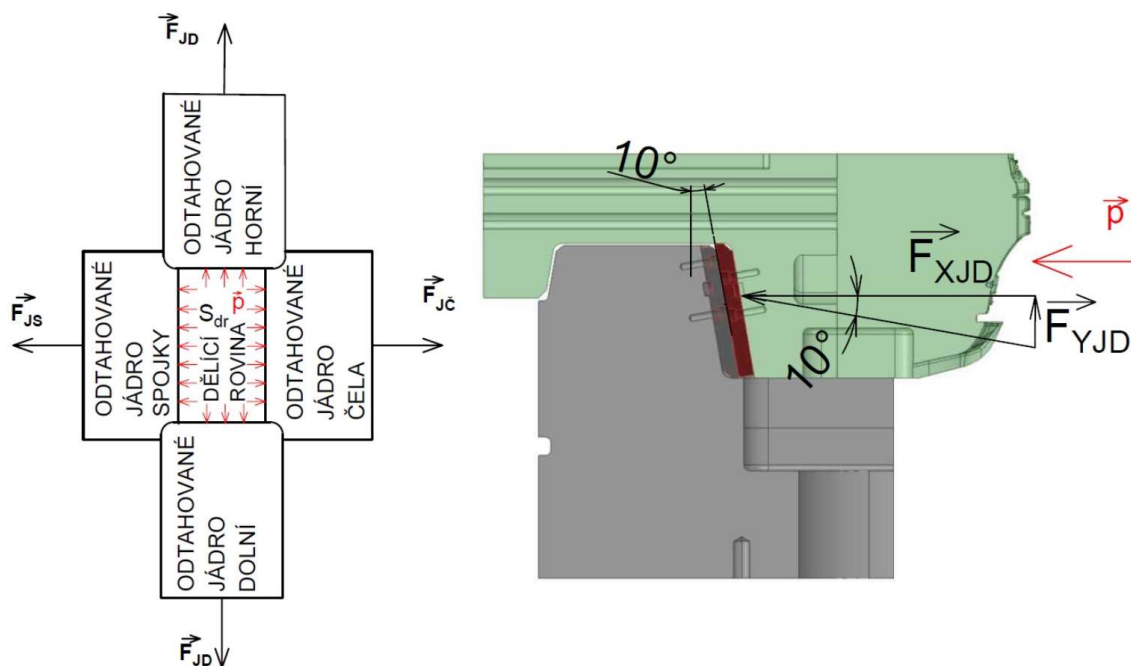
$$F_{OT} = F_{DR} + F_{YJD} + F_{YJS} + F_{YJH} + F_{YJČ} \quad (4)$$

$$F_{UZ} = F_{OT} \cdot (1,05 - 1,1) \quad (5)$$

$p = 100 \text{ MPa}$ – specifický tlak = maximální tlak v dutině formy

S_{DR} – plocha dělicí roviny

$S_{JD}, JS, JH, JČ$ – plochy odtahovaných jader, které jsou ve styku s taveninou



Obrázek 14: Vznik přídavné otevírací síly od pohyblivých jader

a) síly způsobené tlakem taveniny, b) znázornění přenosu sil přes úkosové zámky

	Plocha [mm ²]	Síla působící na jádro [kN]	Otevírací síla [kN]
Horní jádro	76953	7695	1357
Spodní jádro	96953	9695	1710
Spojkové jádro	72548	7255	1279
Čelní jádro	59504	5950	1049
Dělicí rovina	138574	13857	13857
Celková otevírací síla			19252

Tabulka 2: Otevírací síla

Z technického listu liciho stroje byla zjištěna předepsaná uzavírací síla $F_{UZ} = 21000 \text{ kN}$. Jelikož je využita symetrie součásti, bude použita síla o polovinu nižší, tedy $F_{UZ} = 10500 \text{ kN}$ a otevírací silou $F_{OT} = 9626 \text{ kN}$ [11].

3.6.2 Lisovací tlak

Lisovací mechanismus má za úkol dopravit taveninu co nejrychleji z udržovací pece do dutiny formy.

Existují různé druhy regulace [8] [10]:

- Regulace s konstantní lisovací silou
- Stupňovitá regulace síly, přičemž v průběhu pracovního zdvihu lisovacího pístu je síla konstantní
- Stupňovitá regulace síly, kdy se zvýšený stupeň zapíná automaticky v průběhu pohybu lisovacího pístu
- Plynulá regulace síly, kdy se zvýšený stupeň zapíná a mění v průběhu pohybu lisovacího pístu

Ve slévárně Š. A. se používá lisovací mechanismus s plynulou regulací síly. Lisovací cyklus se dělí na tři fáze [11]:

1. fáze – Předplnění plnicí komory

V této fázi dochází k nalévání taveniny do plnicí komory. Po naplnění komory taveninou nastane pohyb lisovacího pístu. V této fázi není plnicí otvor ještě zcela uzavřen a píst se pohybuje pomalou rychlostí okolo 0,2 m/s.

2. fáze – Plnění dutiny formy taveninou

V okamžiku, kdy tavenina dosáhne zaústění vtokového kanálu do odlitku nazývaného „naříznutí“, nastává zalévání dutiny formy taveninou. V této fázi nastává prudké navýšení rychlosti, kdy rychlost taveniny v oblasti zářezu, tedy v nejužším místě formy dosahuje 5–5,5 m/s.

3. fáze – Dotlak

V dutině formy po zaplnění zároveň dochází k obrovskému navýšení tlaku až na hodnotu 100 MPa. Jedná se o tzv. dotlak, který je důležitý z hlediska smršťování odlitků, atermického podchlazení a jemnozrné struktury odlitku. Výzkum ukázal, že tlak vyšší než 100 MPa již není efektivní.

3.7 VÝPOČTY V OBLASTI TLAKOVÉHO LITÍ

V oddělení výroby metalurgického nářadí, kde se provádí i vývoj a konstrukce tlakových licích forem se pro výpočty komponent využívají následující metody.

Výpočty tepelných a napěťových bilancí pro část odlévání, tuhnutí a chladnutí odlitku se provádějí metodou MKP pomocí programu MECAS ESI. Části stroje a formy pro tlakové lití jsou velice komplikované a značně namáhané strojní zařízení, proto není možné uskutečnit výpočet celé soustavy. Pro základní odhad charakteru deformace a napětí jsou použity analytické vztahy uvedené v normě ČSN 22 8603 (PCSN 81-82) [15], viz následující kapitoly 3.7.1–3.7.3. Bohužel, z důvodu složitosti a komplexnosti formy, není možno všechny části vypočítat pomocí analytických vzorců, tudíž se v těchto případech přechází ke zjednodušeným MKP výpočtům. Jak již bylo zmíněno, prováděné výpočty slouží pouze

k prvotním odhadům a při navrhování formy a dalších součástí stále velmi záleží na zkušenostech a praxi odborníků, kteří danou komponentu navrhují.

3.7.1 Výpočet tlaku v dělicí rovině

Úkolem výpočtu je zjistit, zda tlak v dělicí rovině není větší než dovolená hodnota a nedojde tak vlivem provozu k jejímu otlačování, což by mohlo mimo jiné způsobit také prostříknutí tekutého kovu mimo formu.

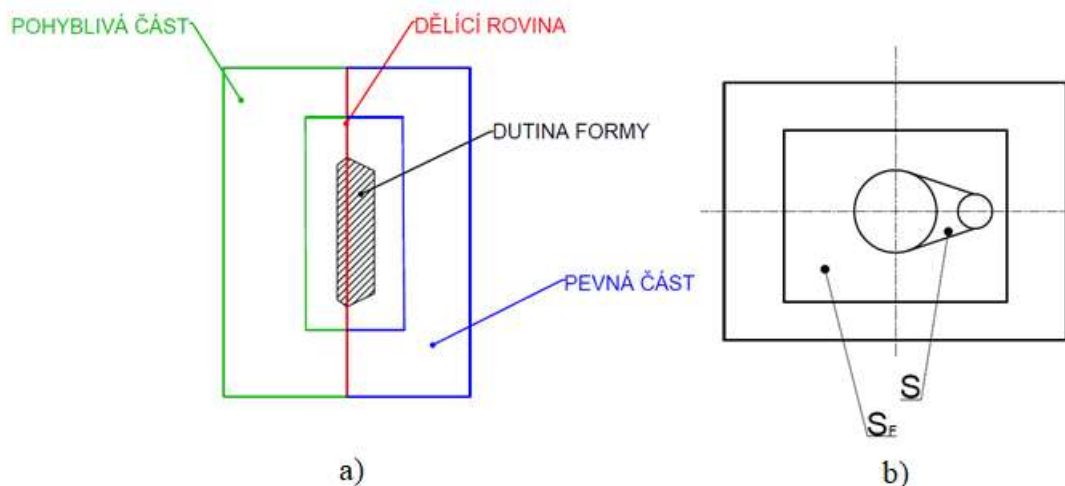
$$\sigma_{tl1} = \frac{F_{UZ}}{S_{DR}} \quad (6)$$

Musí platit podmínka $\sigma_{tl1} < 50 \text{ MPa}$

σ_{tl1} – tlak v dělicí rovině formy při zatížení pouze uzavírací silou

S_{DR} – plocha dělicí roviny

F_{UZ} – uzavírací síla, viz rovnice (5)



Obrázek 15: Dělicí rovina
a) řez formou, b) pohled shora na dělicí rovinu

3.7.2 Výpočet napětí v pohyblivém rámu formy

Druhý definovaný výpočet definovaný ve výše zmíněné normě se používá k jednoduchému odhadu napětí v pohyblivém rámu formy. V rámu jsou uloženy tvarovací části formy, které přenášejí provozní zatížení. Zatížení rámu silou vznikající při plnění tvarovací dutiny tekutým kovem je uvažováno jako konstantní spojitě zatížení.

Výpočet je dále zjednodušen těmito předpoklady:

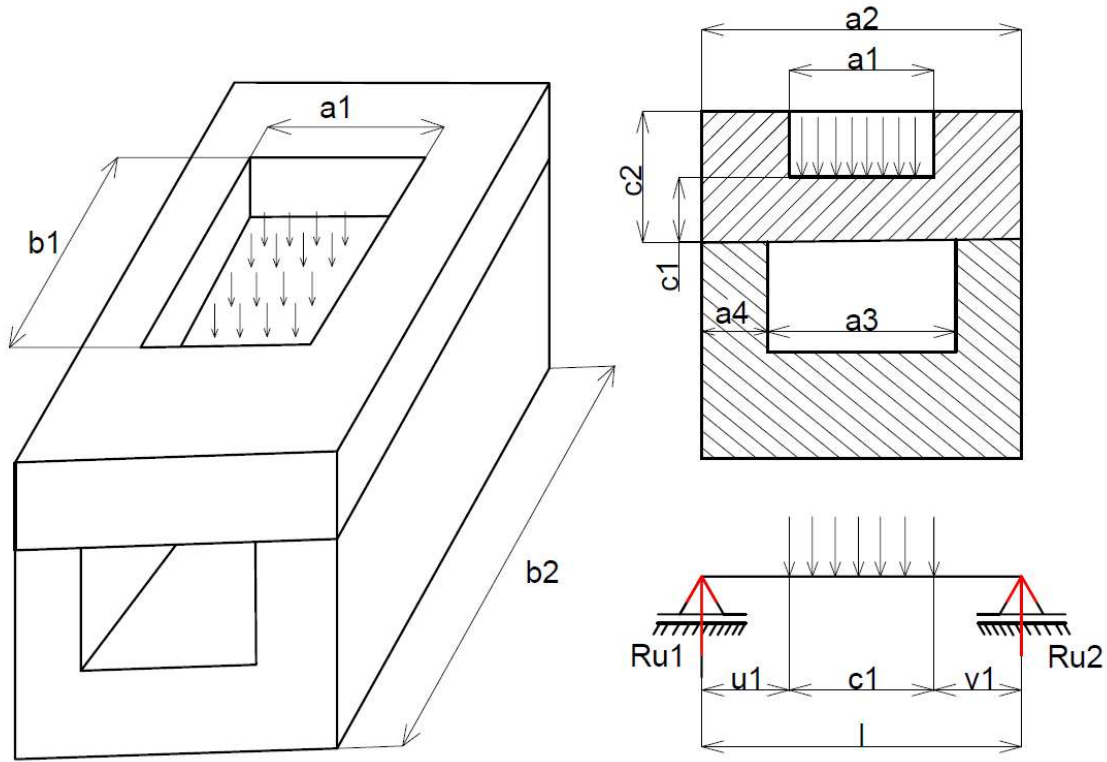
- Rám je považován za prostý podepřený nosník
- Uvažovaná napětí jsou v mezích Hookova zákona
- Nejsou uvažovány teplotní vlivy
- Zatížení je uvažováno jako statické

$$R_{u1} = \frac{F_{UZ}}{l} \left(v_1 + \frac{a_1}{2} \right) \quad (7)$$

$$R_{u2} = \frac{F_{UZ}}{l} \left(u_1 + \frac{a_1}{2} \right) \quad (8)$$

$$T = R_u - q \cdot (x - u) \quad \text{kde } u_1 \leq x \leq u_1 + a_1 \quad (9)$$

$$M = R_u \cdot x - \frac{1}{2} \cdot q \cdot (x - u)^2 \quad \text{kde } u_1 \leq x \leq u_1 + a_1 \quad (10)$$



Obrázek 16: Schematické znázornění pohyblivého rámu pro analytický výpočet [7]

Dále je proveden výpočet plošného momentu setrvačnosti průřezu k neutrální ose, kdy se celá součást rozdělí na geometricky jednoduché útvary, které se následně posunou pomocí Steinerovy věty a sečtou.

Z výše uvedených vztahů již můžeme dosadit do vzorce pro napětí a následně určit redukované napětí v rámu formy.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{o\ max}}{W_o} \quad (11)$$

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot e^2}{2} \quad (12)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (13)$$

Redukované napětí se dále může porovnat s hodnotou meze kluzu a zjistit tak, zda se pohybujeme v oblasti elastické nebo plastické deformace [15].

3.7.3 Výpočet tuhosti rámu

Cílem výpočtu je získat maximální průhyb rámu pohyblivé formy. Za předpokladu že $u_1 = v_1$, je možno uvažovat největší průhyb uprostřed rámu. Dále je určováno maximální natočení φ v místě podpory.

$$y = y_M + y_T \quad (14)$$

$$y_M = \frac{F_{UZ}}{48EI} \left[l^3 - \frac{a_1}{4} \right] \quad (15)$$

$$y_T = \frac{F_{UZ}}{4GS} \left[l - \frac{a_1}{2} \right] \quad (16)$$

$$\varphi = \frac{F_{UZ}}{48EI} \cdot (3 \cdot l^3 - a^2) + \frac{\beta \cdot F_{UZ}}{2 \cdot GS} \quad (17)$$

Vypočtené hodnoty se porovnávají s hodnotami v normě ČSN 22 8603 (PCSN 81-82) čl. 3.9. V případě, že forma nevyhoví, zvětší se tloušťka rámu nebo musí být rám formy uprostřed podepřen [15].

4 VÝPOČTOVÉ MODELOVÁNÍ

Hlavním cílem práce je analýza deformačně napětových stavů rámu formy pro různé způsoby zatěžování a následné určení kritických míst. V kapitole 2.5 byla zvolena k řešení problému metoda MKP, která je jako jediná schopná podchytit složitost geometrie, nelinearity v podobě kontaktů a zároveň je osvědčenou a uznávanou metodou pro analýzy deformačně napětových stavů. Na začátku bude krátce pojednáno o MKP a dále budou uvedeny základní parametry vstupující do výpočtů. Následující dvě podkapitoly budou věnovány analýze dvou zatěžovacích stavů, a to uzavření formy a nalisování taveniny do dutiny formy.

Metoda konečných prvků je jednou z nejpoužívanějších inženýrských metod v oblasti numerických výpočtů, a to především z důvodu své univerzality a rozšířenosti napříč spektrem oborů. MKP se řadí mezi variační metody, které vycházejí z Langrangeova variačního principu. Podstatou MKP je diskretizace spojitého problému na jednoduché tvarové prvky, jako např. čtverec, kvádr, trojúhelník, jehlan, aj., které jsou matematicky jednoduše popsitelné. Jednotlivé prvky jsou spojeny pomocí uzlů, pro které se sestavuje a následně hledá řešení rovnic. V případě deformační metody MKP jsou hledanými veličinami posuvy, resp. natočení v daných uzlech, ke kterým následně přes konstitutivní vztahy dopočítává přetvoření a napětí. Po následném vyřešení rovnic v daných uzlech jsou výsledky aproximovány pomocí báзовých funkcí na celý prvek, díky čemuž se přibližují ke spojitému řešení [16].

Ve všech strukturálních výpočtech byly použity kvadratické tetrahedrony SOLID 187 a kontaktní prvky CONTA 174. Pro termální analýzu byly použity kvadratické prvky SOLID 87.

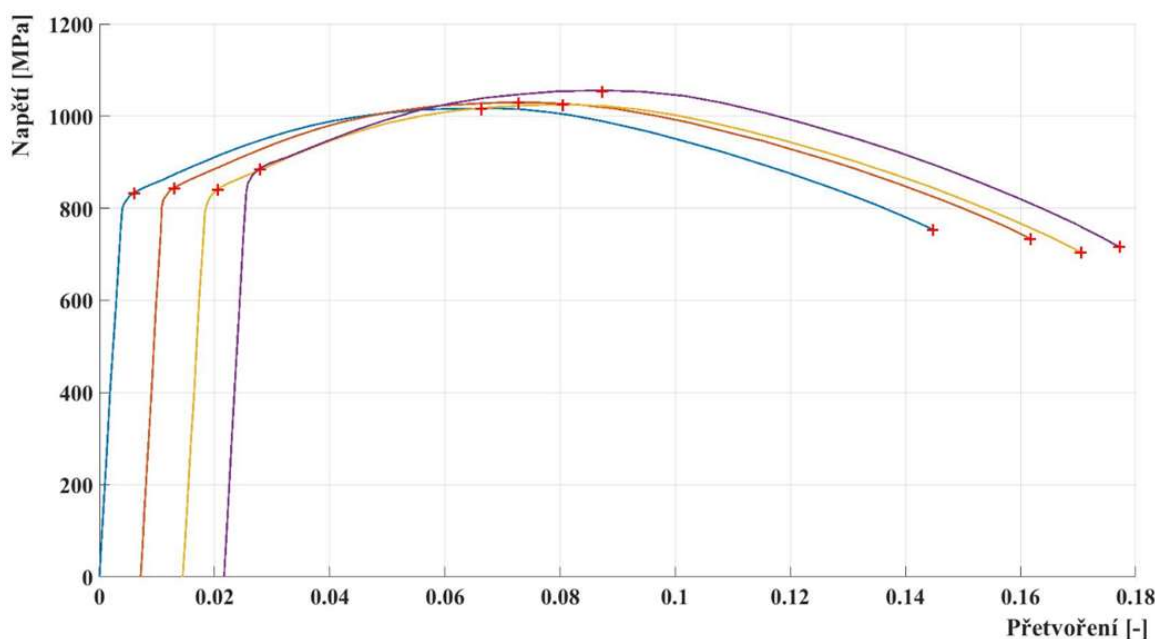
4.1 VSTUPNÍ PARAMETRY

Pro dosažení co nejpřesnějších výsledků je zapotřebí dosáhnout co možná nejlepší shody použitého modelu s realitou. Nutno je také zohlednit náročnost výpočtů a vytvořit tak jakýsi kompromis, který poskytuje spolehlivé výsledky a zároveň je časově „nenáročný“. Určení správných parametrů vstupujících do výpočtu je tudíž jednou z nejpodstatnějších částí analýzy. Těmito parametry mohou být například materiálové charakteristiky, model geometrie, zatížení aj.

4.1.1 Materiálové charakteristiky

Pro materiál 15 260, ze kterého je vyroben rám formy, byl dodán protokol o tahové zkoušce. Zkoušeny byly celkem 4 vzorky, přičemž vyhodnocovanými charakteristikami byla mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti R_m , kontrakce Z a tažnost A . Jelikož v protokolu dané tahové zkoušky nebyly uvedeny veličiny nezbytné pro výpočet, kterými jsou modul pružnosti E a poissonův poměr μ , bylo nutné rekonstruovat tahové křivky a chybějící charakteristiky z nich dopočítat.

Rekonstrukce tahových křivek byla provedena pomocí programu Plot Digitizer, přičemž práce s tímto programem je velice jednoduchá a intuitivní [17]. Nejprve se načte obrázek s danými křivkami, následně se kalibrují osy grafu a po definování hodnot na osách je nutné křivky tzv. „oklikat“. Program si na základě definice os dopočítá souřadnice bodů křivky, které následně vyexportuje do excelovské tabulky. Tímto způsobem byly vytvořeny všechny čtyři křivky uvedené v obrázku 17. Z důvodu přehlednosti obrázku jsou tahové křivky pro jednotlivé vzorky vůči sobě posunuty o určitou konstantní hodnotu přetvoření.



Obrázek 17: Tahová zkouška materiálu 15 260 s vyznačenými důležitými body

	E [GPa]	R _m [MPa]	R _{p0.2} [MPa]	A [%]	Z [%]
Vzorek č.1	212,8	1017,0	834,0	14,1	51,1
Vzorek č.2	212,9	1030,0	846,0	15,1	54,8
Vzorek č.3	200,0	1025,0	842,0	15,2	56,6
Vzorek č.4	221,0	1055,0	887,0	15,2	55,9
Průměrná hodnota	211,7	1031,8	852,3	14,9	54,6

Tabulka 3: Materiálové charakteristiky materiálu 15 260

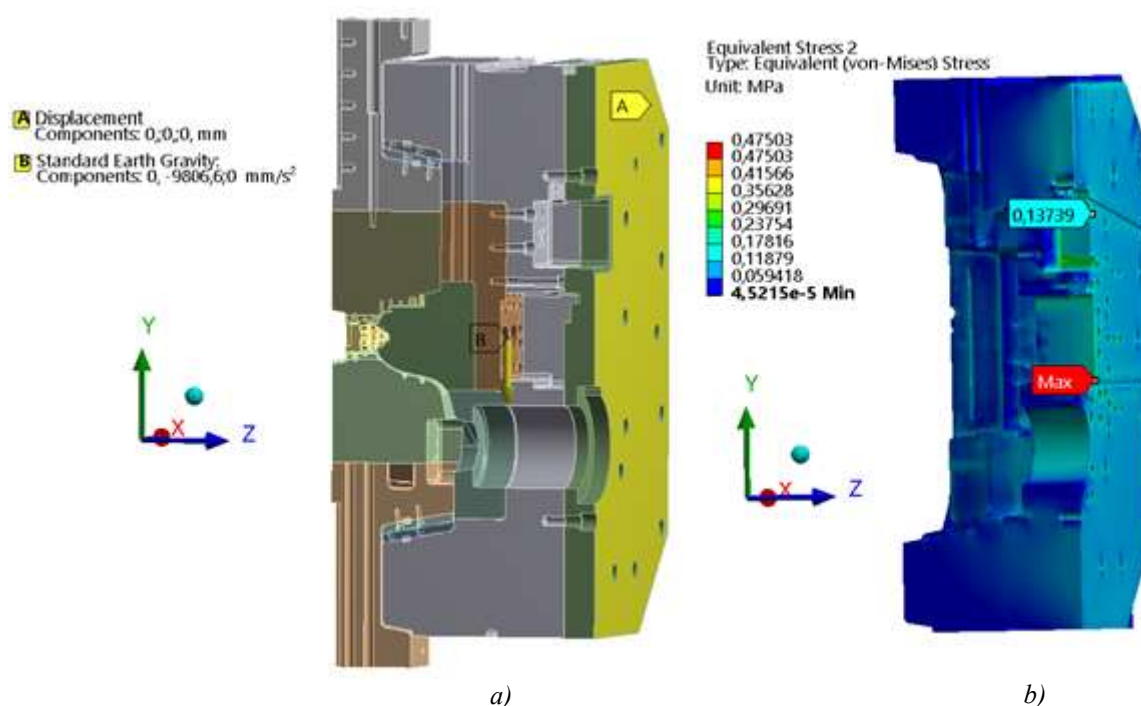
V tabulce 3 lze vidět, společně s již zmíněnými pevnostními charakteristikami, výsledné hodnoty modulu pružnosti. Jelikož nebyl k dispozici záznam příčné kontrakce, nebylo možné dopočítat hodnotu poissonova poměru, tudíž bude použita standardní hodnota pro ocelové slitiny $\mu = 0,3$. Jelikož je v lineární oblasti sklon křivky σ - ϵ velice strmý, mohlo dojít k zanesení chyby při „oklikání“ křivky, což taky dokazují rozkolísané hodnoty modulu pružnosti uvedené v tabulce 3. Pro kvantifikaci velikosti potenciální chyby byly provedeny dva zkušební výpočty s průměrnou a minimální hodnotou modulu pružnosti ($E = 211,7$ GPa, $E = 200,0$ GPa). Na základě těchto výpočtů lze konstatovat, že i v případě vnesení chyby při určování modulu pružnosti E , který by měl mít reálně nižší hodnotu než použitý modul pružnosti $E = 211,7$ GPa, bude do výpočtu zanesena chyba nanejvýš 1 %, což je na naší rozlišovací úrovni přijatelné.

4.1.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky jsou závislé zejména na úrovni modelu geometrie a typu zatížení. Stálými okrajovými podmínkami jsou uložení formy, gravitační zrychlení a rovina symetrie. Specifické okrajové podmínky budou definovány vždy v souvislosti s danou analýzou pro konkrétní zatěžovací stav nebo úroveň modelu geometrie.

Forma je uložena mezi pevným a pohyblivým třmenem licího stroje. Jelikož třmen je mnohonásobně hmotnější než samotná forma, lze předpokládat, že jeho tuhost je vůči tuhosti formy zanedbatelná a lze jej považovat za ideálně tuhý. Pevný rám formy je ke třmeni pevně uchycen pomocí podložné desky, což bude zajištěno zamezením všech posuvů na spodní straně podložné desky, viz obrázek 18 a).

Druhou okrajovou podmínkou, která bude stejná pro všechny analýzy, je gravitační zrychlení. Na obrázku 18 a) lze vidět ukázkou uložení a zatížení formy. V tomtéž obrázku na pozici b) je zobrazeno výsledné redukované napětí (von Mises). Na základě této pevnostní analýzy lze konstatovat, že i přes celkovou váhu formy přes 10 t, je na dané rozlišovací úrovni gravitační zrychlení nepodstatné.



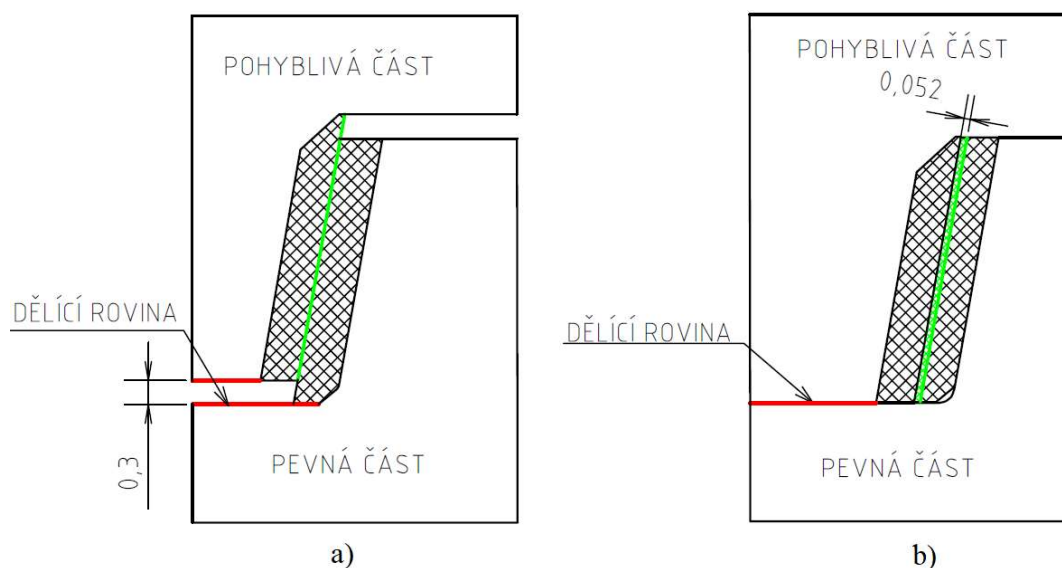
Obrázek 18: Působení gravitačního zrychlení na napjatost v pevném rámu formy

Rovněž je třeba podotknout, že část hmotnosti, která je aplikována v analýze na obrázku 18, je přenášena také do pohyblivé části formy, což snižuje zatížení pevné části. Z důvodu jednoduššího zobrazování je možné dále díky neuvažování gravitačního zrychlení formu zobrazovat ve vodorovné poloze.

Poslední použitou okrajovou podmínkou společnou pro všechny analýzy je předepsání roviny symetrie. Pro zadání symetrie je použita vazba frictionless support, která zamezuje posuvy v normálovém směru [18].

4.1.3 Lisovací síla

Kapitola se zabývá určením lisovací síly, která odpovídá síle potřebné k zalisování zámků. V okamžiku uzavírání formy, kdy na sebe dolehne pevný a pohyblivý zámek, je mezi dělicí rovinou a pohyblivými jádry vůle 0,3 mm, viz obrázek 19 a). K úplnému uzavření formy dochází až po prolomení kloubového uzavíracího mechanismu, který vyvolá sílu o hodnotě až 2100 t. V momentě prolomení dochází k úplnému uzavření formy a k zalisování zámků, viz obrázek 19 b). Na dělicí rovinu tedy působí tlak od uzavírací síly zmenšený o sílu potřebnou k překonání zalisování zámků.



