

FEM optimalizace vstřikovaných stěnových konstrukčních prvků z plastu

Bc. Pavel Odstrčilík

Diplomová práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel ODSTRČILÍK**
Osobní číslo: **T10383**
Studijní program: **N 3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Téma práce: **FEM optimalizace vstříkovaných stěnových konstrukčních prvků z plastů**

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešeršní studii k dané problematice.
2. Vypracujte FEM analýzy napětí a deformace komerčního konstrukčního stěnového prvku.
3. Pomocí FEM analýz optimalizujte geometrii stěnového prvků s hlediska jeho únosnosti a tuhosti.
4. Získané výsledky vyhodnoťte.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student volí dle vlastního uvážení a doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Oldřich Šuba, CSc.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **13. února 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **18. května 2012**

Ve Zlíně dne 2. února 2012


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské 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 užit své dílo – diplomovou/bakalářskou 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/bakalářské 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/bakalářské 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 nevdělečně 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 vzdělávacího 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 diplomové práce je navrhnout vstříkovaný stěnový konstrukční prvek z plastu (poklop šachty kanalizační sítě) a pomocí FEM lineárních analýz optimalizovat návrh v parametrickém 2D skořepinovém tvaru a 3D objemovém tvaru. Následně obě analýzy porovnat a vyhodnotit na základě sledovaných veličin (napětí, deformace a objem) a získaných závislostí (napětí na tloušťce desky, deformace na tloušťce desky a objem na tloušťce desky).

Klíčová slova: vstříkovaný konstrukční prvek, poklop, FEM analýza

ABSTRACT

The purpose of present thesis is to design injection-moulded plastic structural shell construction (sewerage shaft gully top) and to optimize design in parametric 2D shell shape and 3D shape by means of FEM linear analyses. The thesis subsequently concentrates on comparison and evaluation of observed quantities (tension, deformation and volume) as well as acquired dependences (tension on panel thickness, deformation on panel thickness and volume on panel thickness).

Keywords: Injection-moulded Shell Constructions, gully top, FEM analysis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Oldřichu Šubovi, CSc. za odbornou pomoc a cenné rady při tvorbě diplomové práce.

MOTTO

Dicere enim bene nemo potest, nisi qui prudenter intellegit.

(Nemůže dobře mluvit ten, kdo není znalý věci.)

Cicero

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 VLASTNOSTI POLYMERŮ	13
1.1 POLYOLEFINY.....	13
1.1.1 Polyethylén (PE)	13
1.1.2 Polypropylén (PP)	14
1.1.3 Polyvinylchlorid (PVC)	16
1.1.4 Polyamidy (PA).....	17
1.1.5 Polystyrén (PS).....	18
1.1.6 Kopolymer styrén-akrylonitril (SAN).....	18
1.1.7 Kopolymer akrylonitril-butadién-styrén (ABS).....	18
1.1.8 Polykarbonát (PC).....	18
1.2 REAKTOPLASTY.....	18
1.2.1 Polyesterové (UP) a epoxidové (EP) pryskyřice.....	18
1.3 PLNIVA.....	19
1.3.1 Plniva částicová.....	19
1.3.2 Vytuzující plniva.....	20
1.3.3 Nanoplňiva	21
2 PROSTOROVÁ NAPJATOST A DEFOMACE TĚLES	23
2.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY	23
2.2 ROVNICE ELASTICITY PRO 3D NAPJATOST	24
2.3 STLAČITELNOST – HOOKŮV ZÁKON V OBJEMOVÉM TVARU	24
2.4 MĚRNÁ ENERGIE NAPJATOSTI.....	26
2.5 VON MISESOVO SROVNÁVACÍ NAPĚTÍ	27
2.6 OHYB V OBLASTI PLASTICKÝCH DEFORMACÍ.....	28
2.7 ZKOUŠKA OHYBEM.....	31
3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	34
3.1 ÚVOD DO VSTŘIKOVÁNÍ	34
3.2 ZÁKLADNÍ PŘEDPOKLADY PRO VSTŘIKOVÁNÍ DÍLŮ S DEFINOVANOU JAKOSTÍ.....	35
3.2.1 Plastikační fáze.....	37
3.2.2 Vstřikovací fáze	37
3.2.3 Dotlaková fáze	38
3.2.4 Fáze ochlazovací	39
3.3 VSTŘIKOVACÍ STROJ.....	40
3.3.1 Systémový tlak	40
3.3.2 Tlak před čelem šneku	40
3.3.3 Tlak v dutinně formy.....	41
3.3.4 Plastikační jednotka	42
3.4 VSTŘIKOVACÍ FORMA.....	44
3.4.1 Parametry formy.....	44
3.5 PERIFERNÍ ZAŘÍZENÍ	49
4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	50

II PRAKTICKÁ ČÁST	51
5 NORMA ČSN EN 124.....	52
5.1 NÁZVOSLOVÍ.....	52
5.2 ZKOUŠENÍ.....	53
5.2.1 Zkušební zatížení	53
5.2.2 Zkušební stroj.....	53
5.2.3 Zkušební nástroj.....	53
5.2.4 Příprava zkoušky.....	54
5.2.5 Metoda zkoušení	54
6 LINEÁRNÍ 2D ANALÝZA	56
6.1 OKRAJOVÉ PODMÍNKY.....	56
6.1.1 Uložení	56
6.1.2 Zatížení.....	57
6.1.3 Síť.....	57
6.1.4 Materiálová charakteristika.....	58
6.1.5 Souřadný systém	59
6.2 NÁVRH GEOMETRIE.....	59
6.2.1 Geometrie č. 1	61
6.2.2 Geometrie č. 2	65
6.2.3 Geometrie č. 3	69
6.2.4 Geometrie č. 4	74
6.2.5 Geometrie č. 5	79
6.2.6 Geometrie č. 6	84
6.2.7 Geometrie č. 7	89
6.3 ZHODNOCENÍ 2D LINEÁRNÍ ANALÝZY	93
7 LINEÁRNÍ 3D ANALÝZA	97
7.1 MODELÝ PRO 3D ANALÝZU.....	97
7.2 OKRAJOVÉ PODMÍNKY.....	97
7.3 VARIANTY MODELU POKLOPU	98
7.3.1 Model č. 1.....	98
7.3.2 Model č. 2.....	100
7.4 ÚPRAVY KONEČNÉHO 3D MODELU.....	102
7.5 ZHODNOCENÍ 3D LINEÁRNÍ ANALÝZY	103
ZÁVĚR	104
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	105
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	106
SEZNAM OBRÁZKŮ	107
SEZNAM TABULEK.....	109
SEZNAM GRAFŮ	110
SEZNAM PŘÍLOH.....	111

ÚVOD

Mnohé epochy ve vývoji lidstva a techniky jsou pojmenovány podle materiálů, které výrazně posunuly vývoj civilizace kupředu - namátkou jmenujme dobu železnou či dobu bronzovou. Pokud jde o začínající 21. století, mnozí odborníci zabývající se zákonitostmi vědeckotechnického a průmyslového pokroku zastávají názor, že půjde o století plastů.

Plasty byly již od svého počátku v 19. století velmi inovační a kreativní. První umělá hmota vznikla jako výsledek pokusů profesora Alexandra Parkese už v roce 1850 - tvrdá, pružná a průsvitná hmota byla pojmenována parkesin. Téměř o dvacet let později tuto novinku zdokonalil Američan John Hyatt a vyrobil z ní např. kulečnickové koule. Hmotě se začalo říkat celulooid. V roce 1904 pak Belgičan Leo Baekeland vynalezl (na rozdíl od celulooidu nehořlavý) bakelit.

V následujících desetiletích pak plasty stále markantněji odhalovaly svůj enormní inovační potenciál. Díky novým variantám a modifikacím i díky stálému zlepšování techniky zpracování vznikalo stále více a více nových profilových vlastností přizpůsobených určitým aplikacím a způsobu použití.

Rozvoj plastů nemá v materiálové historii obdoby. Je srovnatelný snad jen s dynamikou výroby oceli v období první průmyslové revoluce devatenáctého století. Dnes polymerní materiály představují nejvýznamnější segment výroby a spotřeby podle objemu mezi všemi technickými materiály. V současnosti není srovnatelný obor, pokud se týká novinek v materiálech, technologiích zpracování i finálních výrobků.

Nesporný předstih před jinými materiály

Plasty postupně předběhly ostatní materiály. Oproti klasickým materiálům mají řadu výhod. Izolují elektricky a tepelně, jsou šetrné k přírodě, vyznačují se kluznými vlastnostmi i bez maziv, mají několikanásobně menší měrnou hmotnost než klasické materiály, dále propouštějí elektromagnetické vlny a gama-zářením, mají tlumící schopnosti, nepodléhají korozi a rozšiřují možnosti pro uplatnění designu.

Nové modifikace pak dále zlepšují mechanické hodnoty, chrání proti povětrnostním vlivům, dále zlepšují kluzné vlastnosti, zaručují elektrickou vodivost a rovněž zlepšují vzhled, např. přidáním barev.

Vlastnosti plastů umožňují oproti klasickým materiálům i snadnou zpracovatelnost - plasty mohou být upravovány vstřikováním, obráběním, vytlačováním, válcováním, litím,

stříkáním, svařováním. Mimořádná je jejich tvárnost zejména při zvýšené teplotě, která je umožněna jejich skladbou z vláknitých, řetězovitých makromolekul, ale i životnost a odolnost proti stárnutí a v neposlední řadě i výhodný poměr mezi užitnými vlastnostmi a cenou.

Ze všech těchto důvodů spotřeba plastů neustále narůstá. Plasty pronikly do všech odvětví zpracovatelského průmyslu, zejména do obalového, elektronického, elektrotechnického a automobilového průmyslu. Mimořádně významná je jejich úloha i v letectví a kosmonautice (materiály první volby v kosmických technologiích, skafandry, solární vozidla, ochrana před meteority aj.), ve zdravotnictví (biologicky odbouratelné polymery, jejichž pomocí může lékař vytvořit tělesnou tkáň pacientům postiženým úrazem, srdeční systémy, systémy srdečních chlopní, systémy ochrany před syndromem náhlého úmrtí), ale i při výrobě spotřebního zboží, kde je nejvíce oceňována možnost zpracovat plast do jakéhokoliv tvaru.

