

Vliv materiálu a tvaru vrubu na napjatost filmového spoje při zatížení

Bc. Marie Janovská

Diplomová práce
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav fyziky a mater. inženýrství
akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Marie JANOVSÁ**
Studijní program: **N 2808 Chemie a technologie materiálů**
Studijní obor: **Materiálové inženýrství**

Téma práce: **Vliv materiálu a tvaru vrubu na napjatost filmového spoje při zatížení**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky.
2. Vypracování literární rešerše, základní východiska pro praktickou a teoretickou část.
3. Vyhodnocení naměřených materiálových charakteristik.
4. Aplikace MKP pro výpočet napjatosti a únavy u filmového spoje.
5. Vyhodnocení a porovnání výsledků s návrhy pro aplikaci v praxi.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Schätz,M.,Vondráček,P.: Zkoušení polymerů-SNTL. Nakladatelství technické literatury, Praha,1979.
2. Bathe,K.J.: Finite Element Produres in Engineering Analysis, Praticce-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 1996.
3. Bishop,N.,V.,M.,Sherratt,F.: Finite Element Based Fatigue Calculations.
4. Pokluda, J., Kroupa,F.,Obdržálek,L.: Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek. VUT Brno, PC-DIR spol.s.r.o. Nakladatelství Brno, 1994.

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Antonín Polášek, CSc.

Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

15. února 2010

Termín odevzdání diplomové práce:

19. května 2010

Ve Zlíně dne 15. února 2010



doc. Ing. Petr Hlaváček, CSc.
děkan



Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

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

Ve Zlíně

.....

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ABSTRAKT

Cílem této práce bylo posoudit vliv materiálu a tvaru vrubu na napjatost filmového spoje při zatížení. V teoretické části diplomové práce je provedena literární rešerše zabývající se filmovým spojem a materiálem z něhož je vyroben. Dále je v teoretické části věnována pozornost popisu únavy a lomu konstrukčních materiálů a metodě konečných prvků (MKP). V praktické části jsou uvedeny naměřené hodnoty získané z tahové zkoušky. Výsledky tahové zkoušky byly aplikovány pro analýzu napětí a deformace u čtyř modelů s filmovým spojem pomocí numerické metody konečných prvků. Byly navrženy vhodné úpravy filmového spoje, které by snížily koncentraci napětí v oblasti vrubu.

Klíčová slova: filmový spoj, metoda konečných prvků (MKP), koncentrace napětí, vrub.

ABSTRACT

The aim of present Master Thesis was examination of material influence and the shape of notch on stress of film joint during load. The theoretical part Master Thesis contains bibliographic search focused on film joint and material, which was used to product film joint. The theoretical part also contains information about fatigue and fraction of construction materials and Finite Element Method (FEM). The practical part includes results of tensile test. The results of tensile test has been applied for analysis of distribution of stress and deformation four models with film joint through the use of Finite Element Method. Before that it been proper modification of film joint that reduce tension on the area of notch.

Keywords: film joint, Finite Element Method – FEM, stress concentration, notch.

Chtěla bych poděkovat panu Ing. Antonínu Poláškoví, Csc., který mi věnoval čas, odborné vedení, poskytnutí cenných rad a připomínek při tvorbě mé diplomové práce. Společnosti K.P.R. Engineering děkuji za poskytnutí softwarového vybavení.

Dále děkuji za pomoc z experimentálním měření Ing. Martinu Juříčkovi, Ph.D. a také děkuji své rodině za podporu při studiu.

Prohlašuji, že jsem na diplomové práci pracovala samostatně a použitou literaturu jsem citovala. V případě publikace výsledků, je-li to uvedeno na základě licenční smlouvy, budu uvedena jako spoluautorka.

Ve Zlíně 16. 5. 2009

.....

Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 SPOJOVÁNÍ MATERIÁLŮ	12
1.1 FILMOVÝ SPOJ	12
1.1.1 Namáhání filmového spoje	12
1.1.2 Konstrukční materiály pro filmový spoj	13
1.1.2.1 Bergaform®	13
2 STRUKTURA PLASTŮ	15
2.1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA PORUŠENÍ	15
3 ÚNAVA PŘI MECHANICKÉM NAMÁHÁNÍ	16
3.1 STÁDIA ÚNAVOVÉHO PROCESU	16
3.2 VLIV RŮZNÝCH FAKTORŮ NA ÚNAVOVOU PEVNOST POLYMERŮ	17
3.3 CYKlickÉ NAMÁHÁNÍ	18
3.4 CYKlickÉ DEFORMAČNÍ VLASTNOSTI	18
3.4.1 Hysterezní smyčka	18
3.4.2 Cyklická deformační křivka	19
3.5 ÚNAVOVÉ ZKOUŠKY	20
3.6 VRUBOVÉ ÚČINKY	21
3.6.1 Typy vrubů	21
3.7 SOUČINITEL KONCENTRACE NAPĚTÍ	23
3.7.1 Gradient napětí	24
3.8 SOUČINITEL VRUBU	24
3.8.1 Způsoby výpočtu součinitele vrubu	24
4 LOM KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ	27
4.1 PŘÍČINY PORUŠENÍ	27
4.2 VZNIK LOMU	27
4.2.1 Druhy lomů	27
4.2.2 Vliv teploty na lomové chování	29
5 ZKUŠEBNÍ METODY	30
5.1 MECHANICKÉ ZKOUŠKY	30
5.1.1 Tahová zkouška	30
6 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)	32
6.1 HISTORIE FEM	32
6.2 ÚVOD DO MKP	32
6.3 DEFORMAČNÍ METODA MKP	33
II PRAKTICKÁ ČÁST	36
7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	37
8 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	38

8.1	PROCES VSTRÍKOVÁNÍ	38
8.2	ZKUŠEBNÍ TĚLÍSKA VE TVARU OBOUSTRANNÉ LOPATKY	38
9	TAHOVÁ ZKOUŠKA	39
10	POSUZOVANÁ SOUČÁST	43
10.1	MATERIÁL SOUČÁSTI.....	44
11	ANALÝZA FILMOVÉHO SPOJE S OSTRÝM VRUBEM.....	45
11.1	MATERIÁLOVÉ CHARAKTERISTIKY A OKRAJOVÉ PODMÍNKY	45
11.2	ZADÁNÍ ZÁTĚŽOVÉHO STAVU	47
11.3	ANALÝZA VÝSLEDKŮ MKP	47
11.4	VÝPOČET SOUČINITELE TVARU.....	51
12	NÁVRH NOVÉHO ŘEŠENÍ FILMOVÉHO SPOJE.....	52
12.1	MODEL SPOJE R1	52
12.1.1	Analýza modelu R1	52
12.2	MODEL SPOJE R2.....	55
12.2.1	Analýza modelu R2.....	56
12.3	MODEL SPOJE S ODLEHČOVACÍMI OTVORY OR1.....	59
12.3.1	Analýza modelu OR1	60
12.4	VÝPOČET SOUČINITELE TVARU.....	64
13	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	66
13.1	TAHOVÁ ZKOUŠKA	66
13.2	ANALÝZA VÝSLEDKŮ ZÍSKANÝCH POMOCÍ MKP	66
13.2.1	Model z ostrým vrubem	66
13.2.2	Analýza upravených modelů vrubu	67
13.3	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MODELŮ FILMOVÉHO SPOJE	67
	ZÁVĚR	69
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ	70
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	72
	SEZNAM OBRÁZKŮ	75
	SEZNAM TABULEK.....	77

ÚVOD

Dnes jsou plasty nedílnou součástí aplikací v průmyslu a hrají důležitou roli v mnoha odvětvích. Projektantům a inženýrům nabízí širokou nabídku kombinací vlastností odlišných od jiných materiálů. Plasty mají výhody, jako je nízká hmotnost, odolnost proti korozi, barevnost, snadné zpracování, cenovou dostupnost apod. [19]

S rostoucím používáním plastů jako konstrukčních materiálů rostou i nároky na jejich bezproblémový provoz a exploataci bez poruch. Únavové procesy představují pro součásti z plastů důležitou roli a jsou důležitým atributem při selhání plastových částí, z těchto důvodů je třeba věnovat tomuto problému velkou pozornost. Dnes se při návrzích a konstruování plastových částí běžně používá CAD, který umožňuje synergicky provádět návrhy, pevnostní výpočty a optimalizace na modelech pomocí numerických metod např. MKP v reálném čase. [19]

Poruchy součástí můžeme rozdělit do dvou skupin. Do první skupiny patří porušení, které neohrožuje bezpečnost provozu ani životy lidí a do druhé skupiny patří porušení, které ohrožuje bezpečnost a životy lidí a může mít katastrofické následky. [16]

Dnes s pohledu výpočtů na únavu musíme brát v úvahu i filosofii návrhu plastových částí. V současnosti existují dva základní přístupy k dimenzování konstrukcí. První přístup představuje dimenzování na tzv. *bezpečný únavový život* (safe-life). Ten předpokládá, že během projektované uvažované životnosti nesmí vzniknout únavová porucha součástí. Druhý přístup dimenzování konstrukcí tzv. *bezpečných i při poruše* (fail-safe) nebo konstrukcí *s přípustným poškozením* (damage tolerance) vychází z předpokladu připouštějící vznik poruchy avšak vylučuje náhlé selhání celé konstrukce. Všem typům poruch je třeba předcházet nebo alespoň zajistit jejich včasnou identifikaci. [16, 3]

Zásadní vliv na pevnost součástí má materiál, ze kterého je součást vyrobena respektive vlastnosti materiálu. Dalším důležitým faktorem, který ovlivňuje životnost je samotný tvar součástí a způsob zatěžování. [16]

Cílem této diplomové práce je navrhnout takové úpravy filmového spoje, které sníží koncentrace napětí a pokusit se tak snížit poruchy spoje, ke kterému dnes běžně dochází. Vychází se tvaru filmového spoje a materiálu od zadavatele Kasko s.r.o.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SPOJOVÁNÍ MATERIÁLŮ

Technologie spojování materiálů slouží ke spojování plastových dílů mezi sebou. Existuje řada konstrukčních způsobů spojování materiálů, které můžeme podle rozebíratelnosti dělit na:

- rozebíratelné spoje (šroubové, kloubové, západkové atd.),
- nerozebíratelné spoje (lepené, svařované, lisované, nýtované atd.). [24]

1.1 Filmový spoj

Filmový spoj patří mezi nerozebíratelné pohyblivé spoje. Tento spoj vzniká současně se spojovanými prvky technologickým procesem vstříkovaní do dutiny formy. Nejsou nutné žádné další montážní operace. Spoj přenáší ohybový moment mezi rozměrově stabilním dílem a jakýmkoliv upevňovaným prvkem např. příklopka.

Spoj umožňuje rozevření pohyblivého prvku (příklopka) z jeho původní polohy o více než 90° a vrácení zpět do původní polohy bez jeho porušení. Toto je umožněno díky elasticitě plastů.

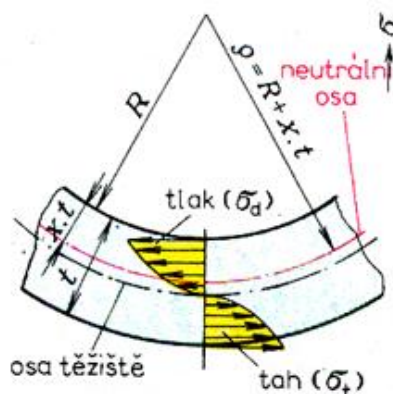
Pro celý výrobek je použit jeden materiál v našem případě je to termoplastický polymer pod názvem Bergafom (viz. kapitola 1.1.2.), ale mohou být použity i jiné typy plastů.

Nevýhodou spoje je jeho velká citlivost, při ohybu může dojít k porušení a následně k lomu. Velkou výhodou spoje je, že není narušena celistvost dílu a tím se nezvyšuje jeho hmotnost (např. přidáním nýtů, šroubů, lepidla atd.). Dalšími výhodami je barevná celistvost výrobku a snížení výrobních nákladů díky nepotřebnosti další montážní operace.

Filmový spoj nachází uplatnění v automobilovém průmyslu, v potravinářství, v přístrojích pro domácnost a podobně.

1.1.1 Namáhání filmového spoje

Filmový spoj je namáhán na ohyb při velkých posuvech a pootočeních spojované části. Při tomto procesu je materiál spoje deformován do různého úhlu. Stejně tak jako jiné způsoby tváření, při kterých je těleso upravováno do žádoucího tvaru využívá taky ohyb zákonů plasticity tzn. překročením meze kluzu dosáhneme oblasti plastické deformace, která je doprovázena deformací elastickou. Po průřezu je to pružně plastická deformace, která má různý průběh od povrchu materiálu k neutrální ose. [24]



Obr. 1 - Rozložení a velikost napětí při ohybu [24].

1.1.2 Konstrukční materiály pro filmový spoj

Firma Kasko spol. s.r.o., která je zadavatelem této práce používá pro výrobek s filmovým spojem materiál Bergaform[®] (POM), který je normalizován podle koncernové normy VW tj. TL 524-76, vydané 03/06. Předchůdcem byl podobný typ materiálu pod názvem POLYform a do budoucna se uvažuje o zařazení materiálu KEPITAL. U všechny třech typů jde POM vyráběný jinými výrobci.

1.1.2.1 Bergaform[®]

Bergafom[®] je ochranná známka společnosti PolyOne a je to obchodní název pro polyoxymetylen (POM - polyformaldehyd). Jedná se o termoplastický tvrdý polymer na bázi formaldehydu, kterého řetězec obsahuje skupiny $-\text{CH}_2-$ a atom kyslíku. Je to bílá hmota s vysokým krystalickým podílem. Bergaform se dodává ve formě granulí v balení po 25kg.

Vlastnosti a použití:

- vysokou houževnatost a tvrdost, a to i při nízkých teplotách,
- velmi dobrá rozměrová stálost za tepla,
- dobré elektrické vlastnosti,
- velmi dobré kluzné vlastnosti a odolnost proti oděru,
- snadné zpracování,
- dobrá chemická odolnost, např. proti rozpouštědlům, olejům.

Bergaform se pro své vynikající vlastnosti používá pro nejrůznější aplikace v elektrotechnice, v automobilovém průmyslu a ve strojírenství.

K dispozici jsou čtyři typy, a to C-100, C-300, C-310, C-900. Typ C-310 je vhodný pro složitější tvary výrobku byl nastaven pro lepší zatékavost. [5,18]

2 STRUKTURA PLASTŮ

Plasty jsou chemické látky obsahující ve svých molekulách nejčastěji atomy vodíku, uhlíku, kyslíku a jiných prvků. Molekula plastů je v podstatě řetězec základních stavebních jednotek (monomerů), které jsou mezi sebou vázány primárními vazbami. U plastů se nejčastěji vyskytují kovalentní primární vazby. Tyto řetězce se mohou větvit a tvořit spolu prostorovou síť (lineární, rozvětvená, síťovaná). Mezi molekulami působí slabší sekundární vazby nebo taky mezimolekulární síly ve většině případů van der Waalsova druhu (disperzní, dipólové, indukované), někdy se mohou uplatňovat i vodíkové můstky. Tyto sekundární vazby lze vnějším silovým působením nebo zvýšenou teplotou snadno překonat.

Vlastnosti plastů jsou dány chemickou strukturou a taky molekulovou hmotností. Pevné vazby způsobují vysokou podélnou tuhost a pevnost polymerních řetězců. Polymerní řetězce neustálým pohybem jednotlivých segmentů zaujímají různých uspořádání – konformace. [22,23]

2.1 Fyzikální podstata porušení

Všechny pozorovatelné změny vlastností plastů jsou výsledkem jejich molekulární a nadmolekulární struktury a jejich změn při zatěžování.

V případech, kdy jsou chemické vazby mezi řetězci porušeny nebo kdy mezimolekulární fyzikální vazby zmizí, se jedná o porušení. Podmínkou porušení vazby mezi atomy je dodání dostatečného množství energie umožňující překonat energetickou bariéru vazby. Energie může být dodána ve formě chemické energie, energie záření apod. Nás zajímá porušení, ke kterému dochází vlivem působení vnějších mechanických sil na těleso. Mohlo by se zdát, že k porušení dojde jen tehdy, když působící vnější síly překonají vazební sílu mezi atomy. Ve skutečnosti atomy vykonávají tepelný pohyb, který vede k tomu, že v důsledku fluktuací může dojít k nahromadění kinetické energie, která může způsobit narušení vazby.

K případu čistě mechanického porušení dojde jen při rychlém nárůstu působící síly, kdy nemají čas se tepelné fluktuace uplatnit. [22]

3 ÚNAVA PŘI MECHANICKÉM NAMÁHÁNÍ

Pod pojmem únava jsou označovány změny vlastností materiálů vedoucí až k jejich porušení vlivem cyklického namáhání. Je důležité si uvědomit, že po určitém počtu zatěžovacích cyklů může dojít k únavovému lomu, i když velikost zatěžovacího napětí je nižší než je mez pevnosti a mez kluzu. [10]

Dnes nám možnosti výpočetní techniky umožňují řešení takových úloh, které byly dříve nemyslitelné - např. počítačové modelování, optimalizace. Zvyšuje se úroveň znalostí o materiálech a jejich využitelných vlastnostech. Začínají se uplatňovat nové názory na pevnostní výpočty lomového chování. [17]

3.1 Stádia únavového procesu

U nízkocyklové (s vysokými amplitudami plastické deformace) i vysokocyklové (s nízkými amplitudami plastické deformace) únavy je celý proces poškozování řízen i podmíněn plastickou deformací. I velmi malá, ale mnohonásobně opakovaná plastická deformace vede k poškozování, které může končit únavovým lomem. Celý únavový proces můžeme rozdělit na tři stádia, která na sebe navazují: [15]

1) Stádium změn mechanických vlastností

V důsledku kumulace plastické deformace se mění rozložení a hustota dislokací v materiálu. Materiál cyklicky změkčuje nebo zpevňuje.

2) Stádium nukleace mikrotrhlin

Bylo zjištěno, že k nukleaci trhlin dochází u homogenních materiálů vždy na volném povrchu. Proto můžeme vznik trhlin snadněji pozorovat, zároveň vhodnou úpravou povrchu lze ovlivnit únavovou životnost.

V některých případech dochází k vzniku trhlin v určité hloubce pod povrchem materiálu. Příčinou je makroskopická strukturní nehomogenita např. výrazně zpevněná povrchová vrstva nebo vnitřní vada.

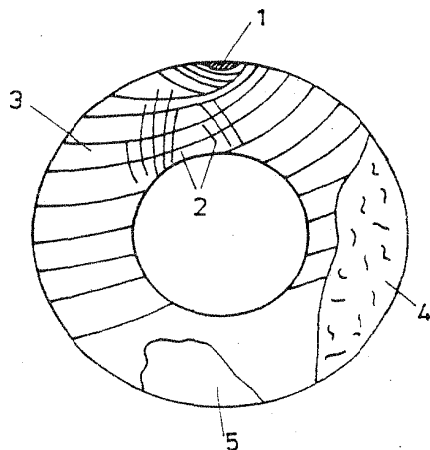
3) Stádium růstu trhlin

Růst trhliny navazuje plynule na stádium nukleace. Ne všechny vzniklé mikrotrhliny se musejí rozvinout v makrotrhliny a vést k porušení součásti. Rozhodující podmínky proto jsou podmínky na čele trhliny.

4) Konečný lom

Obvykle kvazikřehký charakter, na lomové ploše lze rozeznávat typická pásma.

- Ohnisko porušení, tj. makroskopické místo zárodku únavového lomu.
- Sekundární stupínky a lemy při nukleaci únavových trhlin z různých center ležících v různých rovinách. Množství stupínků a lemů ukazuje na počet center porušení a nepřímo na velikost přetížení.
- Část postupného rozvoje. Únavové trhliny mohou měnit směr postupu, což vede ke vzniku sekundárních trhlin, odpočinkových čar a jiných znaků. Změna směru postupu je způsobena změnou podmínek vnějšího zatížení, přerozdělením napětí následkem postupu trhliny, vlivem sousedních blízko umístěných trhlin, vad materiálu, zbytkových napětí .
- Pásmo urychleného rozvoje, je to přechodová oblast mezi vlastním únavovým lomem a oblastí dolomení.
- Pásmo dolomení. [15,22]



- 1 - ohnisko a střed lomu
- 2 - sekundární stupínky a lemy
- 3 - únavové (odpočinkové) čáry
- 4 - pásmo urychleného rozvoje lomu
- 5 - pásmo dolomení

Obr. 2 – Únavový lom [15].

3.2 Vliv různých faktorů na únavovou pevnost polymerů

Faktor velikosti – z rostoucím rozměrem vzorku klesá jeho pevnost. Na snížení pevnosti má vliv jak větší počet defektů vzorku, tak i horší odvod tepla ve větším vzorku.

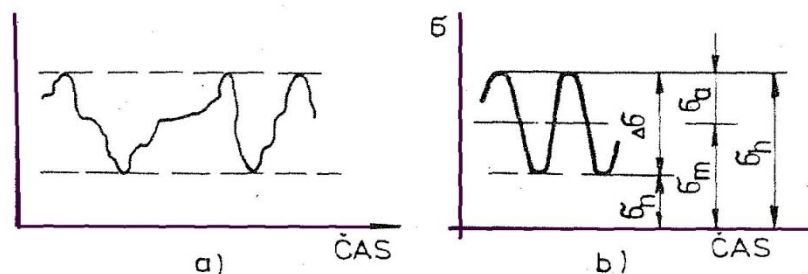
Vliv koncentrace napětí je jiný pro každý plastický materiál. Z termoplastů je velmi citlivý na vruby polymethylmetakrylát, jehož hladké vzorky mají tepelně zabarvené houževnaté lomy a přítomnost koncentrátoru může vést ke křehkému lomu.

Jedním z nejdůležitějších faktorů, které mají vliv na únavovou pevnost je teplota. Mnohokrát bylo prokázáno, že vyšší teplota okolí při zkouškách snižuje mez únavy. Plasty na rozdíl od kovů mají špatnou tepelnou vodivost, v důsledku čehož se plasty při cyklickém namáhání značně zahřívají. Proto má na zkoušení vliv nejen teplota okolí, ale i teplo vznikající při cyklickém zatěžování a odvod tepla. Odvod tepla závisí na teplotě okolí, rozměrech vzorku a na odvětrání. [14]

3.3 Cyklické namáhání

Různé součásti a výrobky jsou často namáhány časově proměnným napětím mající stochastický charakter (obr. 3a) se pro účely únavového posuzování schematizuje soubory harmonických kmitů (obr.3b). [14,15]

Každý kmit napětí můžeme popsat pomocí (obr. 3b) horního napětí σ_h (nebo τ_h) - nejvyšší algebraická hodnota napětí kmitu, dolního napětí σ_n (nebo τ_n) – nejnižší hodnota napětí kmitu, středního napětí σ_m , rozkmitu napětí $\Delta\sigma$ a amplitudy napětí σ_a . Pro poměrné prodloužení ε nebo zkos γ lze použít tyto pojmy zcela analogicky. Dále je možno tyto kmity dělit podle nesouměrnosti. [15]



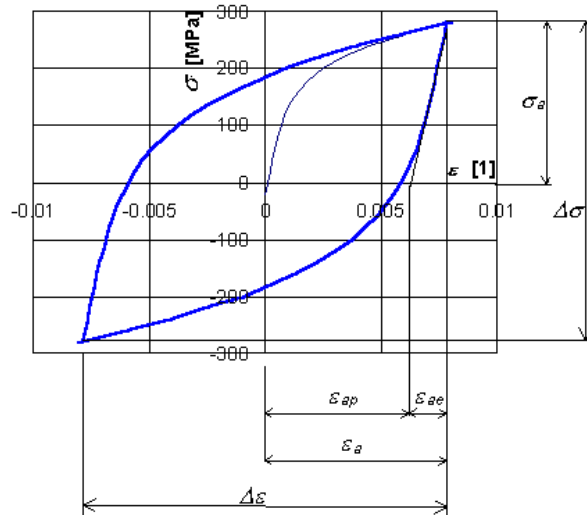
Obr. 3 – Časově proměnné napětí [15].
a) stochastický charakter, b) pravidelný charakter.