Obrázek 19: Lisování zámků

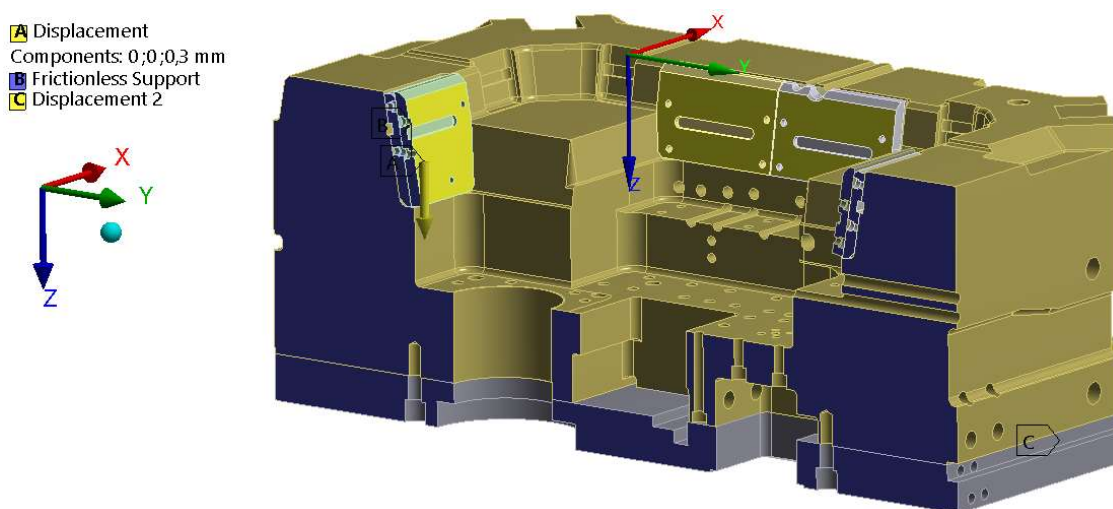
Analýza proběhne na dvou úrovních modelu geometrie, přičemž oba modely budou zatěžovány deformačně, a to posuvem pohyblivé části o 0,3 mm ve směru na dělicí rovinu. Následně bude ze silových reakcí ve vazbě zjišťována velikost síly potřebná pro překonání deformačního zatížení.

Jelikož jsou zámkové vložky vůči sobě smýkány, bude jednou z hlavních veličin ovlivňujících velikost lisovací síly koeficient smykového tření. V literatuře se koeficienty smykového tření značně liší v závislosti na druhu materiálu, kvalitě povrchu a úrovni lubrikování. V reálném procesu nejsou zámkové vložky přímo mazány, avšak v jejich blízkosti se nanáší separační látka, která se dostane i na povrchy zámků. Jelikož však přesná hodnota není známa, je proveden výpočet pro hodnoty koeficientu tření 0,2, 0,1 a 0,05, které jsou určeny z tabulky 4. Následně bude porovnána chyba, která by mohla být do výpočtu zanesena v případě zvolení nesprávného koeficientu tření.

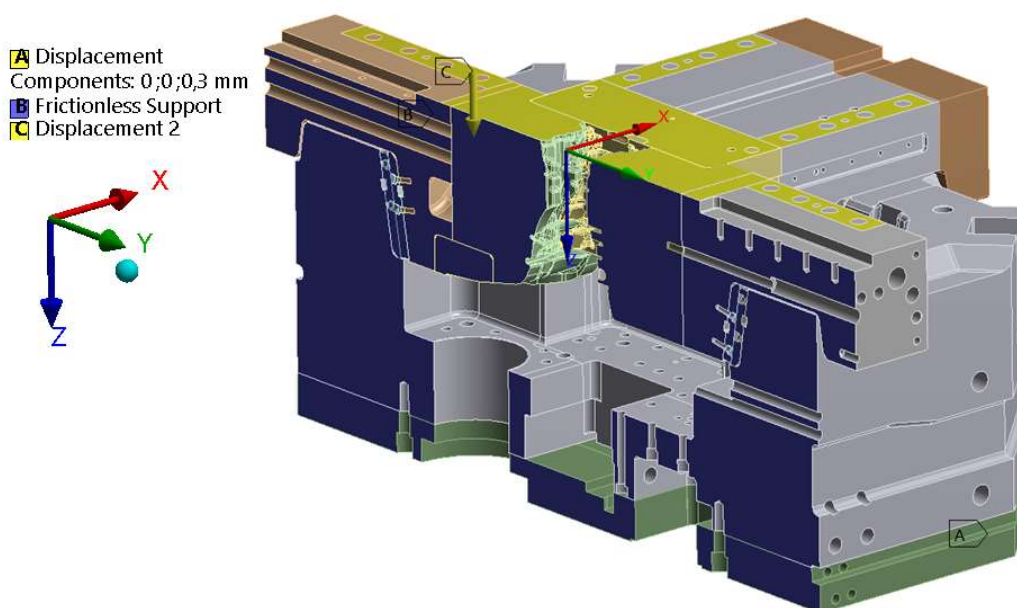
Stav	Klid		Pohyb	
Povrch	Suchý	Mazán	Suchý	Mazán
Koeficient tření	0,15-0,2	0,1-0,12	0,1-0,2	0,03-0,09

Tabulka 4: Koeficienty tření [23]

Na obrázcích 20 a 21 jsou zobrazeny modely geometrie, pomocí kterých bude určována velikost lisovací síly. V obou případech je model zatížen posuvem pohyblivých částí ve směru na dělicí rovinu (osa Z). V případě prvního modelu je zadán posuv působící na plochy pohyblivých zámků $U_z = 0,3$ mm, přičemž v ostatních směrech je zadán nulový posuv $U_x = 0$ mm a $U_y = 0$ mm. Předepsáním nulových posuvů ve směru x a y je definován stav, ve kterém je předpokládána ideální tuhost pohyblivých jader, čímž je do výpočtu vnesena jistá nepřesnost. Tato nepřesnost je eliminována použitím druhého modelu, ve kterém jsou již pohyblivá jádra zahrnuta. Cílem použití dvou modelů je srovnání velikosti lisovací síly v závislosti na úrovni modelu geometrie.



Obrázek 20: Lisovací síla - 1. model geometrie, bez pohyblivých jader



Obrázek 21: Lisovací síla - 2. model geometrie, s pohyblivými jádry

Z tabulky 5 je zřejmé, že koeficienty tření i úroveň modelu mají značný vliv na velikost lisovací síly. V případě lisování bez pohyblivých jader a koeficientu tření 0,2 síla dosahuje velikosti 1000 kN. Pro model s pohyblivými jádry a s koeficientem tření 0,05 je síla třetinová. Rozdíl lisovací síly je až 60%, avšak uzavírací síla je o řád či dva vyšší než síla lisovací. Jak lze z tabulky 5 vyčíst, největší rozdíl v uzavírací síle je 7 %. Na základě těchto výpočtů lze konstatovat, že jak úroveň geometrie, tak velikost koeficientu tření, velkou mírou ovlivňují velikost lisovací síly, která však nemá tak významný vliv na sílu uzavírací. Abychom se pohybovali na konzervativní straně, bude zvolena vyšší uzavírací síla, čímž dojde ke zvýšení zatížení působící na dělicí rovinu.

Koeficient tření	0,2	0,1	0,05
Lisovací síla (bez jader) [kN]	1000	730	590
Lisovací síla (s jádry) [kN]	530	380	310
Uzavírací síla (bez jader) [kN]	9500	9770	9910
Uzavírací síla (s jádry) [kN]	9970	10120	10190

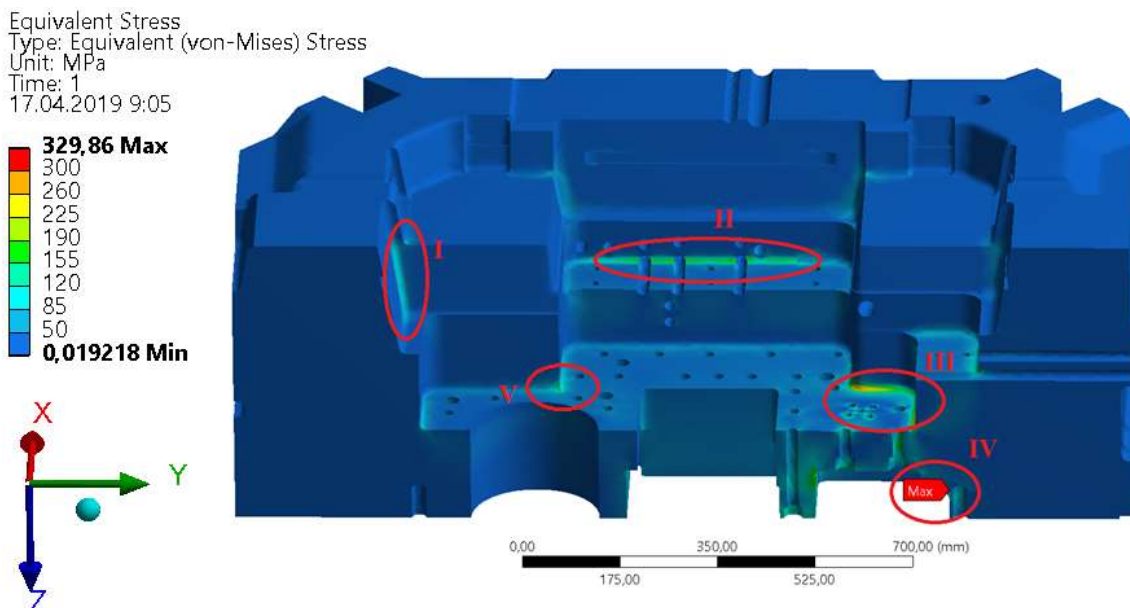
Tabulka 5: Lisovací a uzavírací síla

Pro další výpočty je tedy uvažována střední hodnota koeficientu tření 0,1 a nejvyšší možná uzavírací síla $F_{UZ} = 10190$ kN.

4.2 KRITICKÁ MÍSTA

Na základě první deformačně napětíové analýzy byla vybrána nejvíce zatěžovaná místa, která budou sledována a vzájemně spolu porovnávána, viz obrázek 22. Mezi tato kritická místa se řadí nejen místa s maximálním napětím, ale také místa vykazující lokálně zvýšené napětí, které by se v případě cyklického zatěžování mohlo stát dominantní. Přestože je uvažován pouze poloviční model, není možno vytvořit dostatečně jemnou síť pro vyhodnocování napětí na celém modelu. Z tohoto důvodu je využito tzv. submodelování.

Základním principem submodelování je vytvoření dvou modelů. V prvním modelu je zahrnuta celá geometrie a všechny okrajové podmínky, přičemž abychom byli schopni tuto analýzu spočítat, musí být použita hrubá síť. Druhý model je pouze lokální výřez modelu prvního (submodel), na kterém lze vytvořit dostatečně jemnou síť pro vyhodnocování napětí. Submodel je zatěžován posuvy jednotlivých uzlů převzatých z řezných ploch celého modelu. Výsledné napětí je vyhodnocováno v dostatečné vzdálenosti od místa zatížení tak, aby nedocházelo k ovlivňování výsledků dle Saint Venantova principu [18].



Obrázek 22: Kritická místa

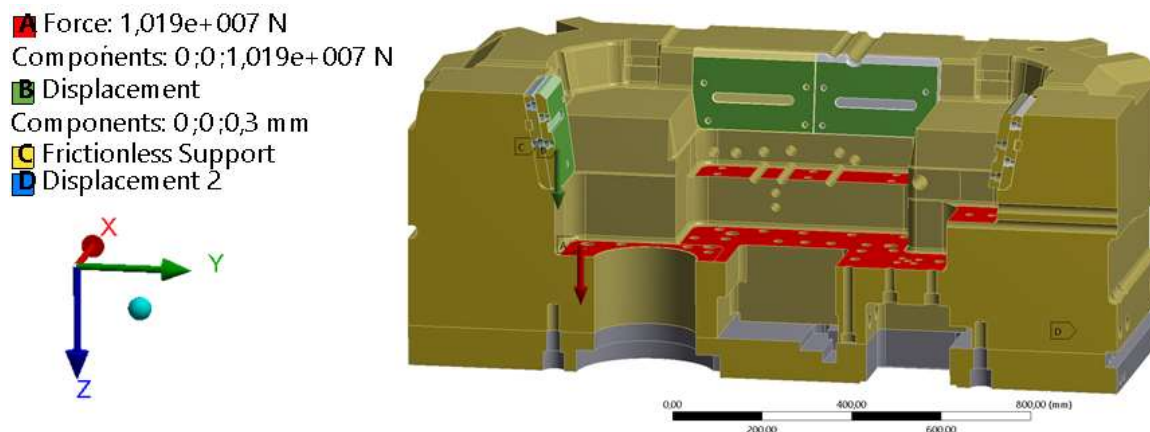
4.3 UZAVŘENÍ FORMY

Uzavření formy je jedním z hlavních posuzovaných zatěžovacích stavů. Celá fáze uzavírání začíná sjetím pohyblivých jader k sobě, přičemž současně začíná hydraulický člen vyvíjet tlak na pohyblivý třmen a díky tomu se pohyblivá forma přibližuje k pevné části. V okamžiku, kdy na sebe dolehne pevný a pohyblivý zámek, dojde k prolomení kloubového mechanismu a zalisování zámků, viz kapitola 4.1.3.

Analýza uzavření formy bude provedena na třech úrovních modelu geometrie. První model geometrie nebude uvažovat žádné vnitřní vybavení, síla bude tedy aplikována přímo na pevný rám formy. V druhém modelu geometrie budou již zahrnuty pevné vložky, čímž je rámu částečně zvýšena tuhost. V poslední části bude použit téměř celý model geometrie, což způsobí výraznou změnu tuhosti v průběhu zalisování zámků. Změny tuhostí v jednotlivých geometriích jistě povedou ke změnám v napjatosti v pevném rámu. Cílem je posoudit, zda budou tyto změny významné a jaký bude mít vliv použití jednotlivých modelů geometrie na výsledné napětí.

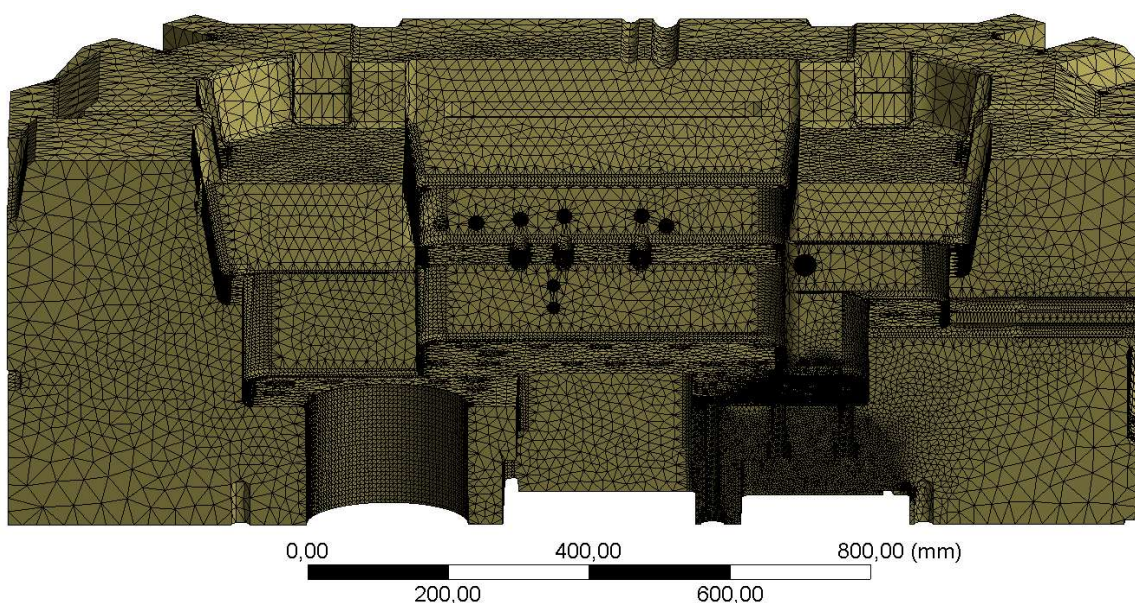
4.3.1 Model geometrie - 1. úroveň

Jako první model geometrie byla použita pouze forma bez jakéhokoliv vnitřního vybavení, viz obrázek 23. Forma bude zatěžována deformačním posuvem pohyblivých zámků a uzavírací silou stanovenou v kapitole 4.2.



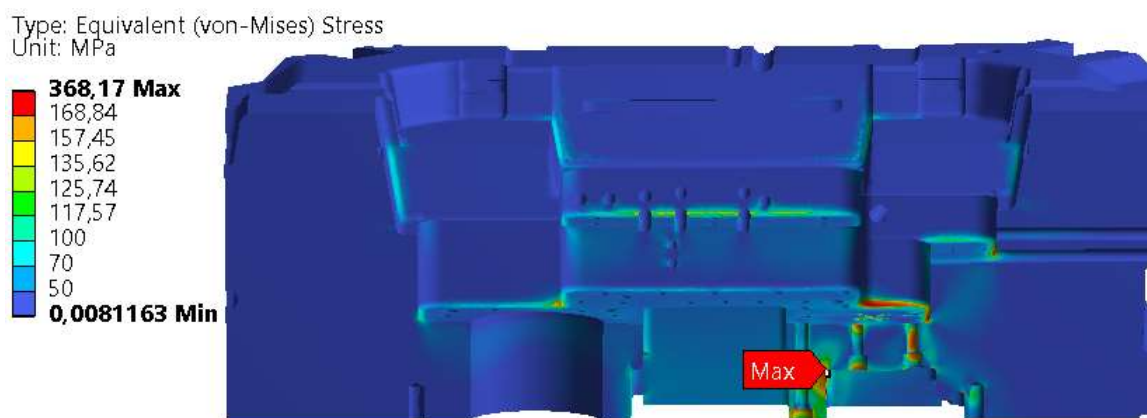
Obrázek 23: Zatížení, uzavření formy - 1. Úroveň modelu geometrie

Analýza je rozdělena do několika kroků. Prvním krokem bylo vytvoření analýzy celého modelu geometrie s poměrně hrubou sítí. Z důvodu zajištění dostatečného počtu uzlů, ze kterých budou načteny posuvy do submodelů, byla síť v těchto místech zjemněna, viz obrázek 24. Následně bylo vytvořeno 5 submodelů sloužících k vyhodnocení jednotlivých kritických míst. Přestože některá z těchto míst nejsou ve fázi uzavírání formy kritická, lze předpokládat, že budou významná v další fázi zatěžování.



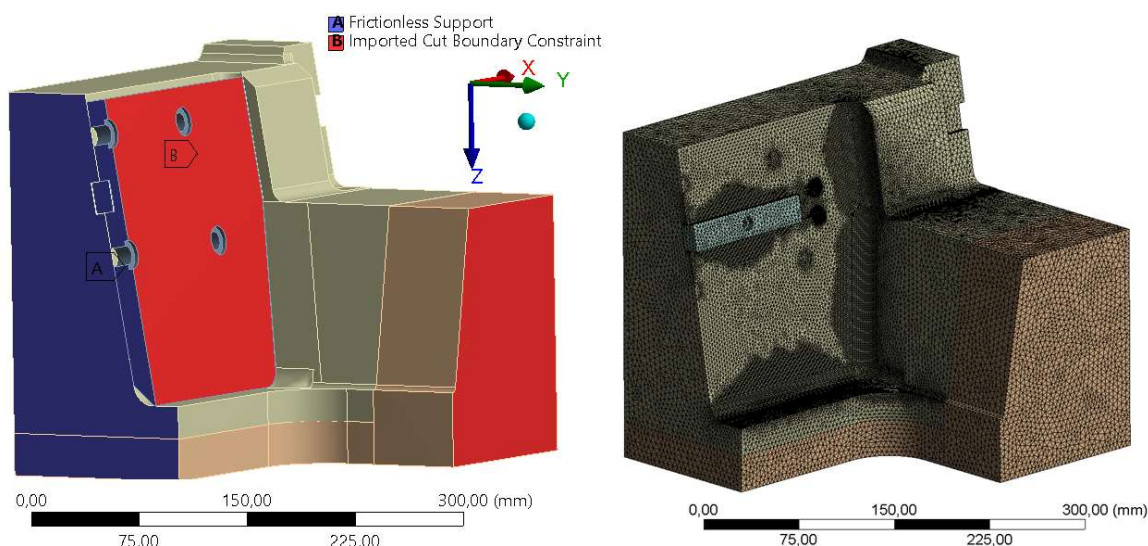
Obrázek 24: Síť celého modelu

Na obrázku 25 je možno vidět výsledné redukované napětí von-Mises celého výpočtového modelu, přičemž maximální hodnota napětí se nachází v horním levém zaoblení pravého spodního vybrání.



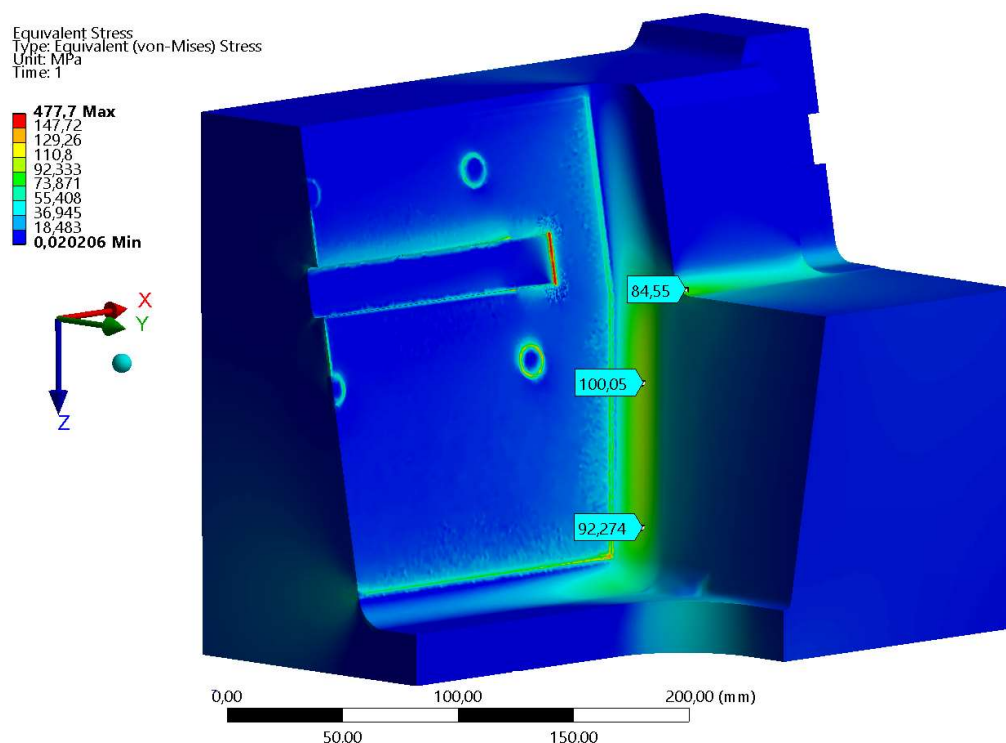
Obrázek 25: Redukované napětí von-Mises - 1. úroveň modelu

První submodel se zaměřuje na oblast v okolí zámku spodního odtahovaného jádra, která je v této fázi namáhána pouze zalisováním zámků. Síly ve svislém směru jsou mezi pevným zámkem a rámem přenášeny převážně přes pero. Tlak pevného zámku na rám je přenášén pomocí kontaktních prvků s třecím koeficientem 0,2, viz tabulka 4 v kapitole 4.1.3. Dále bylo předepsáno zatížení pomocí posuvů importovaných z celého modelu na řezné plochy a zároveň byly zamezeny podmínky symetrie pomocí vazby frictionless support, viz obrázek 26.



Obrázek 26: Zatížení a síť submodelu I

Na obrázku 27 jsou vykresleny hodnoty redukovaného napětí von-Mises, přičemž maximální napětí dosahuje hodnoty 477 MPa v místě přechodu drážky pro pero a plochy, na kterou se přenáší kontaktní tlak z pevného zámku. Tato koncentrace napětí je způsobena pouze chybnou numerickou simulací kontaktů. Z důvodu vzniku singularity v daném bodě, není možno vyhodnocovat napětí, jelikož se zjemňováním sítě poroste hodnota napětí do nekonečna. Jelikož není očekáváno, že by v daném místě mělo být zvýšené napětí, dále toto místo nebude uvažováno. Výsledné napětí bude vyhodnoceno v místě svislého zaoblení. Jak lze vidět na obrázku 27, nejvyšší hodnota napětí se pohybuje okolo 100 MPa.

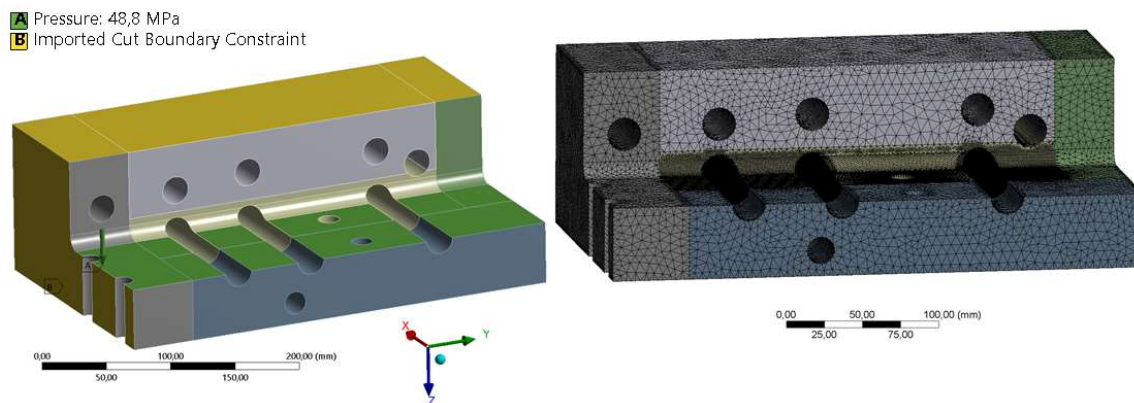


Obrázek 27: Redukované napětí von-Mises submodelu I

Další submodel má za úkol popsat zaoblení v místě pevné vložky u odtahovaného jádra spojky, zejména pak v okolí otvorů sloužících ke chlazení. V analýze celého modelu je tato část zatížena silou. Jelikož je však proveden lokální výřez, je nutné sílu přepočíst na tlakové zatížení, které bylo vypočteno pomocí vztahu (18).

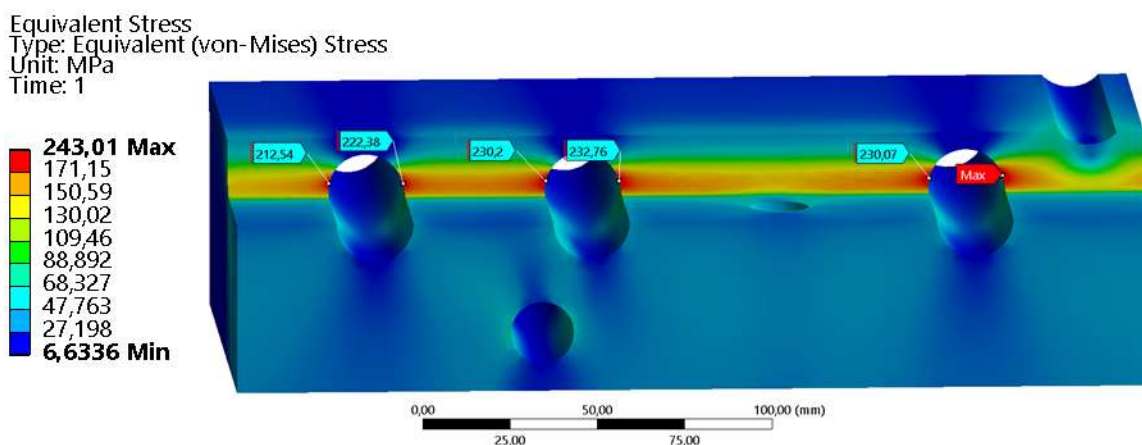
$$p = \frac{F_{UZ}}{S} = \frac{10190000}{208622} = 48,8 \text{ MPa} \quad (18)$$

Uzavírací síla F_{UZ} je stanovena v tabulce 5 (kapitola 4.1.3) a S je celková plocha, na kterou síla působí. Dále je submodel zatížen posuvy na plochy vytvořené řezem z celého modelu, viz obrázek 28.