U řady řešení jsou už prakticky nenahraditelné. Přicházejí nové a nové vlny inovací, výzkum pokračuje dynamicky v materiálech, technologiích i finálních výrobcích. Z plastů se bude vyrábět stále více předmětů, pro něž se dnes používají jiné materiály. Plastikářský průmysl, který v širším pojetí zahrnuje vše - od zpracování surovin na materiály přes výrobu nástrojů, strojů a zařízení až po zpracování nejrůznějších výrobků - je dnes ve vyspělých zemích nositelem a motorem největšího počtu inovací. Tento silný a neustále se rozvíjející obor s velkými přesahy do jiných oborů a odvětví představuje nikdy nekončící inovační proud, který neustále přináší jak standardní, tak i nadstandardní inovace, ale i vize, které jsou nezbytným předpokladem vývoje. [5]

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 VLASTNOSTI POLYMERŮ

Sortiment plastů představuje širokou paletu od základních plastů širokého použití až po speciální konstrukční plasty s význačnými vlastnostmi, zejména s vyšší pevností a tuhostí i za zvýšených teplot a se zvýšenou odolností proti účinkům agresivních látek. Nejrozličnější polymerní směsi, kopolymery, plněné a lehčené polymery umožňují přizpůsobit vlastnosti materiálu požadavkům kladeným na určitý druh výrobku. Lze například zvyšovat tuhost a pevnost, snižovat křehkost při nižších teplotách, výrazně zlepšit odolnost proti povětrnostním a chemickým vlivům, odolnost proti hoření, tepelnou a elektrickou vodivost, tvarovou stálost za tepla atd. V praxi se materiály rozlišují na základní typy, speciální typy (např. polymery se stabilizátory proti ultrafialovému záření, s retardéry hoření atd.) a plněné typy. Plněné plasty jsou tzv. částicovými kompozity – částice plniva jsou rozptýlena v polymerní matici. Jako plniva se používají krátká skleněná vlákna, mletá minerální plniva, skleněné mikrokuličky, grafit aj., a to v různých koncentracích. Tuhé částice obecně zvyšují tuhost, méně již pevnost, zhoršují houževnatost plastu. Proti tomu kaučukové inkluze zlepšují odolnost proti křehkým lomům. Za zvláštní případ částicového kompozitu lze považovat lehčené plasty, které se používají zejména pro své tepelně izolační vlastnosti a nízkou hmotnost. [1]

1.1 Polyolefiny

Polyolefiny jsou semikrystalické termoplasty s poměrně nižší tuhostí a pevností, ale značnou houževnatostí. Nenavlhají a jsou odolné zejména proti působení kyselin, louhů, solných roztoků a rozpouštědel. Neodolávají oxidačním činidlům a chlorovaným uhlovládům. [1]

1.1.1 Polyethylén (PE)

Vlastnosti PE jsou závislé na hodnotách strukturních parametrů. Vyrůstající hodnota od $0,915 \text{ g/cm}^3$ pro LDPE k $0,97 \text{ g/cm}^3$ pro HDPE je příčinou vyššího obsahu krystalického podílu, zhoršení zpracovatelnosti. Z mechanických vlastností se zlepšuje pevnost, a tuhost, ale klesá tažnost a houževnatost. Index toku se výrazně nemění. Vyrůstá teplota tání a tvarová stálost za tepla. Teplota křehnutí se posunuje k vyšším hodnotám. Odolnost vůči chemikáliím se zlepšuje, stejně jako propustnost pro plyny a páry. Naopak zvyšuje se zákal a klesá průhlednost. Nízkou hustotou obvykle doprovází hodně a často rozvětvená mak-

romolekula, zatímco pro vysokou hustotu je typická lineární makromolekula s malým počtem krátkých větví. Základní předností PE jsou:

- Nízká hustota ve srovnání s ostatními plasty
- Vysoká houževnatost provázena odolností proti rázům a vysokou tažností
- Velmi dobré elektrické a dielektrické vlastnosti, pro které je používán v kabelářském průmyslu
- Velmi malá nasákavost
- Vysoká korozní odolnost proti chemickým činidlům

Přes tyto jednotlivé přednosti se typy PE mezi sebou liší. Pro kvalitativní porovnání poslouží následující přehled.

Rozvětvený polyetylén (LDPE)

- Měkčí a ohebnější
- Lepší rázová i vrubová houževnatost i při nízkých teplotách
- Nižší teplota tání $105 \div 110$ °C
- Nižší tvarová stálost za tepla 40 °C (Vicat B)
- Nižší pevnost $8 \div 10$ MPa
- Nižší modul pružnosti $100 \div 200$ MPa v ohybu
- Svařitelný

Lineární polyetylén (HDPE)

- Tvrdší a tužší
- Nepatrně křehčí
- Vyšší teplota tání $130 \div 135$ °C
- Vyšší tvarová stálost za tepla $70 \div 75$ °C (Vicat B)
- Vyšší pevnost $20 \div 30$ MPa
- Vyšší modul pružnosti $700 \div 1000$ MPa v ohybu
- Svařitelný [1]

1.1.2 Polypropylén (PP)

Polypropylén je klasický představitel komoditních polymerů. Přestože je už od svého objevu začátkem padesátých let trvale předmětem zájmu vědy i průmyslu. Výsledkem in-

tenzivního výzkumu je nejen poznání vztahů mezi strukturou a vlastnostmi PP, ale také zlepšené postupy polymerace, nové způsoby zpracování a podstatné rozšíření jeho aplikací.

Výhodná kombinace ceny s dobrými užitnými vlastnostmi zajistila izotaktickému PP pevné postavené mezi komoditními plasty. Některé jeho aplikace jej však řadí i mezi konstrukční materiály. Mezi nejvýznamnější aplikace PP patří vlákna, obalová technika, díly automobilů, domácích spotřebičů a různé spotřební boží.

V posledních letech význam PP znovu zřetelně roste. Důvodem jsou nově vyvinuté modifikace a kompozity na jeho základě, nové pozoruhodné aplikace a také důraz na snadnou recyklovatelnost polymerních výrobků. Za zmínku stojí netkané textilie nových typů, PP trubky pro rozvod vody s výrazným ekonomickým i ekologickým dopadem aj. Široké možnosti modifikace mechanických vlastností PP nabízí jeho modifikace jak jinými polymery, tak částicovým, případně vláknitým plnivem. Takto lze zejména vyvažovat vzájemný poměr mezi pevností a houževnatostí. Kompozity a směsi na bázi PP dosahují takových vlastností, že se řadí do skupiny konstrukčních plastů vhodných jako náhrada za kovové materiály nebo za konstrukční plasty s vyšší cenou. K nejběžnějším modifikacím patří přidání částicového plniva, elastomeru nebo krátkých skleněných vláken.

Mezi nejčastěji používaná částicová plniva patří vápenec, mastek a slída. Do PP matrice se tyto anorganické látky přidávají ve formě prášku, jehož zrnitost obvykle přesahuje 10 μm . S rostoucí podílem plniva roste modul pružnosti E, hodnoty tažnosti naopak ve většině případů klesají. Přidáním asi 20 objemových procent anorganického prášku lze dosáhnout 1,5 až 2 násobné hodnoty modulu pružnosti proti hodnotě čistého PP.

Houževnatost kompozitu je obvykle proti matrici nižší. Práškové plnivo totiž snižuje podíl polymerní složky, která je schopna pohltit dodávanou mechanickou energii, a tím zvyšuje křehkost materiálu. Rozhraní mezi plnivem a polymerem navíc zavádí do materiálu defekty. Experimentální výsledky však ukazují, že malé množství mikromletého vápence (do 10%) může zvýšit současně jak pevnost v tahu, tak i houževnatost. Ukázalo se také, že při nízkých teplotách zvyšují i poměrně velké koncentrace plniv pravidelného tvaru schopnost pohlcovat energii, a tím dochází ke zvýšení houževnatosti PP kompozitu i při nízkých teplotách. Příliš vysoká koncentrace plniva (20% a více) však zavede do materiálu tolik defektů, že jejich účinek převládne nad mechanismy brzdící rozvoj lomu a houževnatost opět klesne. Výsledné vlastnosti částicového kompozitu jsou, ovlivněny objemovou koncentrací plniva, velikostí a dispergací jeho částic i kvalitou mezifázového rozhraní.

Řada anorganických plniv působí zároveň jako nukleací činidla, a ovlivňuje tedy stupeň krystalinity i celkovou morfologii materiálu, což se ovšem projeví na výsledných mechanických vlastnostech.

Kombinace termoplastů s vlákny přináší zvýšení tuhosti, pevnosti, tvarové stálosti a odolnosti při vyšších teplotách. Termoplastické matrice se vyztužují krátkými vlákny skleněnými, uhlíkovými, aramidovými, případně jejich kombinací. Vlastnosti těchto kompozitů lze rozdělit podle toho, zda o nich rozhodují především vyztužující vlákna (tuhost, pevnost) nebo matrice (houževnatost). Kromě samotných vlastností vláken, především jejich pevnosti a tuhosti, záleží na jejich objemovém zastoupení, orientaci i na soudržnosti mezi maticí a vlákny. Výrobní postup ovlivňuje rozložení vláken jejich orientaci, případně stupeň porušení, a tím i distribuci délek vláken.

Typy PP se střední tekutostí, zejména PP-B, se používají pro vstřikování rozměrnějších výrobků, jako jsou tělesa autobaterii, přepravky, vědřky, cestovní kufry, kufry na nářadí nebo také zahradní nábytek. PP s mastkem má vyšší tvarovou stálost za tepla a současně je odolný i vůči pracím prostředkům. Proto je vhodný pro součásti frotovacích hrnců, fénů, praček, myček nádobí apod.

Kopolymery PP-R plněné mastkem se používají pro součásti strojů, kde je nutné mechanické a akustické tlumení, jako jsou např. sekačky na trávu. Typy vyztužení krátkými skleněnými vlákny jsou určeny pro vysoce tepelně a mechanicky namáhané technické díly, např. oběžná kola ventilátorů.