3.4 Cyklické deformační vlastnosti

3.4.1 Hysterezní smyčka

Závislost napětí na celkové (případně pouze na plastické) deformaci je při cyklickém zatěžování charakterizována v průběhu jednoho kmitu hysterezní smyčkou (Obr.4). Tvar i velikost hysterezní smyčky se mění v průběhu zatěžování, většina těchto změn však probíhá především pouze na počátku zatěžování. Po dosažení saturovaného stavu tyto změny buď ustanou nebo jsou již velmi malé (to platí v nízko i vysokocyklové oblasti).

Změny hysterezní smyčky ukazují na změnu odporu materiálu proti cyklické plastické deformaci, ten může vzrůstat (potom hovoříme o cyklickém zpevnění) nebo klesat (při cyklickém změkčení). [15]



Obr. 4 – Hysterezní smyčka [16].

Amplitudu celkové deformace ε_a můžeme vyjádřit jako:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} \quad (1)$$

V rovnici je ε_{ae} elastická složka deformace, ε_{ap} je plastická složka deformace.

Šířka hysterezní smyčky je rovna rozkmitu plastické deformace $\Delta\varepsilon$ [15,16].

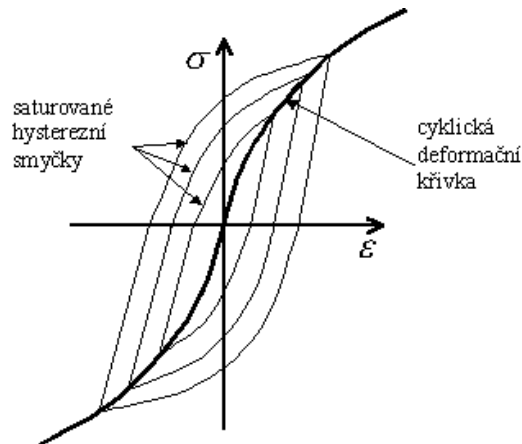
3.4.2 Cyklická deformační křivka

Proložením křivky vrcholovými body stabilizovaných hysterezních smyček s různou amplitudou napětí, které odpovídá příslušná hodnota plastické deformace získáme cyklickou deformační křivku. Je analogií chování materiálu při cyklickém zatěžování ke skutečnému tahovému diagramu pro monotónní zatěžování. Tyto dva průběhy můžeme vzájemně srovnávat a říci pak zda jde o cyklické změkčování nebo zpevňování materiálu. Plastickou část křivky můžeme aproximovat mocninovou závislostí ve tvaru: [16,11]

$$\sigma_a = K' \cdot \varepsilon_{ap}^{n'} \quad (2)$$

$$K' = \frac{\sigma_f'}{(\varepsilon_f')^{n'}} \quad (3)$$

kde K' představuje modul cyklického zpevnění, n' je exponent cyklického zpevnění, σ_f je součinitel únavové pevnosti a ε_f je součinitel únavové tažnosti.



Obr. 5 – *Cyklická deformační křivka [16].*

Pro vztah mezi amplitudou napětí a deformace potom dostáváme tzv. Ramberg-Osgoodovu rovnici:

$$\varepsilon_{al} = \varepsilon_{ae} + \varepsilon_{ap} = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (4)$$

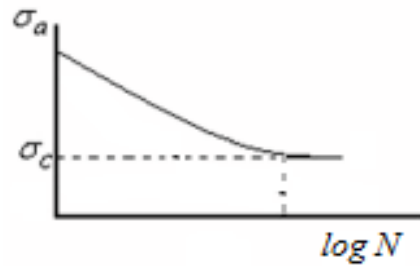
respektive pro jejich rozkmity: [16,15]

$$\Delta\varepsilon_a = \Delta\varepsilon_{ae} + \Delta\varepsilon_{ap} = \frac{\Delta\sigma}{E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{2^{1-n'} \cdot K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (5)$$

3.5 Únavové zkoušky

Zkoušení únavového chování materiálů lze provádět různými způsoby zatěžování (tah, tlak, ohyb, krut atd.). Materiál je cyklicky zatěžován napětím σ s amplitudou σ_a tak dlouho, než dojde k únavovému lomu. Závislost amplitudy napětí σ_a na počtu cyklů N (v logaritmických souřadnicích) je vyjadřován únavovou křivkou napětí nebo taky Wöhlerovou křivkou v anglosaské literatuře označovaná jako S-N křivka. [10,11]

Pomocí Wöhlerovy křivky lze stanovit amplitudu napětí, při které materiál teoreticky vydrží neomezený počet zatěžovacích cyklů. Takové amplitudě napětí představuje mez únavy σ_c . [10,11]



Obr. 6 - Wöhlerova křivka [10].

3.6 Vrubové účinky

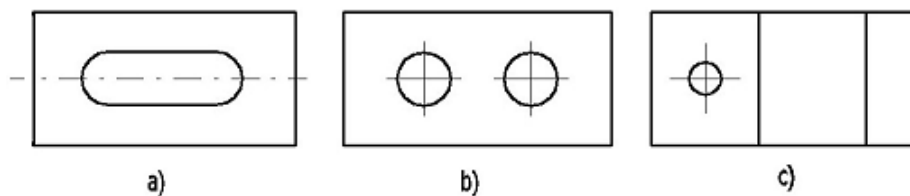
V praxi se vyskytují součásti, jejichž průřez se s funkčních důvodů mění. Změna tvaru, která podmiňuje změnu silového toku, má velký vliv na rozdělení napětí. K poruchám stavu napjatosti dochází také v místech působení vnějších sil, stejně tak i v místech vnitřních vad materiálu. Všechna místa, která způsobují změnu silového toku nazýváme *vruby*, které dělíme na *konstrukční* a *technologické*. [14]

3.6.1 Typy vrubů

Konstrukční vruby jsou náhlé nebo málo zaoblené přechody, otvory, drážky, zápichy a podobně, tedy všechna místa způsobující změnu silového toku, které jsou na součástce provedené z funkčních důvodů.

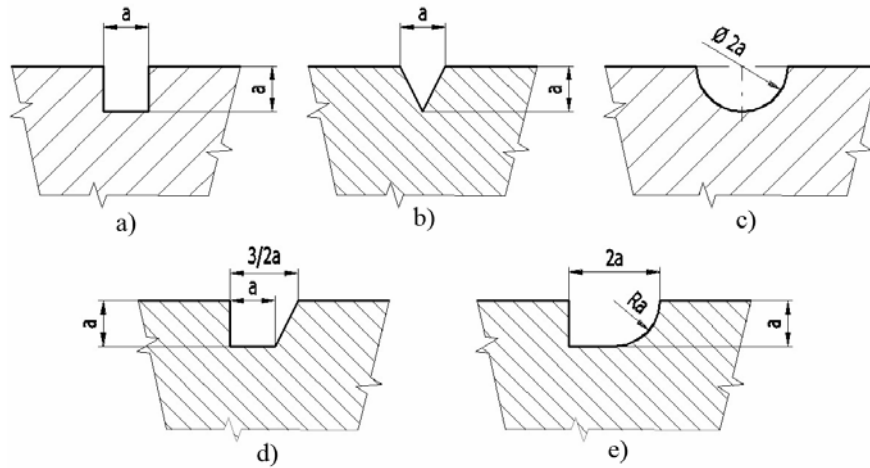
Technologické vruby jsou všechny nedokonalosti materiálu, které mají taky vliv na rozložení napětí. Tyto vruby dále rozdělujeme na *vnější* a *vnitřní*.

Praxe prokázala, že při cyklickém namáhání vzniká většina lomů v místech vrubu, tj. lomy byly zaviněny tzv. vrubovým účinkem. [14]



Obr. 7 – Konstrukční vruby [13].

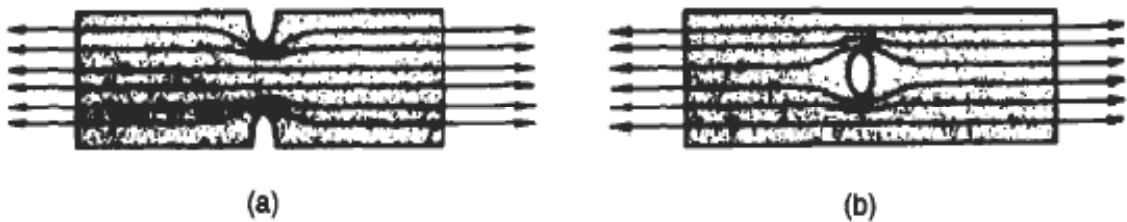
Většina vrubů vychází z geometrický tvarů (jehlan, krychle, koule) a jejich kombinací.



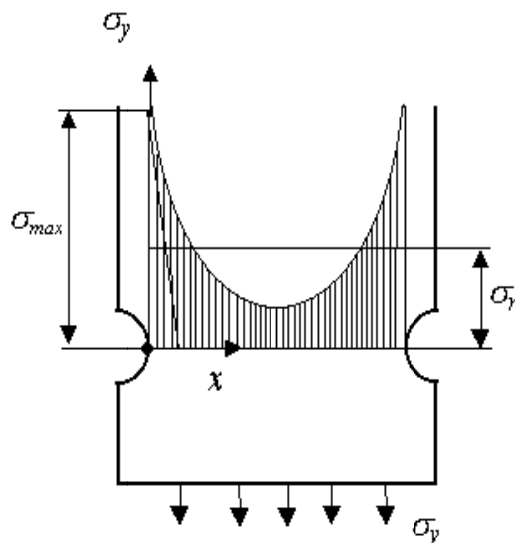
Obr. 8 – Vruby vytvořené ze základních geometrických tvarů [13].

Vruby mají dvojitý účinek na napjatost:

- vrub vyvolává ve svém okolí nerovnoměrné rozložení napětí (obr. 10)
- vrub způsobuje změnu napjatosti. Jednoosou napjatost mění na víceosou, která se projeví při zatěžování v pružném i plastickém stavu. [14]



Obr. 9 - Silový tok v okolí vrubu [19].



Obr. 10 – Rozložení napětí [16].

3.7 Součinitel koncentrace napětí

Vruby zvyšují místně napětí, což lze vyjádřit poměrným zvýšením napětí ve srovnání s hladinou nominálního napětí (obr.10), které by působilo u těles stejného typu a stejně namáhaných bez vrubu. Toto zvýšení se vyjadřuje bezrozměrovým *součinitelem koncentrace napětí* α (také tzv. *tvarovým součinitelem*).

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (6)$$

Kde σ_{max} je největší napětí v místě koncentrace, σ_{nom} je nominální napětí (tj. takové napětí, které vypočteme pomocí klasické pružnosti).

V případě víceosé napjatosti vystihuje podmínky lépe redukovaný součinitel tvaru α_{red} .

$$\alpha_{red} = \frac{(\sigma_{max})_{red}}{\sigma_{nom}} = v \cdot \alpha_1 \quad (7)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_1\sigma_3 - \sigma_2\sigma_3} = \sigma_1 \cdot v \quad (8)$$

v = součinitel napjatosti, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ = hlavní napětí. [14,15],

Tvarový součinitel α je vždy větší než 1 a je nezávislý na velikosti součástky a na materiálu, ale je závislý na geometrickém tvaru vrubu a druhu namáhání (tah, ohyb, krut apod.), na poloměru zaoblění vrubu ρ a úhlu rozevření vrubu.

Na závěr můžeme říct, že čím je vrub ostřejší a hlubší, těleso rozměrnější, tím je součinitel α vyšší. Koncentrace napětí je největší při namáhání v tahu (tlaku) menší v ohybu a nejmenší při krutu. [14]

3.7.1 Gradient napětí

Vedle velikosti špičky napětí je důležitý též pokles napětí z místa maxima (kořen vrubu), tedy gradient napětí. Obecně je dán tangentou ke špičce napětí v uvažovaném bodě. Jeho největší hodnota je na povrchu vrubu.

$$G = tg \nu = \left[\frac{(d\sigma)}{dx} \right]_{x=0} \quad (9)$$

Pro praktické využití je účelnější poměrný gradient napětí [15].

$$\bar{G} = \frac{G}{\sigma_{\max}} = \frac{\left[\frac{(d\sigma)}{dx} \right]_{x=0}}{\sigma_{\max}} \quad (10)$$

3.8 Součinitel vrubu

Součinitel vrubu β je definován jako poměr mezního výkmitu zkušební tělesa bez koncentrace napětí $\sigma_A(\tau_A)$ (většinou hladké tyče) a zkušební tělesa s koncentrací napětí $\sigma_A^*(\tau_A^*)$ při stejných podmínkách zkoušení. (tj. při stejné asymetrii kmitu nebo stejném středním napětí a při stejném počtu kmitů). Pro případ trvalé pevnosti platí: [17]

$$\beta = \frac{\sigma_A}{\sigma_A^*} \quad (11)$$

3.8.1 Způsoby výpočtu součinitele vrubu

Nejprve se hledalo vysvětlení rozdílu mezi součinitelem vrubu a součinitelem tvaru pomocí tzv. vrubové citlivosti q (Thum 1934)

Součinitel vrubu podle Thuma

$$q = (\beta - 1)/(\alpha - 1), \quad \beta = 1 + q \cdot (\alpha - 1) \quad (12)$$

Kde α je tvarový součinitel [-], q je součinitel vrubové citlivosti [-].

Součinitel vrubu podle Neubergera:

Neubert navrhl vztah výpočtu součinitele vrubu, který je použitelný pro různé druhy zatěžování i ostrých vrubů včetně elastoplastického stavu v kořeni vrubu. Průběh napětí v příčném řezu je vyjádřen stupňovitou křivkou udávající integrální hodnoty napětí na jednotlivých strukturních částicích velikosti ρ . Aby došlo k rozvoji únavového procesu musí být dosaženo meze únavy v určité hloubce ρ^* materiálu pod povrchem. Tato hloubka je materiálovou konstantou,

$$\beta = \alpha \cdot \left(1 + \rho^* \cdot \frac{s}{\rho} \right)^{-1/2} \quad (13)$$

Ve vztahu je s bezrozměrný faktor související se způsobem zatěžování a použitou podmínkou plasticity a pohybuje se v rozmezí 2 - 2,5 (pro tah a ohyb), ρ je poloměr vrubu [mm] a je ρ^* materiálová konstanta. [16,17]

Součinitel vrubu podle Petersona

Peterson předpokládal, že únavová trhлина se může iniciovat až tehdy, kdy napětí v určité hloubce pod povrchem je rovno mezi únavy.

$$\sigma_c = \beta \cdot \sigma_{nom} = \alpha \cdot \sigma_{nom} - a \cdot \bar{G} \cdot \alpha \cdot \sigma_{nom} \quad (14)$$

$$\beta = \alpha \cdot (1 - a\bar{G}) \quad (15)$$

$$\beta = 1 + \frac{\alpha - 1}{1 + \frac{a}{\rho}} \quad (16)$$

Doposud uvedené vztahy jsou spojeny přímo nebo nepřímo s poměrným gradientem napětí jako parametr určující rozsah plastické deformace. U vztahu od Siebela a Stillera je poměrný gradient rozhodující veličinou. [16,17]

Součinitel vrubu podle Siebela a Stillera pro ocel:

$$\beta = \alpha \cdot \left(1 + \sqrt{\bar{G}} \cdot 10^{-\left(\frac{R_e}{810} + 0,35\right)} \right) \quad (17)$$

Kde \bar{G} je poměrný gradient napětí ve vrubu [mm], R_e je mez kluzu [MPa].

Součinitel vrubu podle Heywooda

$$\beta = \frac{\alpha}{1 + \frac{\alpha - 1}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{a'}{\rho}}} \quad (18)$$

Kde a' je konstanta podle Heywooda, respektující tvar vrubu a pevnost materiálu.

Součinitel vrubu podle Němce

$$\beta = \left[1 + \left(\alpha \cdot \frac{\nu}{\nu_{\beta}} - 1 \right) \cdot \eta \right] \cdot \psi \quad (19)$$

Kde ν představuje součinitel respektující stav napjatosti $\nu = \frac{\alpha_{red}}{\alpha}$, ν_{β} je součinitel

velikosti, η je součinitel citlivosti materiálu, ψ je součinitel zpevnění materiálu.

[16,17,18]

4 LOM KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ

Lom je proces deformace materiálu doprovázený tvorbou nových povrchů, jehož důsledkem je ztráta (znehodnocení) funkce materiálu (výrobku). U konstrukčních součástí může dojít k lomu již při napětích menších než je pevnost materiálu a dokonce i pod mezi kluzu. [10,11]

4.1 Příčiny porušení

K iniciaci a šíření trhlin dochází v oblastech koncentrátorů napětí - defekty (vady).

Defekty mohou být např:

- mikrotrhliny (vznikají často při výrobě, v důsledku tepelných pnutí),
- dutiny (vznikají při smršťování materiálů jejich tuhnutí a chladnutí),
- nečistoty, defekty materiálu.

Vady v materiálu je vždy potřeba minimalizovat, zvláště u velkých konstrukčních součástí jsou vady nebezpečné, protože jejich výskyt je větší. [10, 19]

4.2 Vznik lomu

Působením dostatečně vysokým napětím na vzorek, se začnou v místech materiálu s drobnými defekty a v místech poškození povrchu rozvíjet zóny, které jsou u průhledných materiálů dobře viditelné. Orientace těchto zón je zpočátku kolmá k hranici defektů, ale postupně pod vlivem zatížení se stáčí kolmo na nominální tahové napětí. V určitém okamžiku se vytvoří mikrotrhlina. V místech vzniku trhlinky s dobou zatěžování dochází k porušování vazeb mezi molekulami a snižuje se přetvářecí schopnost materiálu. V další fázi porušování se vzniklá trhlina rozvíjí, až dojde k lomu tělesa.

Někdy první porucha nastává na povrchu a můžeme ji objevit, v jiných případech vzniká porucha uvnitř tělesa i tu můžeme zjistit pomocí defektoskopie nebo jiných metod. [14]

4.2.1 Druhy lomů

Podle průběhu rozlišujeme dva druhy lomů – lomy houževnaté (tvárné) a lomy křehké (štěpné). Hlavní rozdíl mezi tvárným a křehkým lomem je přičítáno množství plastické deformace.

a) *Tvárný lom*

Z makroskopického hlediska se za tvárný lom považuje ten lom, kterému předcházela velká plastická deformace. Při dostatečném zatížení dochází k růstu trhliny a k lomu. Během šíření trhliny dochází k velké tvarové změně v okolí lomu. Místa vzniku lomu jsou částice nečistot, které se dostali do materiálu v průběhu zpracování. Tyto částice nemají schopnost plasticky se deformovat a v okolí těchto částic dochází k plastické deformaci. Protože se částice nedeformují, vytváří se kolem nich dutinky, tyto dutinky se protahují a následně propojují. Mechanismus propojování je označován za tvárný lom. Pro růst tvárné trhliny je spotřebováno velké množství energie na plastickou deformaci.[9]

b) *Křehký lom*

Většina křehkých lomů obsahují z makroskopického hlediska malé oblasti, ve kterých došlo k plastické deformaci tyto lomy se nazývají tzv. lomy kvazikřehké.

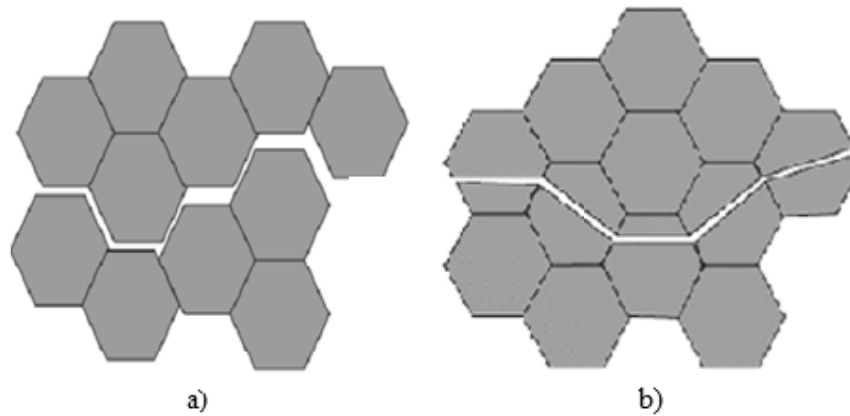
Jako křehké lomy se označuje takové porušení tělesa, při kterém působící namáhání (většinou tahové) nevyvolá při hodnocení pouhým okem nebo při malém zvětšení známky plastické deformace. Rozměry tělesa před a po porušení jsou prakticky stejné. Čelo trhliny nemusí postupovat při štěpení v jedné rovině, ale v několika blízkých rovnoběžných rovinách, které se navzájem stupňovitě propojují. Určitá plastická deformace pak vždy doprovází štěpení ve stádiu rozvoje trhliny. Rovina lomu je orientována kolmo na hlavní tahové napětí. Šíření křehkého lomu je náhlé a velmi rychlé tím i spotřeba energie je mnohem menší než absorbovaná energie při tvárném lomu. Proto jsou tyto lomy u nosných konstrukčních součástí velmi nebezpečné. [9]

Důležité u lomů je také způsob šíření trhliny přes materiál. První typ je *transkrystalické* porušení (obr.11b) tj. trhlina cestuje přes zrna materiálu a volí si cestu nejmenšího odporu.

Transkrystalické štěpení je složeno ze tří na sebe navazujících etap:

- a) etapa vzniku zárodků trhlín (etapa nukleace trhlín),
- b) etapa pomalého, stabilního růstu zárodků trhlín (etapa subkritického růstu),
- c) etapa rychlého, nestabilního růstu štěpných trhlín.

Druhým typem je *interkrystalické* (obr. 11a) porušení tj. trhlina (crack) cestuje podél zrn materiálu. Základní a obecnou příčinou tohoto porušení je relativní snížení pevnosti atomových vazeb na hranicích zrn ve srovnání s vazbami uvnitř zrn. [9, 10, 17]



Obr. 11 – Způsoby šíření trhliny materiálem [12].

a) interkrystalické porušení, b) transkrystalické porušení.

4.2.2 Vliv teploty na lomové chování

Teplota je důležitý faktor, který ovlivňuje lomové chování materiálu. S rostoucí teplotou dochází k poklesu meze kluzu a plastická zóna je na čele trhliny větší. Pravděpodobnost vzniku tvárného lomu. Naopak se snižováním teploty dochází k poklesu vibrace atomů, zároveň roste mez kluzu a plastická zóna na špici se zmenšuje až dostáváme křehký lom [11].