Obrázek 28: Zatížení a síť submodelu II

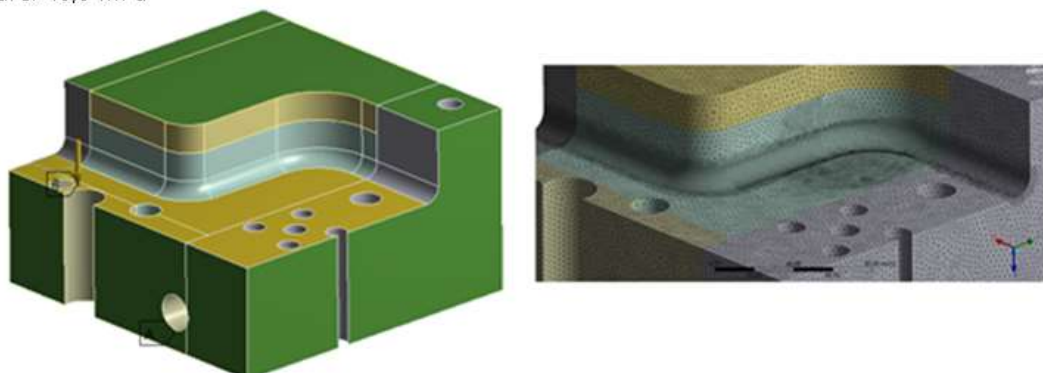
Na obrázku 29 je možné vidět výsledné redukované napětí von-Mises, které dosahuje maximální hodnoty 243 MPa u prvního otvoru zprava. U zbývajících otvorů se napětí pohybuje okolo 220–230 MPa.



Obrázek 29: Redukované napětí von-Mises submodelu II

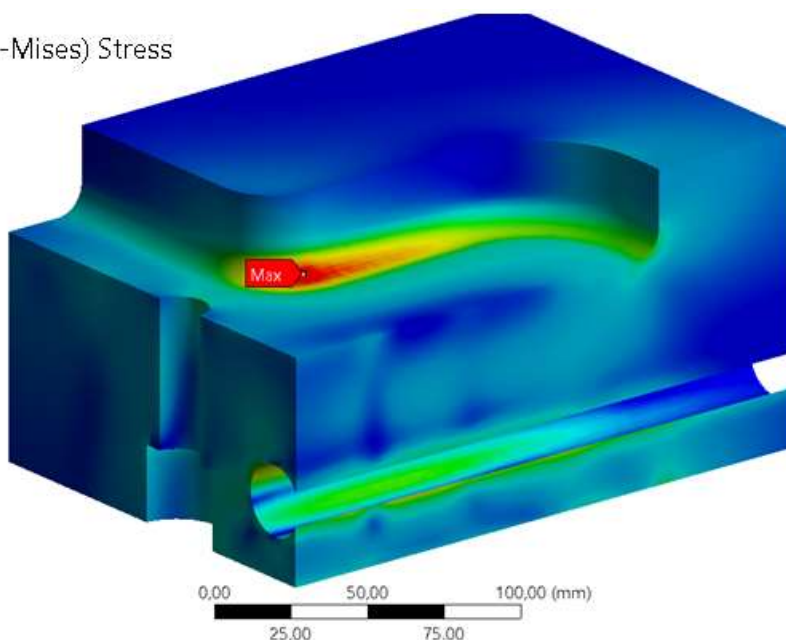
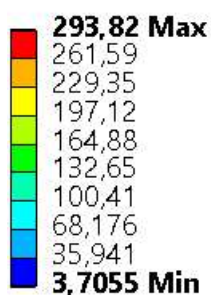
Třetí submodel je zatížen rovněž pomocí tlaku, viz vztah (18), a načtených posuvů, stejně jako v předchozích analýzách, viz obrázek 30. Na obrázku 31 je znázorněno výsledné redukované napětí dosahující hodnoty 293 MPa.

- A** Imported Cut Boundary Constraint
- B** Pressure: 48,8 MPa



Obrázek 30: Zatížení a síť submodelu III

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 1

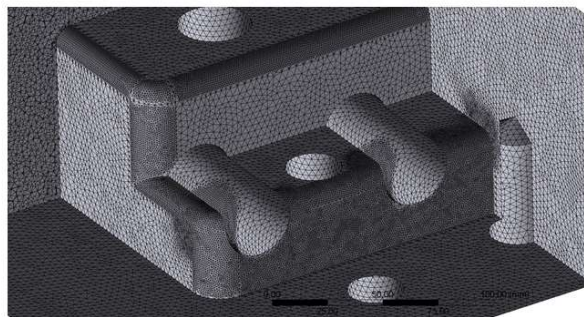
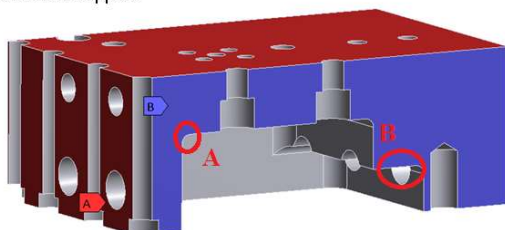


Obrázek 31: Redukované napětí von-Mises submodelu III

V předposledním submodelu je analyzováno pravé spodní vybrání, ve kterém je umístěna hydraulická technika. Z vnitřní strany tedy nepůsobí žádné zatížení. Submodel je zatížen pouze posuvy na řezných plochách a rovinou symetrie. Na této komoře jsou označena dvě kritická místa, přičemž první se nachází v levém horním zaoblení (A) a druhé u pravého spodního otvoru (B), viz obrázek 32.

Static Structural
Time: 1.5
15.04.2019 16:13

 Imported Cut Boundary Constraint
 Frictionless Support

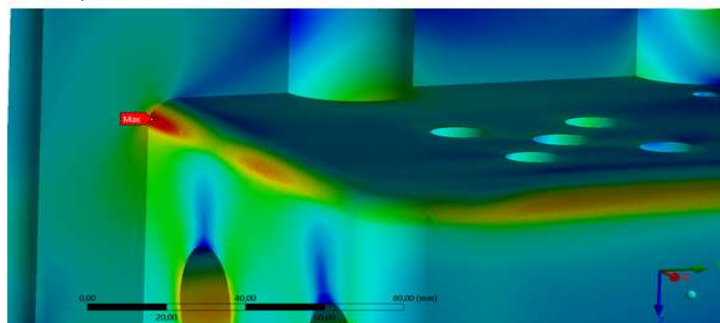


Obrázek 32: Zatížení a síť submodelu IV, znázornění kritických míst (A), (B)

Na obrázku 33 a 34 jsou vykreslena nejvíce namáhána místa, přičemž v kritickém místě (A) dosahuje redukované napětí von-Mises hodnoty 380 MPa. V kritickém místě (B) dosahuje redukované napětí hodnot 354 MPa a 377 MPa.

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress

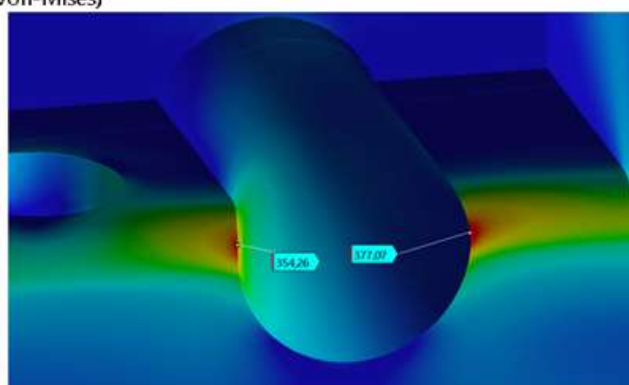
379,95 Max
337,81
295,68
253,55
211,41
169,28
127,14
85,011
42,877
0,74371 Min



Obrázek 33: Redukované napětí von-Mises submodelu IV, kritické místo (A)

Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises)
Unit: MPa

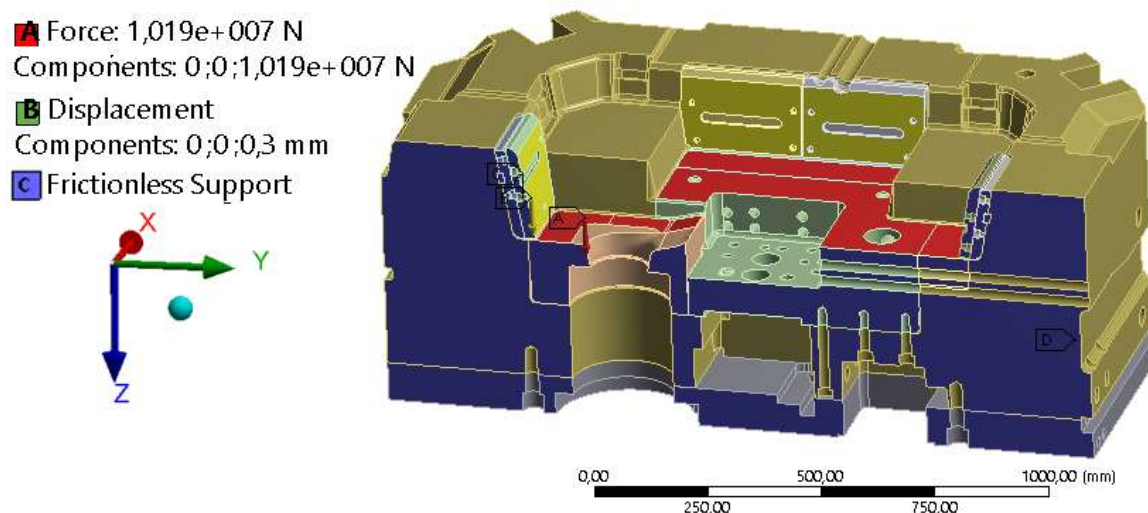
379,95 Max
337,81
295,68
253,55
211,41
169,28
127,14
85,011
42,877
0,74371 Min



Obrázek 34: Redukované napětí von-Mises submodelu IV, kritické místo (B)
(zvýrazněné hodnoty: levá 354 MPa, pravá 377 MPa)

4.3.2 Model geometrie - 2. úroveň

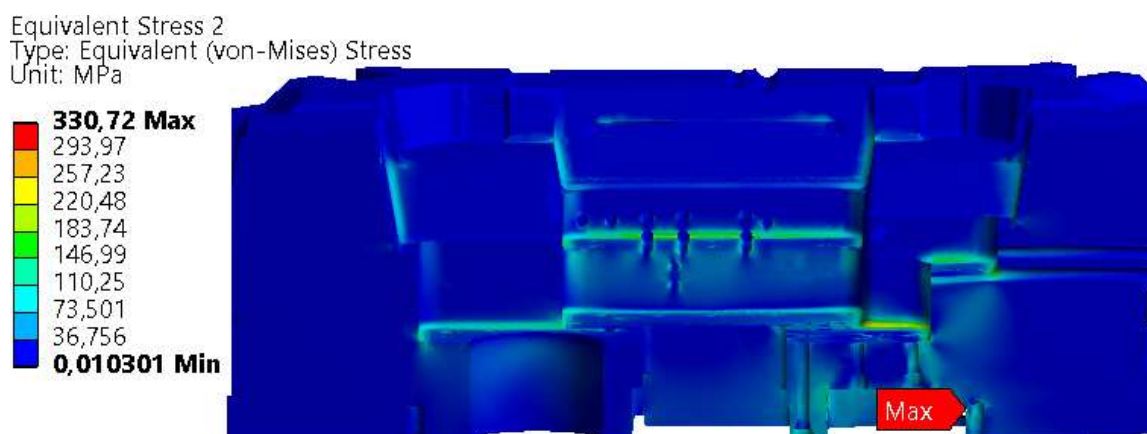
Ve druhém modelu jsou přidány pevné vložky, které zvýší celkovou tuhost analyzovaného rámu. Zatížení zůstává stejné jako v předchozím případě, viz obrázek 35.



Obrázek 35: Zatížení, uzavření formy - 2. Úroveň modelu geometrie

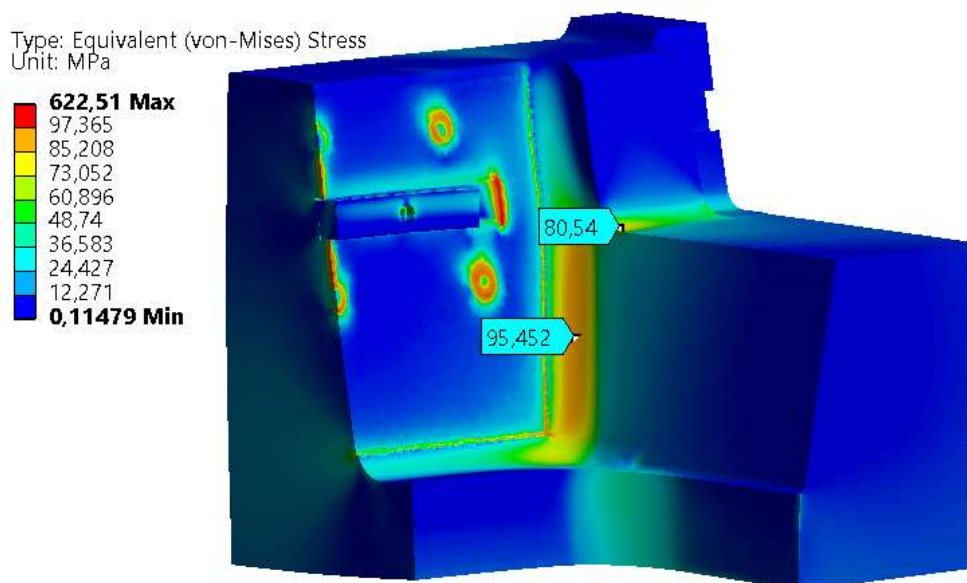
Z důvodu stručnosti práce budou prezentovány pouze odlišnosti mezi jednotlivými modely. Výsledky napětí ze všech kritických míst budou uvedeny ve shrnutí na konci kapitoly 4.3.

Jak lze vidět na obrázku 36, ve 2. úrovni modelu jsou namáhána stejná místa jako v případě úrovně první. Jedinou výraznou změnou je kritické místo, které již není v levém horním zaoblení pravého spodního vybrání (A), ale u spodního otvoru pravého spodního vybrání, tedy v místě (B).



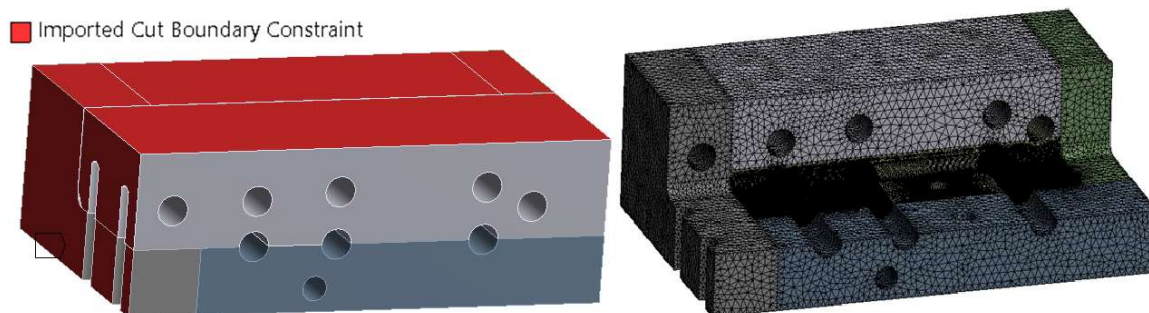
Obrázek 36: Redukované napětí von-Mises v celém pevném rámu, model geometrie s vložkami

Submodel kritického místa (I) je shodný pro všechny úrovně modelu, z tohoto důvodu budou uvedeny pouze výsledné obrázky. Na obrázku 37 lze vidět výsledné hodnoty redukovaného napětí von-Mises, přičemž, stejně jako v předchozím případě, je na přechodu drážky pro pero a kontaktní plochy singularita, tudíž zde vychází i zvýšené napětí. Stejným problémem jsou mezikruží, ve kterých jsou uměle vyvolána napětí kontaktními prvky. Dle výše zmíněných důvodů nebudou tato napětí uvažována. Výsledné napětí bude následně odečteno z místa zaoblení, stejně jako tomu bylo v případě předchozího modelu. Nejvyšším redukovaným napětím je pro nás tedy hodnota 95 MPa.

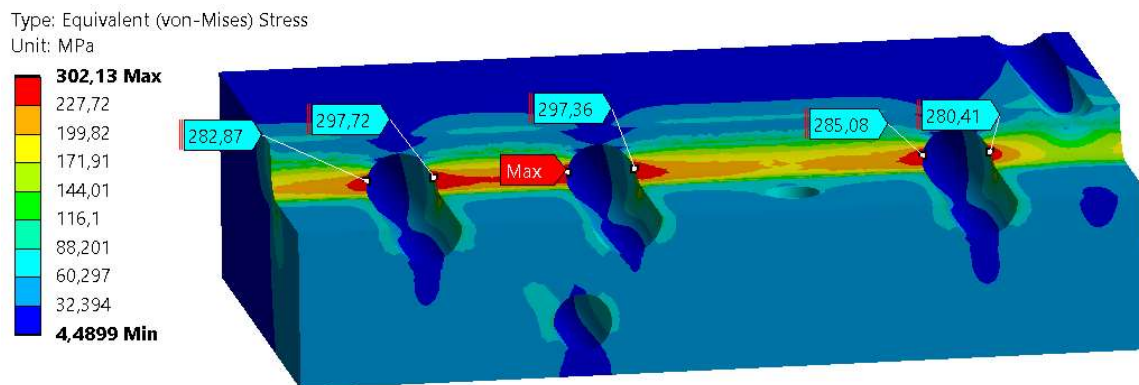


Obrázek 37: Redukované napětí von-Mises submodelu I

Druhý submodel je zatížen pouze načtenými posuvy na plochách řezu, přičemž na pevný rám působí část pevné spojkové vložky, viz obrázek 38. Výsledné napětí v kritickém místě (II) lze vidět na obrázku 39, přičemž průměrná hodnota redukovaného napětí von-Mises se pohybuje okolo 300 MPa.



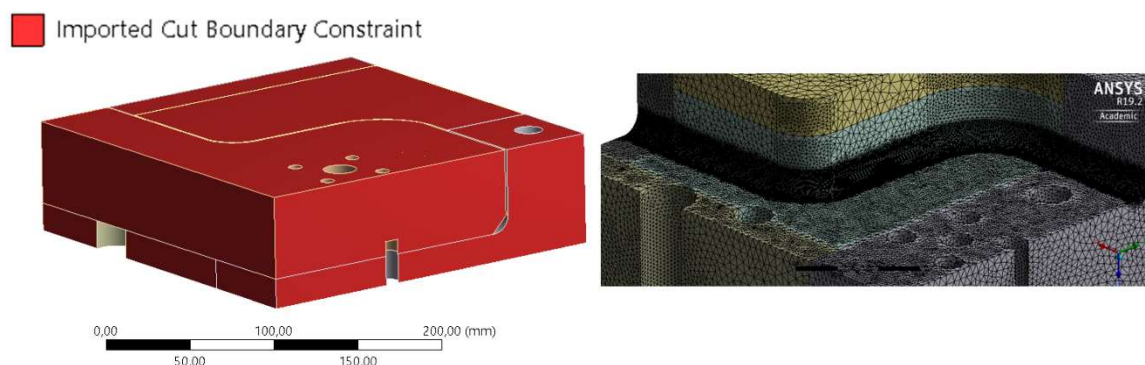
Obrázek 38: Zatížení a síť submodelu II



Obrázek 39: Redukované napětí von-Mises submodelu II

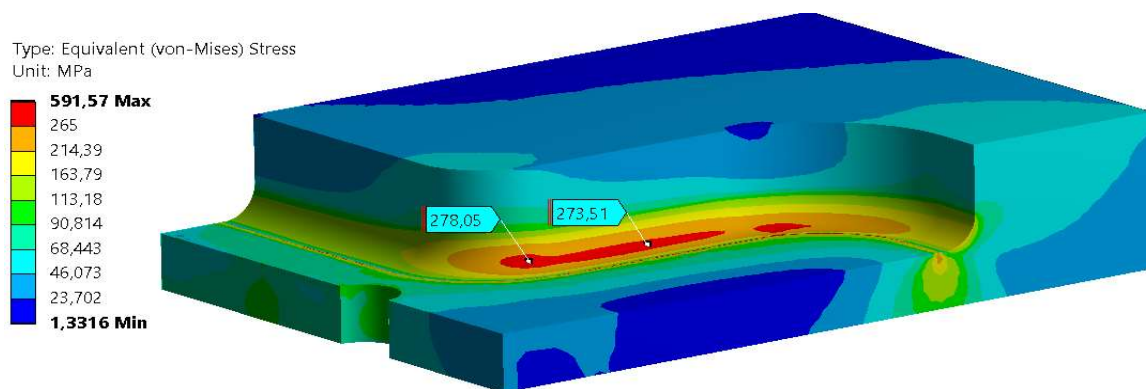
Třetí submodel je zatížen pevnou vložkou, přičemž jsou na všechny řezné plochy předepsány posuvy, tak jako tomu bylo i v předchozích případech, viz obrázek 40. Zatížení z pevné vložky na rám je přenášeno pomocí kontaktu bez tření.

Na obrázku 41 je vykresleno výsledné redukované napětí von-Mises v kritickém



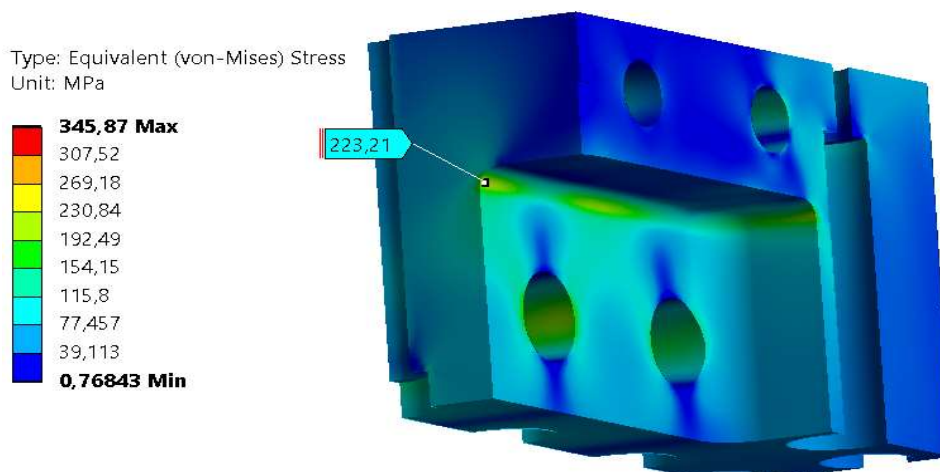
Obrázek 40: Zatížení a síť submodelu III

místě (III). Maximální hodnota napětí dosahuje 590 MPa, avšak jak již bylo uvedeno v dřívějších případech, tato hodnota je způsobena numerickými chybami v oblasti končící kontaktní plochy. Výsledné napětí bude vyhodnocováno z vyznačených hodnot v zaoblení, přičemž maximální hodnota v této oblasti je 278 MPa.

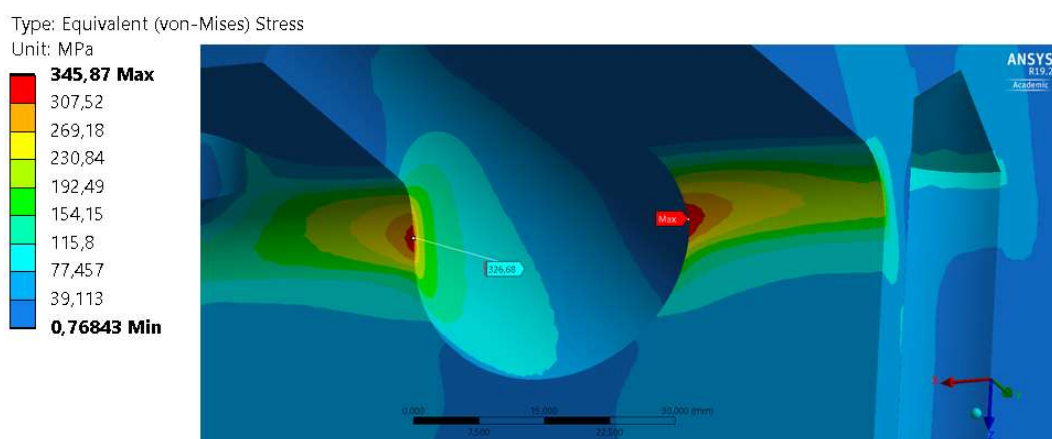


Obrázek 41: Redukované napětí von-Mises submodelu III

Čtvrtý submodel je zatížen stejnými okrajovými podmínkami a je vytvořena totožná síť jako v případě 1. úrovně modelu. Z tohoto důvodu jsou ukázána jen výsledná redukovaná napětí dosahující maximální hodnoty 345 MPa.



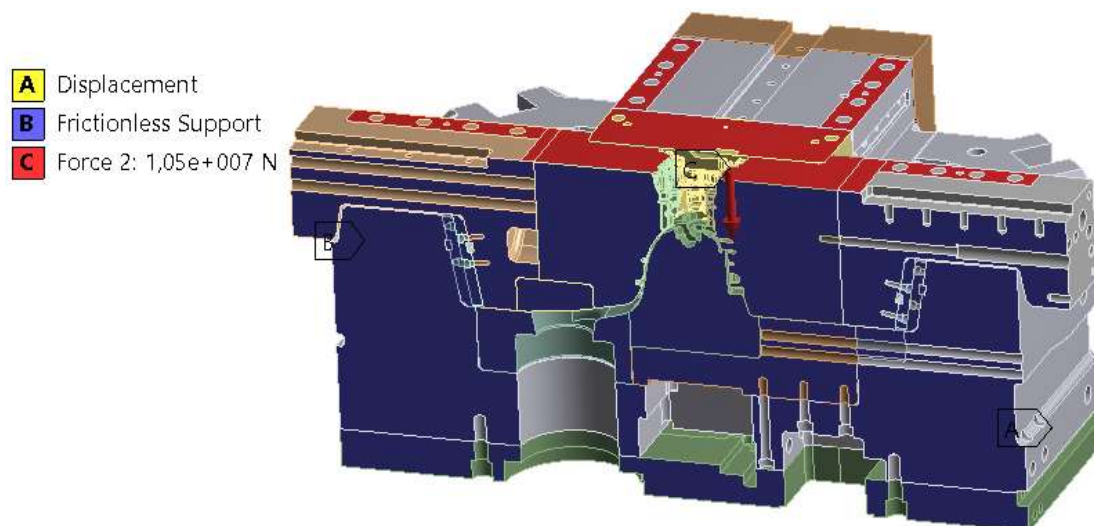
Obrázek 42: Redukované napětí von-Mises submodelu IV, místo (A)



Obrázek 43: Redukované napětí von-Mises submodelu IV, místo (B)

4.3.3 Model geometrie - 3. úroveň

Poslední model geometrie zahrnuje odtahovaná jádra, která doteď nebyla uvažována, viz obrázek 44. Při zalisovávání zámků je tudíž umožněna deformace směrem do středu formy, díky čemuž dojde ke snížení tuhosti při lisovací fázi. Lze tudíž očekávat snížení napětí v oblasti zámků. Model je zatížen uzavírací silou na plochách, kde dochází k přenosu sil z pohyblivého rámu na odtahovatelná jádra. Stejně jako v předchozích úlohách bylo využito symetrie a na podložnou desku jsou předepsány nulové posuvy.

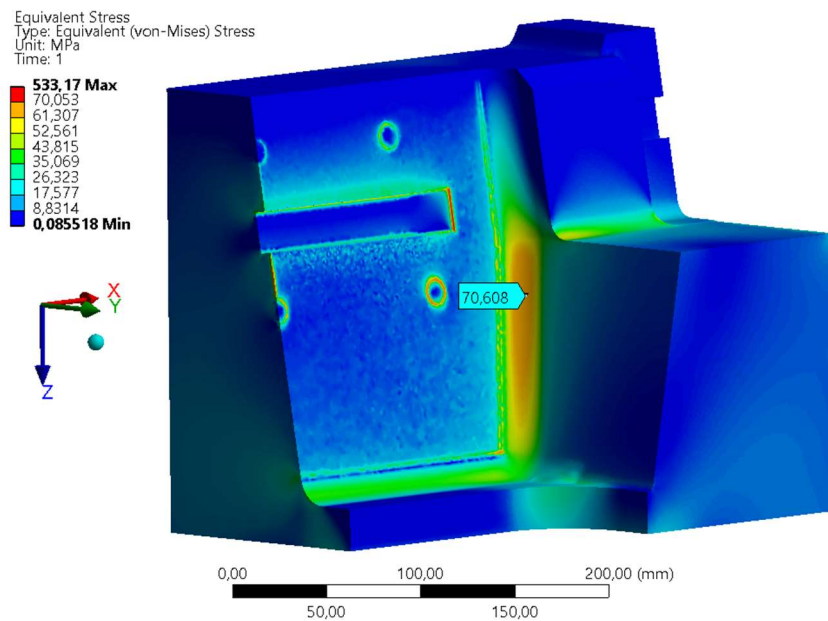


Obrázek 44: Zatížení, uzavření formy - 3. Úroveň modelu geometrie

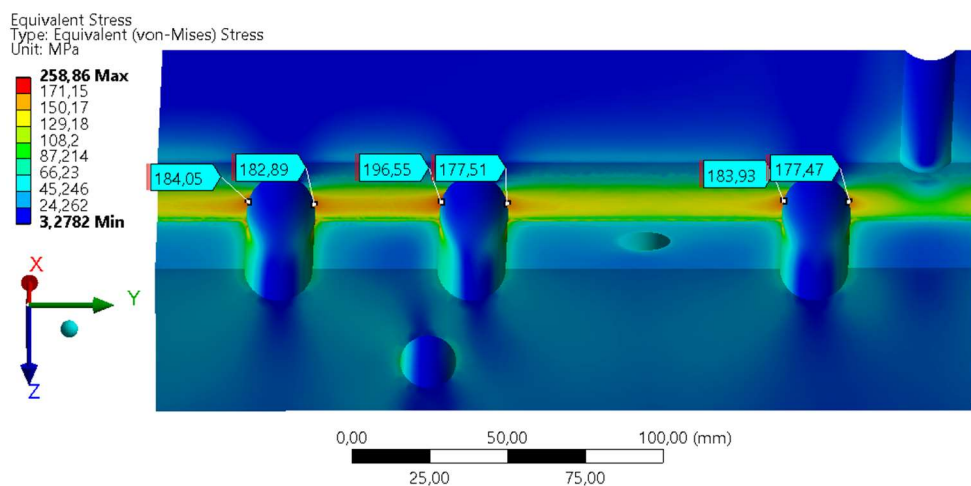
Kritická místa jsou shodná s druhou úrovní geometrie. Rovněž zatížení jednotlivých submodelů je totožné, pouze v některých místech se vyskytuje nižší napětí. Z tohoto důvodu zde budou ukázána pouze výsledná napětí v daných kritických místech.