Automobilový průmysl je hned po obalové technice největším spotřebitelem PP. Díly z PP šetří hmotnost a nekorodují. Obsahují-li vhodné plnivo, např. mastek, mají uspokojivou tuhost i při malé tloušťce stěny. Příkladem vyztužených typů jsou zadní kryty světlometů, nádržky, rozvody chladicí kapaliny i díly topení. Pro venkovní použití se vyžaduje nízkoteplotní houževnatost, kterou splňují pružné kopolymery nebo směsi PP/EP(D)M. tyto vyhoví i pro nárazníky a spoilery. Stejně typy se používají také pro sportovní výzbroj a lyžařské boty. [1]

1.1.3 Polyvinylchlorid (PVC)

Polyvinylchlorid je amorfní termoplast s vyšší tuhostí a pevností a s nízkou tažností a houževnatostí, zejména za nižších teplot (pod -5°C). Tepelná odolnost je nízká (asi 60°C trvale). Odolnost proti povětrnosti a korozi za napětí je lepší než u polyolefinů. PVC není

navlhavý a jeho chemická odolnost proti kyselinám a louhům, alkoholům, olejům a tukům je velmi dobrá. Částečně odolává rozpouštědlům a chlorovaným uhlovodíkům. Houževnaté typy mají nižší tuhost a pevnost jsou však odolnější proti UV záření a povětrnosti. U měkčených typů klesá s rostoucím podílem změkčovadla tuhost a tvrdost, zvyšuje se schopnost tlumení vibrací a rázů.

PVC je plast, který má nejširší aplikační záběr, od automobilového průmyslu až po obalové techniky, od trubek pro stavebnictví až po oděvní průmysl. Je to dáno především jeho schopností vyskytovat se ve velmi rozmanitých podobách. Hlavní důvod této univerzálnosti spočívá v kvalitě fyzikálních a chemických vlastností PVC a jeho schopnosti vyhovět velmi odlišným požadavkům. Přidáním stabilizátorů, barviv a dalších přísad, možnost zpracování vytlačování, přes vstřikování až po válcování, tím vším PVC nabízí stále nové možnosti použití.

Bez změkčovadel nebo maximálně do 5 % změkčovadel je PVC tvrdý plast, tak jak jej známe například z trubek odpadního potrubí nebo okenních rámců. PVC je nekystalický polymer a umožňuje vyrobiť finální výrobky s vysokou průhledností. Tvrdé PVC je materiál s vynikající odolností vůči úderu, která klesá s klesající molární hmotností a zhoršuje se se snižováním teploty. Proto se k PVC běžně přidávají modifikátory houževnatosti.

PVC má sklon k tečení. To má význam pro takové aplikace, jako jsou např. tlakové rozvody, kdy se předpokládá životnost trubek alespoň padesát let. K dlouhodobé odolnosti PVC patří i výborná odolnost proti stárnutí způsobená slunečním zářením. Ta se uplatňuje např. u okenních rámců.

PVC je materiál s malou propustností vodní páry, kyslíku i oxidu uhličitého. PVC je rovněž velmi dobrým elektrickým izolantem. [1]

1.1.4 Polyamidy (PA)

Polyamidy jsou semikystalické termoplasty s krystalickým podílem 20 ÷ 40%. Jsou tuhé a pevné, přitom však s výraznou mezí kluzu a vysokou houževnatostí. Mají poměrně značné vysoké hodnoty tečení. Trvalá teplotní odolnost činí kolem 80°C. odolnost proti UV záření a povětrnosti je nižší. Navlhavost se u jednotlivých PA liší. Navlhavé druhy ztrácejí po vysušení houževnatost a tažnost, vzrůstá pevnost a tuhost. Vlastnosti PA bývají obvykle udávány pro rovnovážný stav vody v prostředí 20°C a 65% relativní vlhkosti. PA

neodolávají kyselinám, louhům, glykolům a horké vodě. Jednotlivé druhy PA se označují číslicemi, které udávají počet uhlíkových atomů ve výchozích monomerech. [1]

1.1.5 Polystyrén (PS)

Polystyren je tvrdý, tuhý, pevný, avšak s nízkou tažností a houževnatostí. Tečení je poměrně nízké. Tepelná odolnost činí asi 60 až 80 °C. odolnost proti UV záření, povětrnosti a korozi za napětí je nízká. Jako houževnatý PS je označován kopolymer styrén-butadién. S rostoucím podílem budadiénu se snižuje tuhost, tvrdost a pevnost, zvyšuje se tažnost a rázová houževnatost. [1]

1.1.6 Kopolymer styrén-akrylonitril (SAN)

SAN má oproti PS vyšší jak tuhost a pevnost, tak i rázovou a vrubovou houževnatost. Má poměrně vysokou mez únavy. Rovněž teplotní a chemická odolnost, odolnost proti povětrnosti a korozi za napětí je výrazně vyšší než u PS. [1]

1.1.7 Kopolymer akrylonitril-butadién-styrén (ABS)

ABS má tuhost, pevnost a tažnost srovnatelnou s houževnatým PS. Má však značně vyšší rázovou a vrubovou houževnatost, a to i za nízkých teplot. Odolnost proti povětrnostním vlivům je nízká, avšak odolnost proti korozi za napětí je značně vyšší než u PS. Chemická odolnost je srovnatelná s odolností SAN. [1]

1.1.8 Polykarbonát (PC)

PC je amorfní termoplast střední tuhosti a vyšší pevnosti. S teplotou se jeho mechanické vlastnosti mění relativně méně. Rázová a vrubová houževnatost je vysoká. Tečení relativně malé. Trvale je tepelně odolný do 100°C. odolnost proti povětrnostním vlivům a korozi za napětí je poněkud nižší. Navlhavost je zanedbatelná. PC odolává slabým kyselinám, benzínu, olejům. Neodolává louhům, aromatickým a chlorovaným uhlovodíkům a rozpouštědům. [1]

1.2 Reaktoplasty

1.2.1 Polyesterové (UP) a epoxidové (EP) pryskyřice

Z reaktoplastů mají největší význam UP a EP, které tvoří matrice vláknitých kompozitů a laminátů. Běžně polyesterové pryskyřice pro všeobecné účely nejsou použitelné ve vlh-

kých korozních prostředích. Pro náročné aplikace v chemickém průmyslu a potravinářském průmyslu (procesní nádrže, korozně odolná potrubí a nádoby) se používají izoftalové a bisfenolové polyestery, mající dobrou až vynikající chemickou odolnost. Vynikající odolnost v těžkých podmínkách mají chlorované polyestery. Epoxidové pryskyřice poskytují po vytvrzení za vyšších teplot dobrou chemickou odolnost. Jsou tužší a pevnější než polyesterové pryskyřice. Mají zvýšenou odolnost proti alkáliím a některým rozpouštědlům. [1]

1.3 Plniva

Polymerní materiály s plnivou se nazývají kompozitnímu. Kompozitní materiály jsou definovány jako materiálové struktury, které vzniknou ze dvou nebo více materiálů zcela odlišných vlastností s výsledným synergickým účinkem. Základním uspořádáním kompozitního materiálu podle uvedené definice je matrice – pojivo, tj. polymer s aditivou, a plnivo, výtuz. Jako plnivo se používají plniva částicová, vyztužující a nanoplňiva.[4]

1.3.1 Plniva částicová

Do skupiny částicových plniv patří celá řada minerálních plniv o různé velikosti a tvaru částic. Tato plniva obecně zvyšují viskozitu taveniny (zhoršují její tekutost), zvyšují tvrdost, tuhost a tepelnou odolnost výstřiku a zmenšují jejich smrštění.

Specifické typy částicových plniv (např. grafit, MoS_2) zlepšují kluzné vlastnosti výstřiku, další snižují povrchový a vnitřně izolační odpor, zvyšují tepelnou vodivost (grafit, uhlíková vlákna, bronzový, hliníkový prach, kovová vlákna)

Koncentrace částicových plniv v kompozitu se pohybují od nízkých hodnot obsahů (pod 1 hmotnostní procento) až po vysoké obsahy (60 a více hm %). Velikost částic se pohybuje od jednoho až desítek mikronů (např. grafit má průměr 2 až 5 mikronů, ketonové vysokostrukturální saze průměr pod 1 mikron, aerosil průměr 10 až 30 mikronů) až po desítky mikronů (např. grafit, mikromletý vápenec). Tvar kulovitý (kaolin, mikromletý vápenec) nebo destičkovitý (slída, grafit).

Mezi částicová plniva řadíme například – skleněné mikrokuličky (balotina), talek (masteček), kaolin, mikromletý křemen, vápenec, čedič, perlit, živec, případně další minerály, koks, saze, aerosil, slídu, oxidy kovů, sírany, práškové kovy a jejich slitiny, polymerní prášky, dřevo atd. Plniva tohoto typu mohou zároveň působit jako pigment (saze), retardér

hoření (saze) nebo jako nukleační látka, pokud jejich velikost je řádově stejná nebo menší než velikost sférolitů. [4]

1.3.2 Vytuzující plniva

Vytuzující plnivo zvyšuje v kompozitu jeho pevnost, tuhost, tvarovou stálost, odolnost k toku za studena a naopak snižuje jeho ohebnost, tažnost, smrštění (ale podstatně zvyšuje anizotropii smrštění) a kluzné vlastnosti s výjimkou uhlíkových vláken. Vytuzující plniva mají obvykle vláknitou strukturu a používají se nejvíce ve tvaru sekaných pramenců vláken. Vliv tvaru plniva na vlastnosti termoplastů je uveden v tabulce 1.

Koncentrace vytuzujících plniv se obvykle pohybuje od 5 do 60% hmotnostních. Nejvíce se používají skleněná vlákna s různou apretací pro dobré spojení s polymerní matricí daného typu. Dále se používají vlákna uhlíková, vlákna z nerezových ocelí, vláknité monokrystaly kovů, oxidy kovů a karbidů, vlákna z titanu alkalických kovů, vlákna aromatických polyamidů, minerální vlna (čedič, walastonit) a další.