5 ZKUŠEBNÍ METODY

Aby byly materiály správně využívány, je potřeba znát jejich vlastnosti. Ty zjišťujeme pomocí různých zkušebních metod. Mezi základní patří:

- a) Fyzikální zkoušky – jejich pomocí se zjišťuje teplotní a tepelná vodivost, objemová roztažnost, elektrická vodivost, teplota tání tuhnutí apod.
- b) Chemické zkoušky – stárnutí a koroze, odolnost proti plynům a kapalinám, žáruvzdornost (hořlavost) a apod.
- c) Mechanické zkoušky

5.1 Mechanické zkoušky

Výsledky zkoušek mechanických vlastností slouží jako číselné podklady pro konstruktéry, používají se tyky jako ukazatelé kvality při výstupní kontrole nebo přejímce materiálů.

Tyto zkoušky lze rozdělit do dvou skupin podle působení síly na:

- *statické zkoušky* – zatížení se zvětšuje postupně. Podle způsobu namáhání sem patří zkoušky na tah, tlak, ohyb a stříh.
- *dynamické zkoušky* – zatížení (síla) působí nárazově. Při cyklických zkouškách se proměnné zatížení opakuje. Patří sem rázová a vrubová houževnatost, odrazová pružnost, zkoušky opotřebení a další.

5.1.1 Tahová zkouška

Zkouška tahem je asi nejrozšířenější statickou zkouškou pro charakterizaci chování nejen u plastů. Pomocí ní můžeme stanovit mez pevnosti v tahu, modul pružnosti při tahovém namáhání a dalších tahových charakteristik ze závislosti napětí/poměrné prodloužení za daných podmínek.

Zkoušky tahem se zpravidla nedělají přímo na vyrobené součásti, ale na připravených zkušebních tělesech, která jsou buď tvářena nebo zhotovena mechanickým obráběním, řezáním nebo vysekáváním z hotových výrobků nebo polotovarů jejichž rozměry a tvary jsou normalizovány.

Podstatou zkoušky je protahování zkušebního tělesa konstantní rychlostí ve směru jeho podélné osy do jeho porušení nebo do předem zvolené hodnoty napětí v tahu (zatížení) nebo protažení (poměrné prodloužení). Výsledkem tahové zkoušky je pracovní diagram,

který vyjadřuje závislost velikosti napětí působící na těleso a změny velikosti prodloužení. [19,20,21]

Výpočet pro tahové napětí:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (20)$$

S protahováním tělesa se mění jeho původní délka l_0 na délku l tuto změnu definujeme jako tzv. *poměrné prodloužení* ε_l :

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (21)$$

Konstantu úměrnosti mezi napětím a deformací nazýváme *modul pružnosti v tahu* E (Youngovým modulem) [21].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_l} \quad (22)$$

6 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ (MKP)

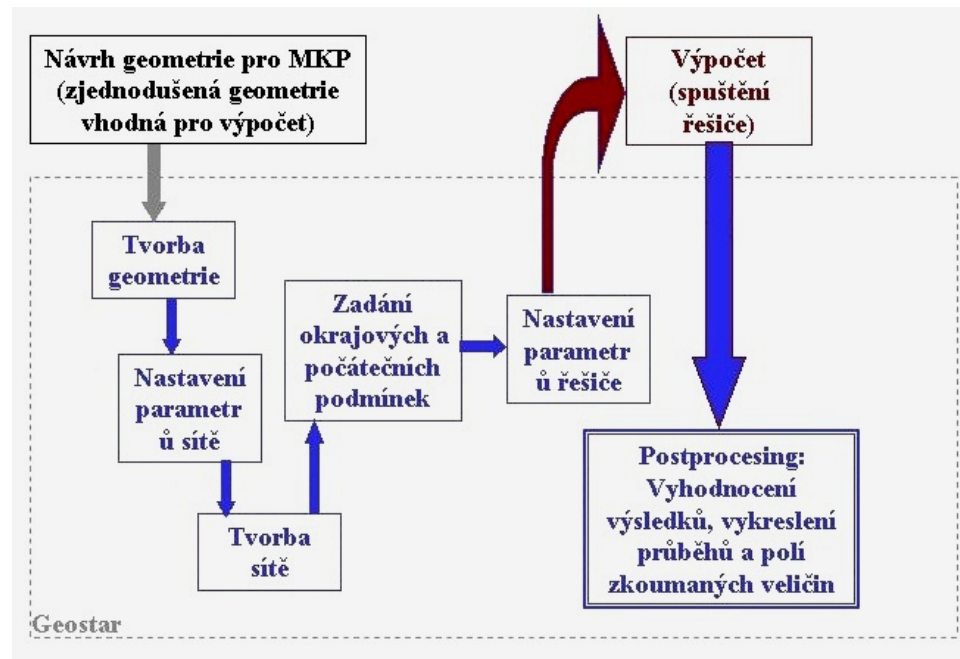
Metoda konečných prvků (Finite Element Method – FEM) je v rukou zkušeného a znalého uživatele výborný nástroj. Dnes je považována za jednu z nejúčinnějších numerických metod pro analýzu struktur a těles. FEM je používána při výpočtech v oblastech vedení tepla, proudění kapalin, statiky, dynamiky, elektřiny atd. [1,2]

6.1 Historie FEM

Je obtížné stanovit přesné datum vzniku, ale za toho kdo první popsal kolem roku 1941 FEM je považován americký matematik Richard Courant, jeho teorie nebyla však akceptována pro řešení rozsáhlých lineárních rovnic. O deset let později byla znovuobjevena americkými inženýry a matice tuhosti byla popsána v maticovém tvaru, což umožnilo řešení rovnic pomocí počítače. Toho bylo využito při provádění pevnostních výpočtů v leteckém průmyslu. V průběhu 60-tých let z napsáním mnoha programů využívající MKP se začala používat i v dalších aplikacích. Hnacím motorem bylo středisko v Berkley zaměřené na úlohy stavebního inženýrství. [2,4]

6.2 Úvod do MKP

Základní myšlenkou MKP je spojitě rozdělení (diskretizace) tělesa na prvky, které jsou snadno matematicky popsatelné. V rovině je prvkem *čtyřúhelník*, v prostoru *šestihran*, někdy zjednodušené tvary jako je *trojúhelník a jiné*. Rohy těchto prvků jsou uzlovými body, prvky vytvářejí síť, jejíž hustota je rozhodující pro přesnost výsledků. Současné programy zvládají kvalitně automatickou tvorbu sítě, takto vytvořená síť potřebuje delší čas na výpočet a paměť počítače, než když ji vytváří výpočtář. [2,4,8]



Obr. 12 - Postup tvorby MKP modelu [7].

Pro MKP jsou důležité tyto body:

1. Nejúčinnější matematický model je ten, který přináší odpovědi na otázky spolehlivým způsobem tj. v rámci přijatelné chyby.
2. MKP může řešit pouze vybraný matematický model (např. tepelný tok nebo napěťový model) a nelze předvídat více informací, než které jsou obsaženy v modelu.
3. V modelu není obsaženo to jak se bude chovat ve skutečnosti tj. jak bude působit vliv prostředí. [6]

6.3 Deformační metoda MKP

Metoda konečných prvků je nejrozšířenější metoda pro řešení úloh mechaniky kontinua. Nejpoužívanější variantou MKP je *deformační metoda* využívající *Lagrangeovských konečných prvků*. Je dnes základem většiny programů pro MKP (95%). [2,4,8]

Deformační varianta vychází z Lagrangeova variačního principu minimální potenciální energie soustavy (těleso + jeho zatížení), nebo-li jeho vnitřních a vnějších (zatížení) sil [8].

Celková potenciální energie je formulována jako:

$$\Pi = \Pi_i + \Pi_z = \min \quad (23)$$

kde: Π - celková potenciální energie systému, Π_i - deformační energie vnitřních sil těles, Π_z - práce vnějších sil.

Princip minima potenciální znamená, že ze všech kinematicky přípustných stavů pružného tělesa nastává takový stav, který dává systému minimální potenciální hodnotu. [3, 8]

Pro spojitě 3D těleso rozdělené do m elementů můžeme celkovou potenciální energii elementu vyjádřit vztahem.

$$\Pi = \sum_{e=1}^m \Pi^e - \{d\}^T \{f\} \quad (24)$$

kde: součin $\{d\}^T \{P\}$ představuje práci vykonanou soustředěnými vnějšími silami.

Rovnici můžeme přepsat do tvaru:

$$\Pi^e = \Lambda^e - W_0^e - W_P^e \quad (25)$$

V maticovém tvaru lze energetický funkcional pro element e zapsat ve tvaru

$$\begin{aligned} \Pi^e = & \frac{1}{2} [d]^e \left(\int_V [B]^T [D][B] dV \right)^e \{d\}^e - \\ & - [d]^e \left(\int_V [B]^T [D] \{\varepsilon_T\} dV + \int_V [N]^T \begin{Bmatrix} X^* \\ Y^* \\ Z^* \end{Bmatrix} dV + \int_{\Gamma} [N]^T \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{Bmatrix} d\Gamma \right)^e \end{aligned} \quad (26)$$

V rovnici představuje první a druhý integrál energii přetvoření (deformační energii), třetí integrál představuje práci vykonanou objemovými silami a čtvrtý integrál představuje práci vykonanou rovnoměrným zatížením na povrchu oblasti Γ . Pro rovnováhu systému nabývá potenciální energie systému své minimum tzn. první variace energetického potenciálu

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \partial \Pi^e(u, v, w) = 0 \quad (27)$$

kde:

$$\partial \Pi(u, v, w) = \sum_{e=1}^m \left(\frac{\partial \Pi^e}{\partial u_i} \delta u_i + \frac{\partial \Pi^e}{\partial v_i} \delta v_i + \frac{\partial \Pi^e}{\partial w_i} \delta w_i \right) = 0 \quad (28)$$

Úpravami předcházejících rovnic dostáváme pak tzv. matici tuhosti pro element.

$$[k]^e = \int_V [B]^T [D] [B] dV \quad (29)$$

kde: $[B]$ - transformační matice, $[D]$ - matice fyzikálních konstant.

Rovnice pro element nabývá tento standardní tvar:

$$[k]^e \{d\}^e = \{f\}^e \quad (30)$$

kde: $\{d\}^e$ - vektor zobecněných posuvů a $\{f\}^e$ - vektor zatížení v uzlech.

$${}^T [d]^e = [u_1 \ v_1 \ w_1 \ \dots \ u_r \ v_r \ w_r] \quad (31)$$

$${}^T \{f\}^e = [\{f\}^1 \ \{f\}^2 \ \dots \ \{f\}^r] \quad (32)$$

kde: r – počet uzlů elementu.

Rovnice tuhosti celého systému pro diskretizované těleso z m uzly musí zahrnout i rovnice všech uzlů a můžeme ji přepsat do tvaru:

$$\begin{bmatrix} M \times M \\ K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} M \times 1 \\ d \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M \times 1 \\ f \end{Bmatrix} \quad (33)$$

kde: $[K]$ je matice tuhosti pro celý systém, $\{d\}$ je vektor uzlových posunutí pro celý systém, $\{f\}$ vektor výsledných sil v uzlech, M je počet uzlů - $M = 3m$ pro 3D úlohu a $M = 2m$ pro 2D úlohu.

Rovnice pro výpočet tenzoru napětí v závislosti na posuvech a počátečních přetvořeních se může zapsat jako:

$$\{\sigma\} = [D][B]\{d\} \quad (34)$$

V případě, že existují počáteční napětí je nutné je superponovat. [3, 6, 8, 15, 25]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je navržení úpravy filmového spoje, které sníží koncentrace napětí a pokusit se tak snížit poruchy spoje, ke kterému dnes běžně dochází. Vychází se tvaru filmového spoje a materiálu od zadavatele Kasko s.r.o.

V praktické části bylo postupováno podle těchto kroků:

- Nejdříve jsou naměřeny a vyhodnoceny materiálové charakteristiky potřebné pro další výpočet pomocí numerické MKP.
- Vytvoření modelu filmového spoje s ostrým vrubem.
- Výpočet tenzoru napětí a deformace.
- Návrhy nového řešení filmového spoje.
- Analýza nového řešení.
- Porovnání a vyhodnocení výsledků.

Pro modelování a následný výpočet tenzoru napětí a deformace byly použity program *Samcef* a verze *SamcefField* založený na metodě konečných prvků.

8 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

V této práci byla připravena pouze zkušební tělesa pro tahovou zkoušku ve tvaru oboustranných lopatek. Zkušební tělesa byla připravena z materiálu Bergaform C310 natur + Lifocolor–šedý 8000269 POM/UV (hmotnostní podíl 8%) tvářecím procesem vstřikováním do uzavřené dutiny formy.

8.1 Proces vstřikování

Před vlastním vstřikování byl granulát sušen v sušárně po dobu 8 hodin při teplotě 80°C. Pro vstřikování byl použit vstřikovací stroj DEMAG ERGOtech 50-200 systém. Vlastní vstřikování proběhlo při těchto podmínkách:

vstřikovací:	• tlak	800 bar
	• dotlak	600 bar
	• rychlost	70 mm/s
doba:	• dotlaku	15s
	• chlazení	20s
	teplota formy	80 °C
teplotní pásma:		
	1 pásmo	170°C
	2 pásmo	190°C
	3 pásmo	200°C
	4 pásmo	210°C

8.2 Zkušební tělíska ve tvaru oboustranné lopatky

Rozměry	[mm]
Celková délka	149±1,0
Šířka lopatek	20±1,0
Délka pracovní části	80±0,5
Šířka pracovní části	10±1,0
Tloušťka pracovní části	3,9± 0,1

Tab. 1 – Rozměry zkušebních tělísek.

9 TAHOVÁ ZKOUŠKA

Pro tahovou zkoušku byl použit trhací stroj Ultra-High-precision Universal Testing Machines AG-X SHIMADZU, který je v laboratořích UFMI.

Zkušební těleso bylo umístěno mezi zkušební čelisti tak aby podélná osa tělesa byla shodná s osou stroje. Rychlost zkoušení byla nastavena na 50mm/min a zkušební tělesa byla kondicionována v laboratorním prostředí. Po dobu zkoušení byla zaznamenávána a vyhodnocována změna síly a změna délky tělesa. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 2.

Číslo vzorku	σ [MPa] při 1mm protažení	ε	E [Mpa]	F_{\max} [N]	σ_{pt} [MPa]	F_1 [N]
1	10,53	0,0125	842,62	2206,35	56,57	1894,47
2	11,56		924,88	2203,78	56,51	1724,77
3	10,89		870,99	2197,26	56,34	2106,58
4	10,53		842,64	2210,79	56,69	1682,05
5	11,20		895,77	2162,57	55,45	1721,84
Průměrná hodnota	10,94		875,38	2196,15	56,31	1825,94
Směrodatná odchylka	0,40		31,72	17,35	0,44	158,26

Tab. 2 – Naměřené a vypočtené hodnoty z tahové zkoušky.

V tabulce 2 je F_{\max} maximální naměřená síla, F_1 je síla při přetržení tělesa, σ_{pt} je mez pevnosti v tahu.

Z naměřených hodnot vypočítáme následující veličiny:

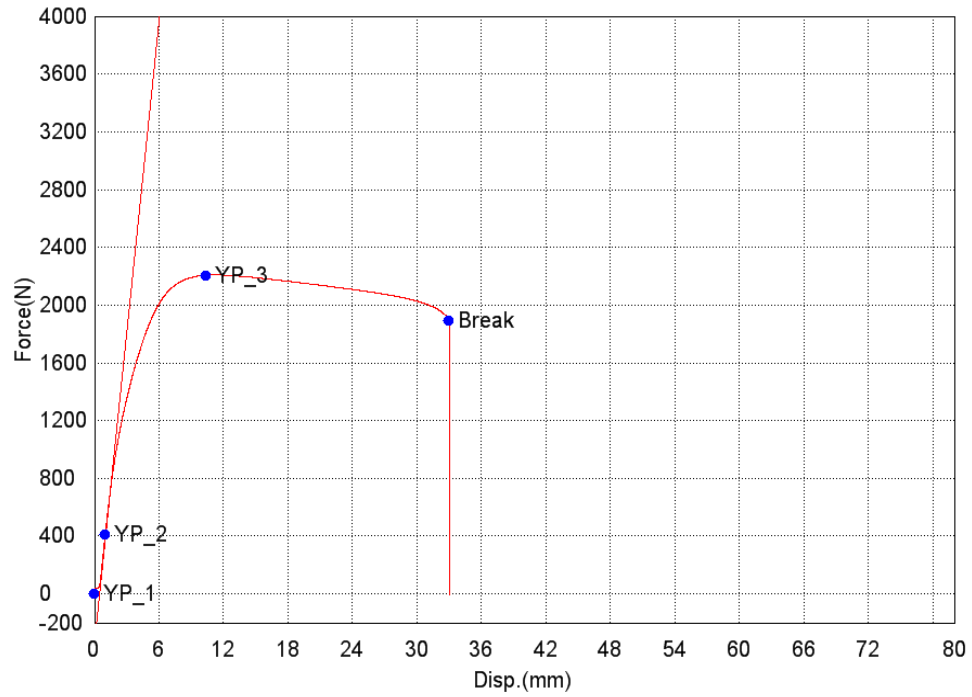
- deformace ε (poměrné prodloužení)

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{80} = 0,0125 \quad (35)$$

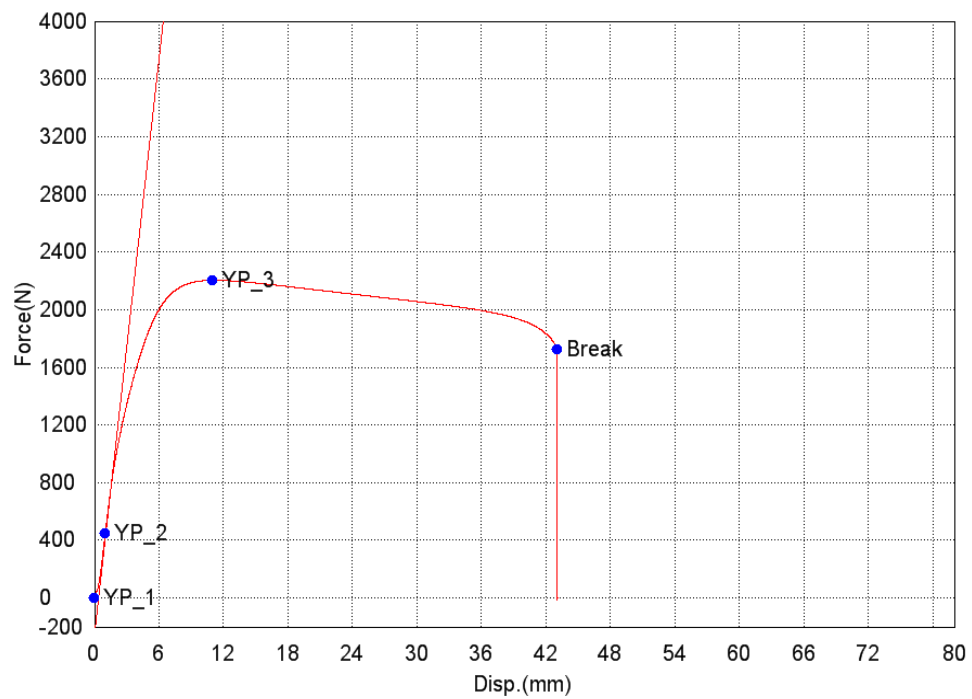
- mez kluzu σ_k

$$\sigma_k = \frac{F_{lin}}{A} = \frac{F_{lin}}{(a \cdot b)} = \frac{900}{(10 \cdot 3,9)} = 23 \text{MPa} \quad (36)$$

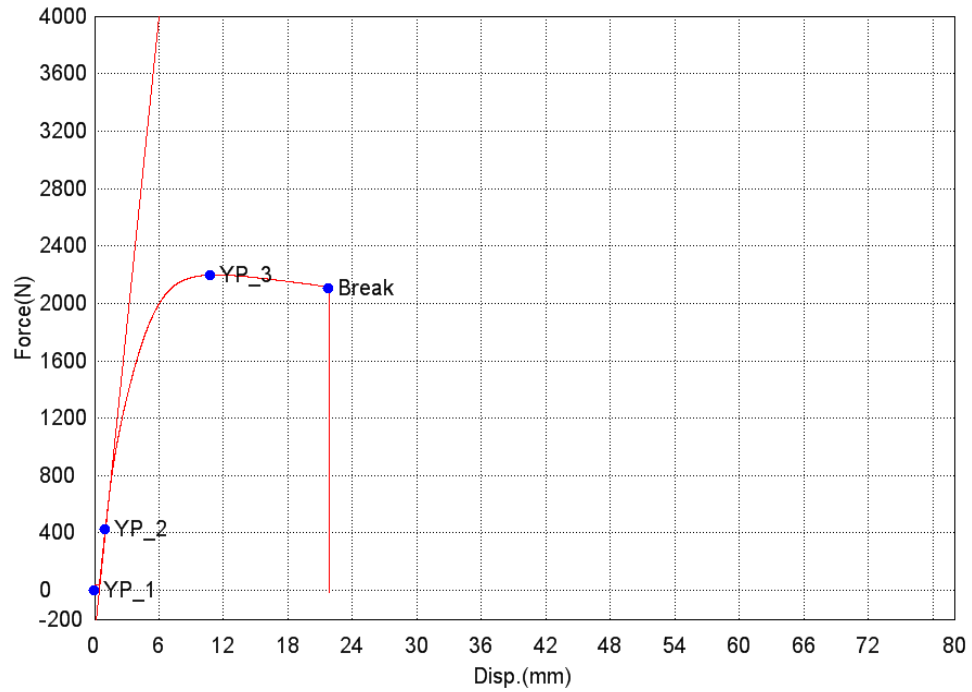
V rovnici 36 F_{lin} představuje lineární sílu, která byla odečtená z obr. 13 až 17, A představuje velikost plochy průřezu zkušební tělíska.



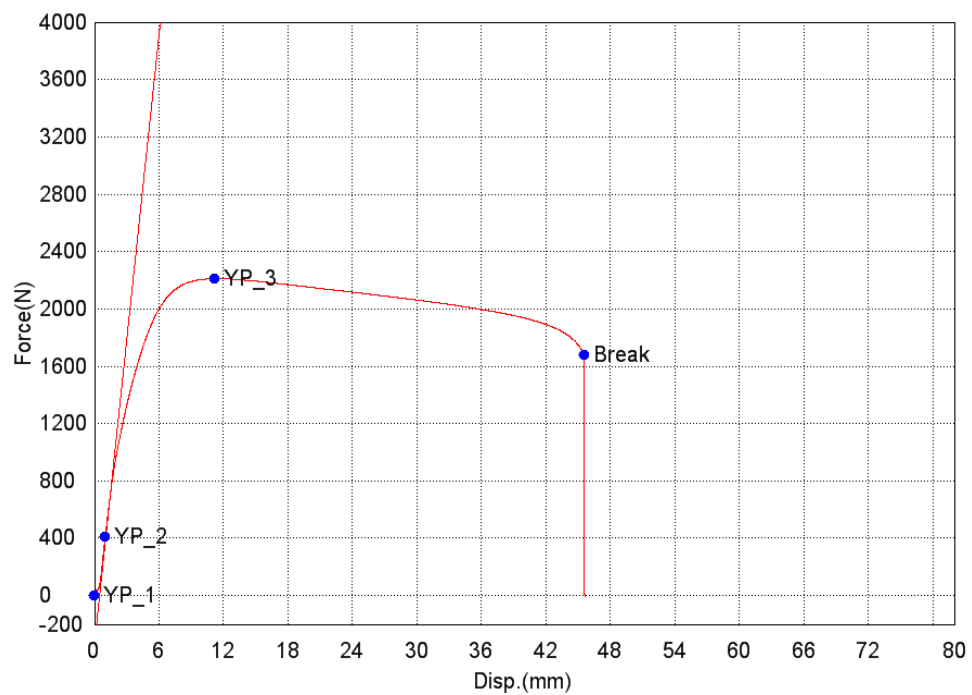
Obr. 13 – Závislost prodloužení Δl na působící síle F pro vzorek č. 1.