Na obrázku 45 lze vidět výsledná redukovaná napětí v I. kritickém místě. Stejně jako tomu bylo již v předchozích případech, maximální napětí není reálné, tudíž bude vyhodnoceno napětí v místě svislého zaoblení, které nabývá hodnoty 71 MPa.

Redukované napětí v II. kritickém místě je vykresleno na obrázku 46, přičemž maximální reálné napětí dosahuje hodnoty okolo 200 MPa.



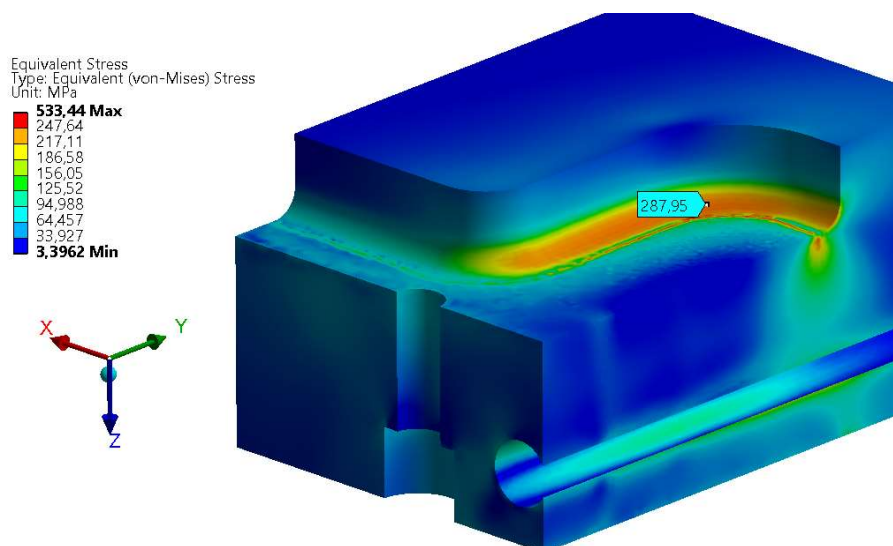
Obrázek 45: Redukované napětí von-Mises submodelu I, kritické místo I



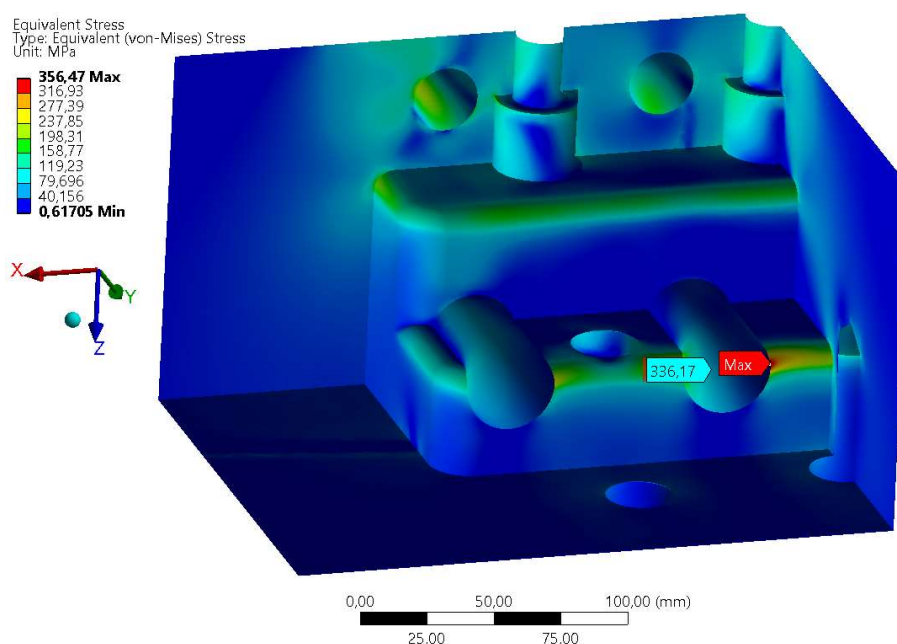
Obrázek 46: Redukované napětí von-Mises submodelu II, kritické místo II

Obrázek 47 vykresluje redukované napětí ve III. kritickém místě, kde reálné napětí dosahuje hodnoty okolo 290 MPa. Opět je možno vidět kritická napětí vzniklá numerickou simulací, kdy dochází k penetrování krajních uzlů zatěžující části do tělesa.

Předposlední kritické místo lze vidět na obrázku 48. Jedná se o místo zaoblení v oblasti pravého spodního vybrání (IV), kde se vyskytuje maximální napětí 356 MPa.



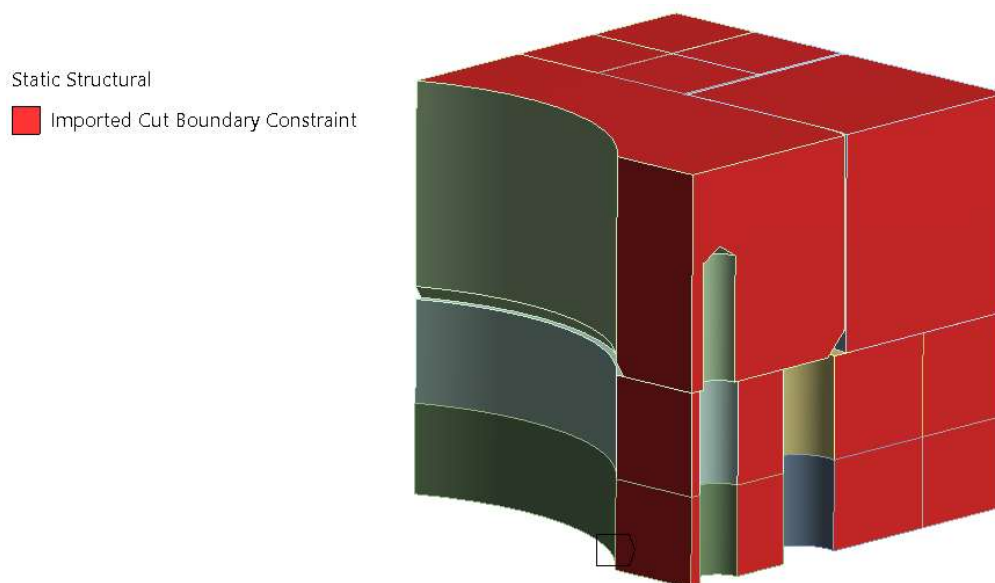
Obrázek 47: Redukované napětí von-Mises submodelu III, kritické místo III



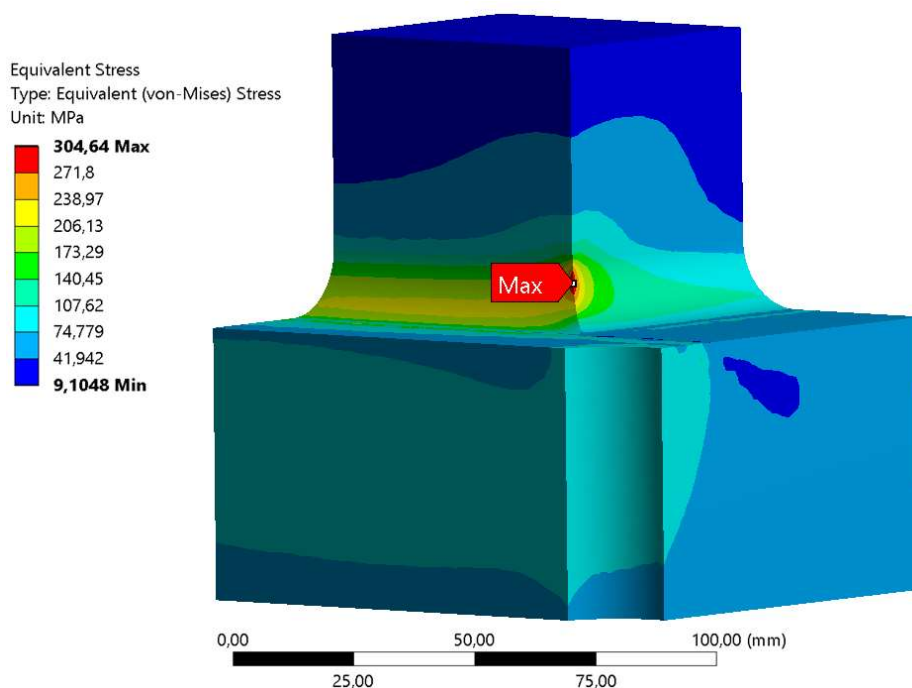
Obrázek 48: Redukované napětí von-Mises submodelu IV, kritické místo IV

Posledním vyhodnocovaným místem je místo setkávání dvou zaoblení na spodní ploše pevného rámu. Toto místo je vyhodnoceno poprvé, jelikož v přechozích úrovních modelů geometrie bylo napětí zanedbatelné. Submodel V je zatěžován pouze pomocí natchtených posuvu, vložky komory a pevné vložky, viz obrázek 49.

Maximální redukované napětí v kritickém místě (V) dosahuje hodnoty 304 MPa, viz obrázek 50.



Obrázek 49: Zatížení submodelu V Redukované napětí von-Mises submodelu V, kritické místo V



Obrázek 50: Redukované napětí von-Mises submodelu V, kritické místo V

4.3.4 Shrnutí úrovní modelů

Pro analýzu kritických míst uzavírací fáze byly vytvořeny 3 úrovně modelu geometrie. Jelikož se třetí úroveň geometrie nejvíce shoduje s geometrií reálné součásti, lze jej považovat za nejvěrohodnější. Hlavním důvodem vytvoření různých úrovní modelů bylo zjistit, zda by se pro příští analýzy pevného rámu dalo využít pouze zjednodušeného modelu geometrie. Analýzou zjednodušeného modelu by se dal ušetřit výpočetní čas.

Jak lze vyčíst z tabulky 6, úroveň modelu geometrie přímo ovlivňuje velikost maximálního redukovaného napětí v kritických místech pevného rámu. Největší odchylka jednotlivých modelů dosahuje 34 %. Na základě těchto výsledků lze konstatovat, že I. a II. úroveň modelu geometrie nejsou vhodné pro zjišťování napjatosti, avšak pro jednoduché odhalení kritických míst jsou dostačující. Hlavní výhodou třetího modelu je možnost zahrnutí dalších důležitých vlivů, jako např. teploty nebo výrobních vůlí, což v případě prvních dvou modelů možné není.

Model geometrie	I. Úroveň [MPa]	II. Úroveň [MPa]	III. Úroveň [MPa]	Největší % odchylka
I.Kritické místo	100	95	71	29%
II.Kritické místo	243	297	196	34%
III.Kritické místo	293	278	288	5%
IV.Kritické místo	377	345	336	12%
V.Kritické místo	277	266	304	12,5%

Tabulka 6: Porovnání úrovní modelu geometrie

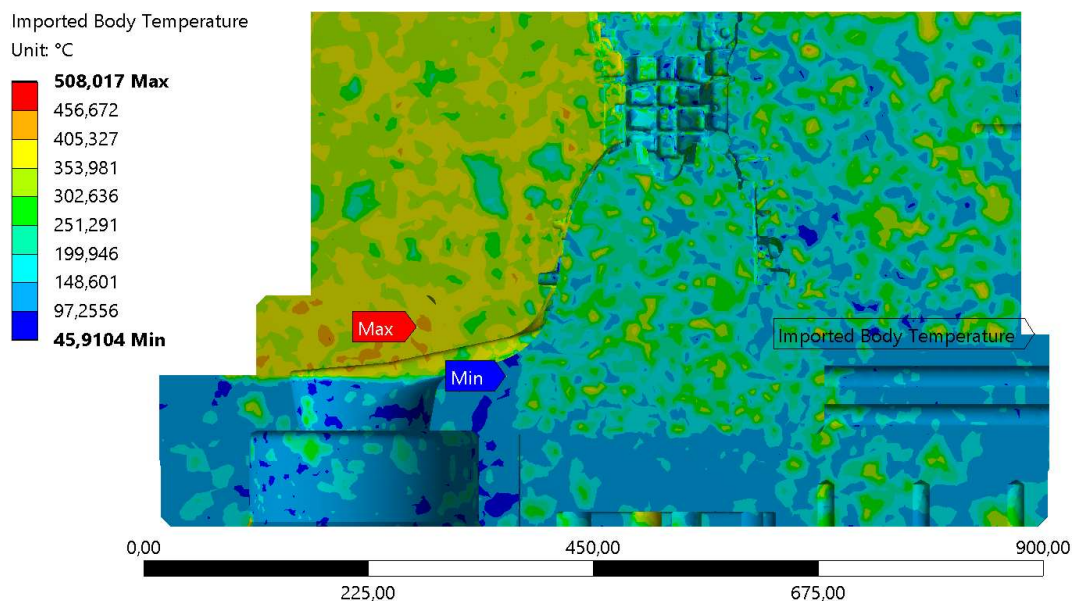
4.4 TEPELNÉ ZATÍŽENÍ FORMY PŘI UZAVÍRACÍ FÁZI

Jelikož je forma teplotně cyklicky namáhanou součástí, přičemž jeden licí cyklus trvá okolo 120 s, nestihne se forma mezi jednotlivými cykly ochladit. Z toho vyplývá, že i při uzavírací fázi je nezbytné počítat se zatížením od tepelné dilatace. V této kapitole bude určeno, jak velký vliv má tepelné zatížení na namáhání pevného rámu formy.

V běžném provozu je na pevném rámu maximální teplota okolo 80 °C. Pro takto nízkou teplotu lze počítat s minimálními změnami materiálových vlastností. Firmou Š. A. byl poskytnut záznam tahové zkoušky pro materiál 1.2311 s podobnými materiálovými charakteristikami, kde byly změřeny materiálové charakteristiky při teplotách 20 °C a 100 °C. Rozdíly v materiálových vlastnostech se pohybují do 5 %, což je na dané rozlišovací úrovni zanedbatelné.

4.4.1 Teplotní pole

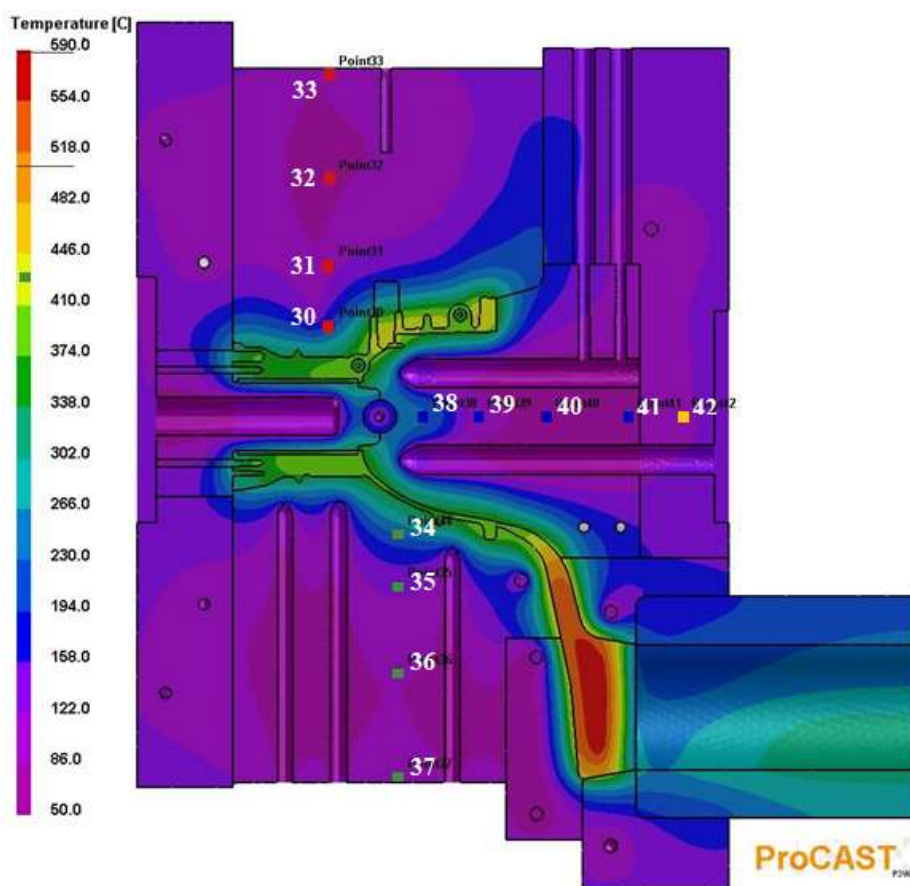
K numerické simulaci licího cyklu, tedy průběhu vstřikování taveniny do dutiny formy a následného tuhnutí odlitku, využívá nářadovna firmy Š. A. program ProCast [19]. Za účelem importování teplot do programu ANSYS, bylo z programu ProCast vyexportováno teplotní pole. Data pro teplotní pole byla dodána v podobě dvou textových souborů, přičemž jeden obsahoval čísla uzlů a teploty, a druhý souřadnice uzlů. V programu Matlab byla data z obou textových souborů spojena a daným souřadnicím byly přiděleny příslušné teploty [20]. Dále byl z programu Matlab vyexportován textový soubor, který se importoval do programu ANSYS. Bohužel se výsledné teplotní pole nepodařilo importovat s dostatečnou přesností, a to ani na původně dodanou síť, ani na síť vygenerovanou programem ANSYS, viz obrázek 51.



Obrázek 51: Import teplotního pole z programu ProCast do programu ANSYS

Dalším pokusem o zahrnutí teplotní dilatace do analýzy bylo rozřezání dílů, které jsou ovlivněny velkými teplotními gradienty, na několik kusů. Na takto připravené části byly zadány konstantní teploty, čímž byla zajištěna jistá tepelná dilatace. V případě, že bychom se zabývali určením napjatosti v celé součásti, nebyl by takovýto postup možný, jelikož by se na spojích jednotlivých dílů vytvořily skoky v napětích. Jelikož je však posuzován pouze pevný rám formy, je důležité, aby byla zachována pouze správná velikost teplotní dilatace. Teploty jednotlivých dílů byly stanoveny na základě obrázků 52 a 53 dodaných firmou Š. A. Problémem však bylo právě určení správné teploty pro jednotlivé díly, abychom dostali stejnou tepelnou dilataci jako v případě spojitě změny. Po následném provedení výpočtu bylo dosaženo extrémně vysokých napětí dosahujících hodnoty až 1400 MPa, tudíž byl tento postup zavržen.

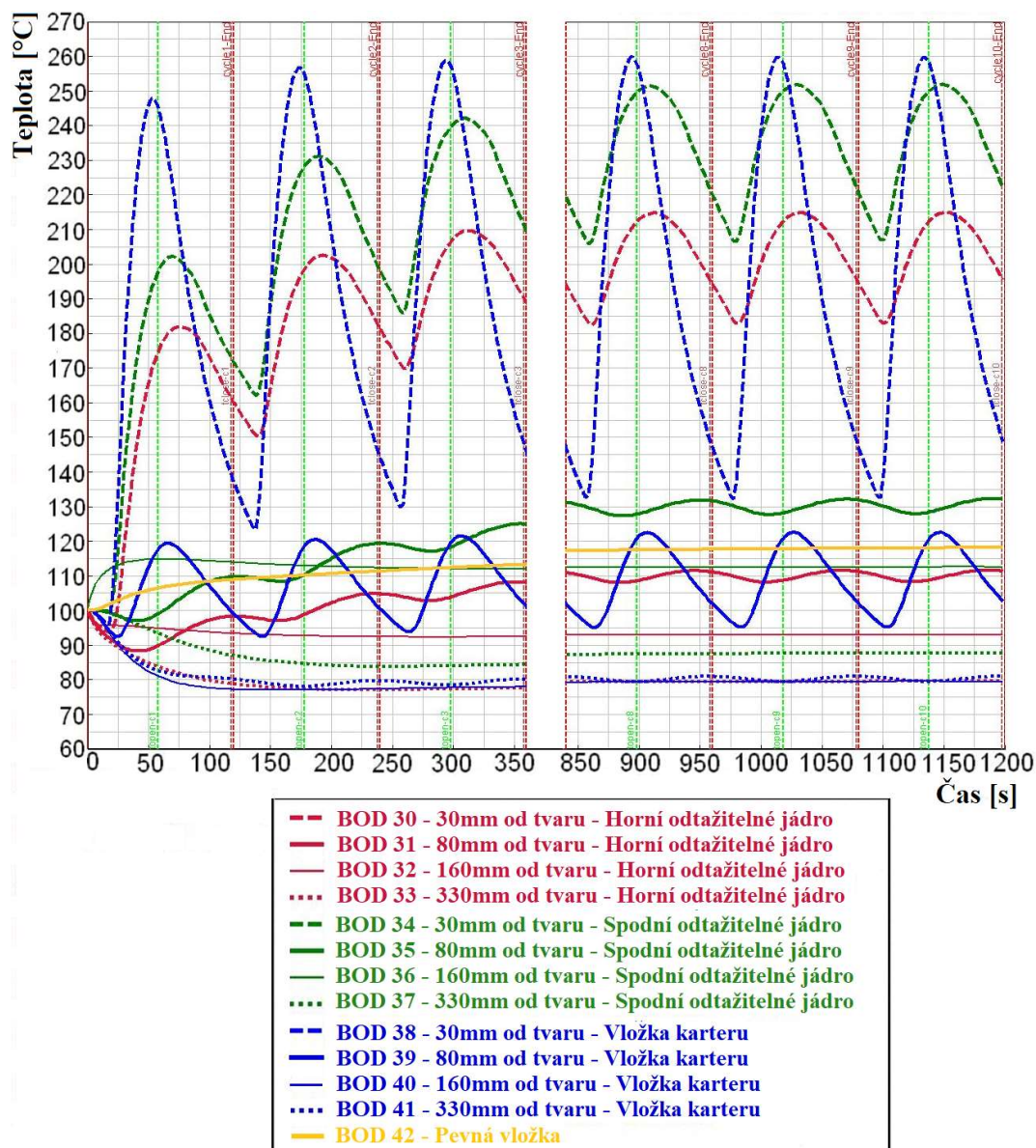
Pro popsání tepelného pole byla zvolena zjednodušená termální analýza, přičemž vstupy do termální analýzy jsou brány na základě hodnot z obrázků 52, 53. Okrajové podmínky v podobě teploty byly zadány na plochy líce formy a chladicí kanály. Nebylo však dosaženo stejných výsledků jako na obrázku 52 a to hlavně z důvodu, že vysoká teplota líce formy prostupovala hluboko do objemu a nebylo tak dodrženo rychlé ochlazení v prvních desítkách milimetrů. Z tohoto důvodu byla teplota aproximována tak, aby seděly teploty na většině objemu součástí. Při provádění termální analýzy bylo tedy nezbytné zanedbat počáteční gradient teploty a bylo uvažováno teplotní pole přibližně od ustálené hodnoty tedy 80 mm. Pro zohlednění alespoň částečné dilatace teplotního gradientu byla celková teplota navýšena přibližně o 5–10 °C. Použité teplotní pole lze vidět na obrázku 54.



Obrázek 52: Mapa teplotního pole v řezu formou, v čase 120 s (fáze uzavření) [11]

Na obrázku 52 je možno vidět, teplotní pole v řezu formou na konci 10. cyklu, tedy v okamžik, kdy je forma nateperována na pracovní teplotu. V této fázi teplota již plně prostoupila do všech částí formy. Z obrázku je patrné, že největší teplotní gradienty se nacházejí v blízkém okolí líce formy (místo styku formy s taveninou) a v největším objemu je teplotní gradient velice malý. Na základě tohoto bylo předpokládáno, že nedojde k výraznému ovlivnění výsledného napětí, při zanedbání počátečního teplotního gradientu. Rovněž je nutné podotknout, že zobrazená část, má pouhých 330 mm, přičemž celková velikost pohyblivého jádra od líce formy je přibližně 500 mm. Na stejném obrázku lze dále vidět čísla bodů, pro které byl vytvořený graf na obrázku 53. Teploty na spojkovém jádru vycházejí z řezu kolmého na současně zobrazenou rovinu, který se v práci z důvodu stručnosti nevyskytuje.

Obrázek 53 znázorňuje průběh teploty v jednotlivých bodech v průběhu 10 cyklů, přičemž jsou v práci kvůli přehlednosti uvedeny pouze první a poslední tři cykly. V grafu jsou pomocí svislých tečkovaných čar označeny dva zatěžovací stavy, a to uzavření formy (červeně) a vstřík taveniny do dutiny formy (zeleně).

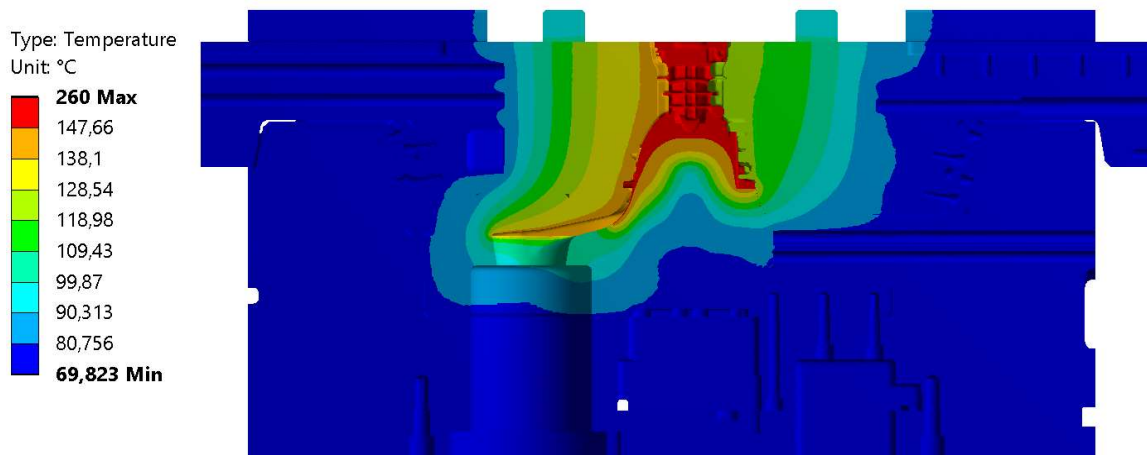


Obrázek 53: Graf popisující průběh teploty v závislosti na čase
První část popisuje první 1. - 3. cyklus, ve druhé části je 7. - 10 cyklus [11]

Z obrázku je patrné, že největší teplotní gradienty jsou na vložce karteru a spodním odtažovatelném jádru. Dále je možné vyčíst, že ve vzdálenosti 80 mm od líce formy, se v závislosti na čase teplota již nijak významně nemění. Z kapacitních důvodů zde není uveden graf pro druhou rovinu, ten bude pouze slovně okomentován. Z druhého grafu je důležitá pouze teplota spojového odtažovatelného jádra, která dosahuje nejvyšších hodnot až 310 °C. Z grafu je rovněž vidět, že i celkový objem spojového jádra dosahuje vyšších teplot, např. ve vzdálenosti 160 mm od líce formy má jádro teplotu okolo 160 °C, přičemž, jak lze vidět na obrázku 53, v této vzdálenosti má většina dílu maximální teplotu 120 °C.

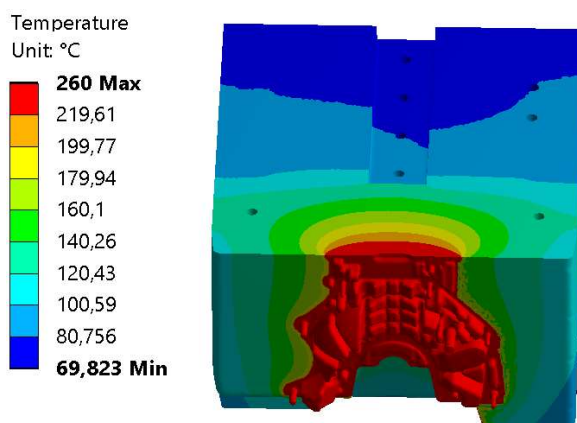
Na obrázku 54 je znázorněno výsledné teplotní pole vypočtené termální analýzou. Jak již bylo výše uvedeno, a z obrázku je to rovněž patrné, nepodařilo se u pravého a levého

odtahovatelného jádra postihnout vysoký gradient teploty v blízkosti líce formy. Z tohoto důvodu, byla na líce těchto jader zadána nižší teplota, která lépe popisuje teplotní pole ve zbytku dané části. Na pevný rám pak byla zadána teplota 80 °C, což odpovídá temperační teplotě formy, viz kapitola 3.5.3.



Obrázek 54: Termální analýza uzavírací fáze

Na obrázku 55 je zobrazen detail vypočteného teplotního pole na spojkovém jádru, přičemž je možné vidět, že spojkové jádro nabývá mnohem vyšších teplot než ostatní, a to hlavně z důvodu, že se v tomto případě podařilo lépe vystihnout proměnlivost teploty v blízkosti líce formy.