Vytuzující efekt vláknitých plniv závisí zejména na poměru jejich délky k jejich průměru. Vytuzující efekt začíná na poměru délky vlákna k jeho průměru l/d větším než 10. Obvyklá délka vláken u běžných vstřikovaných granulátů je v řádu desetin mm (0,2 až 0,4 mm) až celých mm, u materiálů s dlouhými vlákny cca 10 mm. Průměr vlákna je v jednotkách mikrometrů.

V běžných granulátech je krátké vlákno statisticky rozděleno, u vláken delších se jedná o opláštěný pramínkový kabel nasekaný na válečky, kdy je každé vlákno plně impregnováno termoplastickou matricí. Typický rozměr takového granulátu má průměr cca 3 mm a délku 12 mm. Po zpracování na vstřikovacím stroji je délka vláken ve výstřicích cca 0,8 až 4 mm.

Kompozity s dlouhými vlákny oproti těm s krátkými vlákny mají vyšší tuhost mechanické vlastnosti, vyšší vrubovou houževnatost, méně tečou za studena, mají sníženou průtažnost a jsou velmi stálé za vyšších teplot i ve vlhkém a teplém prostředí. [4]

Tab. 1. Vliv tvaru plniva na vlastnosti termoplastů [4]

	Skleněné vlákno	Azbest	Uhlíkové vlákno	Whiskry	Syntetická vlákna	Celulóza	Slída	Talek	Uhlík	Křemenný písek	Kaolin	Skleněné kuličky	Kalciumkarbonát	Oxidy kovů	Saze
Pevnost v tahu	++	+	+	+-			+	0				+			
Pevnost v tlaku	+							+		+		+	+		
E-modul	++	++	++	+			++	+		+		+	+	+	+
Rázová houževnatost	- +	-	-	-	++	+	- +	-		-	-	-	- +	-	+
Snížení teplotní roztažnosti	+	+		+			+	+		+	+			+	
Snížení smrštění	+	+	+				+	+	+	+	+	+	+	+	+
Zlepšení vedení tepla		+	+					+	+	+			+		+
Pevnost za tepla	- +	+	- +				+	+			+		+	+	
Elektrická vodivost				+					+						+
Elektrický odpor							++	+			++			+	
Teplotní odolnost							+	+		+	+			+	+
Chemická odolnost		+					+	0	+		+	+			
Zlepšení otěru			+			+	+	+			+				
Erozní rychlost	- +	+					+				-		-		
Abraze forem a strojů	-	0		0	0	0		0	0	-		0	0		0
Snížení ceny	+	+				+	+	+	+	++	+	+	++		
	Vláknitá plniva					Destičková plniva			Plniva tvaru koule						
	Vyztužující plniva					Nevyztužující plniva									

++ silný vliv

+ slabý vliv

0 bez vlivu

- negativní vliv

1.3.3 Nanoplňiva

Existuje několik druhů nanokompozitů, přičemž nejčastěji používaným plnivem jsou vrstevnaté jíly, např. montmorillonit (složený hlinítokřemičitan, je součástí bentontu). Velikost částic (alespoň jeden její rozměr) je v nanometrech ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) a tedy se řádově blíží velikosti molekuly termoplastické matrice. To umožňuje velmi blízké spojení matrice a plniva, přičemž interakce mezi částicí a pelikulou vytváří na povrchu částice spojenou oblast, která znemožní pohyb příslušné části polymerní matrice. Pro příklad může sloužit již uvedený montmorillonit, jehož 1g má více jak 700 m^2 fiktivního povrchu ve styku s polymerní matricí. Běžně používaný talek o stejné hmotnosti má povrch pouze cca 30 m^2 . Obvyklý obsah nanoplňiva v kompozitu je 3 až 7 %.

Nanočástice tedy zlepšují mechanické vlastnosti polymerní matrice a mohou redukovat obsah přísad nutných k dosažení požadovaných výhod kompozitních materiálů a tím jejich použití vede i k redukci hmotnosti konkrétního výstřiku v porovnání s tradičními plněnými termoplasty. Mohou plně nahradit částicová minerální i vláknitá (skleněná vlákna) plniva i retardéry hoření. Dále zlepšují nepropustnost, odolnost vůči chemikáliím a navlhavost, včetně zvýšení jakosti povrchu výstřiku a zvýšení lesku. Nízký obsah nanoplňiva umožňu-

je výborné probarvení materiálu až po možnost vypuštění dodatečného lakování výstřiku. Technologické podmínky vstřikování (opět v důsledku nízkého obsahu plniva) nejsou závislé na jeho hmotnostním množství. Při výrobě nanokompozitů jsou částice vysušeny, a proto není nutné granulát před vstřikováním sušit (při použití nenavlhavé matrice). Porovnání různých plniv je v tabulce 2. [4]

Tab. 2. Vlastnosti plniv do kompozitních materiálů s termoplastickou maticí [4]

Plnivo	Tvar plniva	Rozeř plniva [10 ⁻⁶ m]	l/d	Hustota [g · cm ⁻³]
Skleněné mikrokuličky	koule	Ø 2,5	1	2,5
Uhlíčan vápenatý CaCO ₃	krychle	0,2–10	1	1,7
Kaolin	destička	0,5 × 5	3–10	2,6
Talek	destička	0,5 × 5	3–10	2,8
Skleněné vlákno	vlákno	10 × 200	20	2,5
Uhlíkové vlákno	vlákno	7 × 200	30	1,6
Montmorillonit	destička	0,001 × 0,2 (1 × 200 nm = 10 ⁻⁹ m)	100–500	2,4

2 PROSTOROVÁ NAPJATOST A DEFOMACE TĚLES

2.1 Základní vztahy

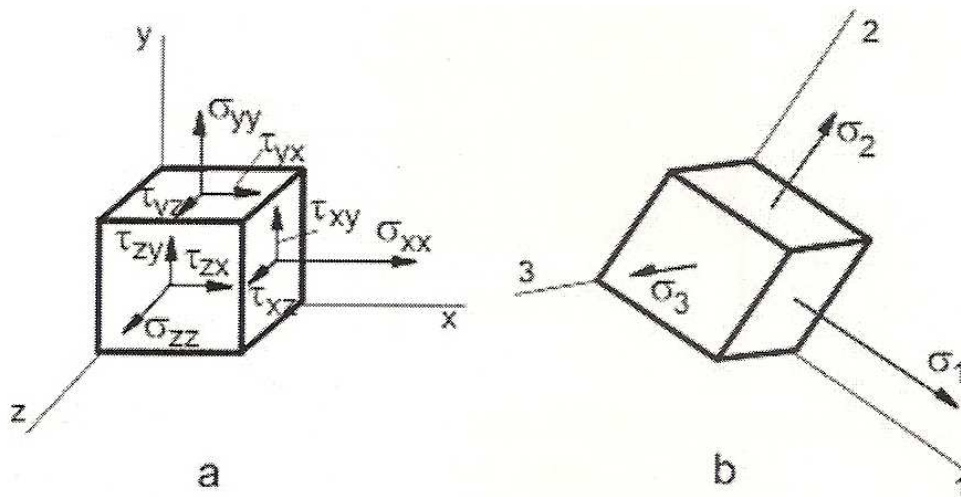
Složky prostorové napjatosti znázorněny na obr.1a. Z momentových podmínek rovnováhy elementární částice vyplývá pro smykové složky symetrie tenzoru napjatosti – tj. platí $\tau_{ij} = \tau_{ji}$. Napjatost v bodě tělesa je tak určena šesti nezávislými složkami. Při přechodu od jednoho ke druhému pootočenému souřadnicovému systému platí pro složky prostorové napjatosti i deformace transformační vztahy:

$$(\sigma)' = [A](\sigma)[A]^T, (\varepsilon)' = [A](\varepsilon)[A]^T. \quad (1)$$

Matice směrových cosinů:

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

S označením $a_{ij} = \cos \alpha_{ij}$, kde α_{ij} je úhel mezi i -tou pootočenou osou a j -tou osou původního souřadnicového systému.



Obr. 1. Složky prostorové napjatosti [1]

Také pro 3D napjatost platí, že existuje hlavní souřadnicový systém, v němž smykové složky vymizí a v ploškách elementární částice působí pouze hlavní normálová napětí obr. 1b. [1]

2.2 Rovnice elasticity pro 3D napjatost

Rozšířením rovnic elasticity dvouosé napjatosti na prostorovou napjatost obdržíme pro normálové složky napětí vztahy

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E}(\sigma_i - \nu\sigma_j - \nu\sigma_k), i, j, k = x, y, z. \quad (3)$$

Inverzí rovnic elasticity obdržíme pro jednotlivá normálová napětí vztahy:

$$\sigma_i = 2G(\varepsilon_i + k), i = x, y, z \quad (4)$$

s označením

$$k = \frac{\nu e}{1 - 2\nu} \cdot [1] \quad (5)$$

2.3 Stlačitelnost – Hookův zákon v objemovém tvaru

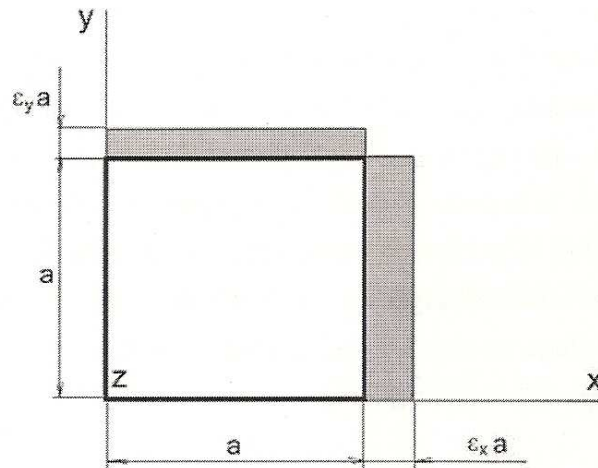
Při prostorové napjatosti změní obecně elementární krychlová část jak svůj tvar, tak i objem. Je-li původní (nedeformovaný) objem elementu $dV = a^3$, je jeho změna objemu po malé deformaci přibližně obr. 2.

$$\Delta dV = a^2 \varepsilon_x a + a^2 \varepsilon_y a + a^2 \varepsilon_z a = a^3 (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (6)$$

Poměrná změna objemu v daném místě tělesa je tak

$$e = \frac{\Delta dV}{dV} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z. \quad (7)$$

Za předpokladu malých přetvoření se na změně objemu elementární částice zřejmě nepodílejí smykové složky deformace.