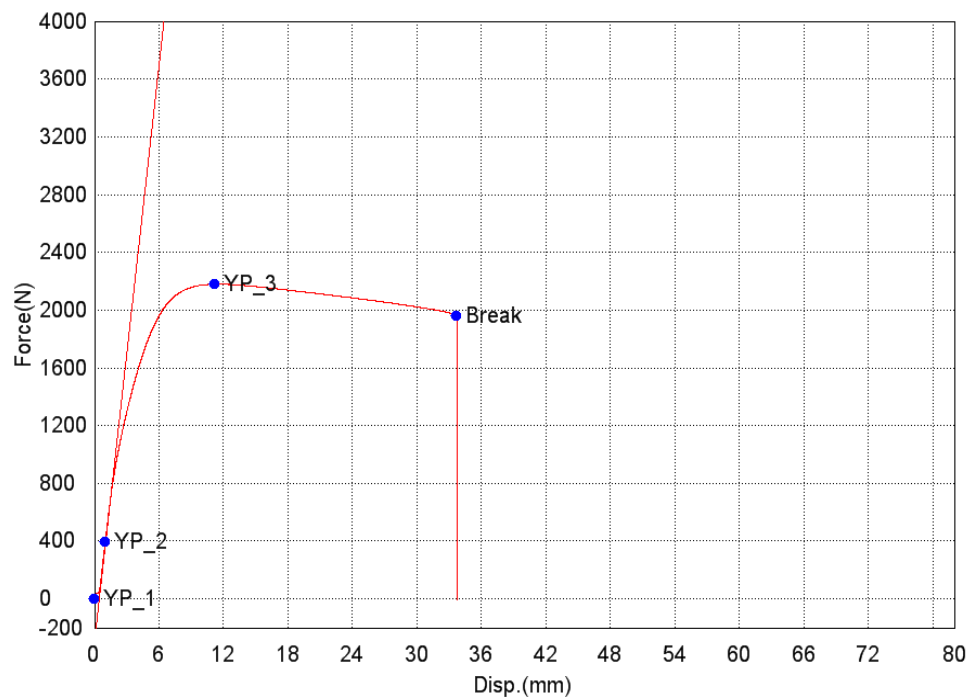
Obr. 14 – Závislost prodloužení Δl na působící síle F pro vzorek č. 2.



Obr. 15 – Závislost prodloužení Δl na působící síle F pro vzorek č. 3.



Obr. 16 – Závislost prodloužení Δl na působící síle F pro vzorek č. 4.



Obr. 17 – Závislost prodloužení Δl na působící síle F pro vzorek č. 5.

10 POSUZOVANÁ SOUČÁST

Filmový spoj je součástí výrobku vyráběného firmou KASKO s.r.o. Z důvodu firemního tajemství nemůže být zobrazen celý výrobek, proto je na obrázcích pouze část výrobku tj. filmový spoj.

Na obrázku 18 je zachycen filmový spoj s rozměry : celková délka spoje je 10 mm , šířka je 2 mm a tloušťka spoje je 0,8 mm.

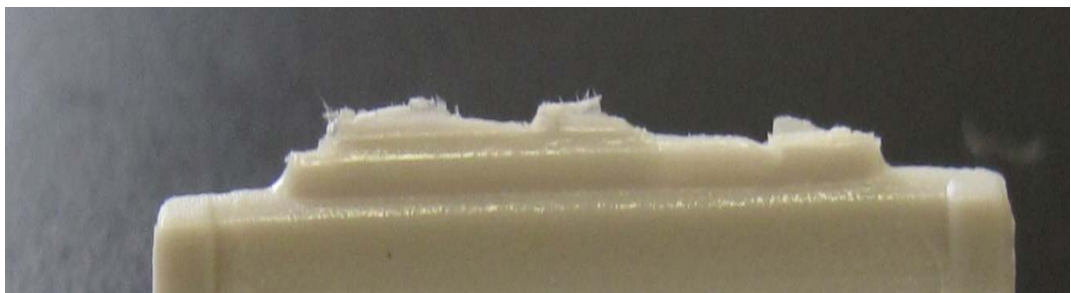


Obr. 18 – *Filmový spoj.*

Na obrázcích 19 a 20 je porušený filmový spoj, jehož porušením (lomem) je rozdělen výrobek na dvě části kdy je oddělena pohyblivá část (příklopka) od nepohyblivé stabilnější části výrobku.



Obr.19 – *Detail porušeného spoje - pohled B.*



Obr. 20 – *Detaily porušeného spoje – pohled A.*

10.1 Materiál součásti

Podrobný popis materiálu je uvedený v kapitole 1. Zde uvádím technický list materiálu Bergaform[®].

Bergaform[®] POM

unverstärkt

Eigenschaften	Prüfbedingungen	Prüfvorschrift ISO	Einheit	C-100	C-300	C-310 leichtfließend	C-900
Mechanische Eigenschaften							
Streckspannung ¹⁾	23 °C, 50 mm/Min	527-1/2	MPa	58	62	62	64
Streckdehnung ¹⁾	23 °C, 50 mm/Min	527-1/2	%	9,5	8,5	8	7,5
Nom. Bruchdehnung ¹⁾	23 °C, 50 mm/Min	527-1/2	%	95	28	25	15
Zug-Modul ¹⁾	23 °C, 1 mm/Min	527-1/2	MPa	2600	2900	2900	2900
Charpy-	23 °C	179/1eU	kJ/m ²	KB	KB	KB	KB
Schlagzähigkeit ⁴⁾	-30 °C	179/1eU	kJ/m ²	-	-	-	-
Charpy-	23 °C	179/1eA	kJ/m ²	10	7	6	4
Kerbschlagzähigkeit ²⁾	-30 °C	179/1eA	kJ/m ²	9	7	6	3,5
Izod-	23 °C	180/1A	kJ/m ²	-	6	6	-
Kerbschlagzähigkeit ²⁾	-30 °C	180/1A	kJ/m ²	-	6	6	-
Thermische Eigenschaften							
Schmelztemperatur	10K/Min	3146	°C	168	167	167	167
Formbeständigkeits-temperatur ³⁾	1,8 MPa	75-1/2	°C	102	104	105	105
Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	längs	DIN 53753	10 ⁻⁶ /K	1,2	1,2	1,2	-
Elektrische Eigenschaften							
Spez. Oberflächenwiderstand ⁶⁾		IEC 93	Ohm	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴
Spez. Durchgangswiderstand ⁶⁾		IEC 93	Ohm cm	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴	>10 ¹⁴
Dielektrischer Verlustfaktor ⁵⁾	1 MHz	IEC 250	10 ⁻⁴	20	20	20	25
Dielektrizitätszahl ⁶⁾	1 MHz	IEC 250		3,8	3,8	3,8	4
Durchschlagfestigkeit		IEC 243-1	kV/mm	35	35	35	35
Brennbarkeit							
Brennbarkeit	0,8 mm	UL 94	Stufe	HB	HB	HB	HB
	1,6 mm		Stufe	HB	HB	HB	HB
Sonstige Daten							
Dichte	23 °C	1183	g/cm ³	1,40	1,41	1,41	1,41
Feuchteaufnahme	23 °C, 50% r.F	62	%	0,2	0,2	0,2	0,2
Wasseraufnahme	23 °C, Sättigung	62	%	0,65	0,65	0,65	0,65
Schmelzindex MFR	190 °C/2,16 kg	1133	g/10 min	3,5	9	13	47
Volumenfließindex MVR	190 °C/2,16 kg	1133	ml/10 min	2,5	7,50	11	41

¹⁾ Zugstab nach ISO 2147
²⁾ Normstab (80x10x4) mm
³⁾ Normstab (130x10x4) mm
⁴⁾ Prüfkörper (80x80X1) mm

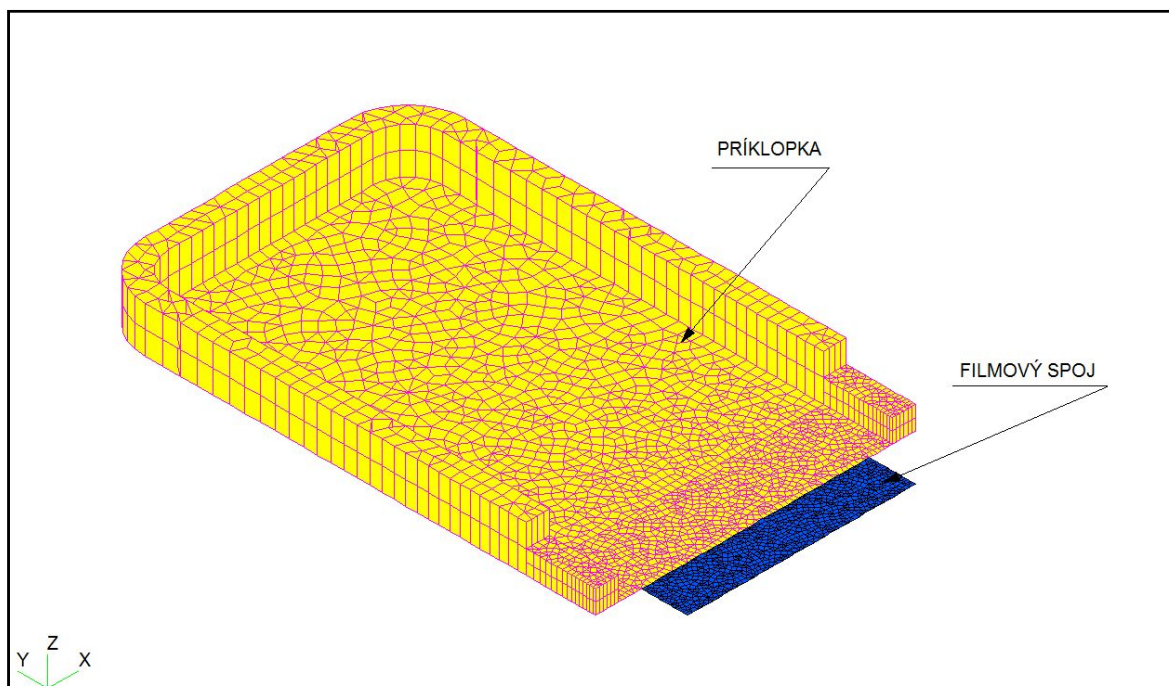
Alle Werte sind Richtwerte. Je nach Herstellungsbedingung können Einzelmessungen von genannten Werten abweichen. Eine Verbindlichkeit kann daraus nicht hergeleitet werden.

Obr. 21 – Technický list materiálu Bergaform[®] [5].

11 ANALÝZA FILMOVÉHO SPOJE S OSTRÝM VRUBEM

Jak je vidět z obrázků 19 a 20 k lomu docházelo jen ve filmovém spoji ve spojení s protikusem. Proto je pro tvorbu modelu uvažována pouze příklopka s filmovým spojem. Protikus filmového spoje vykazuje tak vysokou tuhost, že ho můžeme s pohledu filmového spoje považovat za tuhé těleso. Z těchto důvodů považujeme spojení filmového spoje s protikusem za tuhé vetknutí. Na obrázku 22 je zobrazen filmový spoj s ostrým vrubem, který rozměrově (kapitola 10) odpovídá skutečnosti a pohyblivá část výrobku tzv. příklopka.

Model představuje síť konečných prvků a tato síť je co nejvíce zjemněna v místech tvarových diskontinuit, které představují největší koncentrátoři napětí. V důsledku co největšího zjemnění vypočítáme přesnější hodnoty rozložení tenzoru napětí. Pro modelování a výpočet byl použit MKP programy *Samcef* a *SamcefField*.

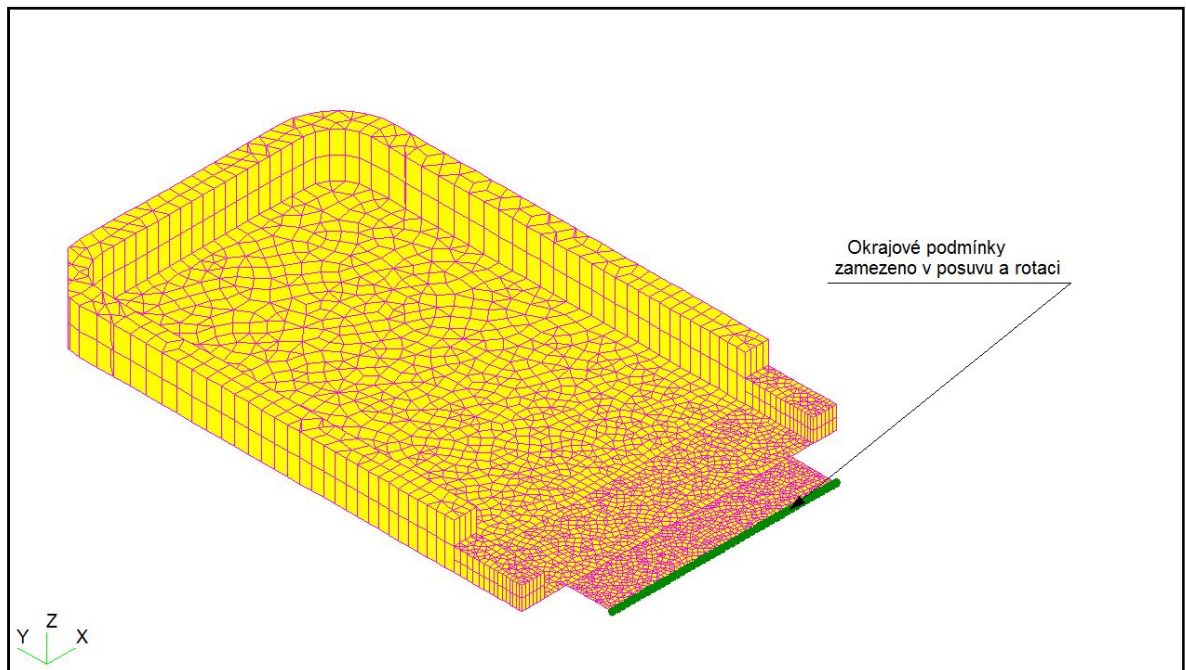


Obr. 22 – Síť konečných prvků – ostrý vrub.

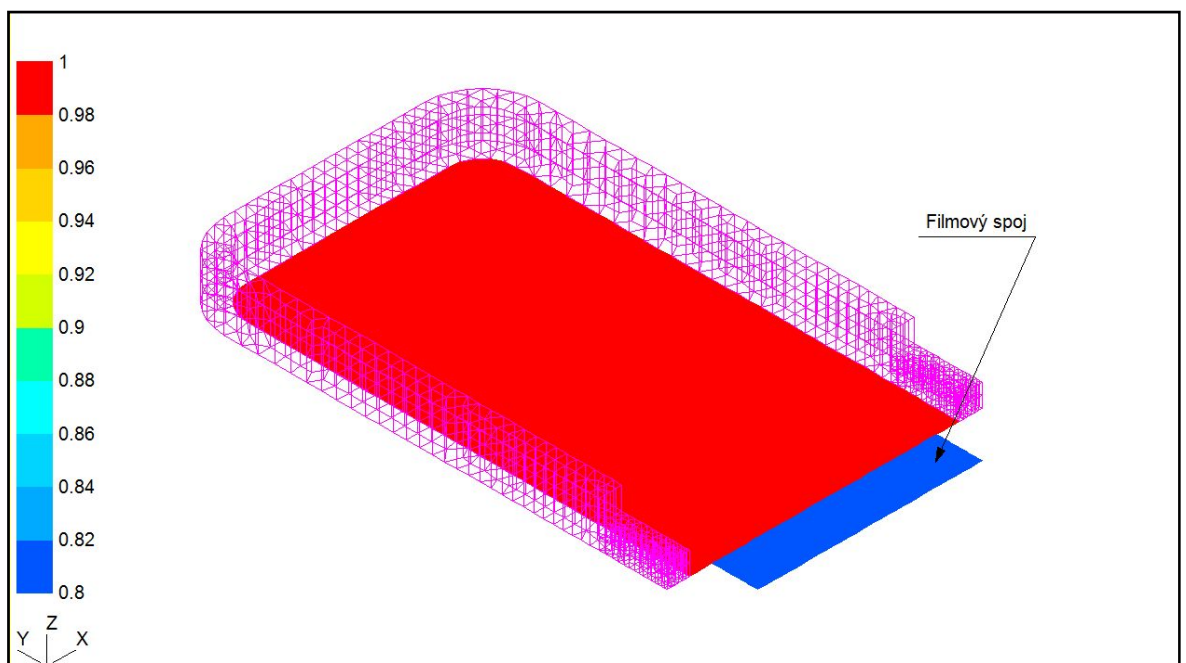
11.1 Materiálové charakteristiky a okrajové podmínky

Při zadání parametrů materiálu jsem vycházela z naměřených hodnot tahové zkoušky. Pro modul pružnosti byla použita hodnota $E = 924 \text{ MPa}$, která nejvíce odpovídá hodnotě udávané výrobcem materiálu Bergaform[®]. Pro Poissonovo číslo uvažuji hodnotu $\mu = 0,35$.

Uchycení filmového spoje bylo uvažováno jako tuhé vetknutí tj. zamezení pohybu a rotace v ose x , y , z . Pro výpočet byl použit 2D a 3D model příkopky s filmovým spojem.



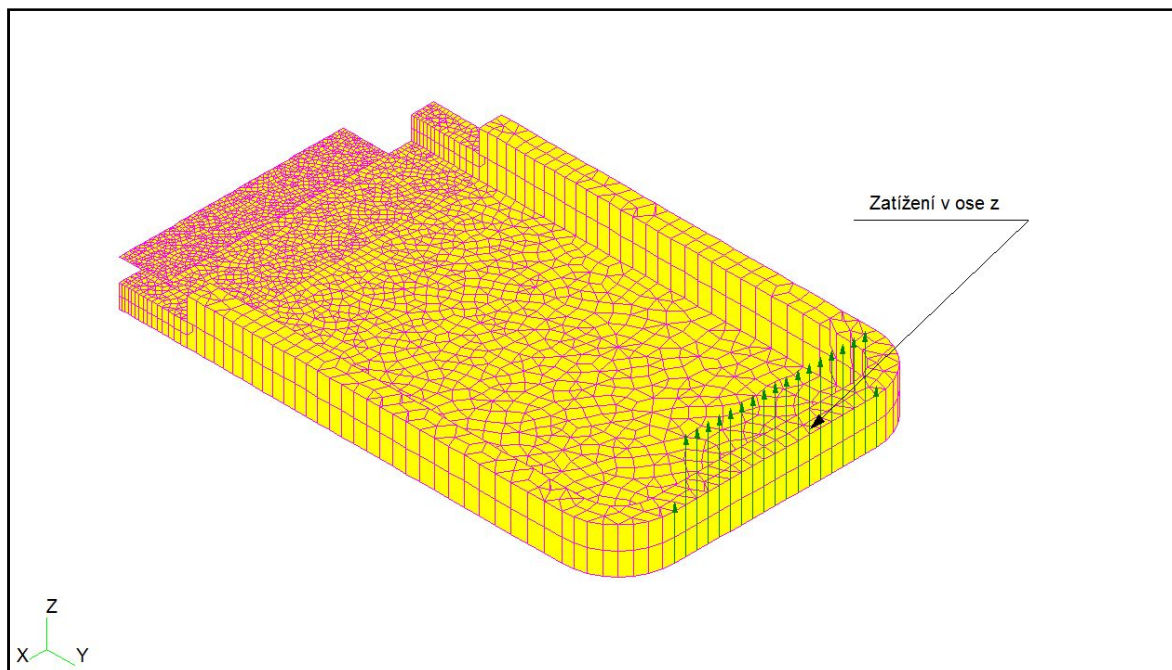
Obr. 23 – Okrajové podmínky- ostrý vrub.



Obr. 24 – Rozložení tloušťky – ostrý vrub.

Na obrázku 24 je zobrazena tloušťka materiálu po 2D plochách. Největší tloušťka zobrazena jako červená je 1mm a nejmenší tloušťka je 0,8 mm (modrá barva), tato tloušťka je v oblasti filmového spoje.

11.2 Zadání zátěžového stavu



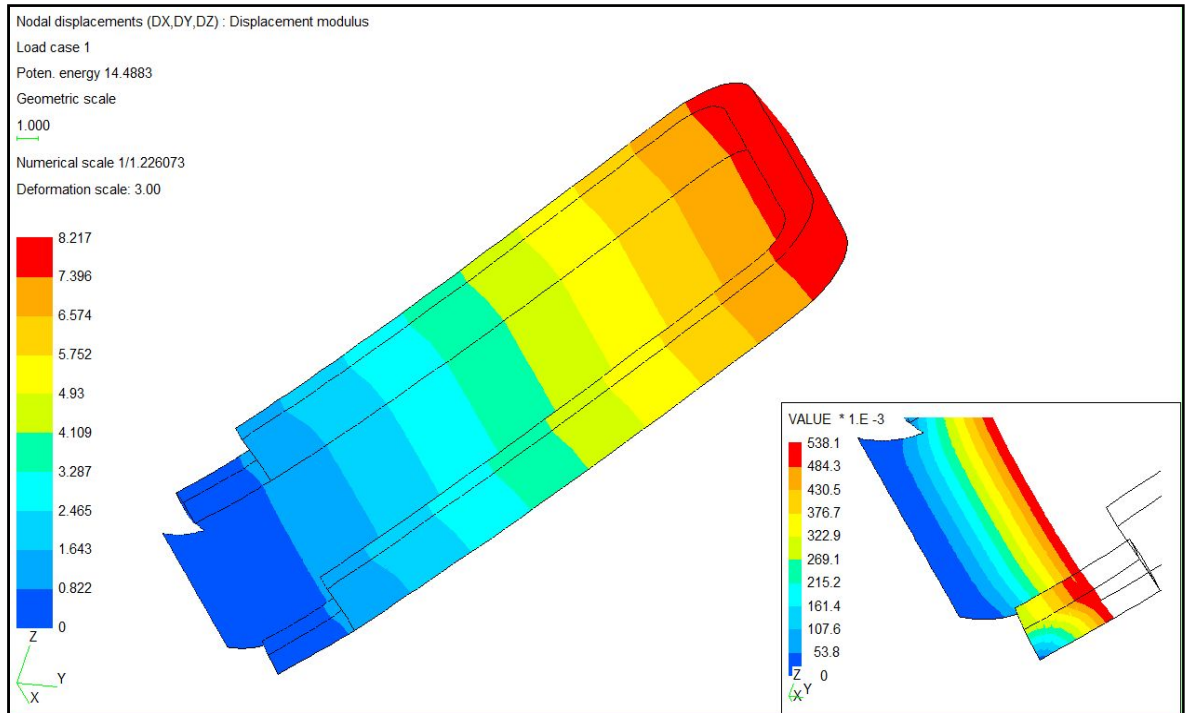
Obr. 25 – Zatížení – ostrý vrub.