Obrázek 55: Termální analýza uzavírací fáze, spojkové odtahovatelné jádro

4.4.2 Okrajové podmínky

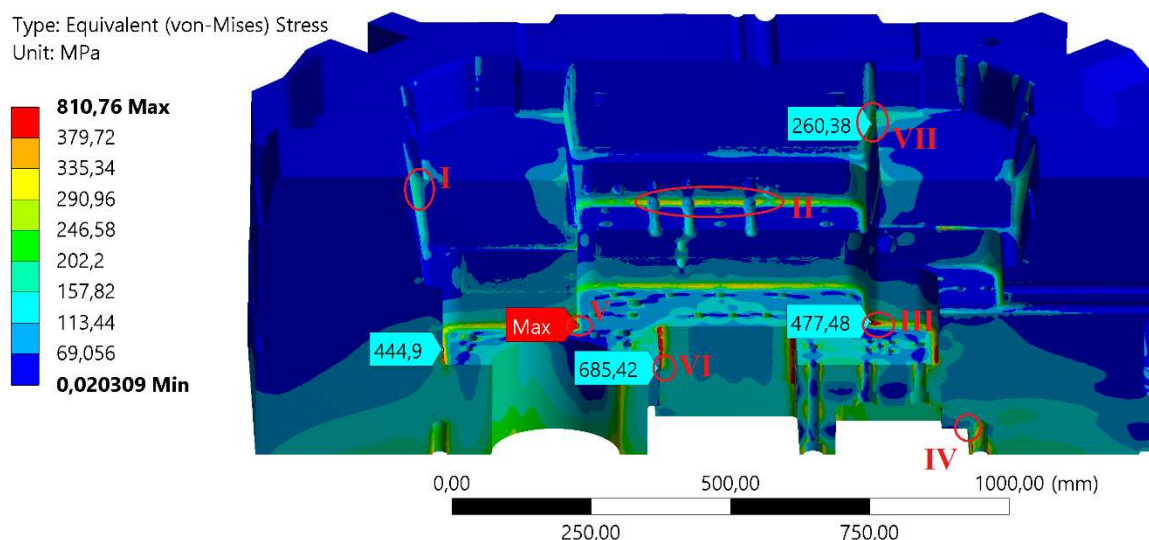
Okrajové podmínky jsou shodné s používanými podmínkami v kapitole 4.3.3, přičemž je uvažováno tepelné zatížení. Jelikož je však pohyblivá část zalisována již v ohřátém stavu, byla analýza rozdělena do dvou zatěžovacích kroků. V případě prvního kroku byly zamezeny posuvy pohyblivých jader ve směru Z (směr na dělicí rovinu) a na model bylo

zadáno teplotní zatížení. V druhém zatěžovacím kroku byla odstraněna podmínka posuvu na jádrech, namísto níž se zadala uzavírací síla. Při obou zatěžovacích stavech byly aplikovány nulové posuvy na spodní stranu podložné desky.

4.4.3 Výsledky

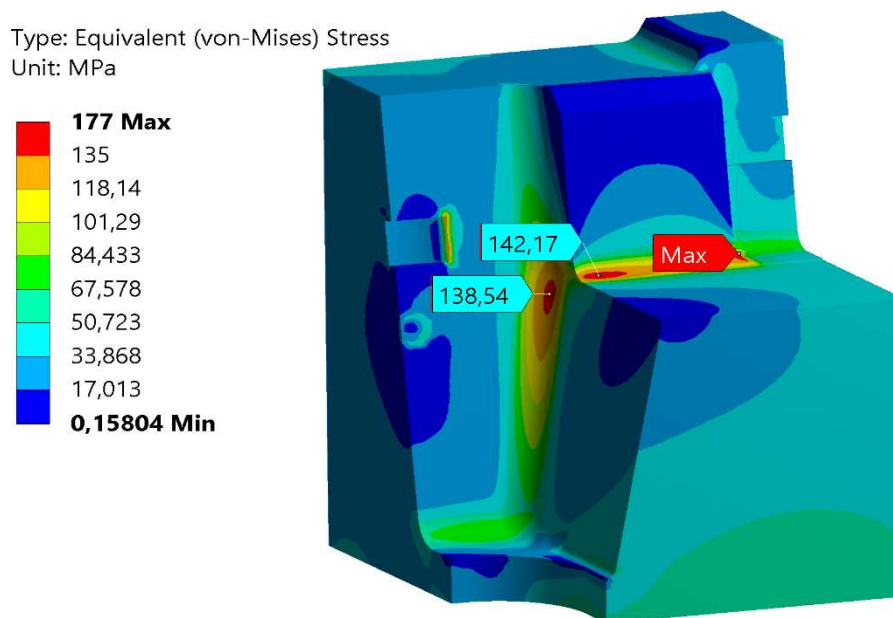
Výsledné redukované napětí v celém rámu společně s popisy kritických míst lze vyčíst z obrázku 56. Z důvodu hrubé sítě celého modelu budou výsledná napětí z kritických míst vyhodnocována pomocí submodelů. Pro větší přehlednost budou ukázána pouze nová kritická místa, případně místa, kde došlo k nějaké významné změně. Ostatní výsledky budou z důvodu stručnosti uvedeny na konci kapitoly v tabulce 7. Zatížení submodelů zůstává totožné jako v případě submodelů uvedených v kapitole 4.3.3, přičemž jsou tyto submodely navíc zatíženy teplotou 80 °C, která odpovídá teplotě pevného rámu.

Na obrázku 56 je vyobrazeno výsledné redukované napětí v rámu. Z obrázku je zřejmé, že se napětí oproti zatížení bez teploty radikálně zvýšila. Čtenář rovněž může pozorovat změnu v kritických místech, např. kritické místo (IV) v oblasti pravého spodního vybrání již se svými 300 MPa není zdaleka nejvíce namáhaným místem. Také si můžeme všimnout změny v oblasti zámků. Jelikož místo spodního zámku (I) je nyní více namáhaným místem okolí zámku spojkového (VII). Nejvyšší napětí se nachází v místě spojů spodních zaoblení (V). Nově vzniklo kritické místo v oblasti přechodu dvou zaoblení prostřední komory (VI). Dále jsou zvýrazněna místa v oblasti spodního zaoblení, z čehož můžeme usoudit, že nejvíce namáhanými místy jsou právě spodní zaoblení s maximálními hodnotami v koncentrátoch napětí (III) a (V).



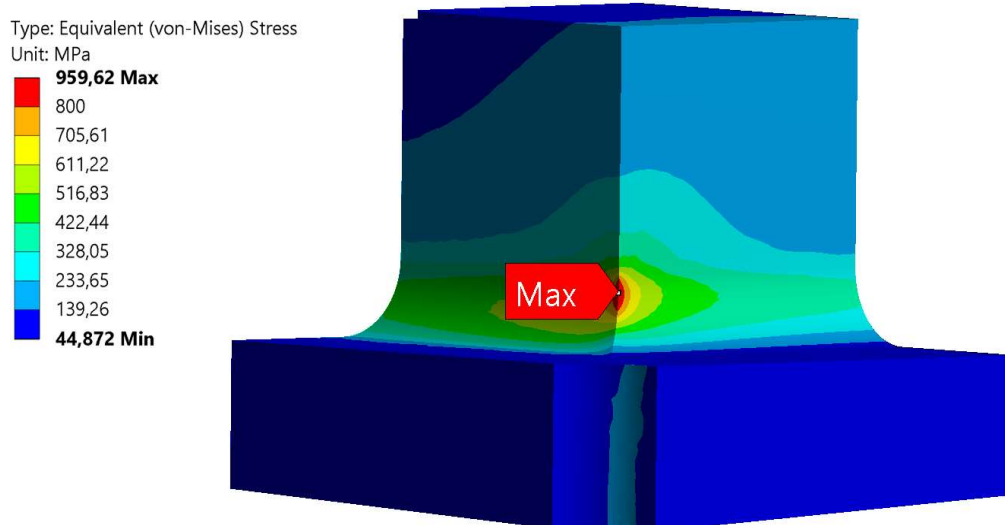
Obrázek 56: Výsledné redukované napětí von-Mises na celém rámu

Výsledné redukované napětí v oblasti prvního kritického místa (I) lze vidět na obrázku 57. Místo vykazuje nejenom zvýšené napětí, ale také změnu polohy maximálního napětí. Jak lze z obrázku vyčíst, napětí ve svislém směru dosahuje hodnoty 140 MPa, zatímco maximální napětí 177 MPa se vyskytuje v přechodu zaobleních na pravé straně. Důležitým místem je nově také vodorovné zaoblení, které v předchozí analýze nevykazovalo významná napětí, avšak pro tuto analýzu se s hodnotou napětí 142 MPa stává významným.



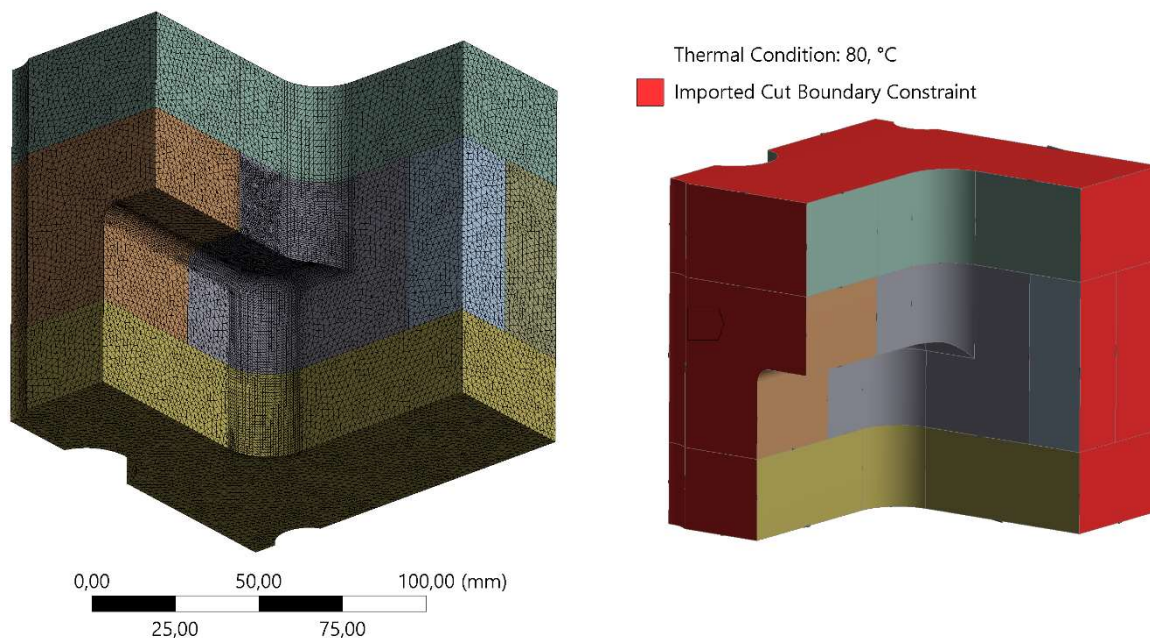
Obrázek 57: Redukované napětí von-Mises, submodel I

Na obrázku 58 lze vidět redukované napětí v místě přechodů spodních zaoblení (V), přičemž napětí v tomto místě dosahuje hodnoty až 960 MPa. Jedná se tedy o nejkritičtější místo pevného rámu.



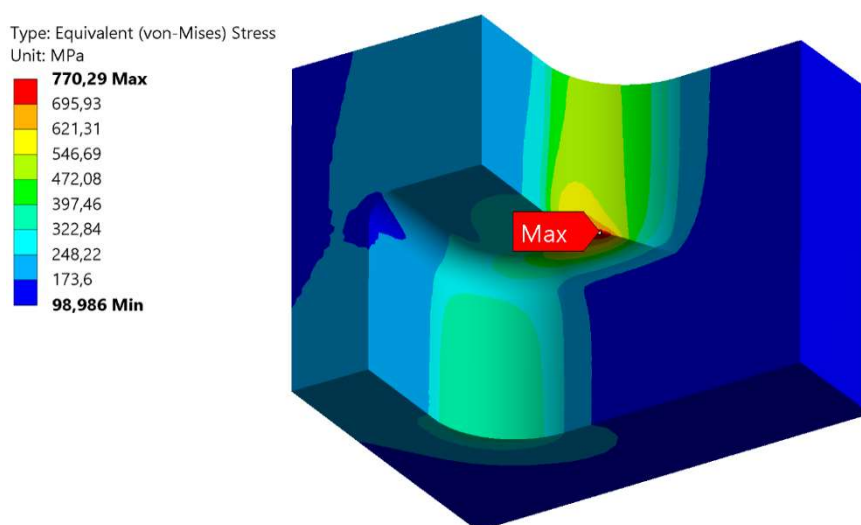
Obrázek 58: Redukované napětí von-Mises, kritické místo V (maximální napětí)

Na obrázku 59 je možno vidět zatížení a síť nového kritického místa (VI), které se nachází v oblasti prostřední dutiny. Zatížení submodelu je obdobné jako v případech uvedených v kapitole 4.3, tedy pomocí převzatých posuvů z analýzy celého modelu. Jediným rozdílem v zatížení je zadání teploty 80 °C, kterým byl zatížen celý submodel.



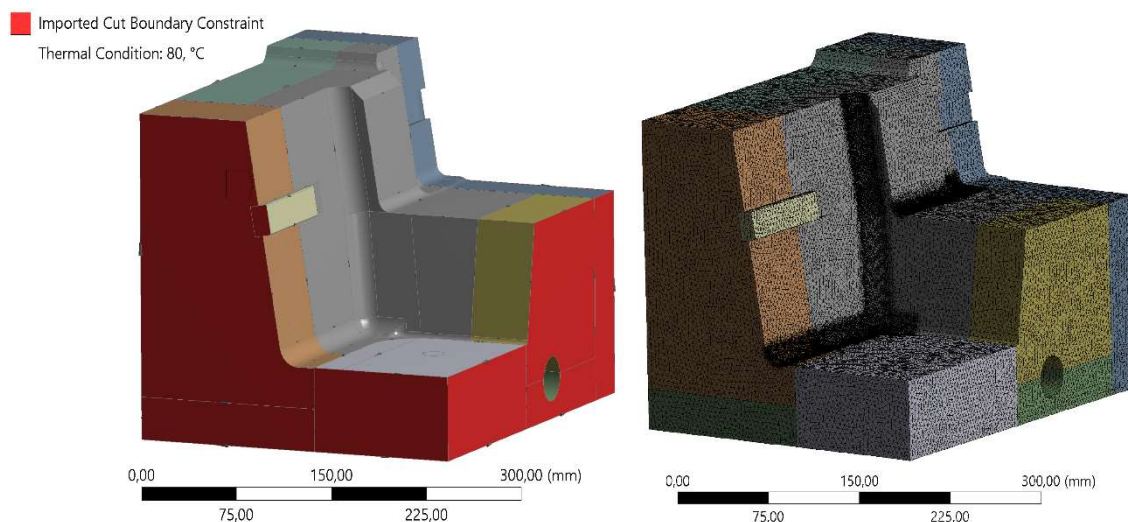
Obrázek 59: Zatížení a síť submodelu VI (oblast prostřední komory)

Obrázek 60 vyobrazuje redukované napětí v kritickém místě (VI), které dosahuje hodnoty až 770 MPa. Vzhledem k takto vysokému napětí můžeme považovat toto kritické místo za druhé nejvíce namáhané.



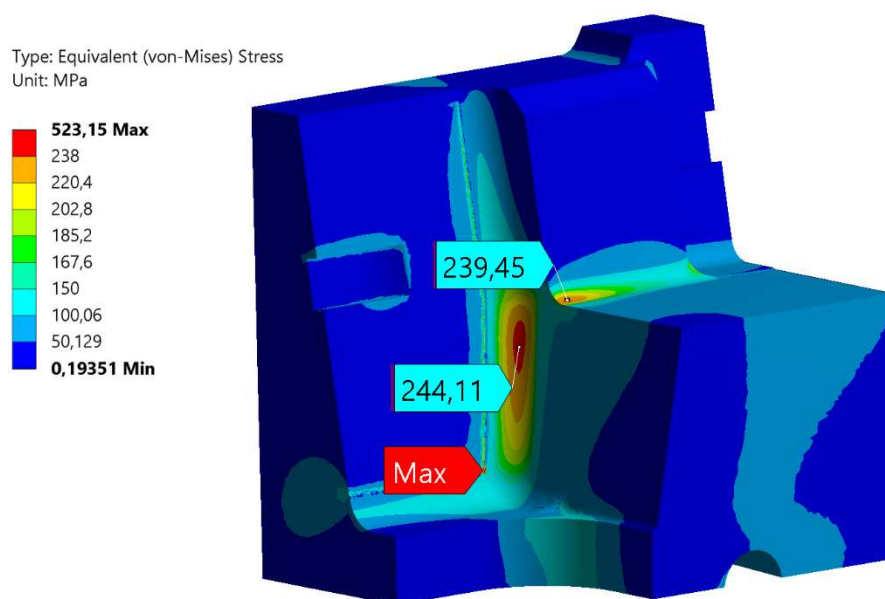
Obrázek 60: Redukované napětí von-Mises submodelu VI

Zatížení posledního kritického místa (VII), které se nachází v oblasti pravého spoj-
kového zámku, je zobrazeno na obrázku 61. Submodel je zatížen stejně jako v případě
zámku spodního, avšak s tím rozdílem, že na boční straně není aplikována podmínka fricti-
onless support, ale jsou zde importovány posuvy z analýzy celého modelu.



Obrázek 61: Zatížení a síť submodelu VII (oblast spojkového zámku)

Redukované napětí na submodelu VII lze vidět na obrázku 62, přičemž nejvyšší
napětí o hodnotě 244 MPa se nachází na vnitřním svislém zaoblení. Druhá nejvyšší hodnota
240 MPa je v místě vodorovného zaoblení. Maximální napětí 523 MPa, je stejně jako v pří-
padech v kapitole 4.3 vyvoláno pouze numerickými kontaktními problémy. Jelikož v tomto
místě není očekáváno významné namáhání, je možné výsledky z řešení vyloučit.



Obrázek 62: Redukované napětí von-Mises, submodel VII

4.4.4 Porovnání zatížení s teplotou a bez teploty

Teplotní pole, kterým byla součást zatížena je v hodně aspektech idealizováno. Největší chybou zanesenou do výpočtu, je nerespektování gradientu teploty v okolí líce formy. Z tohoto důvodu by bylo vhodné vytvořit detailnější termální analýzu, která by lépe dokázala podchytit změny teploty ve formě, což z časových důvodů není možné a otevírá se zde tak prostor pro další diplomovou práci. Dalšími vlivy na teplotní pole by mohlo být například zadání teploty 80 °C na celý pevný rám, nebo uvažování teploty kanálů chlazení stejných jako je teplota chladicího media.

Z výše uvedených obrázků vyplývá, že teplotní zatížení nám značně ovlivňuje velikost výsledného napětí. Srovnání obou analýz bude provedeno na základě tabulky 7, ve které jsou uvedeny i hodnoty z kritických míst VI a VII z analýzy bez teplot. Jelikož však v předchozí analýze nebyla tyto místa kritická, nejsou v kapitole 4.3 zmíněna a jsou zde uvedena pouze k porovnání.

Největší rozdíl v napětí mezi jednotlivými analýzami je až 770 % a to v případě kritického místa VI. Takto velký rozdíl je s největší pravděpodobností způsoben tím, že v případě neuvažování teploty, bylo toto místo zatíženo minimálně, na rozdíl od analýzy druhé, ve které je zatíženo teplotní dilatací vložky karteru. Dalším velkým rozdílem je zvýšené namáhání v oblasti spojkového zámku (VII), což je zajisté spojeno s vysokým tepelným zatížením spojkového jádra, stejně tak v případě kritického místa II.

Nejvíce namáhanými místy jsou přechody zaoblení (V) a (VI), přičemž je třeba brát v úvahu, že v použitém modelu geometrie jsou v těchto místech dokonale ostré hrany, kterých v reálném procesu zřejmě dosáhnuto nebude. Z toho vyplývá, že napětí na reálné součásti bude zřejmě nižší, než námi vypočtené napětí 960 MPa a 770 MPa.

Kritické místo	I	II	III	IV	V	VI	VII
Napětí bez teploty [MPa]	71	196	288	336	304	100	65
Napětí s teplotou [MPa]	177	484	499	320	959	770	244
Procentuální rozdíl	249%	247%	173%	95%	315%	770%	375%

Tabulka 7: Porovnání redukovaných napětí v kritických místech pro analýzu s teplotou a bez teploty

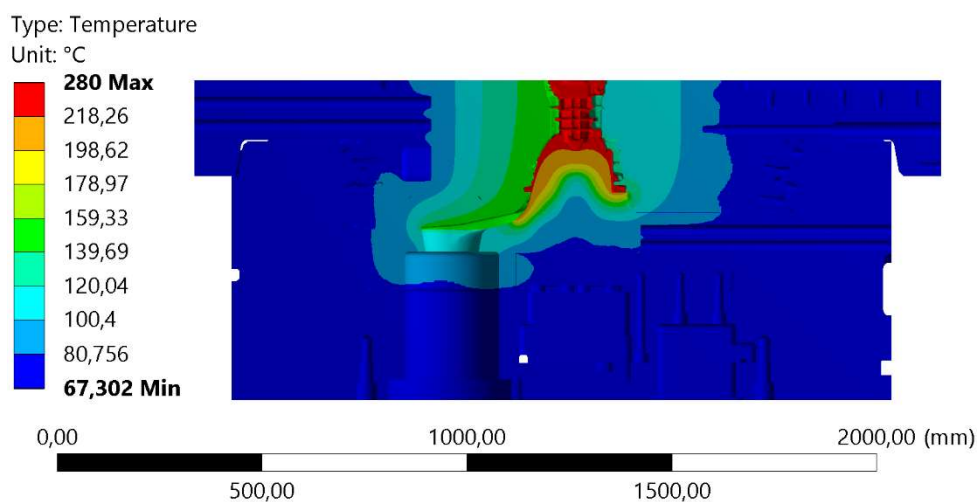
4.5 VSTRÍKNUTÍ TAVENINY DO DUTINY FORMY

Druhým zkoumaným zatěžovacím stavem je okamžik ukončení plnicí fáze. Lící forma je namáhána několika druhy zatížení, jelikož je analyzován pouze pevný rám formy, jsou pro nás dominantní pouze dvě hlavní zatížení, a to od teplotní dilatace a tlaku kovu. Pro lepší představu o tom, jaké jsou vlivy jednotlivých zatížení na namáhání pevného rámu, jsou provedeny tři analýzy. Nejprve je zjišťován vliv teplotní dilatace, dále je uvažováno zatížení tlakem, a nakonec je rám zatěžován kombinací teploty a tlaku.

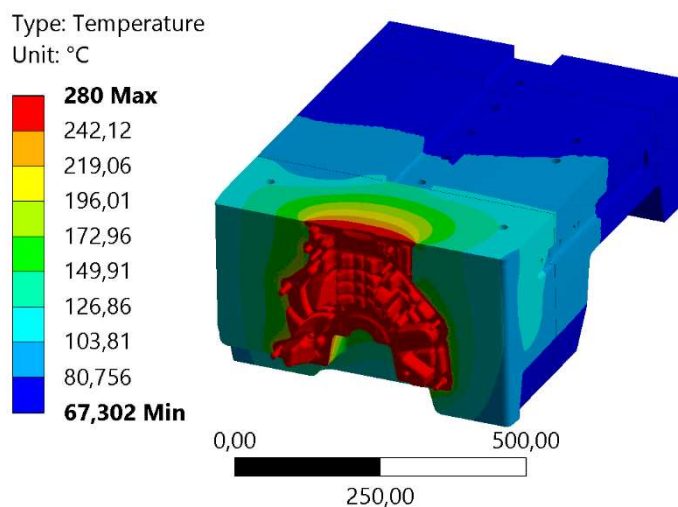
4.5.1 Zatížení teplotou

Prvním zatěžovacím stavem druhé fáze je zatížení teplotní dilataci. Nejprve je nutno určit teplotní pole, které bude počítáno stejně, jako tomu bylo v kapitole 4.4. Z grafu na obrázku 53 je zřejmé, že v průběhu cyklu se teplota výrazně mění pouze v blízkém okolí líce formy. Ve vzdálenosti přibližně 80 mm a více je možné teplotu prohlásit za téměř konstantní. Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, jednoduchou termální analýzou nelze popsat teplotní gradient v oblasti líce formy. Z tohoto důvodu je teplotní pole idealizováno dle grafu na obrázku 53 tak, ať se shoduje co možná největší část objemu materiálu.

Na obrázcích 63 a 64 lze vidět vypočtené teplotní pole, které popisuje teplotní dilataci vnitřních součástí formy v okamžiku naplnění formy taveninou. Čtenář si může všimnout zejména velkého navýšení teploty na vložce karteru, což koresponduje s grafem na obrázku 53, viz kapitola 4.4.1.



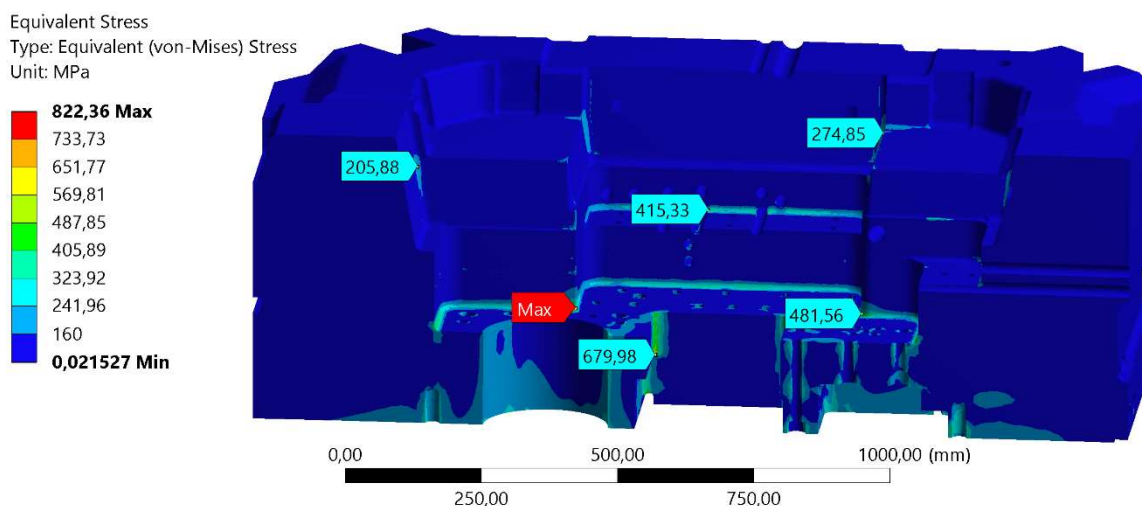
Obrázek 63: Teplotní pole při vstříknutí taveniny do dutiny formy, pohled na spodní a horní jádro, vložku karteru, pevnou vložku, vložku komory a pevný rám



Obrázek 64: Teplotní pole při vstříku taveniny do dutiny formy, pohled na spojkové jádro

Model zatížení je stejný jako v případě předchozí kapitoly, pouze s rozdílem v uzavírací síle, která je snížena v důsledku aplikace síly otevírací, což bude okomentováno v další kapitole. Uzavírací síla byla v této analýze stanovena na $F_{UZ} = 9000 \text{ kN}$.

Na obrázku 65 je možno vidět napětí v celém rámu, z čehož je patrné, že nejvíce namáhaným místem zůstává spodní spojení zaoblení (V). Z obrázku je rovněž patrné, že kritická místa se shodují s místy v kapitole 4.4. Jelikož jsou zatížení i modely geometrie submodelů totožné s kapitolou 4.4, budou z důvodu stručnosti práce napětí pro jednotlivá kritická místa uvedena pouze v tabulce 8.



Obrázek 65: Redukované napětí von-Mises, namáhání teplotním zatížením

Kritické místo	I.	II.	III.	V.	VI.	VII.
Napětí [MPa]	198	497	490	912	777	283

Tabulka 8: Redukované napětí von-Mises v kritických místech

Z tabulky 8 lze vyčíst, že teplota nemá výrazný vliv na kritická místa v oblasti zámků (I) a (VII), naopak významně zatěžuje spodní část formy, kde nejvyšší napětí dosahuje hodnoty až 912 MPa.

4.5.2 Zatížení tlakem

Další analýza se zabývá namáháním pevného rámu formy od zatížení tlakem kovu. Jak již bylo několikrát zmíněno, maximální tlak, na který je forma dimenzována, je 100 MPa. V reálném provozu se však používá tlak o pětinu nižší, tedy 80 MPa. Pro porovnání rozdílů těchto namáhání je provedena analýza obou stavů.