Obr. 2. Deformace elementu [1]

Spojením vztahů (6) a (7) zjistíme, že platí

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \frac{Ee}{1-2\nu} = konst. \quad (8)$$

Je-li částice materiálu namáhána všestranným tlakem, tj. napjatostí hydrostatického typu, kdy (obr. 3) $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = -p$, budou příslušné deformace $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\varepsilon$.

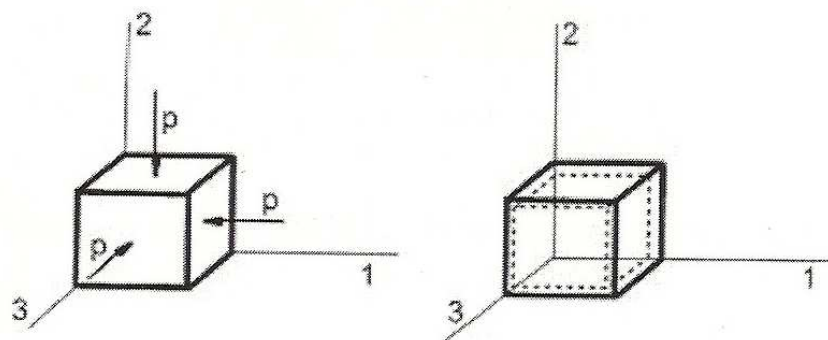
$$\varepsilon = \frac{p}{E}(1-2\nu). \quad (9)$$

Poměrná změna objemu – stlačení je tak zřejmé

$$\varepsilon = 3\varepsilon = \frac{3p(1-2\nu)}{E}. \quad (10)$$

Lze psát $p = Ke$, s označením

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}. \quad (11)$$



Obr. 3. Hydrostatická napjatost [1]

Konstanta K se nazývá objemový modul pružnosti. [1]

2.4 Měrná energie napjatosti

Vztáhneme-li energii prostorové napjatosti U na jednotku objemu, položíme

$$W = \frac{dU}{dV} \quad (12)$$

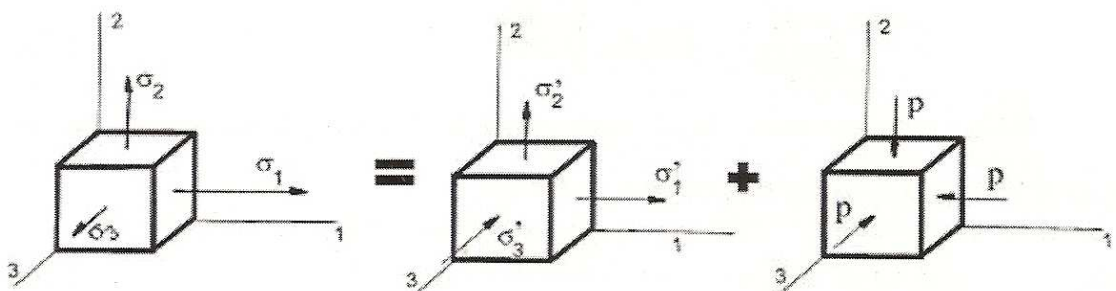
Hovoříme o veličině W jako o měrné energii napjatosti, případně o hustotě energie napjatosti, resp. hustotě deformační energie

$$W = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (13)$$

Dosazením za složky deformace rovnice elasticity, obdržíme vztah

$$W = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)] \quad (14)$$

Rozdělením obecné prostorové napjatosti, danou pro přehlednost hodnotami hlavních napětí, na dvě dílčí části (obr. 4) napětí σ'_i způsobuje pouze změnu tvaru elementární krychle, napětí $\sigma''_i = p$ způsobí pouze změnu objemu.



Obr. 4. Rozdělení obecné napjatosti [1]

První z napjatostí, způsobující pouze změnu tvaru, se nazývá diviátorovou (distorzní) částí napjatosti. Druhá napjatost je již zmíněnou hydrostatickou (objemovou) částí napjatosti.

Pro distorzní část napjatosti $e=0$. Je tak

$$\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3 = 0, \quad (15)$$

součet

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' = 3p, \quad (16)$$

Velikost hydrostatické (objemové) části napjatosti

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}. \quad (17)$$

Tímto vztahem je tak rozdělení prostorové napjatosti na část distorzní a objemovou uskutečněno, neboť již

$$\sigma_i = \sigma_i' + \sigma_i'' = \sigma_i' + p, \text{ tj. } \sigma_i' = \sigma_i - p. \quad (18)$$

Měrná energie objemové části napjatosti

$$W'' = \frac{1-2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2. \quad (19)$$

Měrnou energii distorzní části pak obdržíme jako rozdíl

$$W' = W - W'', \quad (20)$$

$$W' = \frac{1+4\nu}{3E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)] \quad (21)$$

[1]

2.5 Von Misesovo srovnávací napětí

Von Misesova hypotéza srovnává napjatosti na základě hodnoty měrné energie části napjatosti, potřebné na změnu tvaru, tj. distorzní napjatosti. Měrná energie distorzní části napjatosti, vyjádřené hlavními napětími je dána vztahem (21).

Hledáme-li obecnou prostorovou napjatost srovnávací jednoosou napjatost σ_s , která bude mít shodnou velikost W' , bude $W'_1 = W'$,

$$\sigma_s = \left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (22)$$

Pro případy rovinné napjatosti je srovnávací Von Misesovo napětí

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2}, \quad (23)$$

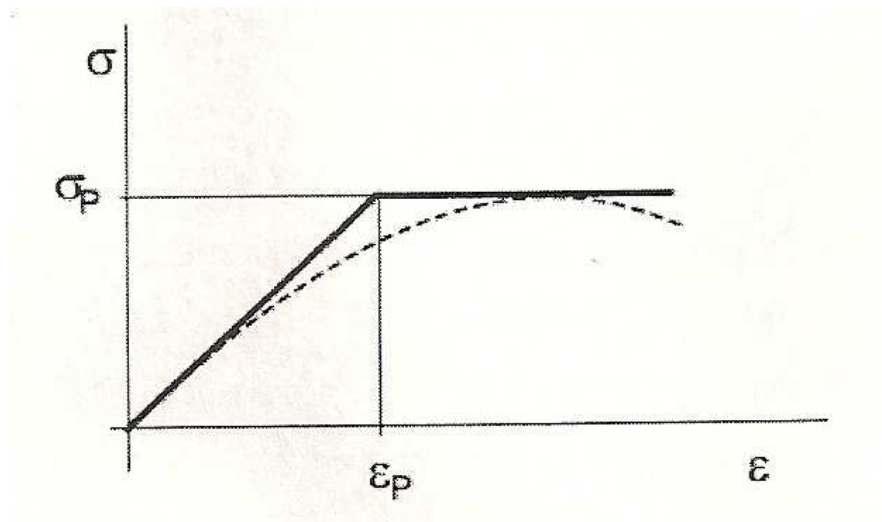
pro čistý smyk ($\sigma_1 = \tau, \sigma_2 = -\tau$)

$$\sigma_s = \sqrt{3\tau^2}. \quad (24)$$

[1]

2.6 Ohyb v oblasti plastických deformací

Předchozí kapitoly se zabývaly lineárně elastickým chováním při ohybu. Lze sem zahrnout případy poměrně nízkých napětí a deformací, případně i vyšších namáhání křehkých a vyztužených plastů, jež mají průběh charakteristiky $\sigma - \varepsilon$ lineárně téměř do meze pevnosti. V případech velkých deformací poměrně houževnatých plastů s vysokou tažností však o lineárně elastickém chování nelze hovořit ani přibližně. Pro praktické výpočty resp. kvalifikované odhady mechanického chování v oblasti velkých deformací proto nahradíme skutečný diagram $\sigma - \varepsilon$ dvěma přímkami obr. 5.



Obr. 5. Diagram $\sigma - \varepsilon$ [1]

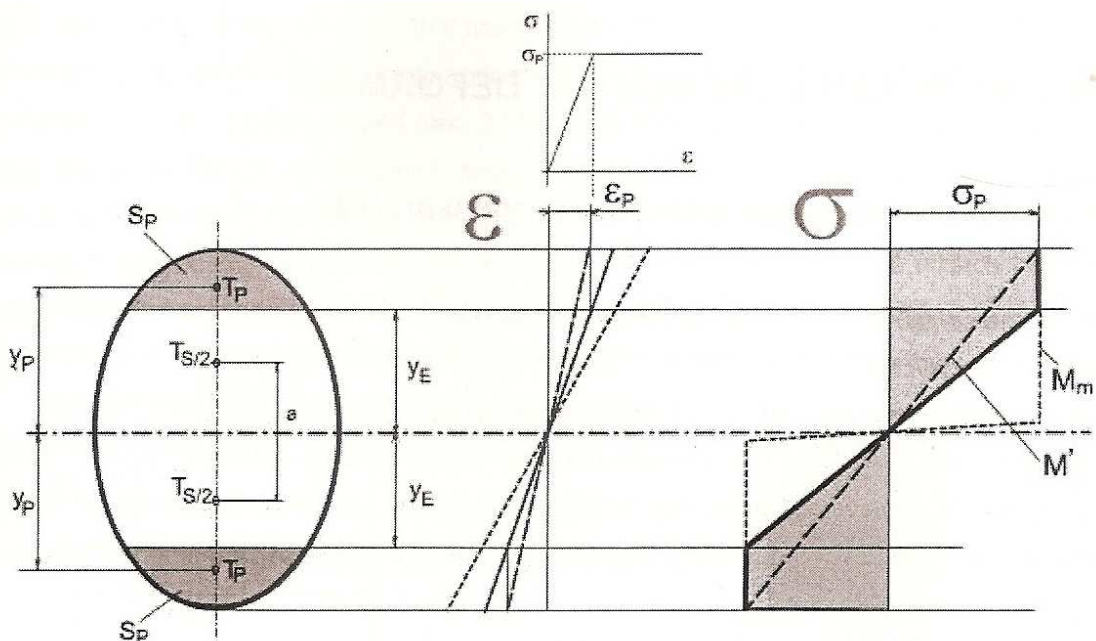
Do meze σ_p předpokládáme platnost Hookeova zákona, tj. platí

$$\sigma = E\varepsilon, \sigma < \sigma_p. \quad (25)$$

Pro $\varepsilon \geq \sigma_p / E$ pak předpokládáme ideální plastické chování bez dalšího zpevnování nad mezí σ_p , tj. $\sigma = konst = \sigma_p$. Ztotožňujeme tak mez úměrnosti s mezí pevnosti, příp. kluzu, což lze jen přibližně. Materiál s takto idealizovanými vlastnostmi budeme nazývat ideálně pružně plastickým.