Vzhledem k tomu že je obtížné vyjádřit velikost zatížení, byla zvolena pro zatížení hodnota liniové síly $F_L = 0,2 \text{ N}$.

Všechny výpočty jsou provedeny pro tuto hodnotu zatížení a posouzení špiček napětí k původnímu a upraveným modelům je tím jednoznačně určeno.

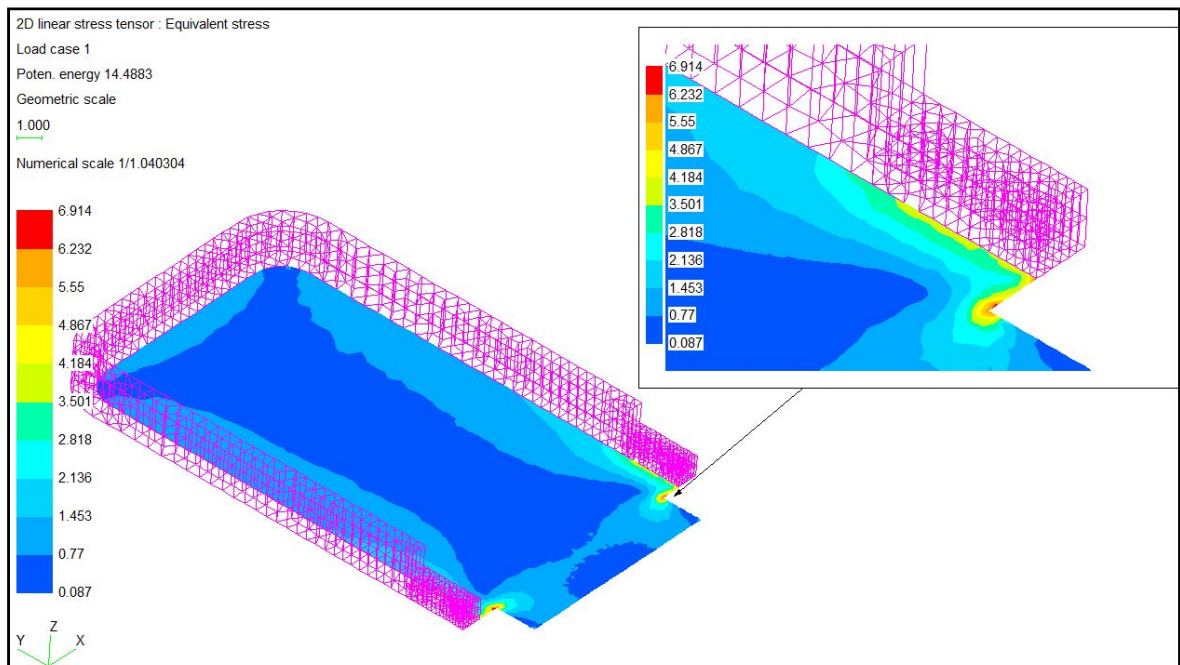
11.3 Analýza výsledků MKP

Po vytvoření MKP modelů, zadání okrajových podmínek, materiálových charakteristik a zatížení byl proveden výpočet velikostí deformací a tenzoru velikosti napětí filmového spoje s příklopkou. Výsledky velikosti deformací a některých napětí jsou v grafické formě uvedeny na obrázcích 26 až 31.

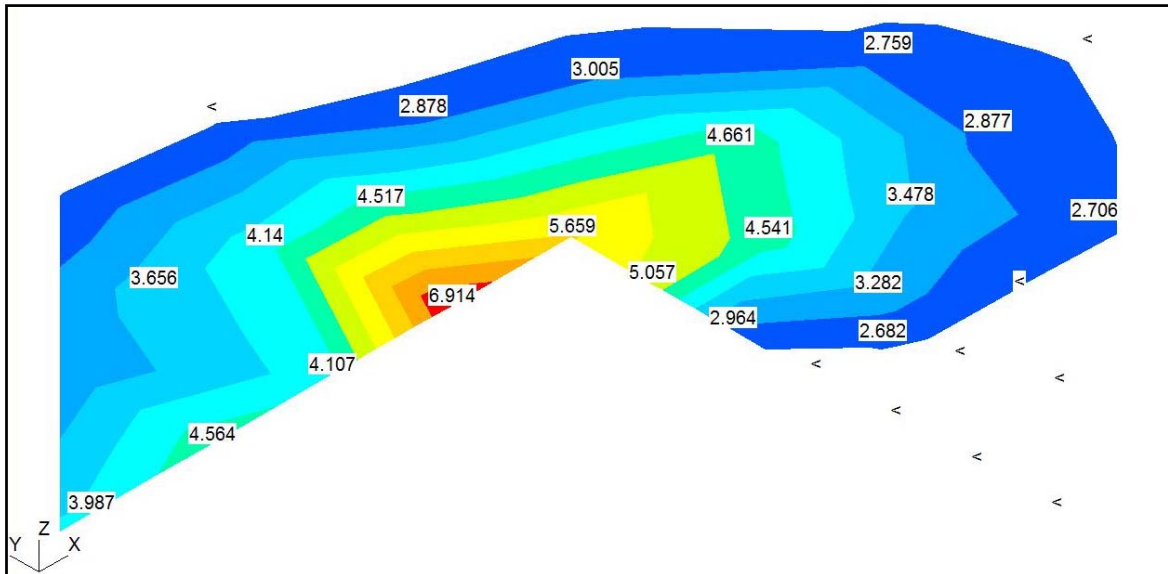


Obr. 26 – Celková deformace – ostrý vrub.

Na levé straně obrázků je barevná stupnice s hodnotami deformací nebo napětí. Největší hodnota deformace nebo napětí je označena červenou barvou.



Obr. 27 – HMM napětí na střednici – ostrý vrub .

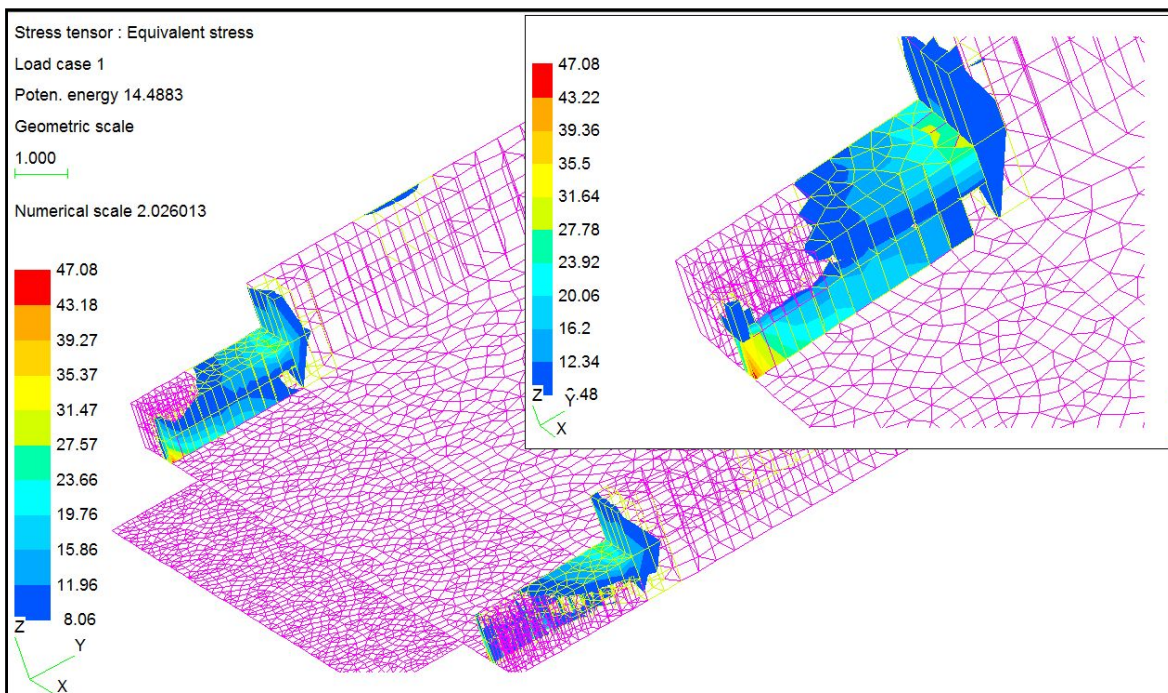


Obr. 28 – Napětí HMH na střednici - detail ostrého vrubu .

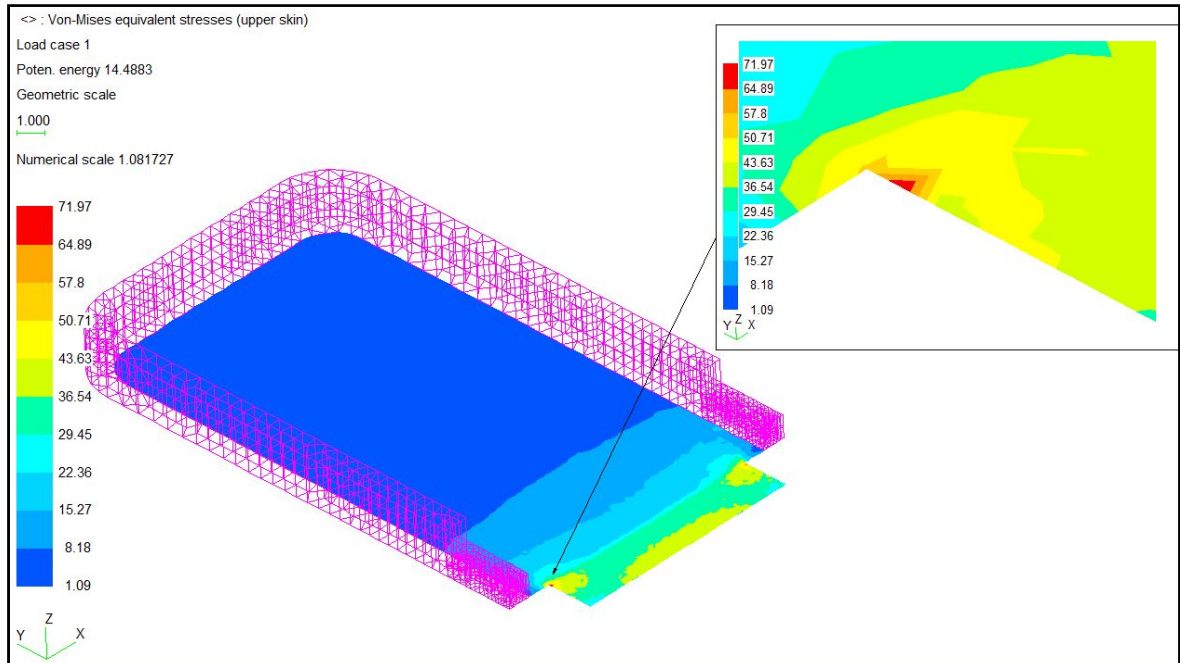
Na obr. 28 je vidět že špička napětí působí v malé oblasti. Maximální hodnota napětí je:

$$\sigma_{max}^{HMH} = 6,91 \text{ MPa} \quad (37)$$

Rozložení tenzoru napětí v 3D objemu tělesa ukazuje obrázek 29. Ve zbývajících obrázcích je napětí HMH v horní (upper) vrstvě a spodní (lower) vrstvě.



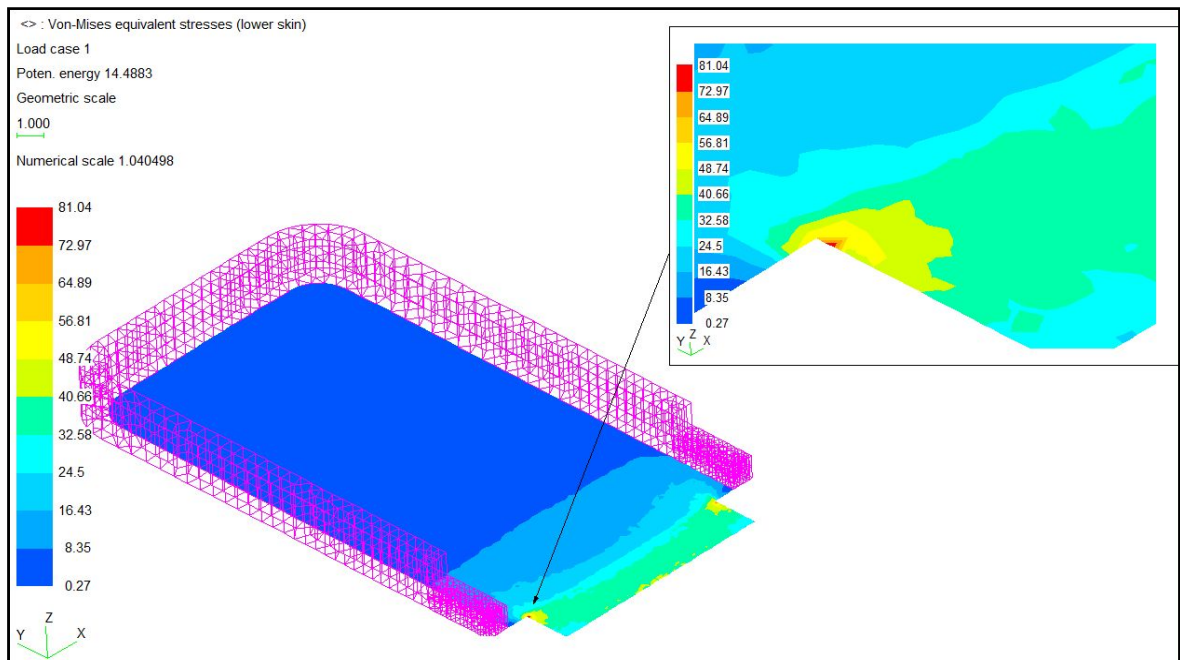
Obr. 29 – Špička napětí v 3D objemu - ostrý vrub.



Obr. 30 – HMH napětí horní (upper) vrstva - ostrý vrub.

Maximální hodnota napětí HMH horní (upper) vrstva:

$$\sigma_{max}^{upper} = 71,97 \text{ MPa} \quad (38)$$



Obr. 31 – HMH napětí spodní (lower) vrstva - ostrý vrub.

Maximální hodnota napětí HMH spodní vrstva:

$$\sigma_{max}^{lower} = 81,04 \text{ MPa} \quad (39)$$

11.4 Výpočet součinitele tvaru

Součinitel tvaru z výsledků MKP u modelu s ostrým vrubem je počítán jako podíl maximálního napětí v místě vrubu a nominálního napětí – napětí vzdálené v dostatečné vzdálenosti od vrubu. Pro výpočet součinitele α byla uvažována střednicová rovina. Hodnoty napětí jsou odečteny z obrázků 25 a 26.

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{\sigma_{max}^{uzel}}{\sigma_{nom}} = \frac{5,659}{1,204} = 4,7 \quad (40)$$

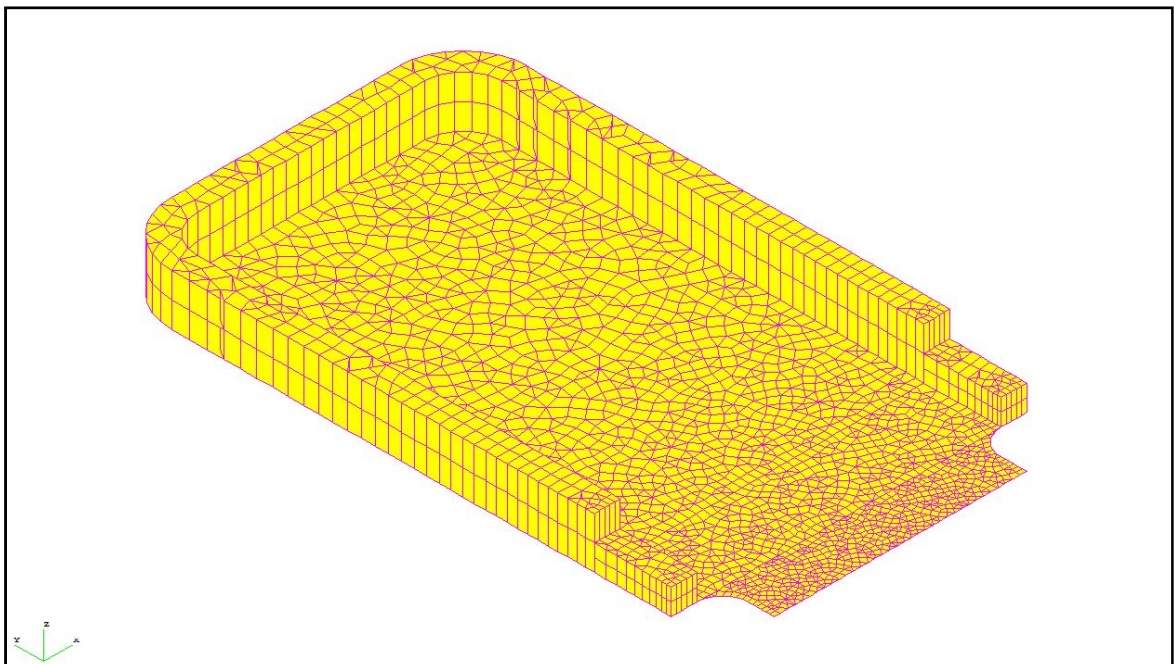
12 NÁVRH NOVÉHO ŘEŠENÍ FILMOVÉHO SPOJE

Při řešení nového konstrukčního tvaru filmového spoje (dále jen spoje), který by snížil velikost napětí jsem vycházela z analýzy spoje s ostrým vrubem. Hlavním cílem bylo pokusit se vhodnými úpravami spoje snížit velikost špičky napětí, které jsou rozhodující v únavovém procesu a při vzniku a šíření trhliny.

Byly navrženy tři řešení. Prvním z nich představuje nahrazení ostrého vrubu radiusem o poloměru $R=1\text{mm}$. V druhém případě byla provedena náhrada ostrého vrubu maximálním možným radiusem o poloměru $R = 2\text{mm}$ a ve třetím případě bylo do modelu s poloměrem $R= 1\text{mm}$ přidány dva odlehčovací otvory s poloměrem $R = 0,5\text{mm}$.

12.1 Model spoje R1

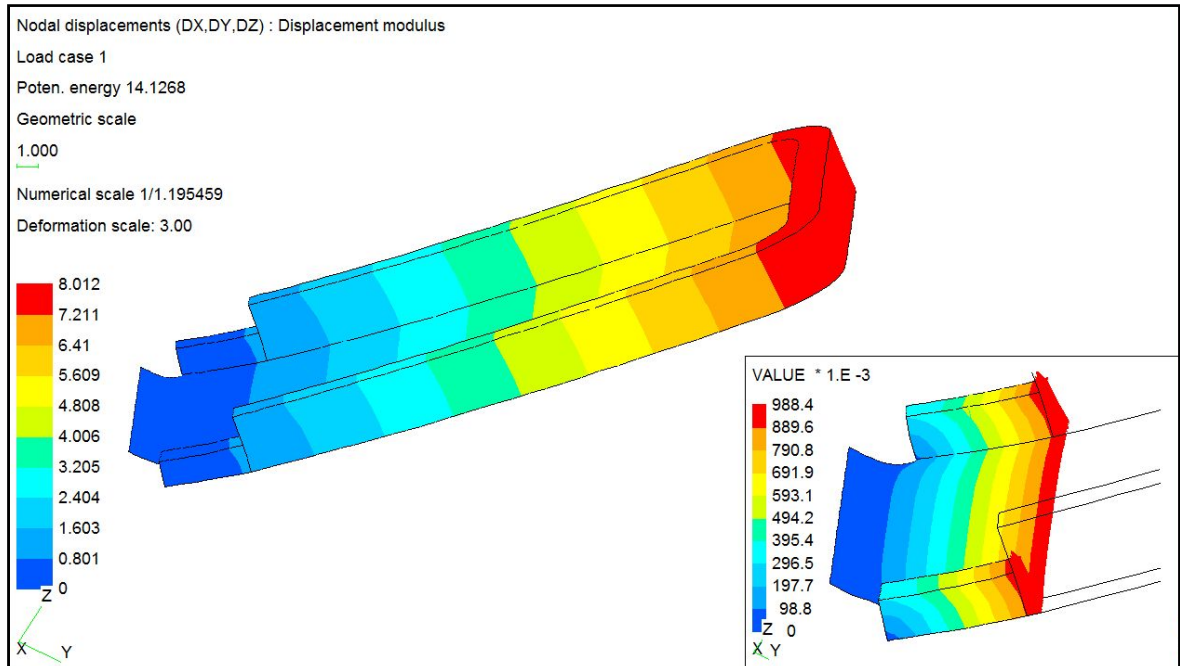
V prvním případě byl ostrý vrub nahrazen radiusem o poloměru $R = 1\text{mm}$. Model představuje síť konečných prvků a tato síť byla co nejvíce zjemněna v místech tvarových diskontinuit, které představují největší koncentrátoři napětí.



Obr. 32 – Síť konečných prvků – model R1.

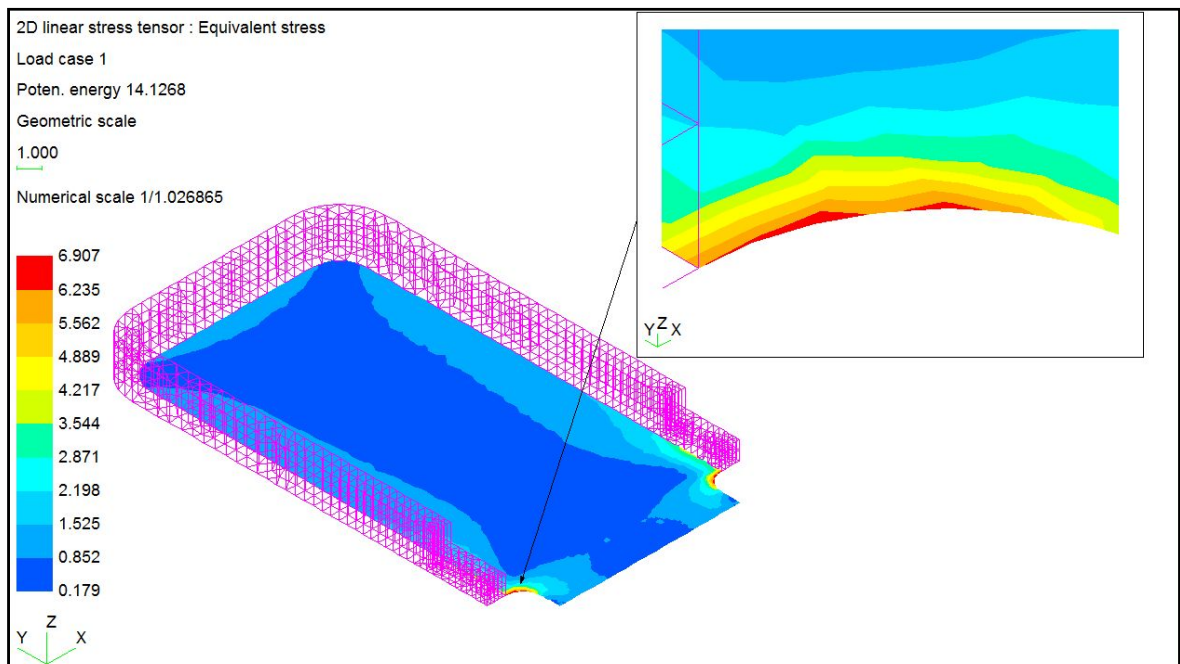
12.1.1 Analýza modelu R1

Výsledky velikosti deformací a některých napětí jsou v grafické formě uvedeny na obrázcích 33 až 37.