Primárním zatížením je tedy tlak kovu, který je zadán na všechny plochy, které jsou reálně ve styku s taveninou. Jak již bylo několikrát zmíněno, tlak kovu vyvolává otevírací sílu, jelikož však v našem modelu geometrie není uvažována horní část formy, otevírací síla není stejná jako při reálném zatěžování. Z tohoto důvodu jsme úměrně snížili uzavírací sílu pro oba tlaky, viz rovnice (19) a (20).

$$F_{UZ1} = F_{UZ} - p_{\text{návrhový}} \cdot S_{\text{chybějící}} = 1,05 \cdot 10^7 - 100 \cdot 20000 \sim 8,5 \cdot 10^6 \text{ N} \quad (19)$$

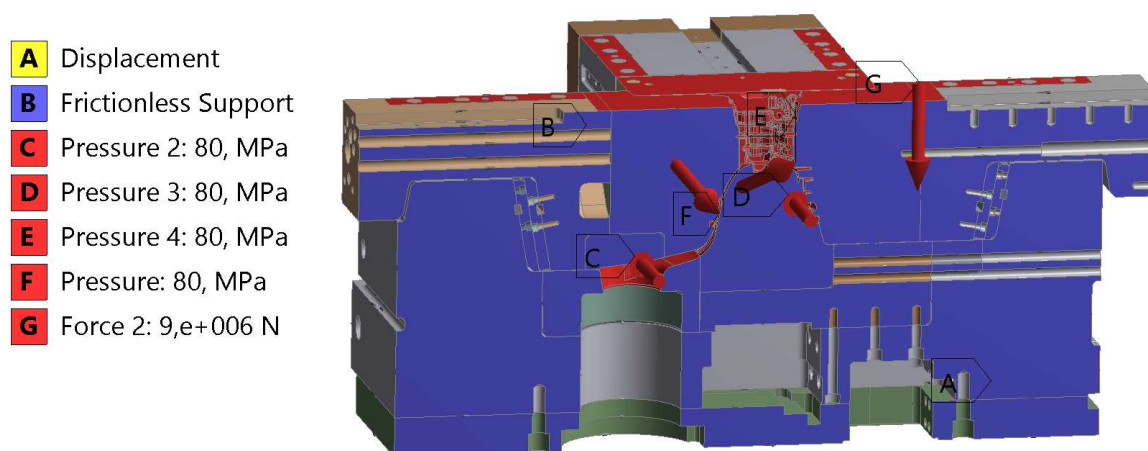
$$F_{UZ2} = F_{UZ} - p_{\text{provozní}} \cdot S_{\text{chybějící}} = 1,05 \cdot 10^7 - 80 \cdot 20000 \sim 9 \cdot 10^6 \text{ N} \quad (20)$$

F_{UZ} – uzavírací síla (stanovena v kapitole 3.6.1)

p – tlak návrhový a provozní

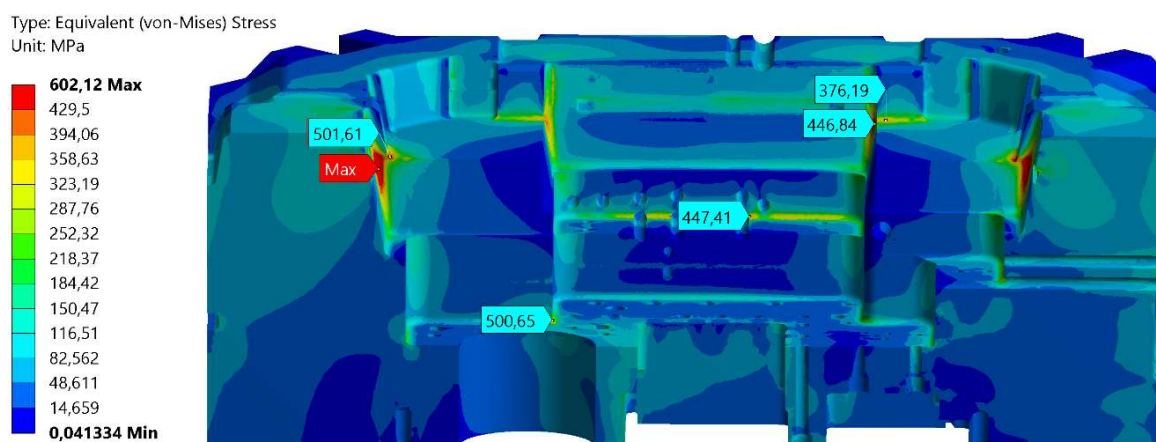
$S_{\text{chybějící}}$ – plocha, na kterou působí tlak, avšak náš výpočtový model ji nezahrnuje

Analýza je rozdělena do dvou fází, přičemž v první fázi je forma zatížena pouze uzavírací silou, která zajišťuje zalisování zámků. V druhém zátěžném kroku je aplikován tlak 80 MPa nebo 100 MPa, viz obrázek 66.



Obrázek 66: Zatížení tlakem a uzavírací silou

Na obrázku 67 lze vidět napětí celého rámu zatíženého tlakem 80 MPa. Z obrázku je zřejmé, že tlak namáhá formu nejvíce v oblasti zámků. Detailní popsání kritických míst bude provedeno v tabulce 9.



Obrázek 67: Redukované napětí von-Mises, zatížení od tlaku 80 MPa

Na základě výsledných hodnot uvedených v tabulce 9 lze porovnat vliv zatížení od tlaku 80 MPa a 100 MPa na namáhání formy. Jak lze vidět, zvýšení tlaku o 20 MPa má významný vliv na celkovou napjatost formy. Lze si také všimnout, že tlakové zatížení má vliv zejména na horní polovinu pevného rámu v oblastech zámků.

Kritické místo	Tlak [MPa]	I.	II.	III.	V.	VI.	VII.
Napětí [MPa]	100	886	758	302	728	391	712
Napětí [MPa]	80	640	591	277	552	314	486

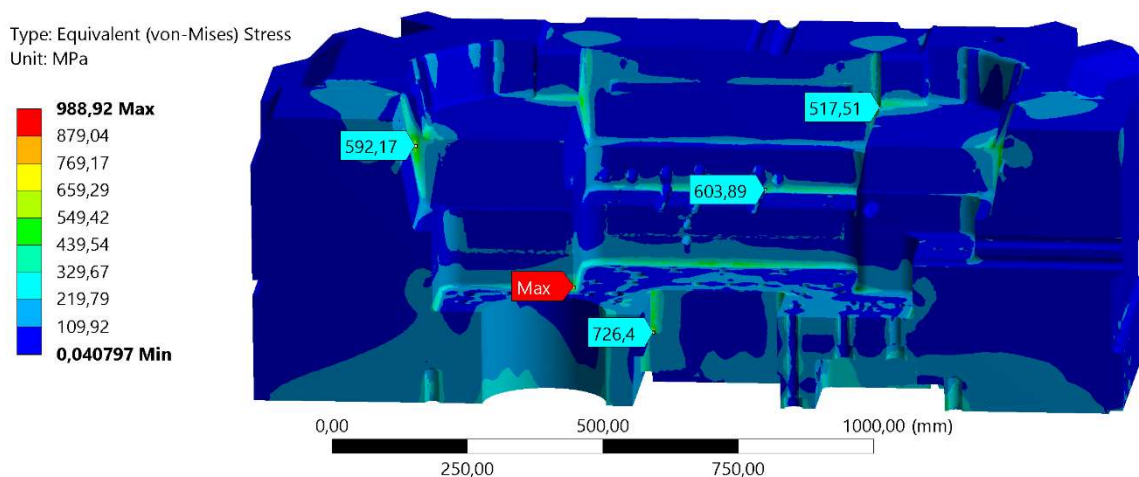
Tabulka 9: Redukované napětí von-Mises v kritických místech, zatížení tlakem a uzavírací silou

Nejvíce namáhaným místem je oblast spodního zámku, přičemž nejvyšší napětí je ve vodorovném zaoblení nikoliv ve svislém, jak lze vidět na obrázku 67. Detailněji bude tato problematika rozebrána v další kapitole.

4.5.3 Zatížení kombinací teploty a tlaku

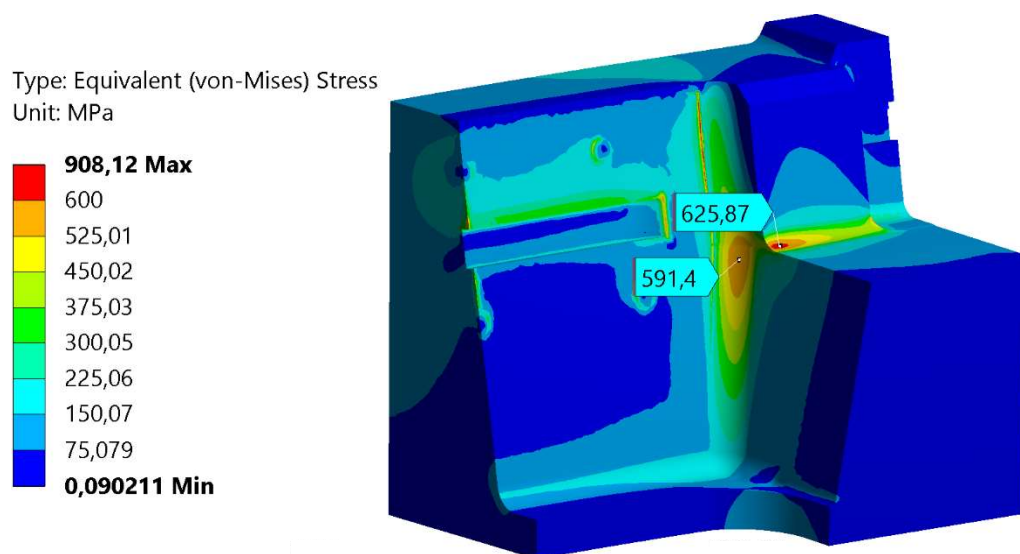
Dále bude uvažováno kombinované zatížení teplotou a tlakem. Stejně jako tomu bylo v předchozí kapitole, budou vytvořeny dvě analýzy zabývající se zkoumáním tlaku provozního a návrhového. Druhým zatížením pro obě analýzy stejným je teplotní zatížení, které bylo detailně popsáno v kapitole 4.5.1. Jelikož byly obrázky jednotlivých zatížení již ukázány v předchozích kapitolách, není nutné zde uvádět kombinaci obou zatížení a přejdeme rovnou k obrázku 68, ve kterém je znázorněna napjatost v celém rámu při tlaku 80 MPa. Dále budou zobrazeny důležitá místa, ve kterých došlo k výrazným změnám v napětích, zbylá místa budou uvedena v tabulce 10. Napětí pro návrhový tlak 100 MPa budou z důvodu stručnosti práce uvedena rovněž pouze v tabulce 10.

Na obrázku 68 lze vidět redukované napětí na celém rámu, zatíženém teplotou a tlakem o velikosti 80 MPa. Z obrázku je patrné, že nejvyšší napětí je opět ve spoji spodních zaoblení, přičemž dalšími kritickými místy jsou oblasti přechodu zaoblení u prostřední komory a oblast spodního zámku. Pro výše zmíněná místa, budou zobrazeny detailní výsledky redukovaného napětí ze submodelu, viz obrázky 69, 70 a 71.



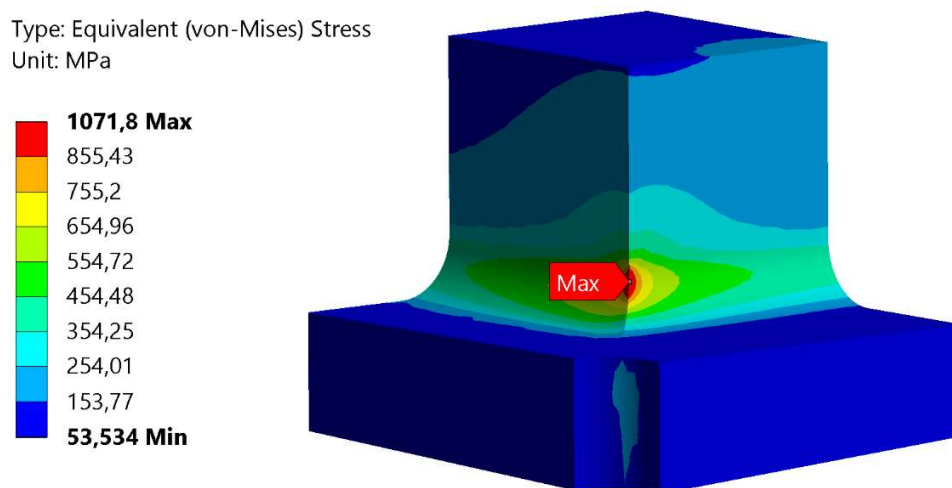
Obrázek 68: Redukované napětí von-Mises v celém rámu, zatíženém teplotou a tlakem

Redukované napětí na spodním zámku (I) lze vidět na obrázku 69. Maximální napětí se nachází na vodorovném zaoblení, nikoliv na svislém, jako tomu bylo v předchozích případech ve fázi uzavření formy.



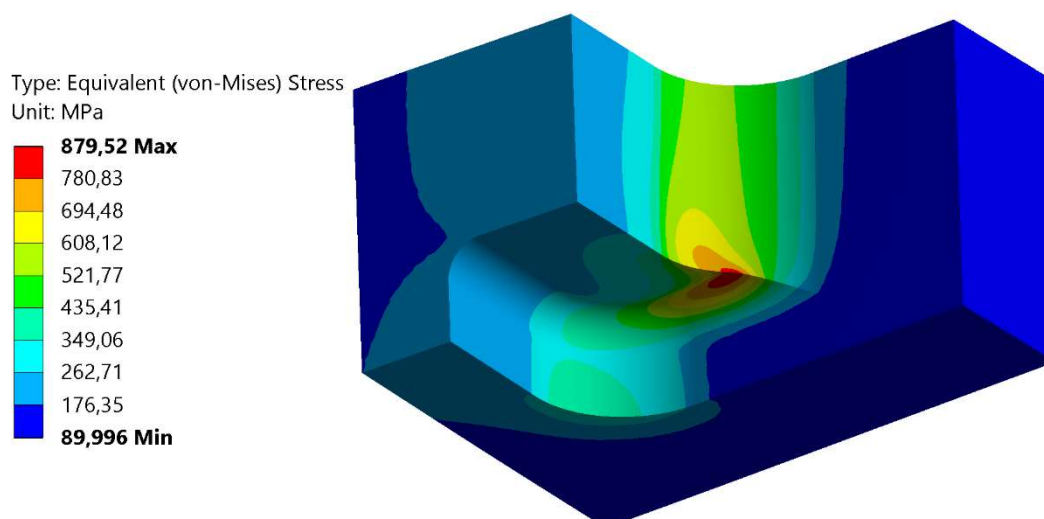
Obrázek 69: Redukované napětí von-Mises, spodní zámek (detail I)

Na dalším obrázku lze vidět místo přechodu spodních zaoblení (V), kde se vyskytuje nejvyšší napětí s hodnotou až 1072 MPa.



Obrázek 70: Redukované napětí von-Mises, přechod zaoblení (detail V)

Na obrázku 71 je zobrazeno redukované napětí na přechodu zaoblení prostředního vybrání (VI), které dosahuje hodnoty 880 MPa.



Obrázek 71: Redukované napětí von-Mises, přechod zaobelní prostřední komory (detail VI)

V tabulce 10 jsou uvedeny redukovaná napětí v kritických místech pro zatížení teplotou a tlakem 80 MPa a 100 MPa. Z tabulky lze vyčíst, že zvýšený tlak má vliv na celkovou napjatost. Nejvíce jsou ovlivněna místa v oblasti zámků, kde dosahuje napětí rozdílu až 250 MPa. Nejvyšší napětí je však stále v oblasti spodních zaoblení (V), a to s hodnotami 1190 MPa pro zatížení tlakem 100 MPa, a 1070 MPa pro zatížení tlakem 80 MPa. Druhým nejvyšším napětím je napětí v oblasti prostředního vybrání (VI), jež dosahuje hodnoty 902 MPa pro tlak 100 MPa a 860 MPa pro tlak 80 MPa.

Kritické místo	Tlak [MPa]	I.	II.	III.	V.	VI.	VII.
Napětí [MPa]	80	625	669	533	1071	861	537
Napětí [MPa]	100	878	774	500	1188	902	725

Tabulka 10: Redukované napětí von-Mises v kritických místech, pro zatížení teplotou a tlakem 80 a 100 MPa

4.6 ZPŘESNĚNÍ MODELU GEOMETRIE

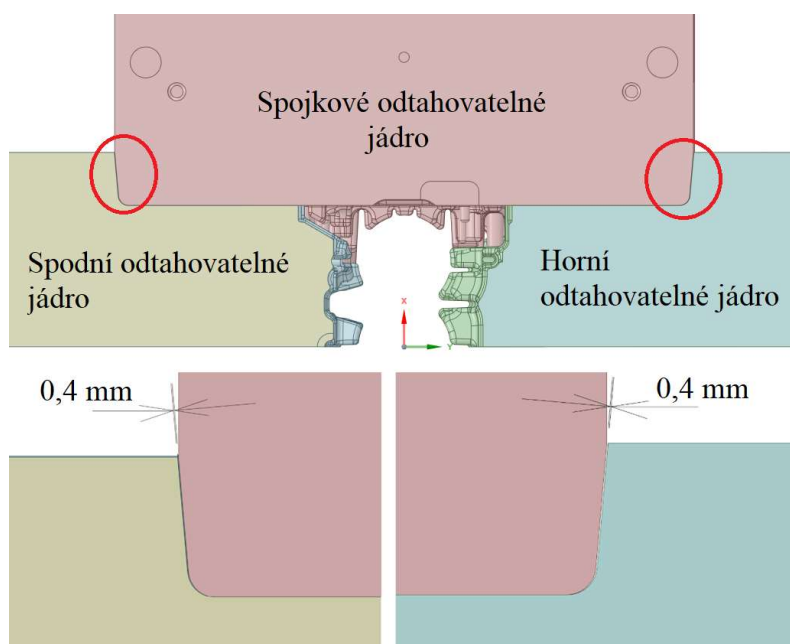
Z důvodu vysokých napětí, které místy překračovaly i hodnoty meze pevnosti, je potřeba zpřesnit model geometrie. Po konzultaci s konstruktéry Š. A. byla navrženo zohlednění výrobních vůlí. Další analýza se tedy zabývá určením napjatosti modelu geometrie se zahrnutými výrobními vřely. Přidáním vřel lze předpokládat snížení napětí od teplotního zatížení, jelikož budou mít horní a spodní odtahovatelná jádra více prostoru pro vymezení dilatace a nebudou tedy tolik zatěžovat pevný rám.

Při výpočtu analýz s vřely byl problém s konvergencí výpočtu při silovém zatěžování. Z tohoto důvodu muselo být provedeno nejprve deformační předzatížení posuvem 0,3 mm ve směru na dělicí rovinu, čímž bylo zajištěno zalisování jader a dále byl model zatížen stejně jako v předchozích kapitolách. Pro zachování stejných silových poměrů v obou analýzách, bylo nutno snížit uzavírací sílu o sílu potřebnou k zalisování jader. Velikost lisovací síly byla určena v kapitole 4.1.3. Pro model geometrie s jádry a koeficient

tření mezi pevným a pohyblivým zámkem 0,1, byla stanovena síla nutná k zalisování zámků na hodnotu $F = 380 \text{ kN}$. Pro analýzy s vůlemi jsou tedy hodnoty uzavíracích sil F_{UZI} a F_{UZZ} sníženy o sílu $F = 380 \text{ kN}$.

4.6.1 Úprava modelu geometrie

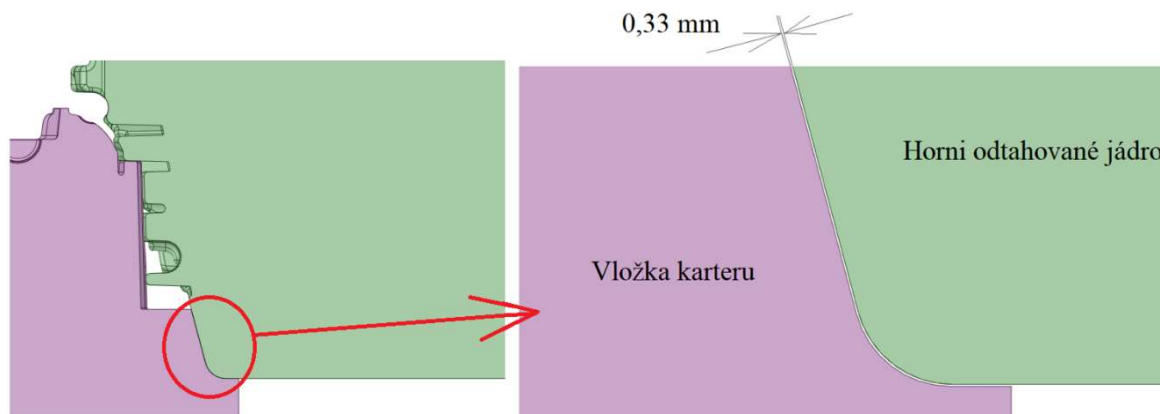
Hlavní změnou v modelu geometrie je přidání vůlí 0,4 mm ve styku spojkového jádra s jádrem horním a spodním, viz obrázek 72.



Obrázek 72: Vůle mezi spodním, resp. horním jádrem a spojkovým jádrem

Další změnou je přidání vůle 0,2 mm mezi horním jádrem a vložkou karteru, viz obrázek 73. Jelikož je však pohyblivá část nezalisována, mezi horním jádrem a dělicí rovinou je mezera 0,3 mm, což nám zvětšuje vůli v nezátíženém stavu na 0,33 mm.

Poslední úpravou geometrie je zahrnutí vůle mezi pevným a pohyblivým zámkem u spodního a horního jádra, čímž dojde ke snížení předpětí při zalisování zámků.



Obrázek 73: Vůle mezi vložkou karteru a horním odtahovaným jádrem

4.6.2 Zatížení teplotou

Z tabulky 11 lze vyčíst, že zahrnutí vřlí má významný vliv na napjatost v okolí spodního zámku, kde se snížilo napětí o 120 MPa. Dalšími rozdíly jsou snížení napětí v oblasti spojení spodních zaoblení (V) nebo prostřední komory (VI). Na druhou stranu lze pozorovat i zvýšení napětí v okolí spojkového zámku (VII) a zaoblení u spojky (II).

Kritické místo	I.	II.	III.	V.	VI.	VII.
Bez vřlí [MPa]	198	497	490	912	777	283
S vřlemi [MPa]	75	520	425	886	756	340

Tabulka 11: Redukované napětí von-Mises, zatížení od teploty pro model geometrie s vřlí a bez vřlí

4.6.3 Zatížení tlakem

Z tabulky 12 lze vyčíst, že přítomnost vřlí na namáhání tlakovým zatížením má téměř nulový vliv. Největší odchylky jsou okolo 20 MPa u spojkového a spodního jádra při tlaku 100 MPa. Čtenář si může rovněž všimnout, že v případě analýzy s vřlemi došlo ke zvýšení napětí v oblasti spodního zámku.

Kritické místo	Tlak [MPa]	I.	II.	III.	V.	VI.	VII.
Bez vřlí [MPa]	100	886	758	302	728	391	712
Bez vřlí [MPa]	80	640	591	277	552	314	486
S vřlemi [MPa]	100	904	757	301	733	388	732
S vřlemi [MPa]	80	650	595	277	557	313	497

Tabulka 12: Redukované napětí von-Mises, zatížení od tlaků pro model geometrie s vřlí a bez vřlí

4.6.4 Zatížení kombinací teploty a tlaku

Poslední analýzou bylo zjištění vlivu přidání vřlí na namáhání pevného rámu při kombinovaném zatížení teplotou a tlakem. Jak je z tabulky 13 patrné, analýza nepotvrdila stanovený předpoklad a ke snížení napětí v oblasti spodního zámku nedošlo. Naopak napětí se v místech I, II a VII ještě zvýšila, na druhou stranu došlo ke snížení napětí v místech V a VI, což jsou nejvíce namáhaná místa.

Kritické místo	Tlak [MPa]	I.	II.	III.	V.	VI.	VII.
Bez vřlí [MPa]	100	878	774	500	1188	902	725
Bez vřlí [MPa]	80	625	669	533	1071	861	537
S vřlemi [MPa]	100	907	850	550	1152	877	792
S vřlemi [MPa]	80	674	700	492	1027	698	604

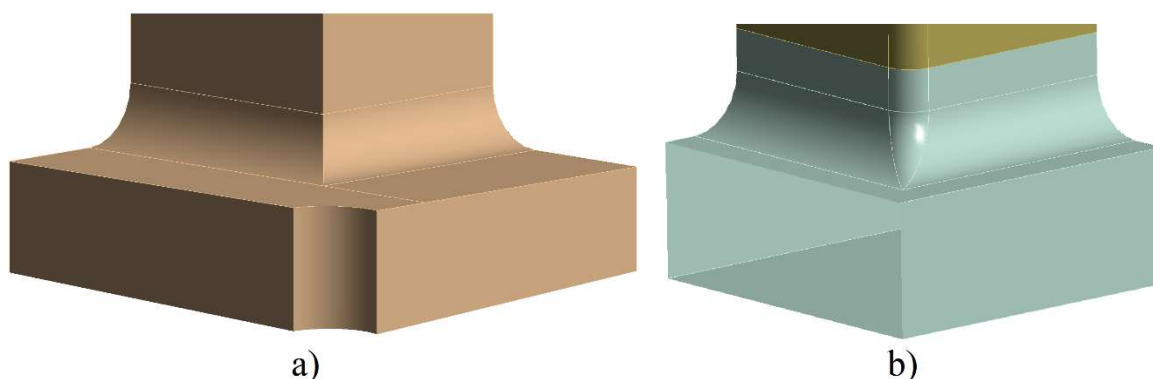
Tabulka 13: Redukované napětí von-Mises, zatížení od teploty a tlaků pro model geometrie s a bez vřlí

5 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ÚPRAV

V následující kapitole je zpracován návrh na zlepšení geometrie, což by mělo vést ke snížení napětí v kritických místech. Jelikož by velké úpravy byly finančně a časově náročné, bude navržena úprava pouze těch částí, které by nemělo být problém upravit bez velkých zásahů do geometrie součástí. Analýza upravené geometrie bude provedena pro zatížení uzavírací silou, teplotou a tlakem o velikosti 80 MPa a 100 MPa. Všechny výpočty byly provedeny na submodelech používaných v předchozích kapitolách, tudíž zde nebudou uváděny zatížení jednotlivých submodelů. Jelikož po měření a verifikaci výpočtu lze očekávat napětí nižší, než jsou vypočtena v kapitole 4.6.4, budou pro porovnávání jednotlivých úprav používány procentuální změny napětí. Lze tudíž posoudit účinnost změny geometrie i přes skutečnost, že budou napětí vyšší, než je mez kluzu.

5.1 SPOJENÍ SPODNÍCH ZAOBLENÍ (KRITICKÉ MÍSTO V)

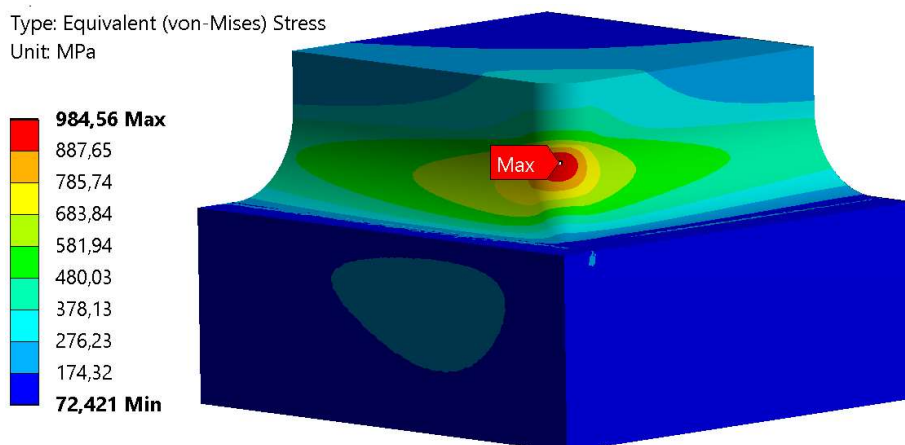
Prvním místem, pro které bude vytvořen návrh na změnu geometrie, je místo s největší koncentrací napětí. Z vypracovaných analýz lze jednoznačně považovat za nejkritičtější místo spojení dvou zaoblení (V), viz obrázek 74 a). Ke snížení koncentrace napětí je navrženo zaoblení této hrany, viz obrázek 74 b).



Obrázek 74: Porovnání úpravy geometrie. Na levé straně původní geometrie. Na pravé straně upravená geometrie se zaoblením $R = 5 \text{ mm}$

Zatížení je stejné jako v předchozích případech, tedy řezné plochy jsou zatíženy posuvy a na všechna tělesa je nastavena teplota 80 °C. Sít' byla mírně upravena, a to pouze v okolí oblasti nového zaoblení.

Na obrázku 75 lze vidět redukované napětí na námi upravené geometrii se zaoblením $R = 5 \text{ mm}$, přičemž maximální napětí dosahuje hodnoty 985 MPa.



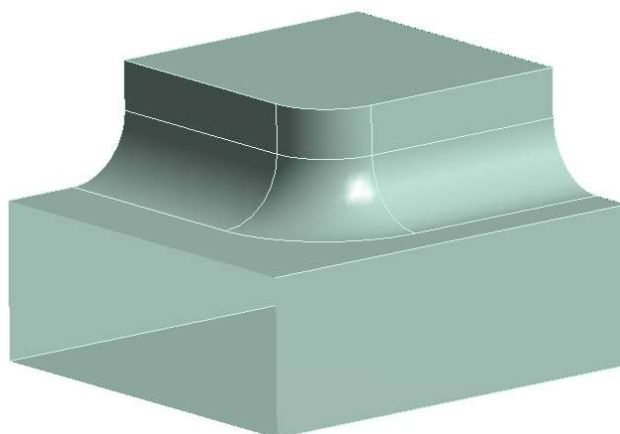
Obrázek 75: Redukované napětí von-Mises na upravené geometrii s $R = 5 \text{ mm}$

V tabulce 14 lze vidět srovnání napětí na původní geometrii a na upravené geometrii pro různé poloměry zaoblení. Čtenář si může všimnout, že již s poloměrem $R = 1 \text{ mm}$ dochází ke snížení napětí přibližně o 5 %. V případě, že by došlo k vytvoření zaoblení $R = 10 \text{ mm}$, mohlo by dle výpočtu dojít ke snížení napětí až o 19 %. Procentuální snížení se shodují jak při zatížení tlakem 80 MPa, tak při zatížení tlakem 100 MPa.