Vyjděme z této zjednodušené představy o chování materiálu při velkých deformacích při řešení jeho ohybu. Necht' je dvouosý souměrný průřez obecného tvaru zatížen ohybovým momentem M (obr. 6) Předpokládejme nejprve, že materiál vykazuje shodné hodnoty σ_p v tlaku i tahu. Nepřestoupí-li napětí v krajních vláknech průřezu σ_p , platí vztahy pro lineárně elastický materiál. Při zvyšování zatížení bude dosaženo hodnoty σ_p nejdříve v krajním vláknech průřezu. Tomu odpovídá velikost ohybového momentu

$$M' = \sigma_p \frac{2J}{h}. \quad (26)$$



Obr. 6. Obecný průřez zatížený momentem [1]

Tento stav je pouze jistým výpočtovým, nikoliv skutečným mezním stavem napjatosti průřezu. Zvýšíme-li nyní zatížení průřezu na jistou hodnotu $M > M'$, vytvoří se v krajních částech průřezu (v místech, kde $\varepsilon > \varepsilon_p$) plastické zóny, jak je na obr. 6 znázorněno. Průřez je tak ve stavu pružně plastické napjatosti. Za předpokladu zachování rovinnosti průřezu po deformaci platí jak pro pružnou tak plastickou část průřezu vztah:

$$\varepsilon(y) = \frac{1}{r} y. \quad (27)$$

Velikost ohybového momentu přenášeného normálovým napětím v průřezu určíme jako součet příspěvků pružné a plastické části

$$M = \sigma_p \frac{J_E}{y_E} + 2\sigma_p S_p y_p. \quad (28)$$

Deformaci prutu v daném místě určuje pružná oblast průřezu

$$\frac{1}{r} = \frac{\sigma_p \frac{J_E}{y_E}}{E J_E} = \frac{\sigma_p}{E y_E}. \quad (29)$$

Při dalším zvyšování zatížení poroste plocha S_p na úkor plochy elastické oblasti. Pro $S_E \rightarrow 0$, tj. $y_E \rightarrow 0$ však podle rovnice (29) roste prutu nade všechny meze. Mezního stavu, kde zcela vymizí elastická oblast, tak prakticky nelze dosáhnout, i kdybychom předpokládali, že se dříve nevyčerpají deformační vlastnosti materiálu. Je-li $y_E \ll h$, je příspěvek pružné části, soustředěné kolem neutrální osy, prakticky zanedbatelným vzhledem k malým ramenům sil. Při větších deformacích proto zůstane ohybový moment v průřezu prakticky konstantní a roven limitní hodnotě velikosti ohybového momentu

$$M_m = \lim_{y_E \rightarrow 0} M = \sigma_p S y_{S/2}. \quad (30)$$

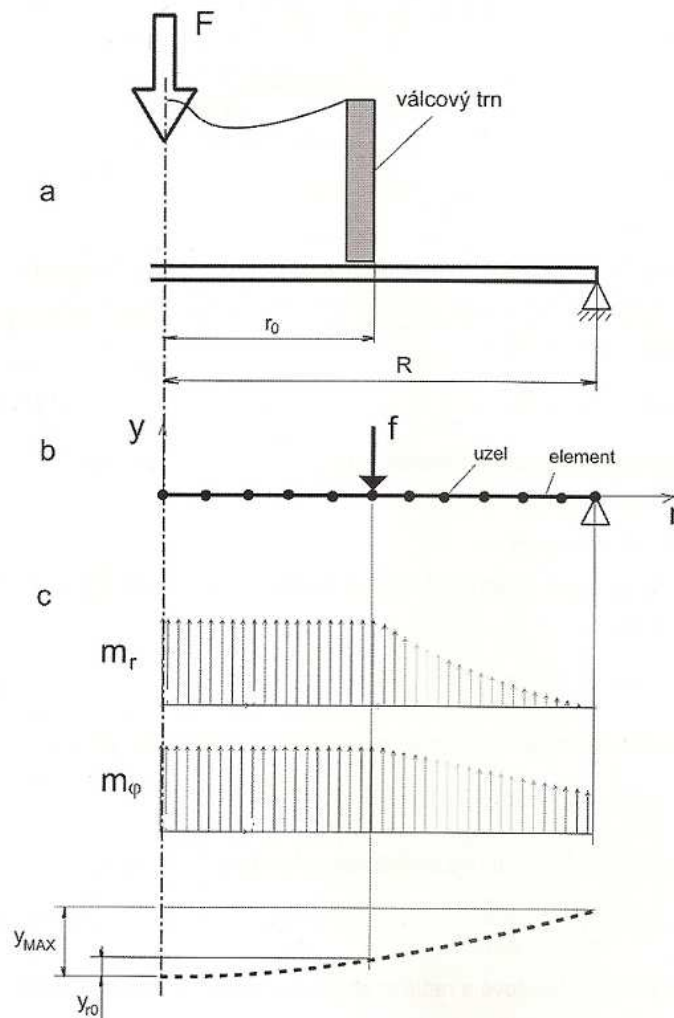
Veličinu M_m nazýváme mezní ohybovým momentem daného průřezu. Mezní moment lze psát v zápisu

$$\sigma_p = \frac{M_m}{W_p}, \quad (31)$$

Kde geometrická konstanta dvouose souměrného průřezu $W_p = S y_{S/2}$ je průřezový modul v ohybu při mezním (plastickém) stavu napjatosti. Například pro kruhový průřez je $W_p = d^3 / 6$, takže poměr $W_p / W_0 = 1,7$. To značí, že mezní ohybový moment je u kruhového průřezu teoreticky o 70% větší než moment M' , při kterém vzniknou první plastické deformace. V praxi nelze obvykle s tak velkou rezervou počítat, neboť reálné materiály vykazují odchylky od ideálního pružného plastického chování. [1]

2.7 Zkouška ohybem

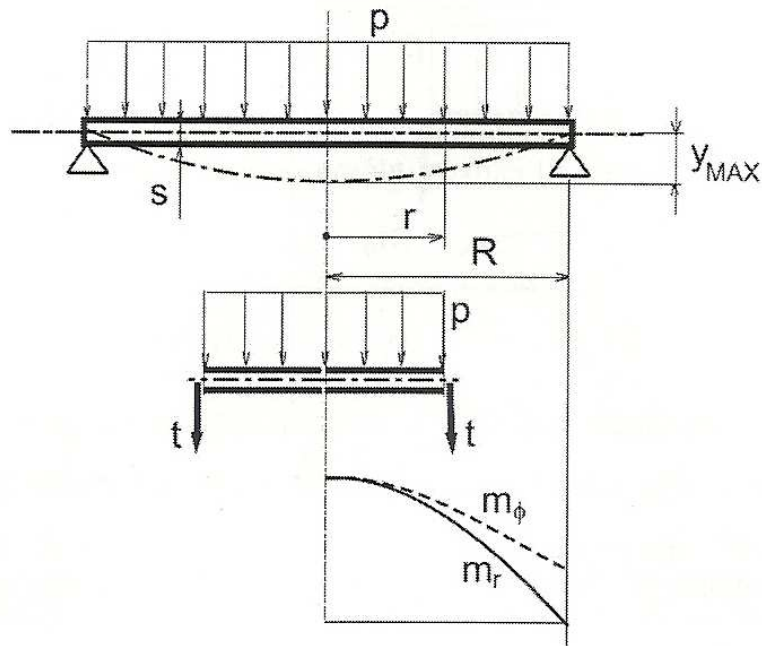
Zkouška ohybem kruhové desky (obr. 7a), zatěžovaná osovou silou F prostřednictvím válcového trnu o průměru $2r_0$ (obr. 7b). Vzhledem k deformacím desky při ohybovém testu je kontaktním rozhraním vnější obvod trnu. Konečně prvkový model rotačně symetrických případů kruhových desek lze sestavit z axiálně symetrických skořepinových prvku (b). Tyto prvky si lze představit jako úzká mezikružít (prstence), v modelu znázorňované podobně jako dvou uzlové 1D nosníkové prvky. Na rozdíl od prutů však geometrie modelu představuje střednici stěny desky (skořepiny v polovičním řezu). Zatížení f představuje hodnotu osové síly, připadající na jednotku délky vnějšího obvodu trnu.