Obr. 33 – Celková deformace - model R1.

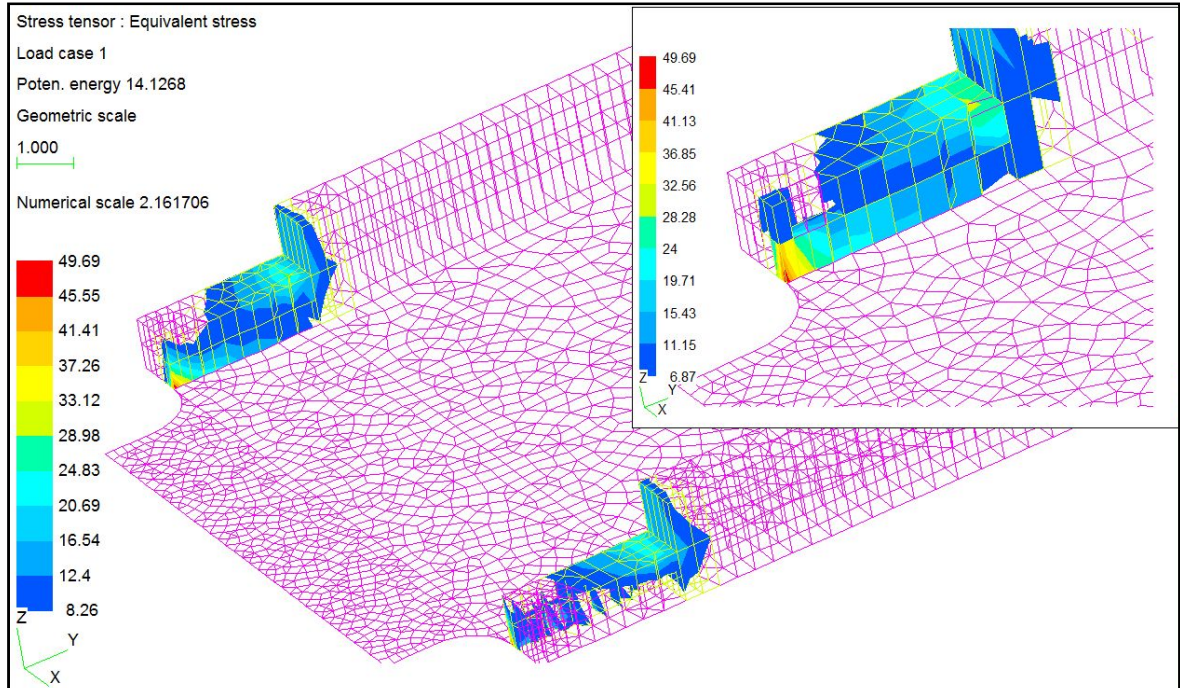
Nahrazení ostrého vrubu radiusem bylo dosaženo snížení hodnoty HMH napětí. HMH napětí na střednici se snížilo jen nepárně jak můžeme vidět na obr. 34, ale hodnoty napětí v horní (upper) a dolní (lower) vrstvě se snížili téměř na polovinu v porovnání s ostrým vrubem.



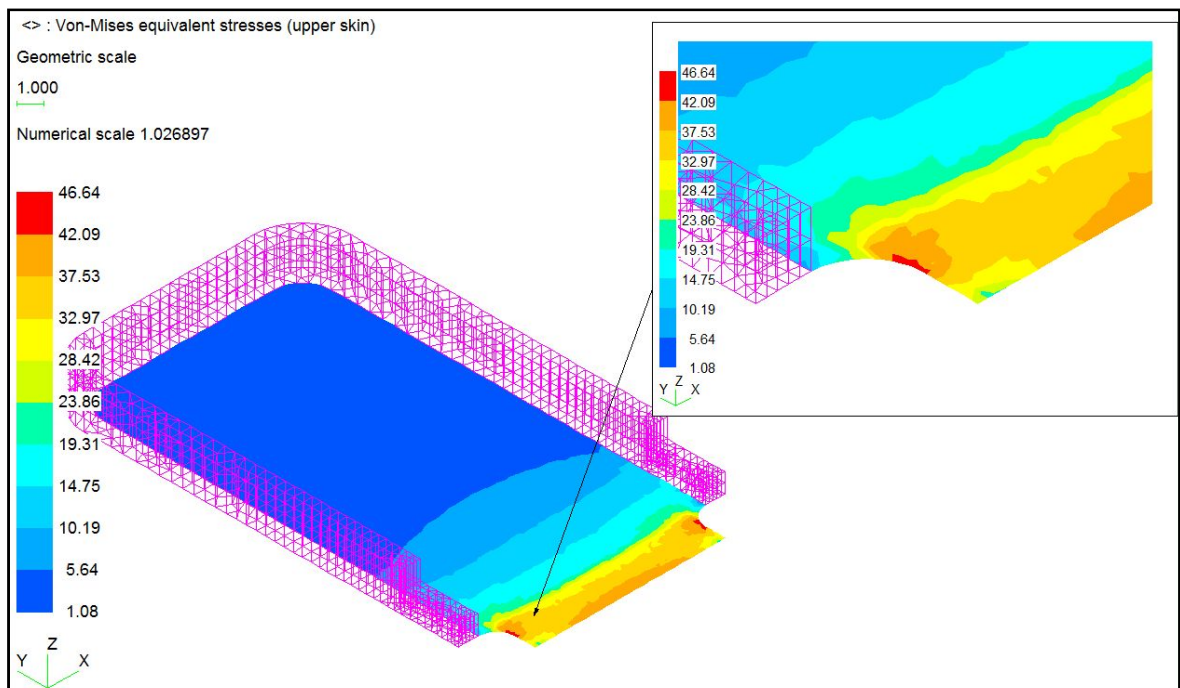
Obr. 34 – HMH napětí střední vrstva - model R1.

Maximální hodnota napětí HMM na střednici:

$$\sigma_{max}^{HMH} = 6,91 \text{ MPa} \quad (41)$$



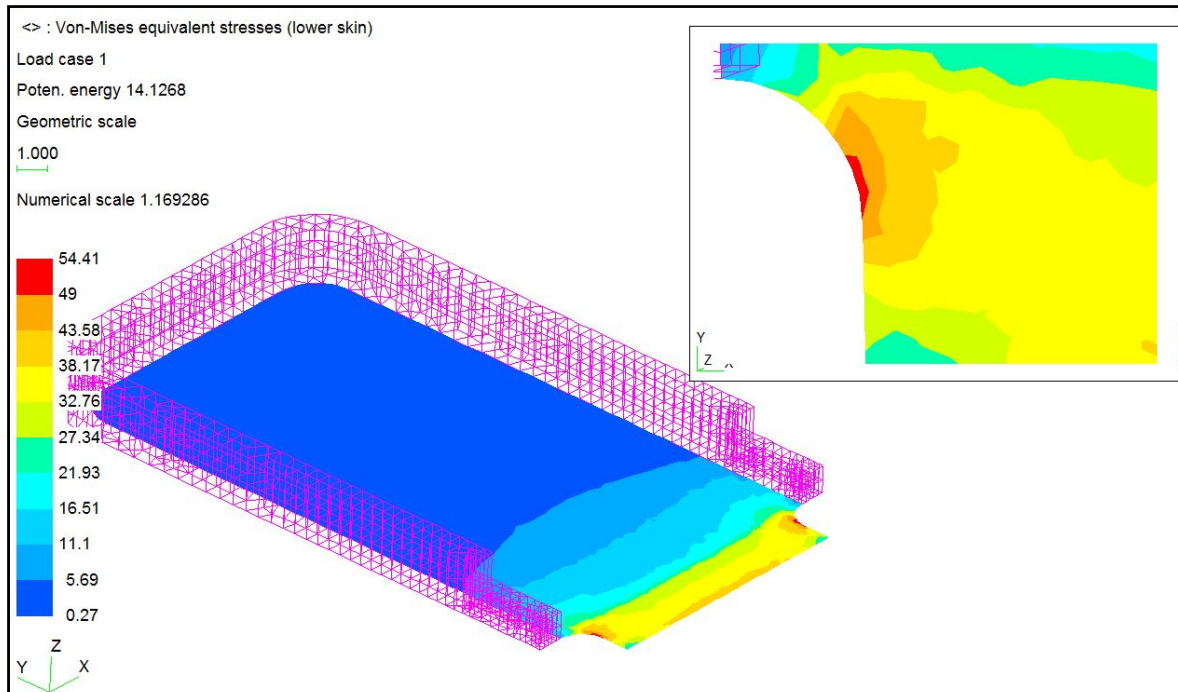
Obr. 35 – Špičky napětí v 3D objemu – model R1.



Obr. 36 – HMM napětí horní vrstva - model R1.

Z obrázku odečtená hodnota napětí HMH na horní (upper) vrstvě:

$$\sigma_{max}^{upper} = 46,64 \text{ MPa} \quad (42)$$



Obr. 37 – HMH napětí spodní (lower) vrstva – model R1.

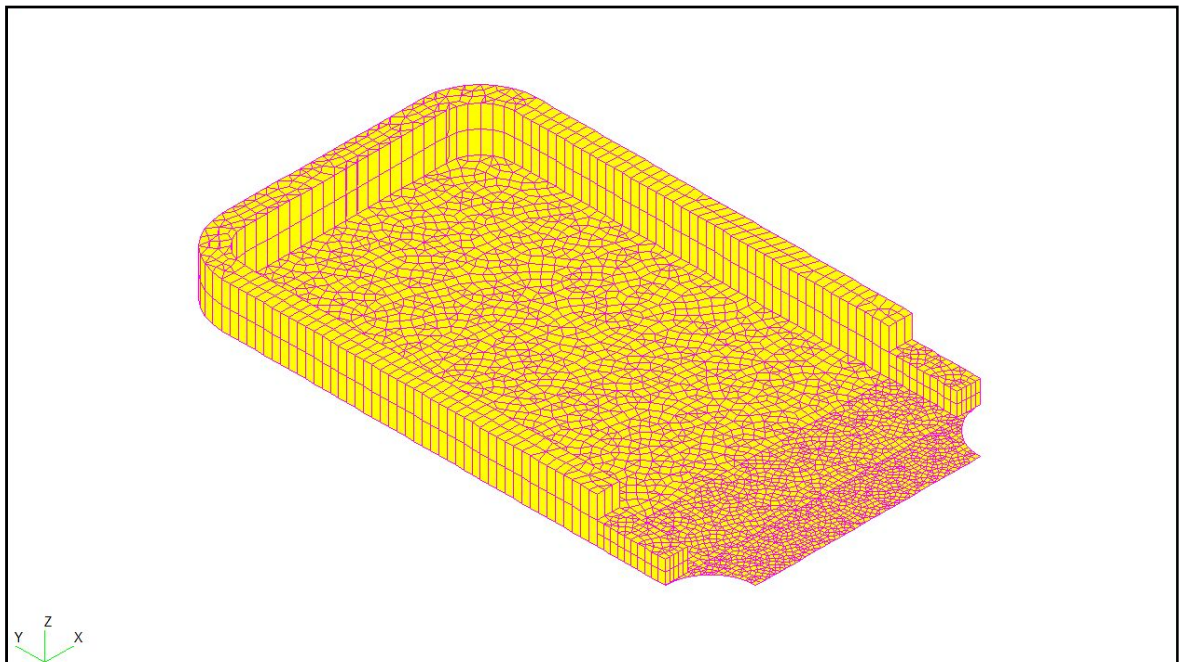
Maximální hodnota napětí HMH spodní (lower) vrstva:

$$\sigma_{max}^{lower} = 54.41 \text{ MPa} \quad (43)$$

12.2 Model spoje R2

Jak jsem uvedla již v úvodu kapitoly byl druhého modelu ostrý vrub nahrazen maximálním možným radiusem o poloměru $R = 2\text{mm}$.

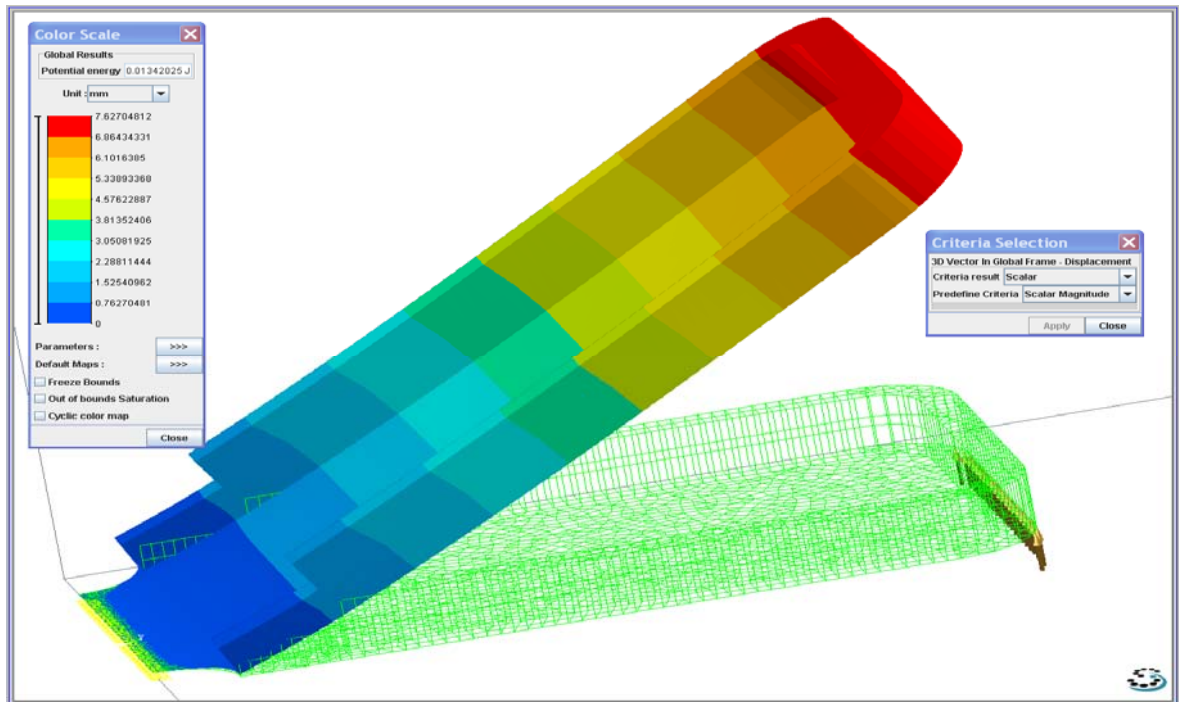
Model představuje síť konečných prvků a tato síť byla co nejvíce zjemněna v místech tvarových diskontinuit, které představují největší koncentrátoři napětí.



Obr. 38 – Síť konečných prvků - model R2.

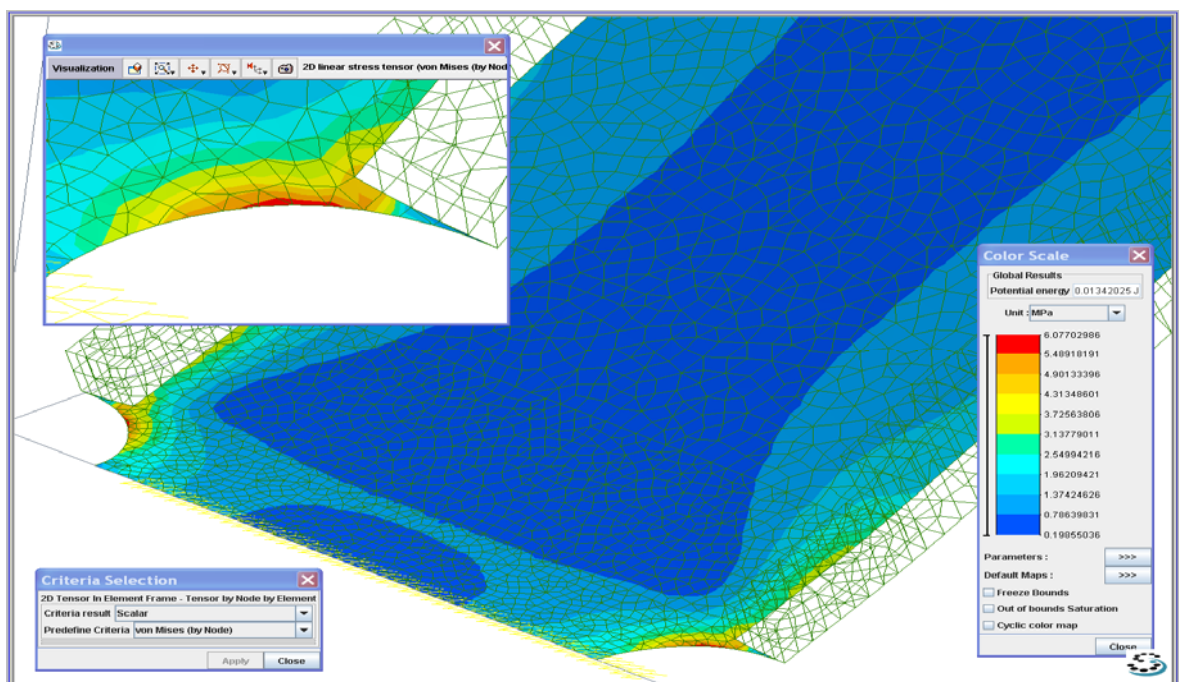
12.2.1 Analýza modelu R2

Na obrázku 37 je celková deformace modelu, kde zelený obrys znázorňuje původní polohu nezatíženého modelu.



Obr. 39 – Celková deformace – model R2.

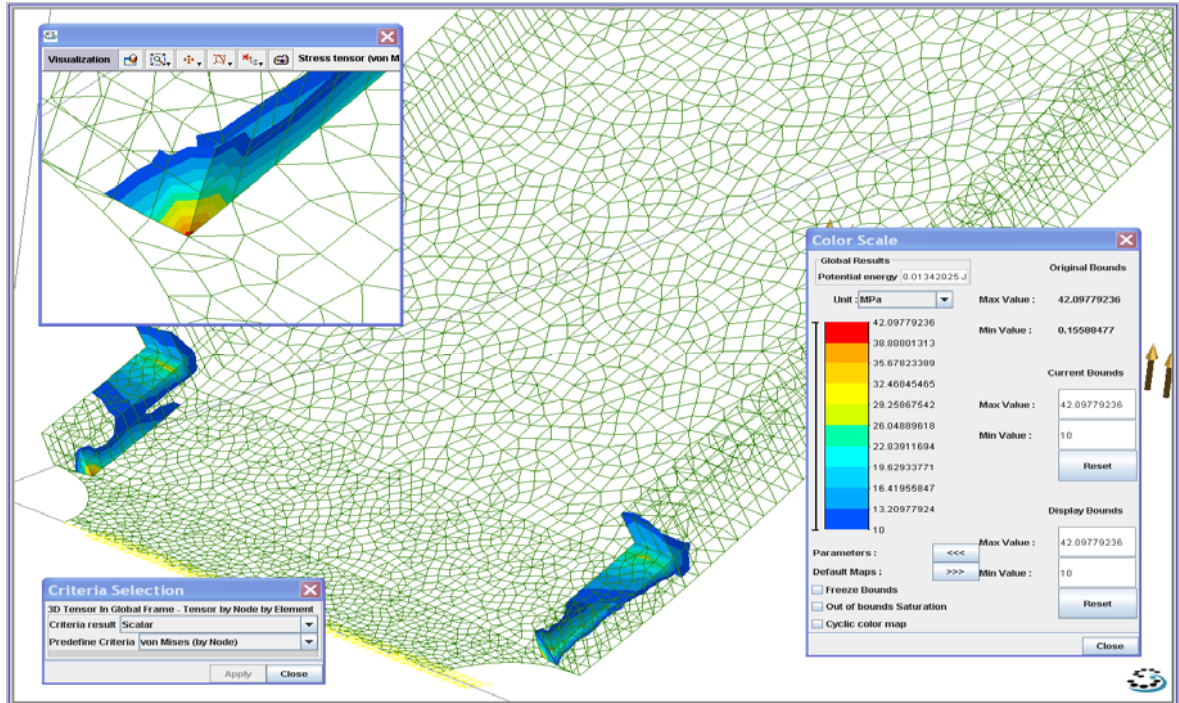
Nahrazením ostrého vrubu větším radiusem došlo opět ke snížení hodnot napětí. Z detailu obrázku 40 můžeme vidět, že radius nevychází ze stejného místa tělesa jako tomu bylo u modelu R1.



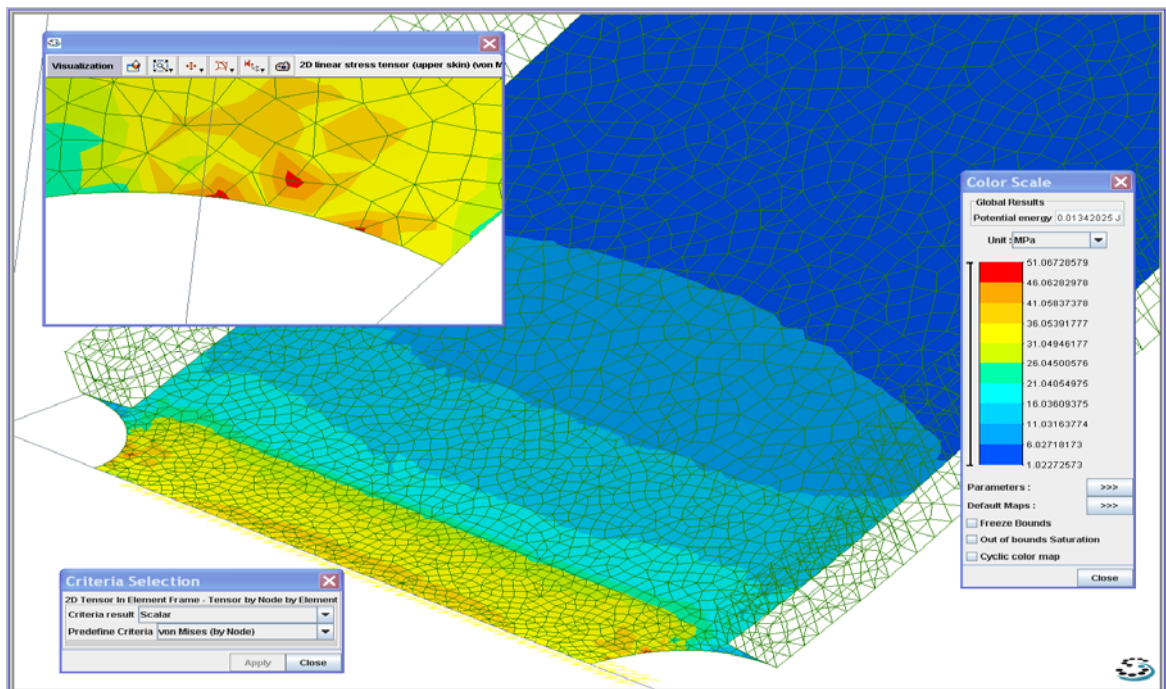
Obr. 40 – HMH napětím na střednici - model R2.