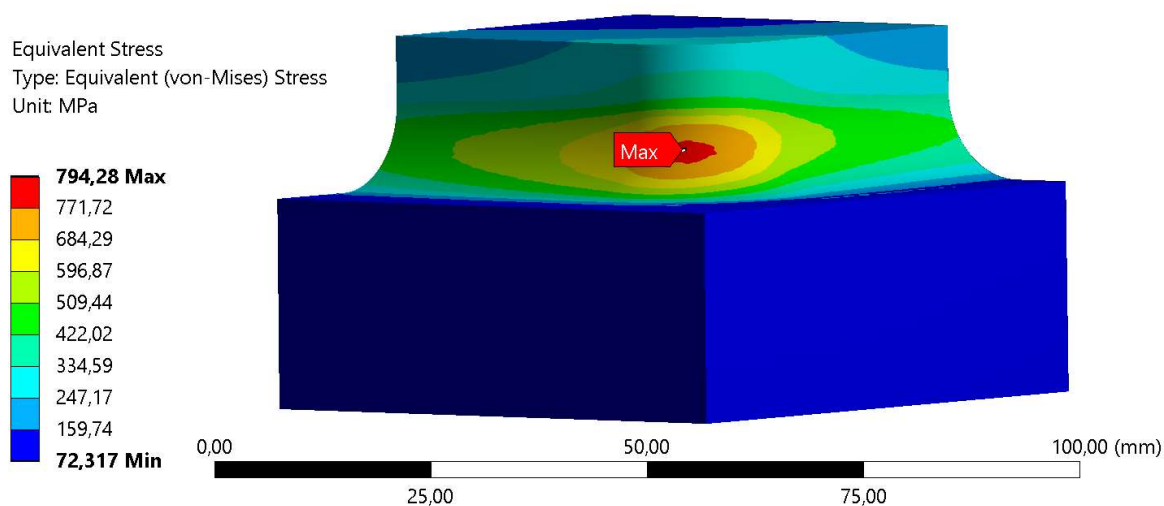
Poloměr zaoblení	Tlak [MPa]	Bez zaoblení	1 mm	5 mm	10 mm
Redukované napětí [MPa]	100	1152	1089	985	935
Rozdíl oproti neupravené geometrii [%]	100	-	5	14	19
Redukované napětí [MPa]	80	1027	971	879	837
Rozdíl oproti neupravené geometrii [%]	80	-	5	14	19

Tabulka 14: Porovnání redukovaných napětí pro neupravenou geometrii a geometrii s různými poloměry zaoblení

Další možností úpravy geometrie je zachování poloměru zaoblení. Nutné je pouze změnit jeho uspořádání, stejně jako tomu je na protější straně formy (detail III), viz obrázek 76. Díky této změně by bylo dosaženo snížení napětí až o 27 % bez toho, aniž by byl upraven poloměr zaoblení, viz obrázek 77.



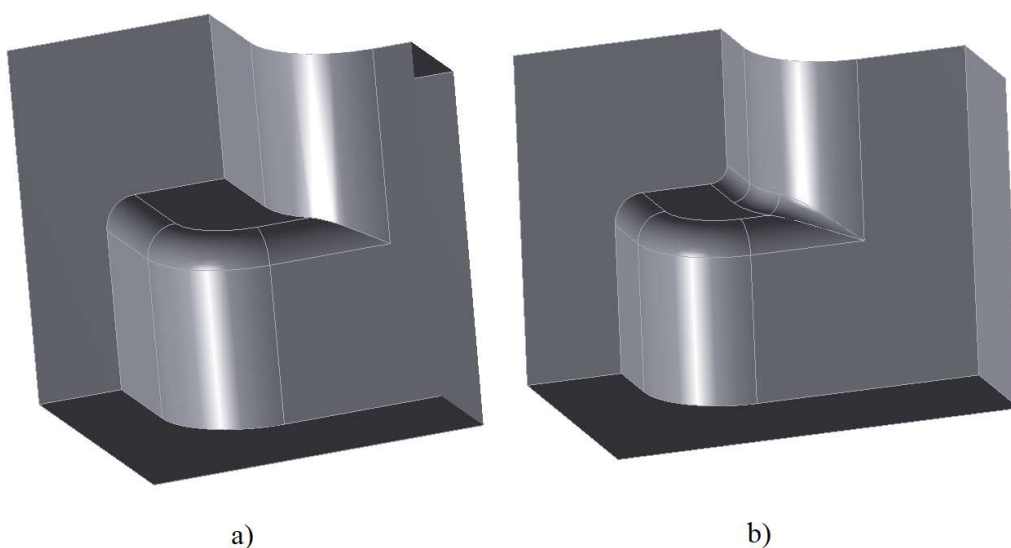
Obrázek 76: Změna uspořádání zaoblení



Obrázek 77: Redukované napětí von-Mises, změna konfigurace zaoblení

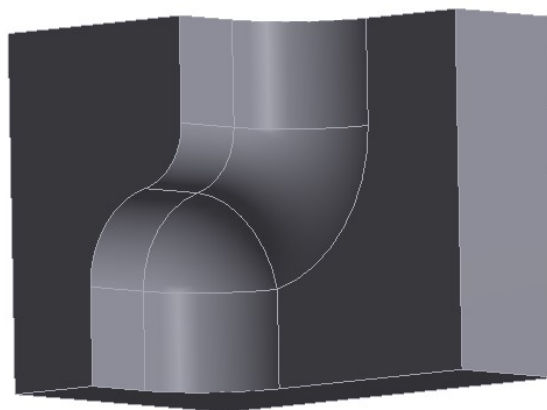
5.2 SPOJENÍ ZAOBLENÍ V OBLASTI PROSTŘEDNÍ KOMORY

Dalším významným koncentrátorem napětí je ostrá hrana v místě spojení dvou zaoblení v oblasti prostřední komory, viz obrázek 78 a). Stejně jako v předchozím případě je navrženo zjemnění přechodu použitím zaoblení, viz obrázek 78 b).



Obrázek 78: Změna geometrie v oblasti prostřední komory
a) originální geometrie, b) upravená geometrie se zaoblením $R = 5 \text{ mm}$

V tabulce 15 lze vidět procentuální rozdíl redukovaného napětí pro původní geometrii a geometrii s přidáním zaoblení. Z tabulky je patrné, že zavedením poloměru v tomto případě nedostaneme výraznou změnu napětí. Ke snížení napětí by tedy bylo nutné provést nějaké významnější změny v konstrukci formy, jako je uvedeno například v obrázku 79. Jelikož nebyl potvrzen předpoklad snížení napětí pro analýzu s tlakem 100 MPa, nebyla analýza pro tlak 80 MPa vůbec provedena.



Obrázek 79: Změna uspořádání zaoblení, poloměr 15 mm

Poloměr zaoblení	Tlak [MPa]	Bez zaoblení	1 mm	5 mm	10 mm
Redukované napětí [MPa]	100	877	873	844	828
Rozdíl oproti neupravené geometrii [%]	100	-	0	4	6

Tabulka 16: Porovnání redukovaných napětí von-Mises, pro neupravenou geometrii a geometrii s různými poloměry zaoblení

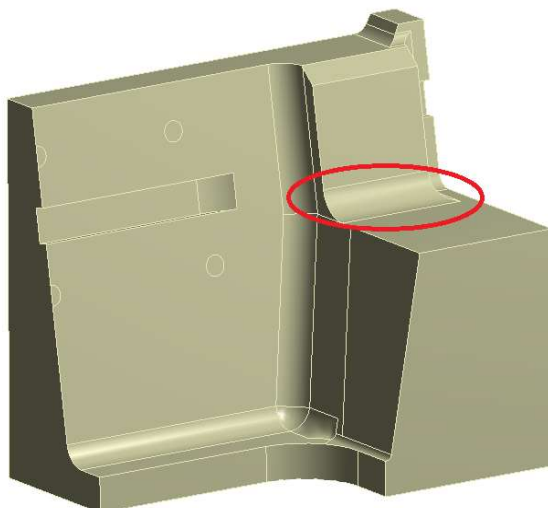
Z tabulky 16 je zřejmé, že při navrhované změně geometrie je možné pro zaoblení $R = 15$ mm snížit napětí až o 27,4 %, avšak jak lze vidět, změna nezaručuje zlepšení v každém stavu. V případě zatížení tlakem o velikosti 80 MPa je dosaženo pro zaoblení o poloměru $R = 5$ mm zvýšení napětí až o 35 %. Na základě výše zmíněných výsledků, lze konstatovat, že napětí v zaoblení prostředního vybrání není možno snížit pouhou změnou poloměru, či uspořádání, a bylo by tedy nutné provést větší zásah do konstrukce formy.

Poloměr zaoblení	Tlak [MPa]	Bez zaoblení	5 mm	10 mm	15 mm
Redukované napětí [MPa]	100	877	988	744	637
Rozdíl oproti neupravené geometrii [%]	100	-	-13	15	27,4
Redukované napětí [MPa]	80	698	940	709	608
Rozdíl oproti neupravené geometrii [%]	80	-	-35	-2	13

Tabulka 15: Porovnání redukovaných napětí von-Mises, pro neupravenou geometrii a geometrii se změnou uspořádání zaoblení a různými poloměry zaoblení

5.3 VODOROVNÉ ZAOBLLENÍ V OBLASTI ZÁMKŮ

Dalšími kritickými místy, kde může být provedena úprava geometrie bez větších zásahů do celkového návrhu, je vodorovné zaoblení v oblasti zámků, viz obrázek 80. Na základě výpočtu je navrženo zvětšení poloměru zaoblení z původní hodnoty $R = 10$ mm, na hodnotu $R = 15$ mm. Pro tuto hodnotu zaoblení již vychází napětí nižší, než je hodnota ve svislém zaoblení. Následně byla spočtena analýza pro poloměr $R = 20$ mm, pro kterou vychází snížení napětí o 24 %. Hodnota je mnohem nižší než ve svislém zaoblení, tudíž není důvod zjišťovat hodnoty napětí pro větší poloměry zaoblení, viz tabulka 17.



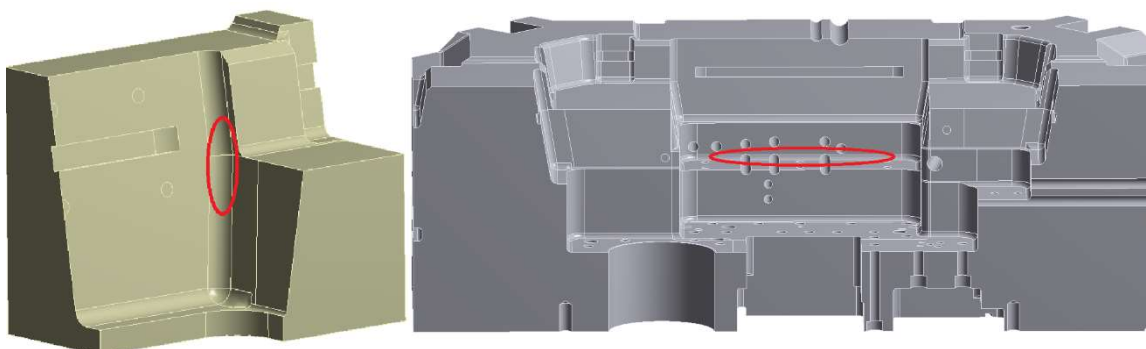
Obrázek 80: Upravovaná geometrie pro vodorovné zaoblení v oblasti zámků

Poloměr zaoblení	Tlak [MPa]	Původní 10 mm	15 mm	20 mm
Redukované napětí [MPa]	100	907	765	688
Rozdíl oproti neupravené geometrii [%]	100	-	16	24
Redukované napětí [MPa]	80	674	568	505
Rozdíl oproti neupravené geometrii [%]	80	-	16	25

Tabulka 17: Porovnání redukovaných napětí von-Mises pro neupravenou geometrii a geometrii s různými poloměry zaoblení

5.4 DALŠÍ POTENCIONÁLNÍ ZMĚNY

Dalšími místy se zvýšenou koncentrací napětí jsou svislá zaoblení v okolí zámků, a zaoblení v oblasti spojkové vložky, viz obrázek 81. Zvětšení poloměru zaoblení v těchto místech by rovněž vedlo ke snížení koncentrace napětí a tím ke zvýšení životnosti rámu.



Obrázek 81: Další potencionální místa pro úpravu

6 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

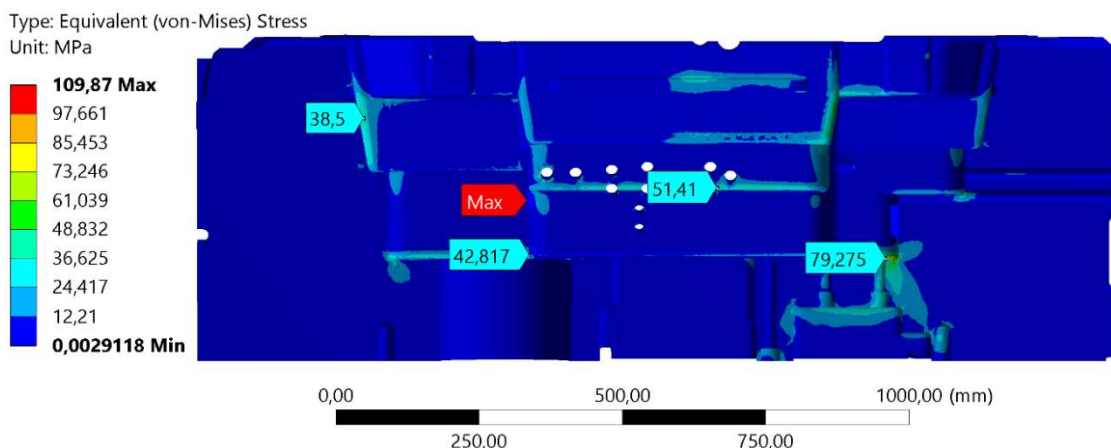
Předposlední kapitola se věnuje experimentálnímu ověření výpočtu. Měření bude navrženo a zpracováno oddělením firmy Š. A, které se zabývá různými druhy měření v rámci celé firmy. V této práci budou pouze vytipována měřící místa, přičemž samotné měření bude z kapacitních důvodů Š. A. provedeno až po odevzdání diplomové práce.

6.1 MĚŘENÍ NA SLICOVACÍM LISU

První možností je provedení verifikačního měření pouze na slicovacím lisu, na kterém se obvykle provádí kontrola přesnosti dosedacích ploch aj. Jednalo by se tedy o měření mimo provoz a nebyla by tím omezena výroba. Na druhou stranu by nebylo možné změřit vliv teploty a tlaku na namáhání pevného rámu, což jsou dle zpracované analýzy nejvýznamnější zatížení. Lze však ověřit přesnost výpočtu uzavření formy bez teploty, zatížené pouze uzavírací silou a předpětím zámků, viz kapitola 4.3.3.

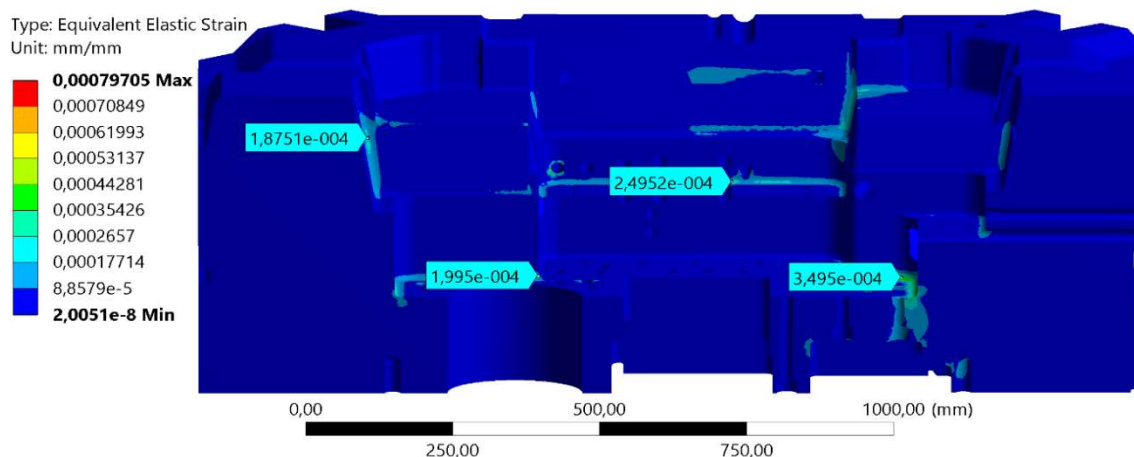
Slicovací lis je schopen vyvolat uzavírací sílu o hodnotě 400 t. Abychom měli možnost verifikovat výpočtový model s naměřenými hodnotami, byla i pro uzavírací sílu vytvořena deformačně napěťová analýza. Zatížení je totožné jako v kapitole 4.3.3 s rozdílem, že byla použita síla 2000 kN, což odpovídá polovičnímu zatížení slicovacího lisu.

Redukované napětí v celém rámu je vykresleno na obrázku 82, přičemž lze vidět, že se kritická místa shodují s vytipovanými kritickými místy. Z obrázku je však patrné, že hodnoty napětí jsou posunuty až o dva řády níže, přičemž maximální hodnota redukovaného napětí je okolo 80 MPa, a to v oblasti spodního zaoblení. Maximální napětí 109 MPa je způsobeno numerickými chybami kontaktu.



Obrázek 82: Redukované napětí von-Mises, pro zatížení od slicovacího lisu

Na obrázku 83 lze vidět redukované přetvoření od zatížení slicovacího lisu, které dosahuje maximální hodnoty 0,35 $\mu\text{m}/\text{mm}$.



Obrázek 83: Redukované přetvoření od zatížení slicovacího lisu

Z výše uvedených obrázků je očividné, že hodnoty pro měření pomocí tenzometrů jsou při zatížení slicovacím lisem velice malé a při použití obyčejného tenzometru by mohly hodnoty napětí zaniknout v šumu, který doprovází každé měření. Vzhledem k tomu, že by měření verifikovalo pouze jednu ze tří hlavních zatížení, není měření na slicovacím stroji doporučeno.

6.2 MĚŘENÍ V PROVOZU

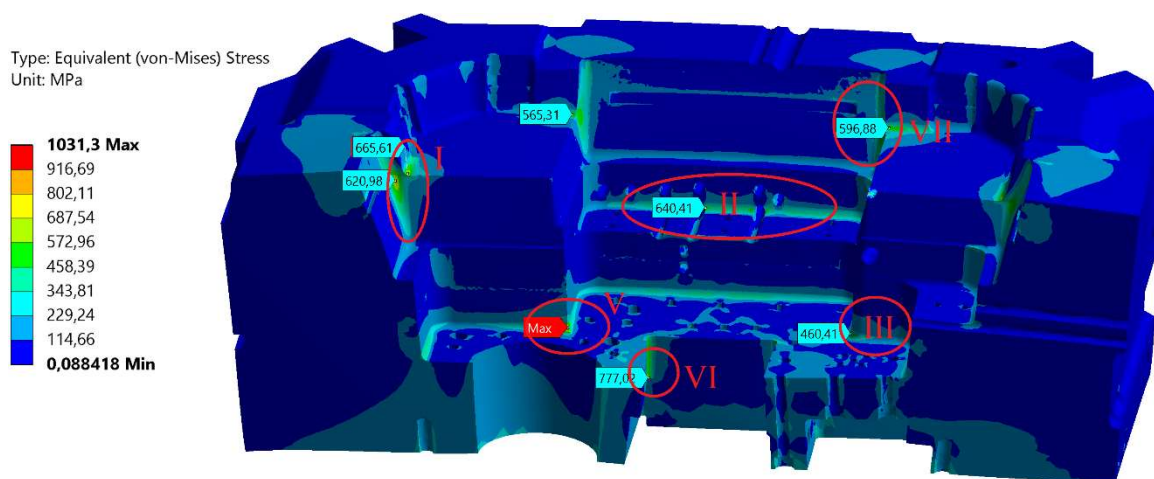
Druhou možností je měření v provozu při plném zatížení. Tato varianta je z pohledu verifikace výpočtu mnohem přijatelnější, jelikož bude měřeno namáhání formy jak při fázi uzavírání, tak při plném zatížení teplotou a tlakem. Společně se zpřesněním měření nám však přibývají komplikace, např. prostoj stroje a tím omezení výroby nebo přívod kabeláže k tenzometrickým snímačům. Všechny části formy přiléhající k zaoblení na pevném rámu jsou opatřena úkosem, prostor pro nalepení tenzometrických snímačů na pevném rámu formy tedy existuje. Pro odvod kabeláže by se teoreticky dalo použít jednoho z chladicích otvorů v pevném rámu. Nejdostupnější místo je oblast pevných zámků, kde díky prostoru mezi zámkem a pevným rámem nebude větším problémem změřit hlavní místa zájmu. Dalším komplikací bude tepelná kompenzace, jelikož v místech v okolí spodního odtahovatelného jádra bude teplota ovlivňovat měření více než v okolí pevného zámku, kde bude teplota téměř konstantní.

Z hlediska verifikace výpočtu je důležité, aby bylo měření provedeno v co možná největší blízkosti kritických míst definovaných v kapitole 4.5.3 a zároveň, aby měly tenzometrické snímače možnost teplotní kompenzace. Na základě naměřených dat bude provedena verifikace výpočtového modelu.

7 PEVNOSTNÍ POSOUZENÍ

Deformačně napěťovou analýzou byla odhalena kritická místa rámu, viz obrázek 84. Při každém konstrukčním návrhu je součást koncipována tak, aby měla co nejdelší životnost při co nejnižších počátečních investicích. Při prvotním návrhu je do součásti vložena návrhová životnost, tedy životnost, na kterou je součást navrhována. V případě tlakové lící formy je tato životnost určena na 200000 cyklů. K ověření, zda daná součást dosáhne své životnosti, je nutné provést posouzení vůči mezním stavům. Prvním posuzovaným mezním stavem je MS pružnosti. Druhým posuzovaným mezním stavem je MS únavy. Samozřejmě dále se nabízejí spousty jiných mezních stavů, např. MS lomového porušení, avšak na jejich posouzení by bylo potřeba provést rozsáhle analýzy, které by byly finančně a časově náročné.

Jelikož nejsou k dispozici napětí z měření verifikovaného výpočtu, jsme nuceni provést posouzení s neverifikovanými daty. Jelikož předpokládáme, že výsledky napětí z verifikovaného výpočtu budou nižší, jsou zde provedená posouzení spíše ukázkou, jak by mohlo posouzení vypadat.



Obrázek 84: Kritická místa pevného rámu, zatížení uzavírací silou, teplotou a tlakem 80 MPa

7.1 MS PRUŽNOSTI

Mezní stav pružnosti posuzuje, zda maximální napětí v kritickém místě překročí hodnotu napětí na mezi kluzu daného materiálu určenou v kapitole 4.1.1, viz vztah (21). Pokud maximální napětí přesáhne danou mez kluzu, dojde v místě k plastické deformaci.

$$k = \frac{Re}{\sigma_{max}} > 1 \quad (21)$$

Nejprve jsou posouzena kritická místa rámu formy ve fázi uzavření. Pevný rám je tedy zatížen pouze uzavírací silou a odpovídající teplotou, určenou v kapitole 4.4.4. Jedním místem nevyhovujícím podmínce MS pružnosti je kritické místo ve spoji spodních zaoblení (V). Lze tedy konstatovat, že na základě vypočtených napětí dojde při uzavírání formy v místě (V) k plastické deformaci, viz tabulka 18.

Kritické místo	I.	II.	III.	V.	VI.	VII.
Napětí	177	484	499	959	770	244
Koeficient bezpečnosti	4,8	1,8	1,7	0,9	1,1	3,5

Tabulka 18: Bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti, fáze 1. uzavření formy

V další části je posouzeno namáhání rámu ve fázi úplného naplnění dutiny taveninou. Součást je tedy zatížena uzavírací silou, teplotou a tlakem kovu 100 MPa. Pro toto zatížení nesplňují podmínku MS pružnosti hned tři místa, a to okolí spodního zámku (I), spojení dvou spodních zaoblení (V) a zaoblení prostředního vybrání (VI), viz tabulka 19.

Kritické místo	I.	II.	III.	V.	VI.	VII.
Napětí	907	850	550	1152	877	792
Koeficient bezpečnosti	0,9	1,0	1,5	0,7	1,0	1,1

Tabulka 19: Bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti, fáze 2. naplnění dutiny taveninou, zatížení uzavírací silou, teplotou a tlakem 100 MPa

Naposledy je posouzena součást dle MS pružnosti při zatížení uzavírací silou, teplotou a tlakem 80 MPa, přičemž podmínku nesplňuje pouze jedno kritické místo. Tímto místem je oblast spojujících se spodních zaoblení (V), viz tabulka 20.

Kritické místo	I.	II.	III.	V.	VI.	VII.
Napětí	674	700	492	1027	698	792
Koeficient bezpečnosti	1,3	1,2	1,7	0,8	1,2	1,1

Tabulka 20: Bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti, fáze 2. naplnění dutiny taveninou, zatížení uzavírací silou, teplotou a tlakem 80 MPa

7.2 MS ÚNAVY

Poslední částí je posouzení dle MS únavy, přičemž analýza je provedena vůči provoznímu zatěžovacímu stavu odpovídajícímu plnému naplnění dutiny taveninou. Součást je tedy zatížena uzavírací silou, teplotou a tlakem 80 MPa.

Pro posouzení na MS únavy existují dva základní typy přístupu. Prvním přístupem je posouzení vysokocyklové únavy, která je uvažována při návrhové životnosti součásti více než 10^5 cyklů. Druhým přístupem je posouzení nízkocyklové únavy, která se používá

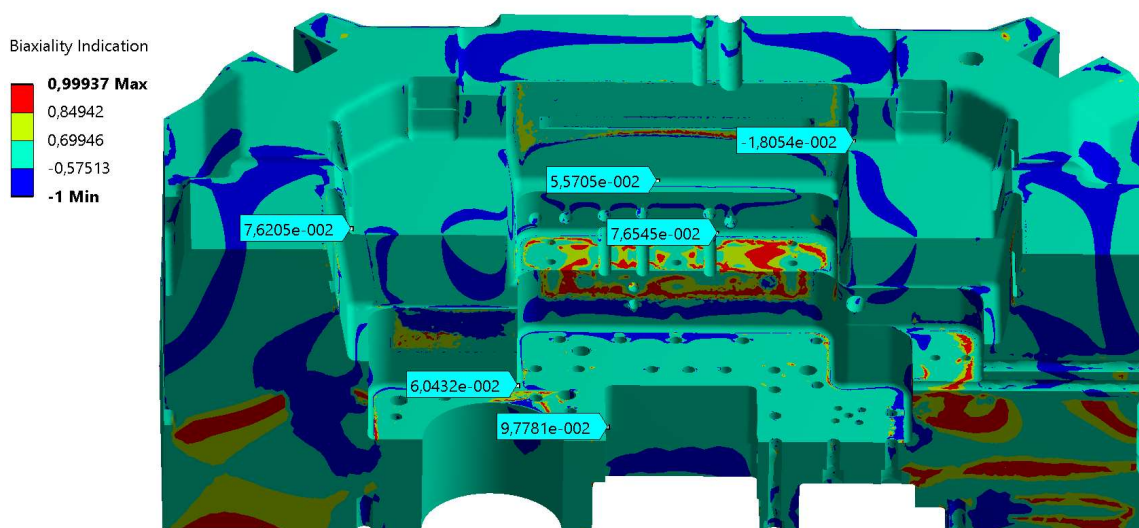
v oblasti časované únavy, zpravidla do 10^5 cyklů. Hlavním rozdílem mezi oběma koncepcemi, je uvažování plastické složky deformace v případě nízko cyklové únavy. Jelikož je návrhová životnost formy 200000 cyklů, což řádově odpovídá spíše nízkocyklové únavě a zároveň z výpočtů vychází, že v součásti bude docházet k lokální plastické deformaci, je zvolen přístup posouzení pomocí kritérií nízko-cyklové únavy. K posouzení MS únavy bude využit nástroj programu ANSYS Workbench, nazývajícím se Fatigue Tool. Pro správné posouzení je nutné, aby bylo dané místo zatěžováno jednoosou napjatostí.