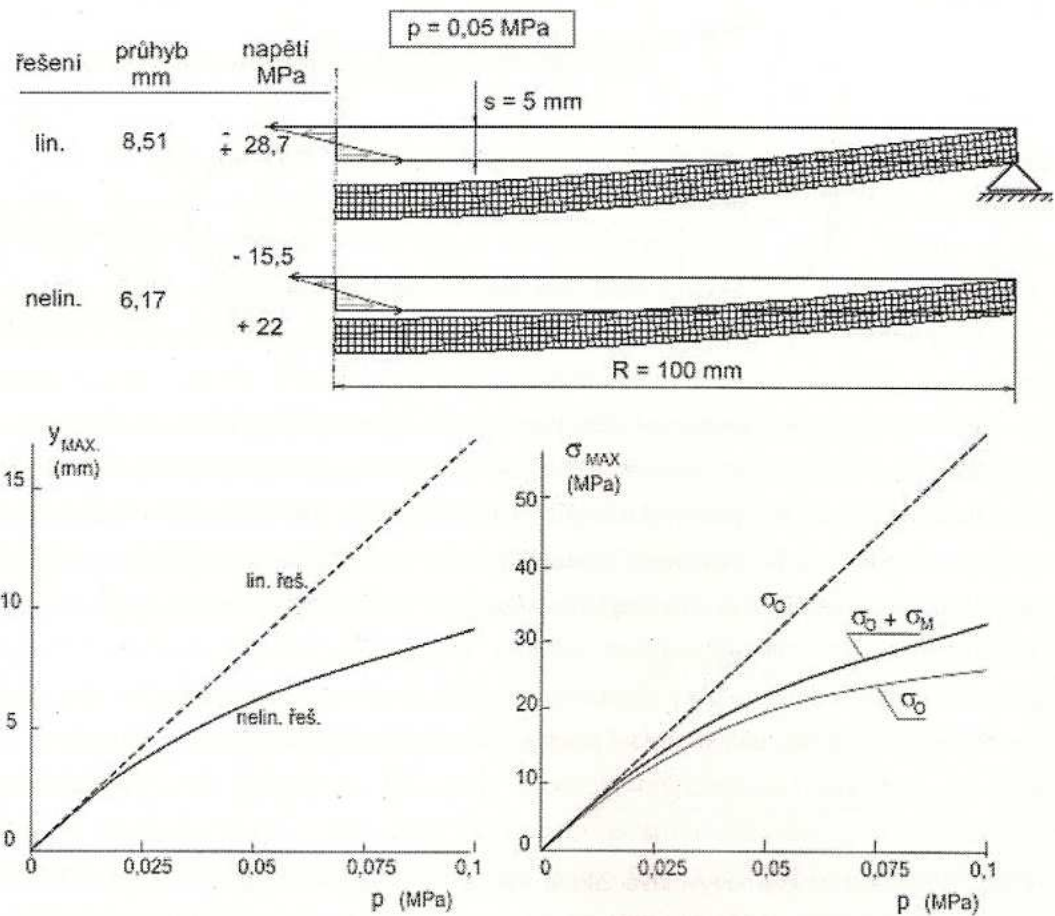
Obr. 7. Zkouška ohybem kruhové desky [1]

Průměrem trnu je plocha kruhové desky rozdělena na dvě oblasti. Vnitřní oblast je svou napjatostí totožná s případem na obr. 7, jedná se o dvouosý ohyb do sférické deformační plochy viz. obr. 7c. Hodnoty příčných sil t jsou této části desky zřejmě nulové. Zkouška je tak určitou analogií standartního čtyřbodového testu ohybem.

Abychom ilustrovali vliv deformace desky na vznik a velikost membránových složek při jejím ohybu, porovnejme Kirchhoffovo lineární řešení čistého ohybu s nelineárním řešením, zahrnující vliv membránových deformací a napětí v případě kruhové desky z termoplastu, na obvodu pouze prostě podepřené a zatížené plošným tlakem, tedy v případě, znázorněném na obr. 8. Poloměr desky je 100mm, tloušťka 5mm, modul pružnosti 3000MPa, Poissonův poměr 0,35. Výsledky obou analýz jsou srovnány na obr. 9. Jak patrně s narůstajícím zatížením vzrůstá jak odchylka v určení deformace, tak napětí. [1]



Obr. 8. Zatížená kruhová deska [1]



Obr. 9. Výsledky analýz [1]

3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

3.1 Úvod do vstřikování

Technologie vstřikování termoplastů, včetně strojů a zařízení pro její realizaci, urazila od svých prvopočátků, pře masový a bouřlivý rozvoj zejména v druhé polovině minulého století až po dnešní globalizaci, velmi dlouhou a úspěšnou cestu. Díky širokým možnostem využití termoplastů, zejména v automobilovém, elektronickém a v dalších oblastech průmyslu, je tato technologie i nadále velmi perspektivní.

Kromě vývoje vstřikovacích materiálů, zejména směsí (blendů), směřovaného na konkrétní výrobní skupiny, se jedná o různé modifikace vstřikovacího procesu, včetně zařízení a forem umožňující tyto modifikace aplikovat na výrobní praxi. Mezi nejčastěji používané modifikace vstřikovacího procesu je možno řadit:

- Vícekomponentní vstřikování ve všech jeho variantách
- Vstřikování dutých a tlustostěnných dílů s využitím tlaku inertního plynu nebo vody (GIT, WIT)
- Výrobu výstřiků se stěnami malých tloušťek
- Technologie vstřikování strukturně lehčených plastů
- Technologii MuCell (Microcellular Foam Molding)
- Dekorativní vstřikování a jeho modifikace
- Kombinace modifikovaných procesů
- Kaskádové vstřikování
- Vstřikování s regulací plnění dutiny formy v reálném čase (Dynamic Feed)

Prakticky všechny modifikace technologie vstřikování plastů vycházejí z poznatků klasického vstřikování. Vždy je nutné připravit z příslušného, případně předem upraveného (tj. vysušeného, smíchaného s aditivou atp.) granulátu teplotně co nejhomogennějšího taveninu, kterou působením vstřikovacího tlaku a vstřikovací rychlosti dopravíme co nejšetrněji do temperované tvarové dutiny formy. V tvarové dutině působením dotlakové fáze vstřikovacího procesu se snažíme eliminovat tepelnou objemovou kontrakci, tak aby výstřik po chlazení a vyhození z formy měl předepsané tvary a rozměry, včetně všech dalších požadovaných jakostních parametrů. [4]

3.2 Základní předpoklady pro vstřikování dílů s definovanou jakostí

Kvalita výstřiků z termoplastů je definována jejich stavem, v němž se nacházejí po vyhození z formy a relaxaci po dobu (min. 16 hod., max. 48hod.) nejčastěji 24 hodin v normálním prostředí.

Stav výstřiku charakterizován:

- Stupněm a rozložením orientace makromolekul, u vyztužených materiálů i orientací vyztužujících plniv (nejčastěji vláknitá plniva). Z pohledu technologických parametrů má na orientaci významný vliv teplota taveniny a vstřikovací rychlost, včetně podílu dotlakové a ochlazovací fáze procesu vstřikování (rychlost ochlazování)
- Velikostí a rozložením vnitřního pnutí, jehož nejvýznamnější složku tvoří tepelné pnutí (ovlivňované zejména teplotou taveniny a formy), dalšími složkami jsou pnutí z nerovnoměrné orientace, nerovnoměrné krystalizace a pnutí z přeplnění vzniklé v důsledku nevhodně zvolených parametrů dotlakové fáze vstřikování
- U částečně krystalických termoplastů obsahem krystalické fáze (v závislosti na teplotě formy a době – rychlosti ochlazování), velikostí a rozložením sférolitů (závislost na přítomnosti nukleacích aditiv a gradientu ochlazování) a tzv. skin-core efektu (povrch-jádro) vyjadřující rozdílný obsah krystalického podílu po průřezu stěnou výstřiku

Stav výstřiku, resp. jeho jakost, závisí na všech faktorech, která se vstřikovacího procesu účastní. V první řadě to jsou:

- Vstřikovaný materiál (jeho typ, složení, aktivace, reologické vlastnosti atd.)
- Vstřikovací stroj
- Požítá periferní zařízení (sušení, doprava a dávkování materiálu, doprava a manipulace s výstřikem, aktivace materiálu a jeho barvení, temperance formy, ohřev horkých rozvodů, atd.)
- Tvar výstřiku a způsobený je zaformováním
- Konstrukce a výroba formy
- Technologické parametry vstřikování

S kvalitou souvisí i následné operace – začišťování výstřiku, jejich obrábění, svařování, potiskování, montáž do montážních podskupin a skupin atd.

Výhradní postavení ve vztahu ke kvalitě má konstrukce výstřiku a z ní vyplývající konstrukce vstřikovací formy. Pokud konstrukce výstřiku je chybná, tj. neodpovídá zásadám technologičnosti konstrukce výstřiku z termoplastů nebo je chybná konstrukce formy (např. malá tuhost, nevhodný vyhazovací systém, nevhodný způsob plnění tvarové dutiny, špatně navržený temperanční systém atd.) sebekvalitnější vstřikovací materiál nebo vstřikovací stroj, resp. nastavení technologických parametrů závadu způsobující výrobu nekvalitních výstřiků těžko odstraní.

Při vyhodnocení vlivů působících na kvalitu výstřiku z termoplastů je nutné vždy mít v úvahu, jak bylo uvedeno výše, všechny skupiny vlivů, zejména:

- Výstřik (jeho tvar) – tloušťky stěn a jejich rovnoměrnost, tvarová složitost, úkosy, zaoblení hran, poměry délky toku ku tloušťce tokové dráhy, způsob plnění, atd.
- Konstrukce formy za předpokladu její dostatečné tuhosti a dokonalého odvzdušnění v kritických místech tvarové dutiny – temperanční systém určující teplotu stěny tvarové dutiny formy, vtoková soustava – studený rozvod taveniny, horký rozvod taveniny, typ vtokového ústí, jeho umístění na výstřiku, počet vtokových ústí pro jeden díl, vyhazovací systém, povrch tvarových dílů formy, atd.
- Technologické parametry vstřikování vázané na příslušný vstřikovaný materiál, tvar výstřiku a konstrukci formy za předpokladu reprodukovatelnosti optimalizovaných technologických parametrů ve všech fázích vstřikovacího cyklu – plastifikace, plnění tvarové dutiny taveninou, přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak, dotlaková fáze a fáze ochlazování
- Vstřikovaný materiál – jeho tokové vlastnosti, aditiva, obsah a druh plniva, smrštění a jeho anizotropie, E-modul, houževnatost, tvrdost atd.

Vstřikování je diskontinuální proces – jedná se o cyklickou výrobu, a proto je prvním předpokladem kvalitní výroby stabilita procesu, při zajištění ostatních optimalizovaných parametrů. To znamená, že je nutné zaručit, aby každý následný vstřikovací cyklus měl identický průběh jako cyklus předchozí.

Zde je nutné si uvědomit, že jediným ukazatelem kvality výstřiku, měřitelným bezprostředně po vyhození výstřiku z formy, je jeho hmotnost. Hmotnost, resp. záznam naměřených hodnot cyklu od cyklu, je tedy do jisté míry ukazatelem stability procesu, nikoliv ale parametrů jakosti jako je např. smrštění. To může platit pouze u některých jednotlivých výstřiků plněných klasickou studenou vtokovou soustavou, kdy naměřené hodnoty hmot-

nosti mohou souviset s hodnotami smršťení – s rostoucí hmotností se hodnoty smršťení snižují.