Z obrázku bylo odečteno maximální hlavní HMH napětí na střednici:

$$\sigma_{max}^{HMH} = 6,08 \text{ MPa} \quad (44)$$



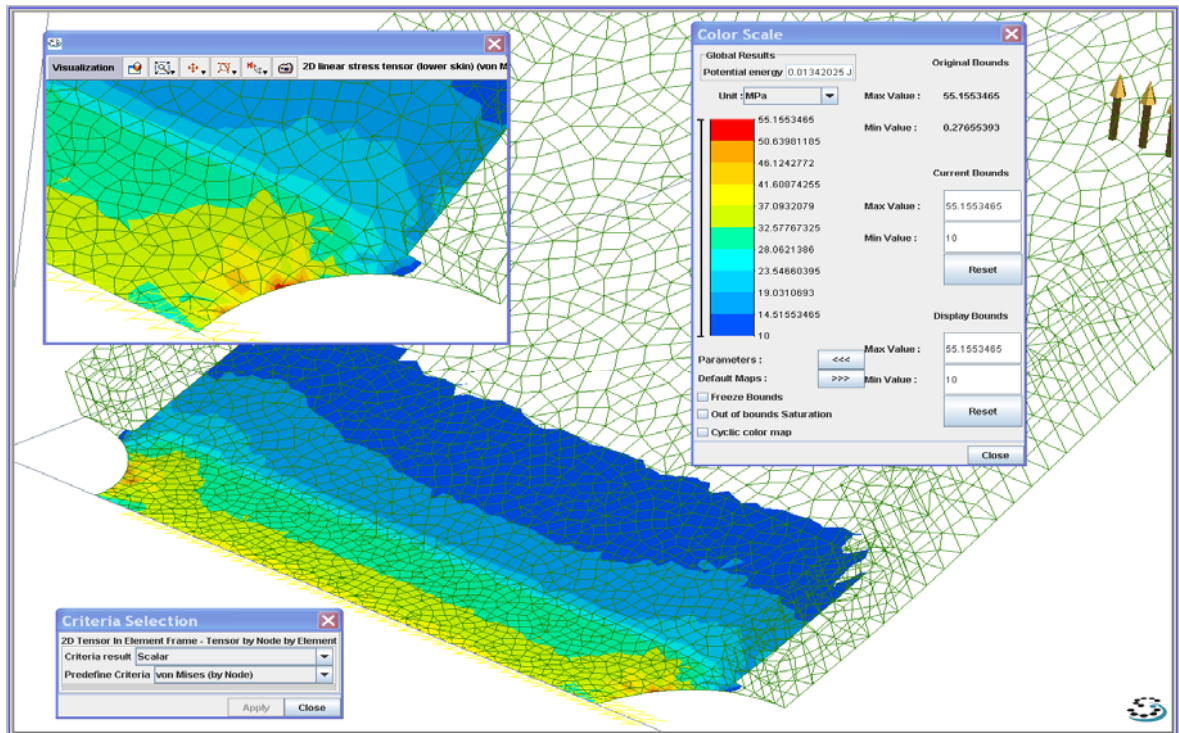
Obr. 41 – Špičky napětí v 3D objemu - model R2.



Obr. 42 – HMH napětí horní (upper) vrstva – model R2.

Maximální hodnota napětí HMH horní (upper) vrstva:

$$\sigma_{max}^{upper} = 51,07 \text{ MPa} \quad (45)$$



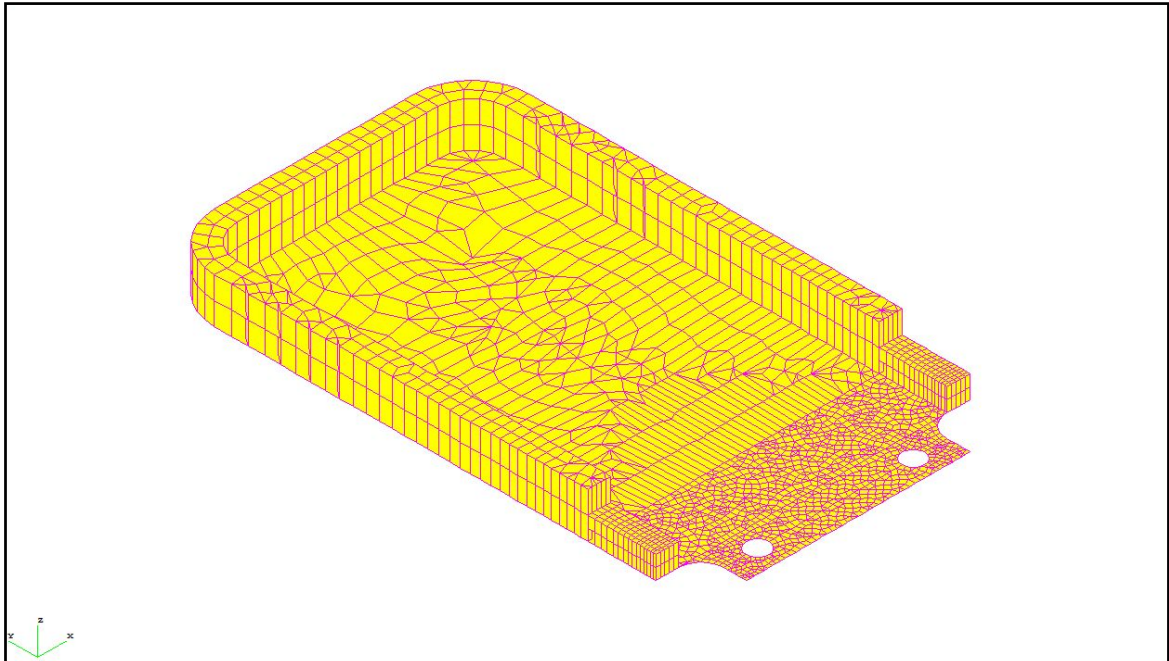
Obr. 43 – HMH napětí spodní (lower) vrstva - model R2.

Maximální hodnota napětí HMH spodní (lower) vrstva:

$$\sigma_{max}^{lower} = 55,15 \text{ MPa} \quad (46)$$

12.3 Model spoje s odlehčovacími otvory OR1

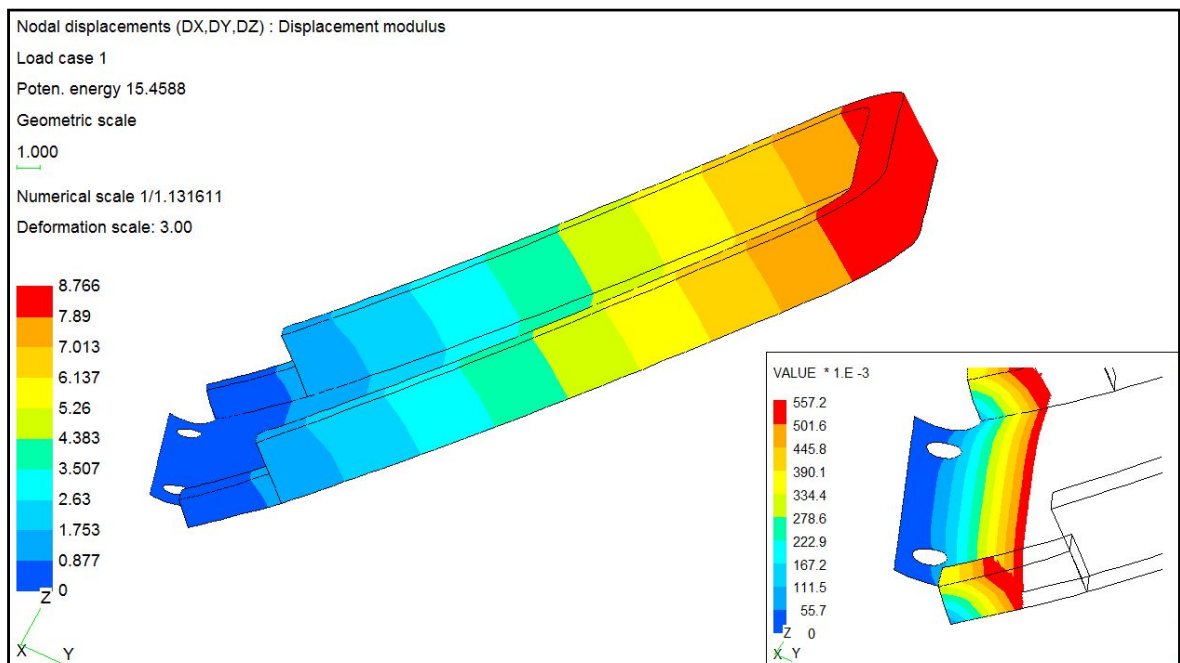
V případě třetího případu byly do modelu R1 umístěny dva odlehčovací otvory každý o průměru $R=0,5\text{mm}$.



Obr. 44 – Síť konečných prvků – model OR1.

12.3.1 Analýza modelu OR1

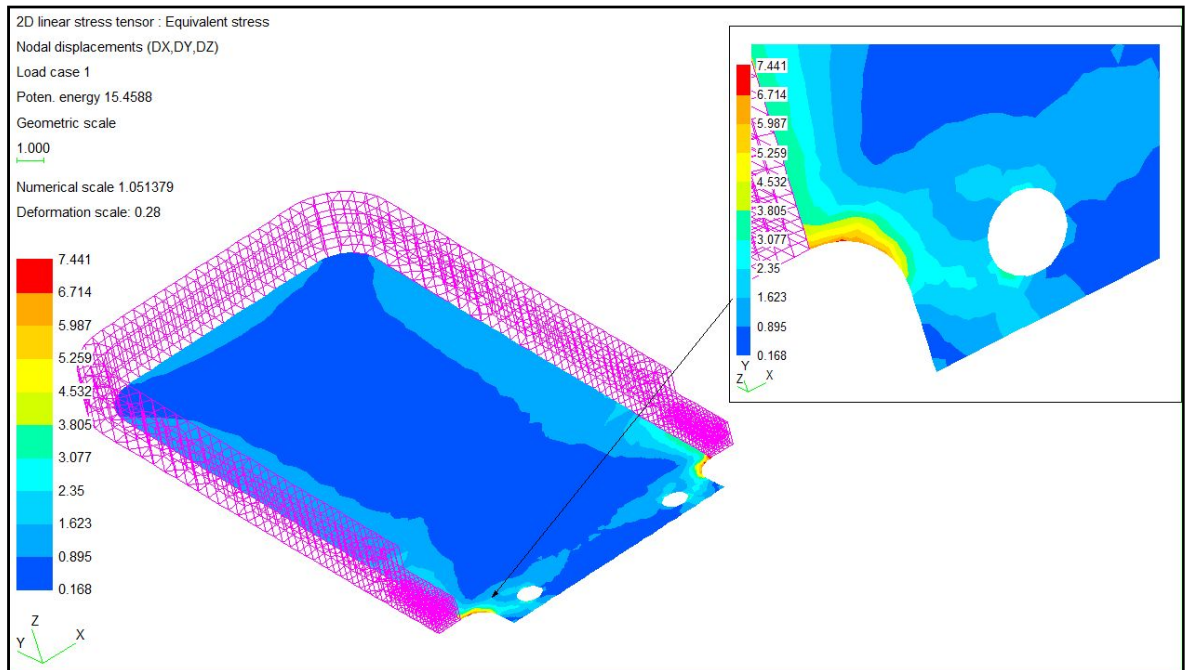
Stejně tak jak v předchozích případech tak jsou na obrázcích 45 až 51 výsledky velikosti deformací a některých napětí v grafické formě.



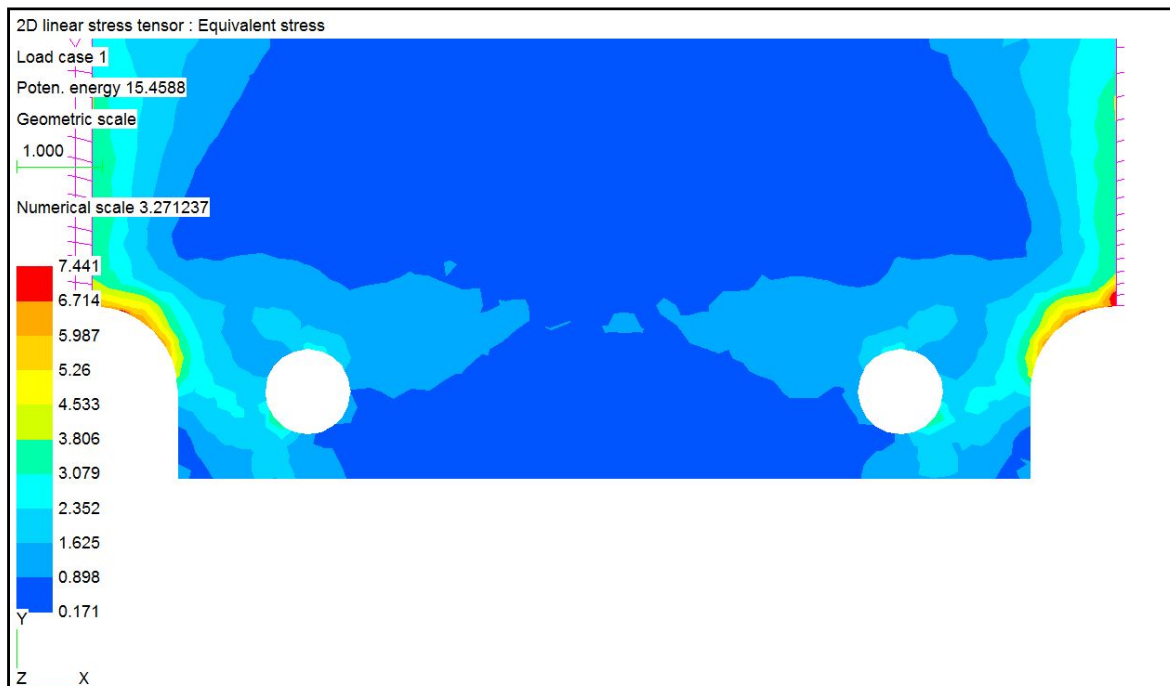
Obr. 45 – Celková deformace - model OR1.

I ve třetím modelovém případě byla snížena hodnota HMH napětí ve vrubu v porovnání s ostrým vrubem, k velké koncentraci a dokonce ke zvýšení napětí došlo v horní a spodní

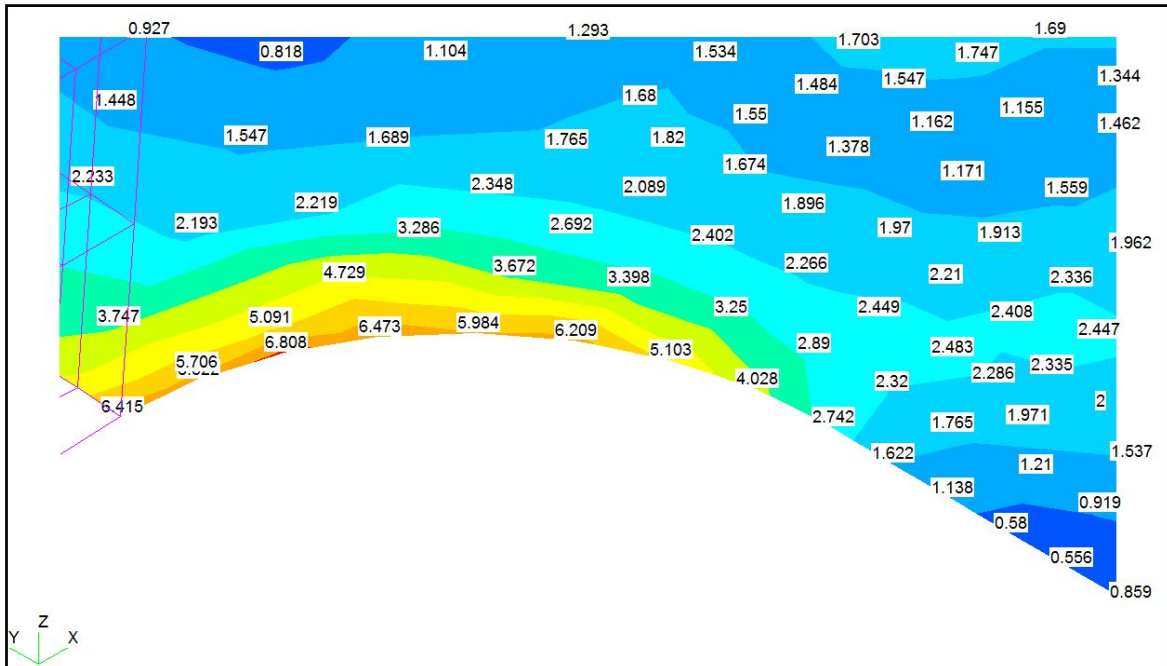
vrstvě, v okolí odlehčovacích vrubů. Podrobnějšímu porovnání a vyhodnocení výsledků je věnovaná následující 13 kapitola.



Obr. 46 – HMH napětí na střednici - model OR1.



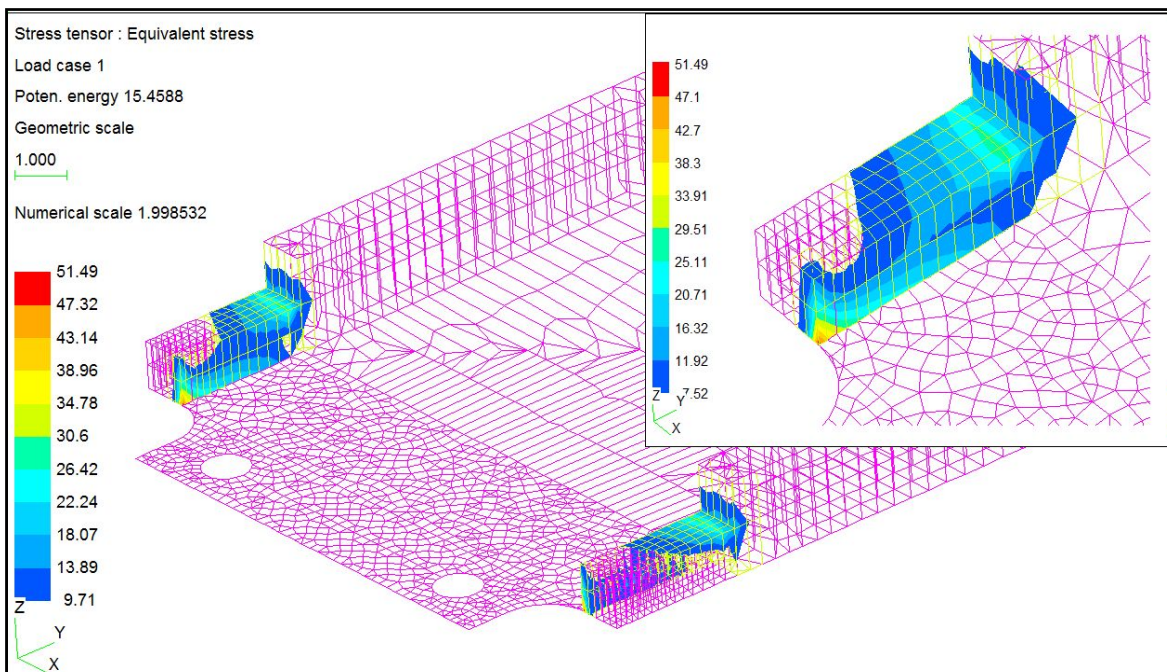
Obr. 47 – Detail otvory HMH napětím na střednici - model OR1 .



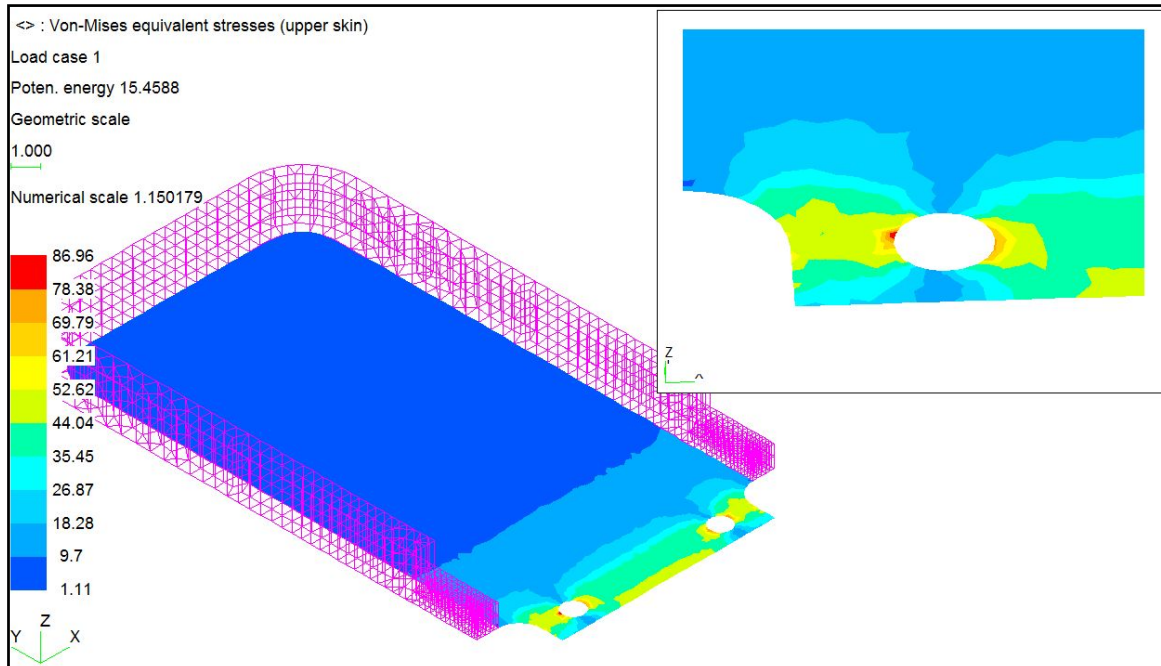
Obr. 48 – Detail vrubu - model ORI.

Z obrázku bylo odečteno maximální hlavní HMH napětí na střednici:

$$\sigma_{max}^{HMH} = 6,81 \text{ MPa} \quad (47)$$



Obr. 49 – Špička napětí objemy - model ORI.