Pro určení, zda je v součásti jednoosá či víceosá napjatost, lze využít faktor biaxiality, přičemž platí [18]:

Biaxiality indication = 0 (jednoosá napjatost)

Biaxiality indication = -1 (smyková napjatost)

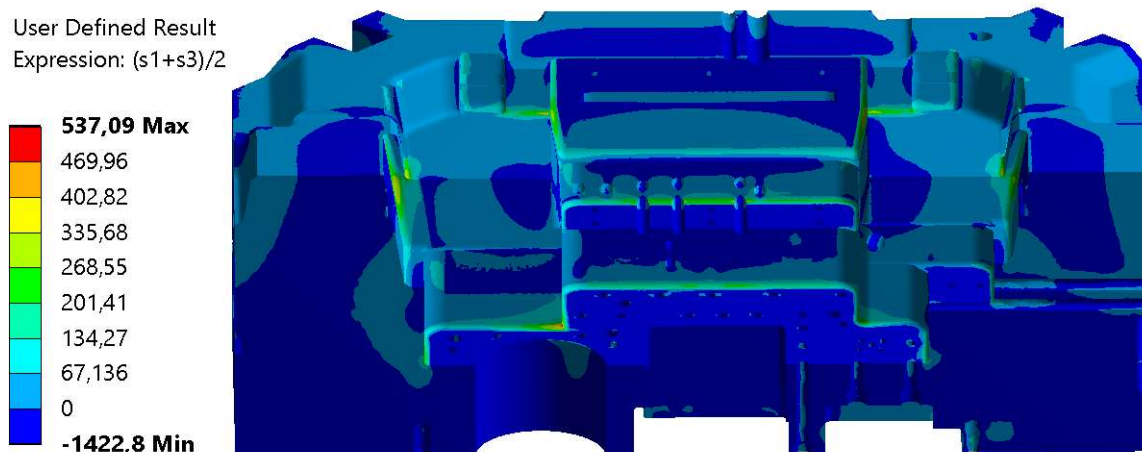
Biaxiality indication = 1 (dvouosá napjatost)



Obrázek 85: Biaxiality indication

Jak lze vidět na obrázku 85, v kritických místech se nachází jednoosá napjatost, na základě čehož lze vyhodnotit únavu pomocí nástrojů v programu ANSYS Workbench. Dále je dobré znát druh dané jednoosé napjatosti, tedy zda je tahová či tlaková, což je určováno na základě hodnoty středního napětí, viz vztah (22). V případě kladných hodnot je oblast namáhána převážně tahovými napětími, viz obrázek 86. Jak lze z obrázku vyčíst, v kritických místech pevného rámu se pohybujeme v oblasti tahové napjatosti.

$$\sigma_S = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (22)$$



Obrázek 86: Střední napětí v rámu formy

Pro popis chování v oblasti nízkocyklové únavy je používána Manson-Coffinova křivka, která je popsána v nápovědě programu ANSYS Workbench dle vztahu (23) [18]. Ve vztahu jsou použity minimálně čtyři na sobě nezávislé parametry, které je nutné zjistit experimentálním měřením. Jelikož nemáme k dispozici experimentální data z oblasti nízkocyklové únavy, budou tyto parametry odhadnuty na základě meze pevnosti a meze únavy. Mez pevnosti je definována v kapitole 4.1.1 a nabývá hodnoty $R_m = 1032 \text{ MPa}$. Druhým parametrem je mez únavy, která byla stanovena v protokolu pro tahovou a únavovou zkoušku firmou Š. A a dosahuje hodnoty $\sigma_{cr} = 220 \text{ MPa}$ pro počet cyklu $N = 1 \cdot 10^7$.

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \varepsilon'_f (2N_f)^c \quad (23)$$

Parametry popisující cyklické vlastnosti materiálu jsou definovány pomocí dvou parametrů, modulem K' a exponentem cyklického zpevnění n' . Jelikož existuje závislost mezi napětím a deformací, lze vyjádřit závislost společně s výše uvedenými parametry K', n', b, c pomocí rovnice (24) [18].

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta \sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta \sigma}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (24)$$

Hledané parametry budou odhadnuty pomocí meze pevnosti a meze únavy na základě těchto vztahů [21]:

$$\sigma'_f = 1,5 \cdot R_m = 1548 \quad (25)$$

$$b = -0,087 \quad (26)$$

$$\varepsilon'_f = 0,59 \cdot \psi = 0,488 \quad (27)$$

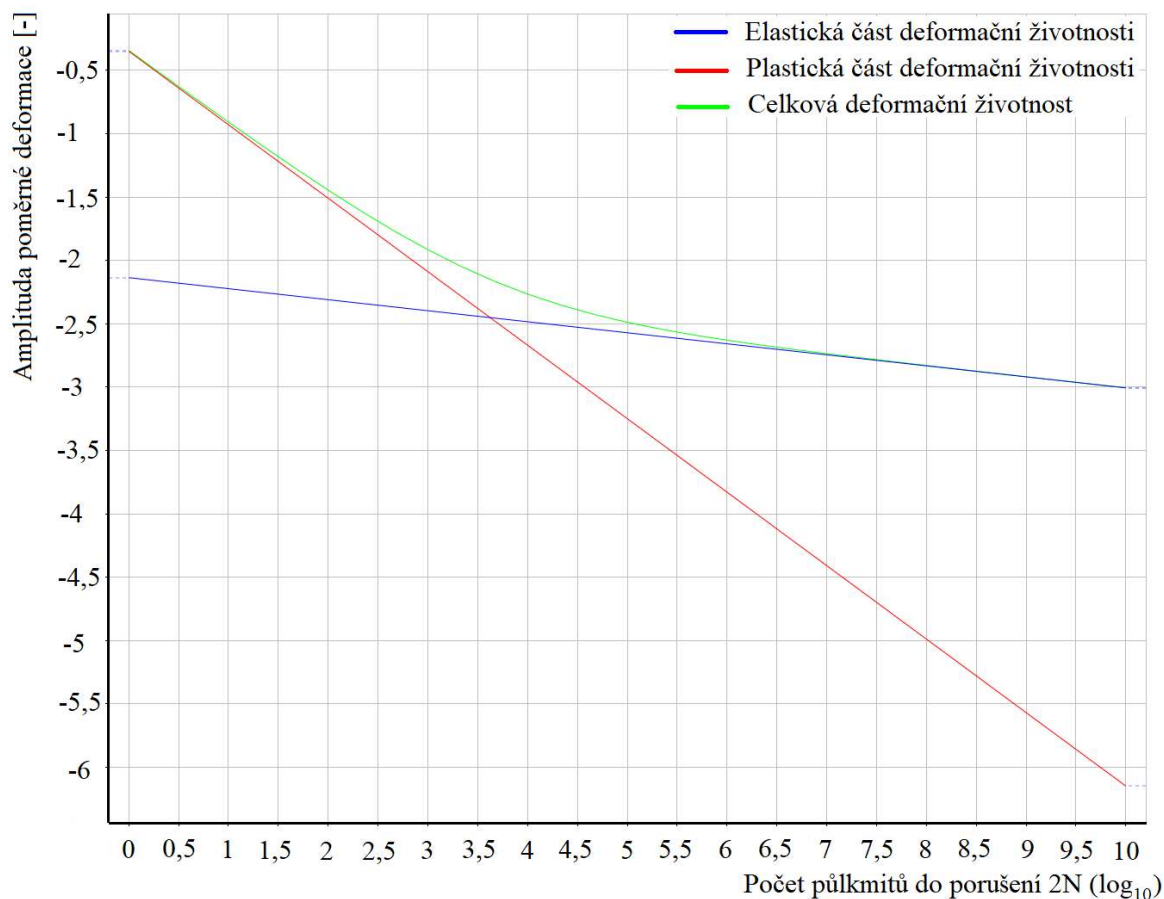
$$c = -0,58 \quad (28)$$

$$K' = 1,65 \cdot R_m = 1703 \quad (29)$$

$$n' = 0,15 \quad (30)$$

$$Kde \psi = \left(1,375 - 125 \cdot \frac{R_m}{E}\right) = 0,76 \quad pro \frac{R_m}{E} > 3 \cdot 10^{-3}$$

Na obrázku 87 lze vidět sestrojenou Manson-Coffinovou křivku programem ANSYS Workbench na základě výše vypočtených hodnot.



Obrázek 87: Manson-Coffinova křivka, vygenerována programem ANSYS Workbench

Dalšími veličinami vstupujícími do výpočtu životnosti jsou koeficient asymetrie cyklu R a únavový korekční faktor K_f . Koeficient asymetrie cyklu je vypočten pomocí vztahu (31) a korekční faktor je určen dle vztahu (32) [18] [21].

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} = \frac{0}{\sigma_{max}} = 0 \quad (31)$$

$$K_f = k_a \cdot k_c \cdot k_d = 0,73 \quad (32)$$

Při určování koeficientů uvedených v rovnici (32) je vycházeno z knihy konstruování strojních součástí, přičemž platí [22]:

$$k_a = a \cdot R_m^b = 0,717 \quad (33)$$

$$k_c = 1 \quad (34)$$

$$k_d = 1,02 \quad (35)$$

Posuzujícími kritérii MS únavy jsou únavová životnost a koeficient bezpečnosti, který je popsán ve vztahu (36) [18].

$$\frac{1}{k} = \frac{\sigma_a}{\sigma_{Eqv}} + \frac{\sigma_m}{R_m} \quad (36)$$

Kritické místo	I.	II.	III.	V.	VI.	VII.
Nejnižší počet cyklů	6,02E+05	6,50E+05	8,95E+06	2,31E+04	1,10E+05	1,83E+06
Safety factor	1,14	1,16	1,49	0,73	0,93	1,28

Tabulka 21: Posouzení únavové životnosti, fáze 2. naplnění dutiny taveninou, zatížení uzavírací silou, teplotou a tlakem 80 MPa

Na základě hodnot z tabulky 21 lze konstatovat, že všechna místa, kromě spojení spodních zaoblení (V) a zaoblení v oblasti prostředního vybrání, vyhoví návrhové životnosti 200000 cyklů. Jak již bylo zmíněno, v analyzovaném modelu geometrie se v místě (V) nachází ostrá hrana, čehož však v reálné geometrii nelze dosáhnout. V případě zaoblení u prostředního vybrání je součást zatěžována tlakově, tudíž je mnohem menší pravděpodobnost iniciace trhliny.

8 ZÁVĚR

Celá práce byla rozdělena do pěti hlavních částí. V první části byla definována problémová situace, problém a byl sepsán systém podstatných veličin. Dále bylo navázáno teoretickou částí, která měla za úkol seznámit čtenáře s problematikou vysokotlakého odlévání. Představena byla také konstrukce analyzované formy, materiály používané pro výrobu forem nebo charakteristiky lícího stroje. První část práce byla zakončena popisem normy definující základní výpočty při návrhu lící formy.

Druhá část práce se zabývala hlavním problémem, a to deformačně napěťovým výpočtem pevného rámu formy a definováním kritických míst. Jednotlivé kapitoly přesně odpovídají tomu, jak bylo v průběhu tvorby finálního výpočtového modelu postupováno. Postupně se přešlo od nejjednoduššího výpočtového modelu, kde byl rám zatěžován pouhou silou a lisováním zámeků, až k finálnímu výpočtovému modelu, ve kterém byl rám zatěžován uzavírací silou, teplotou a tlakem kovu. K simulaci teplotního zatížení bylo snahou nejprve importovat teplotní pole dodané firmou Š. A. Nepodařilo se však načíst data s dostatečnou přesností, tudíž byla vytvořena zjednodušená termální analýza popisující tepelné pole ve formě. V závěru této části byl zpřesněn výpočtový model zahrnutím výrobních vůlí.

V další kapitole bylo navrženo několik konstrukčních úprav, které by vedly ke snížení napětí v kritických místech určených v předchozí části.

Předposlední část byla věnována verifikaci výsledků. V této části byly představeny dvě možné varianty tenzometrického měření, přičemž první z nich nebyla doporučena z důvodu verifikace málo významných zatížení a nízkých hodnot přetvoření, které by mohly zvýšit nároky na měřicí techniku. V druhé variantě byl nastíněn postup provedení měření v reálném provozu, kterým bude výpočtový model verifikován.

V poslední kapitole bylo provedeno pevnostní posouzení dle MS pružnosti a MS únavy. Dle dosažených výsledků lze konstatovat, že ve dvou kritických místech napětí přesáhne dané meze kluzu a dojde k lokální plastické deformaci. Pro provozní zatížení uzavírací silou, teplotou a tlakem kovu 80 MPa byla vypočtena životnost součástí, přičemž bylo zjištěno, že ve dvou kritických místech (V) a (VI), dojde k porušení ještě před dosažením požadované životnosti. Z důvodu neverifikovaného výpočtového modelu je pevnostní posouzení diskutabilní a za věrohodné jej lze prohlásit, až po srovnání s experimentálním měřením.

Jak již bylo řečeno, hlavním cílem celé práce bylo vytvoření deformačně napěťové analýzy, na základě které, se následně zjistí kritická místa pevného rámu. Již první analýzou byla získána představa o rozložení kritických míst. S následným zvyšováním úrovně modelu se však daná kritická místa mírně měnila, přičemž bylo vytipováno 6 kritických míst, která byla dále analyzována. Pro výpočet byl použit lineární elastický model materiálu. Z tohoto důvodu bylo v nejvíce namáhaných místech dosaženo hodnoty napětí vyšší, než je mez pevnosti materiálu, což nutně neznamená, že by muselo v daném místě dojít k okamžitému porušení. S největší pravděpodobností dochází v nejvíce namáhaných místech během prvních pár cyklů k lokální plastické deformaci, díky čemuž může dojít k otupění ostré hrany a tím i ke snížení napětí.

Vhodné je také pozastavit se nad věrohodností výpočtového modelu. V průběhu zvyšování úrovně modelu, bylo pro popsání reálné součásti nutno použít jistá zjednodušení. Největší nejistota byla do výpočtu zanesena nejspíše skrz teplotní zatížení, které bylo nutno idealizovat. Jistá nepřesnost by mohla být také způsobena neuvažováním pohyblivého rámu formy, který jistě pohltí určitou část deformační energie. Všechny výše zmíněné nejistoty, zejména pak teplotní pole, by bylo vhodné dále prověřit a daly by se uvažovat jako podnět ke zpracování další diplomové práce. Tlaková lící forma je velice komplexní nástroj, na kterém by se dalo provést mnoho dalších analýz, např. vliv nepřesného zavírání pevné a pohyblivé části, nebo deformačně napěťová analýza pohyblivého rámu aj.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie litin*. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1263-1.
- [2] ROUČKA, Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
- [3] FIALA, Jakub. *Pevnostní analýza rámu tlakové licí formy*. Liberec, 2012. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Beran, CSc.
- [4] JANÍČEK, Přemysl. *Systémová metodologie: brána do řešení problémů*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2014. ISBN 978-80-7204-887-8.
- [5] ANSYS Academic Research Mechanical, Realease 19.2, Help System, Coupled Field Analysis Guide, ANSYS, Inc. b.r.
- [6] DONG, Xixi a YANG. High strength and ductility aluminium alloy processed by high pressure die casting. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. Elsevier B.V, 2019, 773, 86-96 [cit. 2019-02-10]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.09.260. ISSN 0925-8388.
- [7] RAGAN, Emil. *Liatie kovov pod tlakom*. 1. Prešov: Fakulta výrobných technológií Technickej univerzity, 2007. ISBN 9788080739799.
- [8] JINDŘICH, Valecký. *Lití kovů pod tlakem*. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [9] Animated Video of a Cold Chamber Die Casting Machine. In: Youtube.com [online]. 3250 N. Arlington Heights Rd - Ste 101, Arlington Heights, IL 60004: North American Die Casting Association, 2012 [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=JLfV_u8HRcY&ab_channel=easternalloys
- [10] RUDOLF, Bedřich. *Tvářecí stroje*. 1., *Stroje pro lití kovu pod tlakem a zpracování plastických hmot*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1969, 83 s. : il., grafy, schémata.
- [11] ŠKODA AUTO A.S., . *Firemní podklady pro technologii tlakového lití a zásady konstrukce licích forem*. Mladá Boleslav, b.r.
- [12] ŠEBL, Josef. *Formy pro lití kovu pod tlakem*. Praha: SNTL, 1962. ISBN 04-244-62.

- [13] FIALA, Jakub. Chlazení jader licí formy technologií Jet Cooling. Liberec, 2015. Diplomová. Technická univerzita v Liberci.
- [14] SVOBODA, Karel a Roman DVOŘÁK. Technologie PVD patří v řadě odvětví mezi stěžejní. MM Průmyslové spektrum. 2006, 2006(6), 4. DOI: 060627.
- [15] FORMY TLAKOVÉ LICÍ: Směrnice pro výpočty. Hradec Králové: Úřad pro normalizaci a měření, 1984.
- [16] PETRUŠKA, Jindřich. Počítačové metody mechaniky II. Brno, 2011.
- [17] HUWALDT, Joseph. Plot Digitizer [online]. In: . 2015 [cit. 2019-04-08].
- [18] Ansys Help [online]. ANSYS, Inc., 2018 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: <https://ansyshelp.ansys.com>
- [19] ProCAST [online]. ESI Group, 2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/cz/softwareva-reseni/virtualni-vyroba/slevarenstvi>
- [20] Matlab [online]. MathWorks, 2019 [cit. 2019-05-19]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [21] SHIGLEY, Joseph, Charles MISCHKE a Richard BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [22] RŮŽIČKA, Milan. Pevnost a životnost letadel. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické, 2000. ISBN 80-01-02254-4.
- [23] LEINVEBER, Jiří a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: učebnice pro školy technického zaměření. Šesté vydání. Úvaly: Albra, 2017. ISBN 9788073611118.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[%]	tažnost materiálu
b	[-]	exponent únavové pevnosti
c	[-]	exponent únavové tažnosti
E	[MPa]	modul pružnosti oceli
F _{DR}	[N]	síla dělicí roviny
F _J	[N]	síla vyvozená tlakem na jádro
F _{JY}	[N]	síla vyvozená tlakem na jádro ve směru osy y
F _{JD,JS,JH,JČ}	[N]	síly vyvolané tlakem taveniny na jádro
F _{Y JD,JS,JH,JČ}	[N]	síly vyvolané tlakem taveniny na jádro ve směru osy y
F _{OT}	[N]	otevírací síla
F _{UZ}	[N]	uzavírací síla
G	[MPa]	modul pružnosti ve smyku
k	[-]	koeficient bezpečnosti
k _a	[-]	součinitel jakosti povrchu
k _c	[-]	součinitel vlivu způsobu zatěžování
k _d	[-]	součinitel vlivu teploty
K'	[MPa]	koeficient cyklické pevnosti
K _f	[-]	korekční faktor
l	[mm]	délka
M	[N/mm]	ohybový moment
N	[-]	počet cyklů
n'	[-]	exponent cyklického zpevnění
R	[mm]	poloměr zaoblení
R	[-]	koeficient asymetrie cyklu
R _e	[MPa]	mez kluzu
R _m	[MPa]	mez pevnosti
R _{p0,2}	[MPa]	nevýrazná mez kluzu
R _{u1} , R _{u2}	[N]	reakční síly v podporách pohyblivého rámu
S _{DR}	[mm ²]	plocha dělicí roviny
S _{JD,JS,JH,JČ}	[mm ²]	plochy odtahovaných jader, jež jsou ve styku s taveninou
p	[MPa]	tlak
T	[N]	posouvající síla
u ₁ , v ₁	[mm]	vzdálenosti liniového zatížení od podpory

U_x, U_y, U_z	[mm]	posuvy ve směrech x, y, z
y_M	[mm]	průhyb od ohybového momentu
y_T	[mm]	průhyb od posouvající síly
Z	[%]	kontrakce
$\Delta\varepsilon$	[-]	dvojnásobek amplitudy deformace
$\Delta\sigma$	[MPa]	dvojnásobek amplitudy napětí
ε'_f	[-]	součinitel únavové tažnosti
φ	[°]	maximální natočení v místě podpory
μ	[-]	Poissonův poměr
σ_1	[MPa]	první hlavní napětí
σ_2	[MPa]	druhé hlavní napětí
σ_3	[MPa]	třetí hlavní napětí
σ_a	[MPa]	amplituda napětí
σ_{cr}	[MPa]	mez únavy
σ_{Eqv}	[MPa]	napětí pro předpokládaný počet cyklů
σ'_f	[MPa]	koeficient únavové pevnosti
σ_m	[MPa]	střední napětí
σ_{min}	[MPa]	minimální napětí
σ_{max}	[MPa]	maximální napětí
σ_{red}	[MPa]	redukováné napětí
σ_{tl1}	[MPa]	tlak v dělicí rovině formy při zatížení jen uzavírací silou
τ_{max}	[MPa]	maximální smykové napětí
ČSN		české technické normy
MKP		metoda konečných prvků
MS		mezní stav
Š. A.		Škoda Auto. a.s.
W.Nr		označení materiálu

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: První fáze licího cyklu [9]	7
Obrázek 2: Druhá fáze licího cyklu [9]	7
Obrázek 3: Třetí fáze licího cyklu [9]	7
Obrázek 4: Čtvrtá fáze licího cyklu [9]	7
Obrázek 5: Pátá fáze licího cyklu [9]	8
Obrázek 6: Šestá fáze licího cyklu [9].....	8
Obrázek 7: Lisovací zařízení s teplou komorou [6]	8
Obrázek 8: Lisovací zařízení se studenou komorou [7]	9
Obrázek 9: Schematické znázornění licího stroje [6].....	10
Obrázek 10: Konstrukce analyzované licí formy [11]	11
Obrázek 11: Řez uzavřenou formou.....	12
Obrázek 12: Otevření formy.....	13
Obrázek 13: Silové poměry při vstříknutí taveniny do dutiny	16
Obrázek 14: Vznik přídavné otevírací síly od pohyblivých jader	17
Obrázek 15: Dělicí rovina	19
Obrázek 16: Schematické znázornění pohyblivého rámu pro analytický výpočet [7].....	20
Obrázek 17: Tahová zkouška materiálu 15 260 s vyznačenými důležitými body	23
Obrázek 18: Působení gravitačního zrychlení na napjatost v pevném rámu formy	24
Obrázek 19: Lisování zámků.....	25
Obrázek 20: Lisovací síla - 1. model geometrie, bez pohyblivých jader	26
Obrázek 21: Lisovací síla - 2. model geometrie, s pohyblivými jádry	26
Obrázek 22: Kritická místa.....	28
Obrázek 23: Zatížení, uzavření formy - 1. Úroveň modelu geometrie	29
Obrázek 24: Síť celého modelu.....	29
Obrázek 25: Redukované napětí von-Mises - 1. úroveň modelu	30
Obrázek 26: Zatížení a síť submodelu I	30
Obrázek 27: Redukované napětí von-Mises submodelu I.....	31
Obrázek 28: Zatížení a síť submodelu II	32
Obrázek 29: Redukované napětí von-Mises submodelu II	32
Obrázek 30: Zatížení a síť submodelu III.....	33
Obrázek 31: Redukované napětí von-Mises submodelu III	33
Obrázek 32: Zatížení a síť submodelu IV, znázornění kritických míst (A), (B)	34
Obrázek 33: Redukované napětí von-Mises submodelu IV, kritické místo (A)	34

Obrázek 34: Redukované napětí von-Mises submodelu IV, kritické místo (B)	34
Obrázek 35: Zatížení, uzavření formy - 2. Úroveň modelu geometrie	35
Obrázek 36: Redukované napětí von-Mises v celém pevném rámu, model geometrie s vložkami	35
Obrázek 37: Redukované napětí von-Mises submodelu I.....	36
Obrázek 38: Zatížení a síť submodelu II.....	36
Obrázek 39: Redukované napětí von-Mises submodelu II	37
Obrázek 40: Zatížení a síť submodelu III.....	37
Obrázek 41: Redukované napětí von-Mises submodelu III	38
Obrázek 42: Redukované napětí von-Mises submodelu IV, místo (A)	38
Obrázek 43: Redukované napětí von-Mises submodelu IV, místo (B).....	38
Obrázek 44: Zatížení, uzavření formy - 3. Úroveň modelu geometrie	39
Obrázek 45: Redukované napětí von-Mises submodelu I, kritické místo I	40
Obrázek 46: Redukované napětí von-Mises submodelu II, kritické místo II.....	40
Obrázek 47: Redukované napětí von-Mises submodelu IV, kritické místo IV.....	41
Obrázek 48: Redukované napětí von-Mises submodelu III, kritické místo III.....	41
Obrázek 49: Zatížení submodelu V	42
Obrázek 50: Redukované napětí von-Mises submodelu V, kritické místo V	42
Obrázek 51: Import teplotního pole z programu ProCast do programu ANSYS.....	44
Obrázek 52: Mapa teplotního pole v řezu formou, po naterování formy(fáze uzavření) [11].....	45
Obrázek 53: Graf popisující průběh teploty v závislosti na čase [11].....	46
Obrázek 54: Termální analýza uzavírací fáze, celý model	47
Obrázek 55: Termální analýza uzavírací fáze, spojové odtahovatelné jádro	47
Obrázek 56: Výsledné redukované napětí von-Mises na celém rámu	48
Obrázek 57: Redukované napětí von-Mises, submodel I.....	49
Obrázek 58: Redukované napětí von-Mises, kritické místo V (maximální napětí)	49
Obrázek 59: Zatížení a síť submodelu VI (oblast prostřední komory)	50
Obrázek 60: Redukované napětí von-Mises submodelu VI.....	50
Obrázek 61: Zatížení a síť submodelu VII (oblast spojového zámku).....	51
Obrázek 62: Redukované napětí von-Mises, submodel VII.....	51
Obrázek 63: Teplotní pole při vstříknutí taveniny do dutiny formy, pohled na spodní a horní jádro, vložku karteru, pevnou vložku, vložku komory a pevný rám.....	53
Obrázek 64: Teplotní pole při vstříku taveniny do dutiny formy, pohled na spojové jádro	53
Obrázek 65: Redukované napětí von-Mises, namáhání teplotním zatížením	54

Obrázek 66: Zatížení tlakem a uzavírací silou	55
Obrázek 67: Redukované napětí von-Mises, zatížení od tlaku 80 MPa.....	55
Obrázek 68: Redukované napětí von-Mises v celém rámu, zatíženém teplotou a tlakem	56
Obrázek 69: Redukované napětí von-Mises, spodní zámek (detail I).....	57
Obrázek 70: Redukované napětí von-Mises, přechod zaoblení (detail V).....	57
Obrázek 71: Redukované napětí von-Mises, přechod zaobelní prostřední komory (detail VI)	58
Obrázek 72: Vůle mezi spodním, resp. horním jádrem a spojkovým jádrem	59
Obrázek 73: Vůle mezi vložkou karteru a horním odtahovaným jádrem	59
Obrázek 74: Porovnání úpravy geometrie.....	61
Obrázek 75: Redukované napětí von-Mises na upravené geometrii s $R = 5 \text{ mm}$	62
Obrázek 76: Změna uspořádání zaoblení	62
Obrázek 77: Redukované napětí von-Mises, změna konfigurace zaoblení.....	63
Obrázek 78: Změna geometrie v oblasti prostřední komory	63
Obrázek 79: Změna uspořádání zaoblení, poloměr 15 mm.....	64
Obrázek 80: Upravovaná geometrie pro vodorovné zaoblení v oblasti zámků	65
Obrázek 81: Další potencionální místa pro úpravu	65
Obrázek 82: Redukované napětí von-Mises, pro zatížení od slicovacího lisu.....	66
Obrázek 83: Redukované přetvoření od zatížení slicovacího lisu	67
Obrázek 84: Kritická místa pevného rámu, zatížení uzavírací silou, teplotou a tlakem 80 MPa.....	68
Obrázek 85: Biaxiality indication.....	70
Obrázek 86: Střední napětí v rámu formy	71
Obrázek 87: Manson-Coffinova křivka, vygenerována programem ANSYS Workbench	72

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Materiály používané k výrobě forem ve Š. A. [11].....	15
Tabulka 2: Otevírací síla	17
Tabulka 3: Materiálové charakteristiky materiálu 15 260.....	23
Tabulka 4: Koeficienty tření [23].....	25
Tabulka 5: Lisovací a uzavírací síla	27
Tabulka 6: Porovnání úrovní modelu geometrie.....	43
Tabulka 7: Porovnání redukovaných napětí v kritických místech pro analýzu s teplotou a bez teploty.....	52
Tabulka 8: Redukované napětí von-Mises v kritických místech	54
Tabulka 9: Redukované napětí von-Mises v kritických místech, zatížení tlakem a uzavírací silou.....	56
Tabulka 10: Redukované napětí von-Mises v kritických místech, pro zatížení teplotou a tlakem 80 MPa a 100 Mpa	58
Tabulka 11: Redukované napětí von-Mises, zatížení od teploty pro model geometrie s vřelí a bez vřelí.....	60
Tabulka 12: Redukované napětí von-Mises, zatížení od tlaků pro model geometrie s vřelí a bez vřelí.....	60
Tabulka 13: Redukované napětí von-Mises, zatížení od teploty a tlaků pro model geometrie s a bez vřelí	60
Tabulka 14: Porovnání redukovaných napětí pro neupravenou geometrii a geometrii s různými poloměry zaoblení.....	62
Tabulka 16: Porovnání redukovaných napětí von-Mises, pro neupravenou geometrii a geometrii se změnou uspořádání zaoblení a různými poloměry zaoblení	64
Tabulka 15: Porovnání redukovaných napětí von-Mises, pro neupravenou geometrii a geometrii s různými poloměry zaoblení	64
Tabulka 17: Porovnání redukovaných napětí von-Mises pro neupravenou geometrii a geometrii s různými poloměry zaoblení	65
Tabulka 18: Bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti, fáze 1. uzavření formy	69
Tabulka 19: Bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti, fáze 2. naplnění dutiny taveninou, zatížení uzavírací silou, teplotou a tlakem 100 MPa	69
Tabulka 20: Bezpečnost vůči meznímu stavu pružnosti, fáze 2. naplnění dutiny taveninou, zatížení uzavírací silou, teplotou a tlakem 80 MPa	69
Tabulka 21: Posouzení únavové životnosti, fáze 2. naplnění dutiny taveninou, zatížení uzavírací silou, teplotou a tlakem 80 MPa.....	73