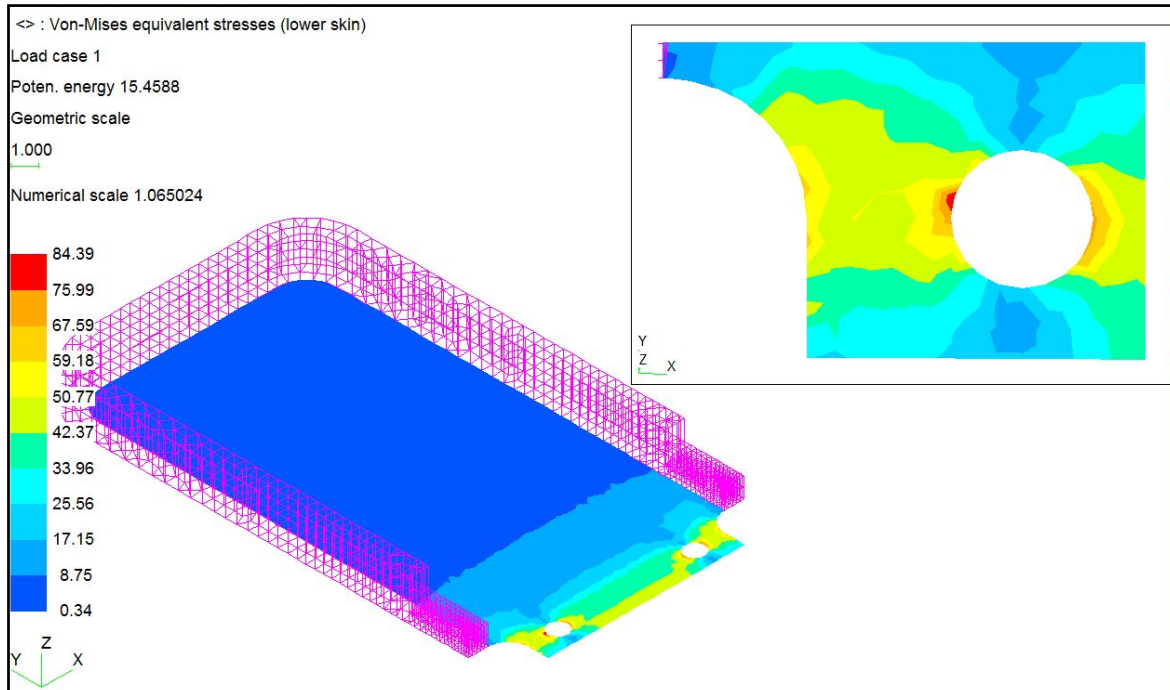
Obr. 50 – HMH napětí horní (upper) vrstva - model OR1.

Nevětší hodnota napětí v horní vrstvě na okraji vrubu R2:

$$\sigma_{max}^{upper} = 59,61 \text{ MPa} \quad (48)$$

Maximální hodnota HMH napětí v horní vrstvě je v okolí odlehčovacích vrubů.

$$\sigma_o^{upper} = 86,96 \text{ MPa} \quad (49)$$



Obr. 51 – HMH napětí spodní (lower) vrstva - model OR1.

Nevětší hodnota napětí v spodní (lower) vrstvě na okraji vrubu R2:

$$\sigma_{max}^{lower} = 61,55 \text{ MPa} \quad (50)$$

Maximální hodnota HMH napětí v spodní (lower) vrstvě je v okolí odlehčovacích vrubů.

$$\sigma_o^{lower} = 84,39 \text{ MPa} \quad (51)$$

12.4 Výpočet součinitele tvaru

Součinitel tvaru pro modely R1, R2, OR1 je počítaný z poddílu maximálního HMH napětí na střednici v uzlu ostrého vrubu a nominálního napětí odečteného z uzlu modelů (R1, R2 a OR1), který je umístěním shodný s uzlem ostrého vrubu, ze kterého bylo odečteno maximální napětí.

$$\sigma_{max}^{uzel} = 5,66 \text{ MPa} \quad (52)$$

Hodnota maximálního napětí byla odečtena z obr. 28.

Součinitel tvaru α pro model R1:

$$\sigma_{nom}^{uzel} = 1,94 \text{ MPa} \quad (53)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{\sigma_{max}^{uzel}}{\sigma_{nom}^{uzel}} = \frac{5,659}{1,944} = 2,9 \quad (54)$$

Hodnota nominálního napětí σ_{nom}^{uzel} pro model R1 byla odečtena z obr. 34.

Součinitel tvaru α pro model R2:

$$\sigma_{nom}^{uzel} = 2,13 \text{ MPa} \quad (55)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{\sigma_{max}^{uzel}}{\sigma_{nom}^{uzel}} = \frac{5,659}{2,130} = 2,7 \quad (56)$$

Hodnota nominálního napětí σ_{nom}^{uzel} pro model R2 byla odečtena z obr. 40.

Součinitel tvaru α pro model OR1:

$$\sigma_{nom}^{uzel} = 2,55 \text{ MPa} \quad (57)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = \frac{\sigma_{max}^{uzel}}{\sigma_{nom}^{uzel}} = \frac{5,659}{2,549} = 2,2 \quad (58)$$

Hodnota nominálního napětí σ_{nom}^{uzel} pro model OR1 byla odečtena z obr. 48.

13 DISKUZE VÝSLEDKŮ

13.1 Tahová zkouška

Z výsledků tahové zkoušky byly získány potřebné hodnoty pro aplikaci MKP. Průměrná hodnota meze pevnosti v tahu $\sigma_{pt} = 56,31$ MPa modul pružnosti v tahu a smluvní mez kluzu $\sigma_k = 23$ MPa. Při výpočtu modulu pružnosti v tahu E se uvažovalo s napětím při 1 mm protažení. Průměrná hodnota vypočítaného modelu pružnosti vyšla $E = 875,38$ MPa, ale pro numerickou aplikaci metody MKP byla použita hodnota vypočítaného modelu pružnosti $E = 924,88$ MPa, která více odpovídá hodnotě udávané výrobcem ($E=2900$ MPa) materiálu Bergaform®.

Rozdílné hodnoty mnou zjištěné a udávané výrobcem materiálu byly zapříčiněny pravděpodobně rozdílnou přípravou zkušebních tělísek a postupem měření. Z dodaných materiálů není patrná příprava zkušebních tělísek. Vzhledem k tomu, že se jednalo hlavně o porovnání vlivu tvaru vrubu filmové spoje není tento rozdíl hodnot modelů pružnosti rozhodující.

13.2 Analýza výsledků získaných pomocí MKP

V programu *Samcef* a *SamcefField* byly vytvořeny jednotlivé modely a pomocí MKP vypočítáno rozložení HMH napětí a deformace v celém objemu tělesa. Z výsledků byl poté vypočítán součinitel tvaru vrubu α .

Celkem byly připraveny čtyři modely, první z nich byl model s ostrým vrubem, který měl přinést výsledky k porovnání se zbylými třemi modely R1, R2 a OR1 jejichž vrub byl upraven. Tyto tři modely měli za cíl snížit koncentraci napětí v oblasti vrubu.

13.2.1 Model z ostrým vrubem

Ze zjištěné numerické analýzy bylo zjištěno jak se předpokládalo, že k největší koncentraci napětí dochází v blízkosti vrubu. Hodnota HMH napětí na střednici je $\sigma_{max}^{HMH} = 6,91$ MPa, hodnota napětí v horní vrstvě je $\sigma_{max}^{upper} = 71,97$ MPa, napětí v dolní vrstvě $\sigma_{max}^{lower} = 81,04$ MPa. Pro výpočet součinitele vrubu bylo použito napětí v uzlu, které je v místě vrubu $\sigma_{max}^{uzel} = 5,66$ MPa, a nominální hodnota napětí je $\sigma_{nom}^{uzel} = 1,20$ MPa. Poddílem těchto dvou hodnot napětí vyšel součinitel tvaru vrubu $\alpha = 4,7$.

13.2.2 Analýza upravených modelů vrubu

Model R1 - Nahrazení ostrého vrubu radiusem v tomto případě s poloměrem $R = 1\text{mm}$ bylo zjištěno snížení napětí téměř o polovinu hodnot modelu s ostrým vrubem. Hodnoty HMH napětí jsou: $\sigma_{max}^{HMH} = 6,91\text{ MPa}$, $\sigma_{max}^{upper} = 46,64\text{ MPa}$, $\sigma_{max}^{lower} = 54,41\text{ MPa}$. Pro výpočet součinitele vrubu bylo použito maximální napětí v uzlu ostrého vrubu a jako nominální napětí $\sigma_{nom}^{uzel} = 1,94\text{ MPa}$. Součinitel tvaru $\alpha = 2,6$.

Model R2 – V tomto případě byl ostrý vrub nahrazen radiusem $R = 2\text{mm}$. Taky v tomto případě došlo ke snížení napětí. Hodnoty HMH napětí jsou: $\sigma_{max}^{HMH} = 6,03\text{ MPa}$, $\sigma_{max}^{upper} = 51,07\text{ MPa}$, $\sigma_{max}^{lower} = 55,12\text{ MPa}$, $\sigma_{nom}^{uzel} = 2,13\text{ MPa}$. Součinitel tvaru $\alpha = 2,7$.

Model OR1 – Model R1 byl doplněn o odlehčovací vruby. Stejně tak jak u předchozích dvou modelů došlo i tady ke snížení hodnoty napětí v okolí vrubu, ale hodnoty napětí v blízkosti odlehčovacích vrubů vzrostli ve srovnání s ostatními hodnotami napětí. Hodnoty napětí v okolí vrubu jsou: $\sigma_{max}^{HMH} = 6,81\text{ MPa}$, $\sigma_{max}^{upper} = 59,61\text{ MPa}$, $\sigma_{max}^{lower} = 61,55\text{ MPa}$, $\sigma_{nom}^{uzel} = 2,55\text{ MPa}$. Součinitel tvaru $\alpha = 2,2$. Hodnoty v okolí odlehčovacích vrubů jsou: $\sigma_o^{HMH} = 7,44\text{ MPa}$, $\sigma_{max}^{upper} = 86,96\text{ MPa}$, $\sigma_{max}^{lower} = 84,39\text{ MPa}$.

13.3 Porovnání výsledků modelů filmového spoje

Z výsledků analýzy filmového spoje můžeme říct, že špička napětí působí vždy v oblasti tvarových diskontinuit. Pouze u modelu OR1 tomu bylo jinak tam vyšla maximální hodnota HMH napětí v oblasti odlehčovacích vrubů čehož jsem chtěla dosáhnout.

Z přehledné tabulky 3 lze vyčíst, že ke snížení špičky napětí došlo u všech třech upravených modelových případech. HMH napětí v horní (upper) a dolní (lower) vrstvě bylo sníženo u modelu R1 téměř o polovinu. HMH napětí na střednici σ_{max}^{HMH} se snižovalo jen v řádech desetin, k největšímu poklesu došlo u modelu OR1. Vliv tvaru vrubu bylo patrné už z deformace modelů jak ukazuje tabulka 3.

	σ_{max}^{HMH}	σ_{max}^{uzel}	α	σ_{max}^{upper}	σ_{max}^{lower}	deformace modelu
Ostrý	6,91	5,66	4,7	71,97	81,04	8,22
R1	6,91	1,94	2,9	46,64	54,41	8,01
R2	6,03	2,13	2,7	51,07	55,12	7,63
OR1/v	6,81	2,55	2,2	59,61	61,55	8,77
OR1/o	7,44			86,96	84,39	

Tab. 3 – Hodnoty *HMH* napětí, součinitele vruby a deformace.

Zajímavé by bylo provedení dalších výpočtů s jinými upravenými modely např. modelu s odlehčovacím vruby a velkým radiusem $R=2\text{mm}$, změna umístění odlehčovacích otvorů u modelu OR1, upravení velikosti radiusu např. $R=1,5\text{mm}$, případně umístění elipsy do modelu. Takových řešení by se našlo mnoho, ale rozsah této práce to neumožňuje.

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout takové úpravy filmového spoje s ostrým vrubem, která by snížila koncentraci napětí a snížila jeho poruchy při zatížení. Tento filmový spoj je součástí výrobku vyráběného firmou Kasko s.r.o., která je zadavatelem této práce.

Z experimentálního měření (tahová zkoušky) byly zjištěny materiálové charakteristiky, které byly následně použity při výpočtu rozložení napětí a deformace v modelu tělesa. Pro vytvoření modelu a výpočet byly použity programy *Samcef* a novější *SamceField*.

Nejdříve byl vytvořen model tělesa, kde rozměry a tvar filmového spoje s ostrým vrubem odpovídají skutečným parametrům. Poté byl proveden výpočet rozložení napětí a deformace v celém objemu tělesa. Z výpočtu byly určeny hodnoty HMH napětí na střední, horní a dolní vrstvě. Podle předpokladu bylo největší napětí v oblasti vrubu. Dále byl vypočítán součinitel tvaru.

Filmový spoj s ostrým vrubem byl použit i jako porovnávací vzor (model) pro upravené modely. Byly navrženy tři modely, které jsou označeny jako R1, R2 a OR1. U všech těchto modelů byl proveden výpočet rozložení napětí a deformace v objemu tělesa při zatížení pomocí numerické metody MKP. Pro všechny případy byl rovněž vypočítán součinitel tvaru.

Z analýzy výsledků, které byly získané pomocí numerické metody MKP lze odvodit, že u všech třech upravených modelů došlo ke snížení koncentrace napětí v oblasti tvarových diskontinuit. K podstatnému snížení napětí došlo v horní (upper) a dolní (lower) vrstvě. Rovněž ve střední vrstvě došlo ke snížení napětí.

Na základě těchto analýz by bylo možné při znalosti všech materiálových parametrů pro filmový spoj provést předběžný odhad počtu cyklů do vzniku trhliny. Bohužel tyto materiálové parametry nejsou k dispozici.

Pro komplexní posouzení vlivu tvaru vrubu a materiálu filmového spoje by bylo potřeba provést řadu dalších výpočtů a měření. Dále by bylo možné provést analýzu na dalších upravených modelech nebo s jiným materiálem než je zadaný Bergaform[®] firmou Kasko s.r.o.. Všechny tyto nadstavby přesahují rozsah této diplomové práce a taky i mé znalosti získané studiem.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJŮ

- [1] DENEMARK, T.: *Metoda konečných prvků v materiálovém inženýrství. Automatizace* [online]. 2007, 50, 11, [cit. 2010-01-10]. Dostupný z WWW: <<http://www.automatizace.cz/article.php?a=1946>>.
- [2] HRUBÝ, J.: *Metoda konečných prvků* [online]. [cit. 2010-03-15]. Dostupné z WWW: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Vmt/MKP_panel1.pdf>.
- [3] BISHOP, N., V., M., SHERRAT, F.: *Finite element based fatigue calculations*. NAFEMS: The international association for the engineering analysis community publication.
- [4] *Metoda konečných prvků* [online]. [cit. 2010-02-10]. Dostupné z WWW: <<http://www.umt.fme.vutbr.cz/~jbursa/MKP4.doc>>.
- [5] *Technické listy PolyOne* [online]. [cit. 2010-04-25]. Dostupné z WWW: <http://www.polyone-bergmann.de/produkte/Bergaform_DE.pdf>.
- [6] BATHE, K, J.: *Finite element procedures*. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey, 1996. ISBN 0-13-301458-4.
- [7] ŠVATNER, M.: *Počítačová simulace s využitím MKP systémů*. [online]. [cit. 2010-02-15]. Dostupné z WWW: <http://home.zcu.cz/~msvantne/Techskop/2009_mtp_cviceni_prednaska.html>.
- [8] KOLÁŘ, V., NĚMEC, I., KANICKÝ, V.: *FEM Principy a praxe metody konečných prvků*. Praha: Computer Press, 1997. ISBN 80-7226-021-9.
- [9] MEISSNER, B., ZILVAR, V.: *Fyzika polymerů*. Praha: SNTL, 1987.
- [10] KRATOCHVÍL, B., ŠVORČÍK, V., VOJTĚCH, D.: *Úvod do studia materiálů*: Praha: VŠCHT, 2005. ISBN 80-7080-568-4
- [11] STRNADEL, B.: *Nauka o materiálu, konstrukční materiály a jejich degradační procesy*. skriptum VŠB-TU Ostrava, 1993.
- [12] *Houževnatost II*. [online]. [cit. 2010-03-28]. Dostupné z WWW: <ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/06%20-%20HouzevntostI.ppt>.
- [13] ČALOVÁ, E.: *Vliv tvaru vrubu na pevnost plastů a kompozitů*. Zlín, 2007. 50s. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně, FT.
- [14] OLIVA, J: *Technická mechanika II. – Pružnost a pevnost*. Brno: VUT, 1972. Učební texty vysokých škol.

- [15] VLK, M.: *Dynamická pevnost a životnost*. Brno: VUT, 1992. ISBN 80-2140-427-2.
- [16] RŮŽIČKA, M.: *Kritéria a postupy při posuzování únavové pevnosti a životnosti konstrukcí*. Praha: ČVUT, 1992.
- [17] VLK, M., FLORIAN, Z.: *Mezní stavy a spolehlivost*. Brno: VUT, 2007. Učební texty vysokých škol.
- [18] MLEZIVA, J., ŠŇUPÁLEK, J.: *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepracované. vyd.: Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [19] CRAWFORD, R.J.: *Plastics Engineering*. (3rd Edition). Elsevier, 1998. ISBN 0-7506-3764-1
- [20] ČSN EN ISO 527-1. *Stanovení tahových vlastností*.
- [21] SCHÄTZ, M., VONDRÁČEK, P.: *Zkoušení polymerů*. SNTL – Nakladatelství technické literatury, Praha, 1979.
- [22] POKLUDA, J., KROUPA, F., OBDRŽÁLEK, L.: *Mechanické vlastnosti a struktura pevných látek*. Brno: VUT, PC-DIR spol.s.r.o. Nakladatelství. 1994.
- [23] DUCHÁČEK, V.: *Polymery - výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. 2. vyd. VŠCHT v Praze, 2006. ISBN 80-7080-617-6
- [24] LENFELD P.: *Technologie II.*: [online]. [cit. 2010-03-02]. Dostupné z WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/uvod.htm>.
- [25] BITTNAR, Z., ŠVEJNOHA, J. *Numerické metody mechaniky I*. Praha: ČVUT, 1992.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

MKP	Metoda konečných prvků
FEM	Finite Element Method
A_0, A	plocha počátečního příčného průřezu
POM	polyoxymetylen , polyacetal, polyformaldehyd
F	síla
E	modul pružnosti v tahu
ϵ_l, ϵ	poměrné prodloužení
l_0	počáteční délka
Δl	zvětšení délky tělesa
σ	tahové napětí
σ_{\max}	největší napětí v místě koncentrace
$\sigma_n, \sigma_{\text{nom}}$	nominální napětí
σ_{red}	redukované napětí
σ_c	mez únavy
σ_a	amplituda napětí
ν	součinitel napjatosti
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	hlavní napětí
α_{red}	redukovaný součinitel tvaru
G	gradient napětí
\bar{G}	poměrný gradient napětí
β	součinitel vrubu
α	součinitel tvaru
q	vrubová citlivost
ρ	poloměr vrubu
ρ^*	materiálová konstanta

s	bezrozměrný faktor
Re	mez kluzu
σ_k	smluvní mez kluzu
α'	konstanta podle Heywooda
ν_β	součinitel velikosti
η	součinitel citlivosti materiálu
ψ	součinitel zpevnění materiálu
$Rm(\sigma_{pt})$	mez pevnosti v tahu
F_{lin}	síla v lineární oblasti
F_L	liniová síla
Π^e	energetický funkcionál pro element
Π	celková potenciální energie
Π_z	práce vnějších sil
Π_i	deformační energie vnitřních sil těles
$\{d\}^T$	vektor složek uzlových posuvů
W_0^e	práce vykonaná objemovými silami
W_p^e	práce vykonaná rozloženým plošným zatížením
Λ^e	práce vykonaná objemovými silami
$[B]$	matice diferenciálních operátorů
$[K]$	matice tuhosti
$[f]$	vektor výsledných vnějších sil v uzlech
$[D]$	matice fyzikálních konstant
$[N]^T$	tvarová funkce
HMH	redukované von Misesovo napětí
σ_{max}^{HMH}	maximální HMH napětí na střednici
σ_{max}^{upper}	maximální HMH napětí v horní vrstvě
σ_{max}^{lower}	maximální HMH napětí v dolní vrstvě

σ_{max}^{uzel}	HMH napětí v uzlu
σ_{nom}^{uzel}	nominální HMH napětí v uzlu
R1 , R2	označení upraveného modelu s radiusem R = 1mm a R = 2mm
OR1	označení upraveného modelu s odlehčovacemi vruby
μ	Poissonovo číslo

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Rozložení a velikost napětí při ohybu [24].	13
Obr. 2 – Únavový lom [15].	17
Obr. 3 – Časově proměnné napětí [15].	18
Obr. 4 – Hysterezní smyčka [16].	19
Obr. 5 – Cyklická deformační křivka [16].	20
Obr. 6 - Wöhlerova křivka [10].	21
Obr. 7 – Konstrukční vruby [13].	21
Obr. 8 – Vruby vytvořené ze základních geometrických tvarů [13].	22
Obr. 9 - Silový tok v okolí vrubu [19].	22
Obr. 10 – Rozložení napětí [16].	23
Obr. 11 – Způsoby šíření trhliny materiálem [12].	29
Obr. 12 - Postup tvorby MKP modelu [7].	33
Obr. 13 – Závislost prodloužení Δ na působící síle F pro vzorek č. 1.	40
Obr. 14 – Závislost prodloužení Δ na působící síle F pro vzorek č. 2.	40
Obr. 15 – Závislost prodloužení Δ na působící síle F pro vzorek č. 3.	41
Obr. 16 – Závislost prodloužení Δ na působící síle F pro vzorek č. 4.	41
Obr. 17 – Závislost prodloužení Δ na působící síle F pro vzorek č. 5.	42
Obr. 18 – Filmový spoj.	43
Obr. 19 – Detail porušeného spoje - pohled B.	43
Obr. 20 – Detaily porušeného spoje – pohled A.	43
Obr. 21 – Technický list materiálu Bergaform® [5].	44
Obr. 22 – Síť konečných prvků – ostrý vrub.	45
Obr. 23 – Okrajové podmínky- ostrý vrub.	46
Obr. 24 – Rozložení tloušťky – ostrý vrub.	46
Obr. 25 – Zatížení – ostrý vrub.	47
Obr. 26 – Celková deformace – ostrý vrub.	48
Obr. 27 – HMH napětí na střednici – ostrý vrub.	48
Obr. 28 – Napětí HMH na střednici - detail ostrého vrubu.	49
Obr. 29 – Špička napětí v 3D objemu - ostrý vrub.	49
Obr. 30 – HMH napětí horní (upper) vrstva - ostrý vrub.	50
Obr. 31 – HMH napětí spodní (lower) vrstva - ostrý vrub.	50
Obr. 32 – Síť konečných prvků – model R1.	52

Obr. 33 – Celková deformace - model R1.....	53
Obr. 34 – HMH napětí střední vrstva - model R1.....	53
Obr. 35 – Špičky napětí v 3D objemu – model R1.....	54
Obr. 36 – HMH napětí horní vrstva - model R1.....	54
Obr. 37 – HMH napětí spodní (lower) vrstva – model R1.....	55
Obr. 38 – Síť konečných prvků - model R2.....	56
Obr. 39 – Celková deformace – model R2.....	57
Obr. 40 – HMH napětím na střednici - model R2.....	57
Obr. 41 – Špičky napětí v 3D objemu - model R2.....	58
Obr. 42 – HMH napětí horní (upper) vrstva – model R2.....	58
Obr. 43 – HMH napětí spodní (lower) vrstva - model R2.....	59
Obr. 44 – Síť konečných prvků – model OR1.....	60
Obr. 45 – Celková deformace - model OR1.....	60
Obr. 46 – HMH napětí na střednici - model OR1.....	61
Obr. 47 – Detail otvory HMH napětím na střednici - model OR1.....	61
Obr. 48 – Detail vrubu - model OR1.....	62
Obr. 49 – Špička napětí objemy - model OR1.....	62
Obr. 50 – HMH napětí horní (upper) vrstva - model OR1.....	63
Obr. 51 – HMH napětí spodní (lower) vrstva - model OR1.....	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – <i>Rozměry zkušebních tělísek</i>	38
Tab. 2 – <i>Naměřené a vypočtené hodnoty z tahové zkoušky</i>	39
Tab. 3 – <i>Hodnoty HMM napětí, součinitele vrubu a deformace</i>	68