Vstřikovací cyklus lze rozdělit na čtyři hlavní fáze, které ovlivňují stav výstřiku a následně jeho kvalitu.

Základní předpoklady pro vstřikování výstřiku s maximální izotropií vlastností jsou definovány pro jednotlivé fáze vstřikovacího cyklu takto. [4]

3.2.1 Plastikační fáze

Základním předpokladem pro optimální naplnění tvarové dutiny formy je zajištění teplotní a viskozitní homogenity v dávce taveniny před čelem šneku. K tomu přispívá správné nastavení teplot na jednotlivých topných pásmech plastikačního válce, zpětný odpor na šneku a otáčky šneku. Poslední dva parametry je obvykle možné v procesu plastikace profilovat. Případná nehomogenita taveniny se projeví negativně zejména na kvalitě povrchu výstřiku – tokové čáry, lesk, studené spoje, rozložení orientace, vnitřní pnutí, u částečně krystalických materiálů i nerovnoměrná tvorba makromolekulárních struktury. Teplota taveniny má rozhodující vliv na orientaci makromolekul výstřiku – s růstem teploty taveniny stupeň orientace klesá a výstřik se, z hlediska vlastností, stává více izotropní. Zároveň ve směru toku taveniny klesají některé mechanické vlastnosti – pevnost v tahu, houževnatost, naopak se zvyšuje pevnost studených spojů a snižuje se vnitřní pnutí. Výstřiky z částečně krystalických materiálů mají vyšší smršťení a nižší dosmršťení. [4]

3.2.2 Vstřikovací fáze

Naplnění tvarové dutiny formy termicky homogenní taveninou tak, aby rychlost čela proudu taveniny byla v každém místě průřezu tvarové dutiny (tokové dráhy) konstantní. U tvarově jednoduchých výstřiků s konstantní tloušťkou stěny je možné tento předpoklad víceméně dodržet, u tvarově členitých výstřiků s rozdílnou tloušťkou stěny je to již problematické i při zapojení počítačové simulace plnění fáze.

Rychlost vstřikování – doba plnění tvarové dutiny formy polymerní taveninou – má vliv zejména na povrchové defekty výstřiku – tokové čáry, vrásnění, povrch pomerančové kůry, stopy po studených spojích atd. rychlost plnění je proto spolu s teplotou taveniny nutné optimalizovat tak, aby na povrchu výstřiku nevznikala příliš vysoká smyková napětí.

Pro polymery s částicovým plnivem se jako nejvhodnější ukázala kombinace vyšší teploty taveniny a nižší vstřikovací rychlosti u polymerů s vláknitými plnivy je naopak výhodnější vyšší rychlost vstřikování.

Při velmi nízké vstřikovací rychlosti se čelo taveniny v dutině formy rychle ochlazuje, což podporuje růst orientace a tím anizotropii vlastností v různých místech výstřiku. S klesající rychlostí plnění sice ve směru toku se zvyšuje pevnost a houževnatost, klesá však povrchový lesk a snižuje se pevnost studených spojů.

Přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak musí být provedeno tak, aby nebyla ovlivněna plynulost tlakové odezvy na plnicí fázi v tvarové dutině, tj. po přepnutí nesmí na tlakové křivce být propad tlaku ani jeho výrazné zvýšení (tlaková špička – pík), tlaková musí plynule stoupat na maximum a po jeho dosažení plynule přejít na dotlakový průběh. To je důležité z hlediska dosažení co největší izotropie vlastností a minimalizace vnitřního pnutí. Předčasné přepnutí (propad dotlaku) má za následek plnění tvarové dutiny formy dotlakem (tj. jinou rychlostí než požadovanou), pozdní přepnutí (tlaková špička) je příčinou zvýšení anizotropie vlastností, zvýšení obsahu vnitřního pnutí a může být příčinou přetoků v dělicí rovině formy.

Předčasné přepnutí, tj. dokončení plnění nebo plnění tvarové dutiny formy – objemové naplnění taveninou a dotlak fáze jsou spojené – dotlak může v některých případech troch paradoxně vést ke kvalitnějšímu povrchu výstřiku. Plnění formy dotlakem je možné použít i v případě, že výroba výstřiku vyžaduje velmi pomalé vstřikování, které není technicky možné realizovat vstřikovací rychlostí (rychlost dotlaku je obvykle nižší než nejnižší rychlost vstřikování). [4]

3.2.3 Dotlaková fáze

Průběh dotlaku, charakterizovaný hodnotou tlakové odezvy v dutině formy, v době jeho působení se musí volit tak, aby bylo dosaženo požadovaných tvarů rozměrů a hmotnosti výstřiku. Působením dotlakové fáze jako celku i jejich jednotlivých parametrů (doba dotlaku, tlaková úroveň dotlaku, profil dotlaku) nad optimum, tj. dosažení požadované hmotnosti, vykopírování tvarů a dezénů, včetně dosažení požadovaných rozměrů, vede ke zvýšení obsahu vnitřního pnutí ve výstřiku (vnitřní pnutí je úměrné součinu dotlaku a doby jeho působení) a je i neekonomické – zbytečná činnost čerpadla. Dotlaková fáze se tedy využívá ke korekci smrštění a tedy rozměrů, případně deformací, k odstranění propadlin, lunek a trhlin, včetně dokonalejšího kopírování povrchu (dezén) tvarové dutiny formy.

Působením plnicí a dotlakové fáze na výstřik je možné kontrolovat pomocí tzv. polštáře, což je množství taveniny, která zůstane před čelem šneku po skončení dotlaku (zamrznutí ústí vtoku na výstřiku). Pokud je hodnota polštáře cyklu od cyklu v daných tolerančních mezích stejná, vypovídá to o tom, že proces je plně reprodukovatelný. [4]

3.2.4 Fáze ochlazovací

Ochlazování výstřiku ve tvarové dutině formy začíná již v okamžiku začátku plnění dutiny taveninou, resp. po objemovém naplnění dutiny a trvá až do vyhození výstřiku z formy, tj. přes dotlakovou fázi a chlazení bez dotlaku – po zamrznutí vtokového ústí. Parametry ochlazovací fáze jsou- teplota formy a doba ochlazování. Minimální doba ochlazování musí zaručit takovou tuhost výstřiku, aby tento díl byl vyhozen z formy bez deformací nebo vad způsobených vyhazovacím systémem.

Z hlediska jakosti výstřiku je dominantním parametrem ochlazovací fáze teplota formy. Rychlost ochlazování je určující pro relaxační jevy, které ovlivňují výsledný stupeň a rozložení orientace, eventuelně složku orientačního a tepelného pnutí a u částečně krystalických polymerů i krystalickou strukturu.

Obecně platí, že čím je ochlazování výstřiku pomalejší, tzn. Čím je vyšší teplota formy a delší doba ochlazování, tím větší je, u částečně krystalických plastů, obsah krystalického podílu, a proto je při takové kombinaci technologických parametrů ochlazovací fáze i větší smrštění, specifická hmotnost, tuhost, tvrdost a pevnost výstřiku, při klesajícím dosmrštění, tažnosti a navlhavost. Teplota formy – její zvýšení – i pozitivní vliv na povrchový lesk a celkově i na kvalitu povrchu výstřiku.

Optimalizace doby ochlazování má výrazný vliv na ekonomii výroby (doba vstřikovacího cyklu). Z hlediska kvalitativních požadavků (rovnoměrná struktura výstřiků, minimalizace vnitřního pnutí – relaxace, minimalizace izotropie – relaxace) by doba ochlazování měla být co nejdelší, z ekonomického hlediska co nejkratší. Vždy je nutné volit kompromis vycházející požadavků odběratele výstřiků.

Pro zajištění zde uvedených předpokladů, resp. pro přiblížení se k uvedenému ideálnímu stavu, je nutné provést celou řadu navazujících a vzájemně se ovlivňujících úkonů, seřízení a optimalizace. [4]

3.3 Vstřikovací stroj

Plně funkční vstřikovací stroj s prováděnou pravidelnou údržbou, včetně čištění olejové náplně, je samozřejmým předpokladem pro optimalizaci procesu vstřikování. Z hlediska výsledku, tj. výroby výstřiků s džinovou kvalitou je konstrukční provedení použitého vstřikovacího stroje nedůležité.

Důležitá je reprodukovatelnost nastavených výrobních parametrů, kontrolována zejména u dílů pro automobilový průmysl při výrobě tzv. prvních vzorků statistickou hodnotou C_{pk} , která uvádí způsobilost procesu

Pro další práci se vstřikovací formou je nutné kromě reprodukovatelnosti parametrů zajistit správný výběr stroje s ohledem na uzavírací sílu a kapacitu plastikací jednotky. V neposlední řadě je nutné věnovat nejvyšší pozornost zpětnému uzávěru na plastikačním a vstřikovacím šneku.

Hlavním úkolem uzavírací jednotky vstřikovacího stroje je být nosičem vstřikovacích forem. Pro zajištění výroby výstřiků bez přetoků v dělicí rovině, při dostatečné tuhosti formy, zejména v oblasti pohyblivých částí – čelisti a jejich uzavírací klíny – je nutné pro daný výstřik, resp. zdvih u vícenásobných forem (součet výstřiků a vtokového rozvodu) stanovit uzavírací sílu.

Uzavírací síla musí zajistit dokonalé sevření formy v dělicí rovině jako reakci na vstřikovací tlak a vstřikovací rychlost (hybnost taveniny dopravované do tvarové dutiny vstřikovací formy). [4]

3.3.1 Systémový tlak

Jedná se o tlak vytvářený čerpadlem nebo skupinou čerpadel v hydraulickém systému vstřikovacího stroje, podle konstrukce strojů má obvykle hodnotu 140, 170, 210, 270 barů. Tento tlak se objevuje na obrazovce řídicího systému vstřikovacího stroje, a proto bývá nejčastěji používán do záznamů o procesu vstřikování. [4]

3.3.2 Tlak před čelem šneku

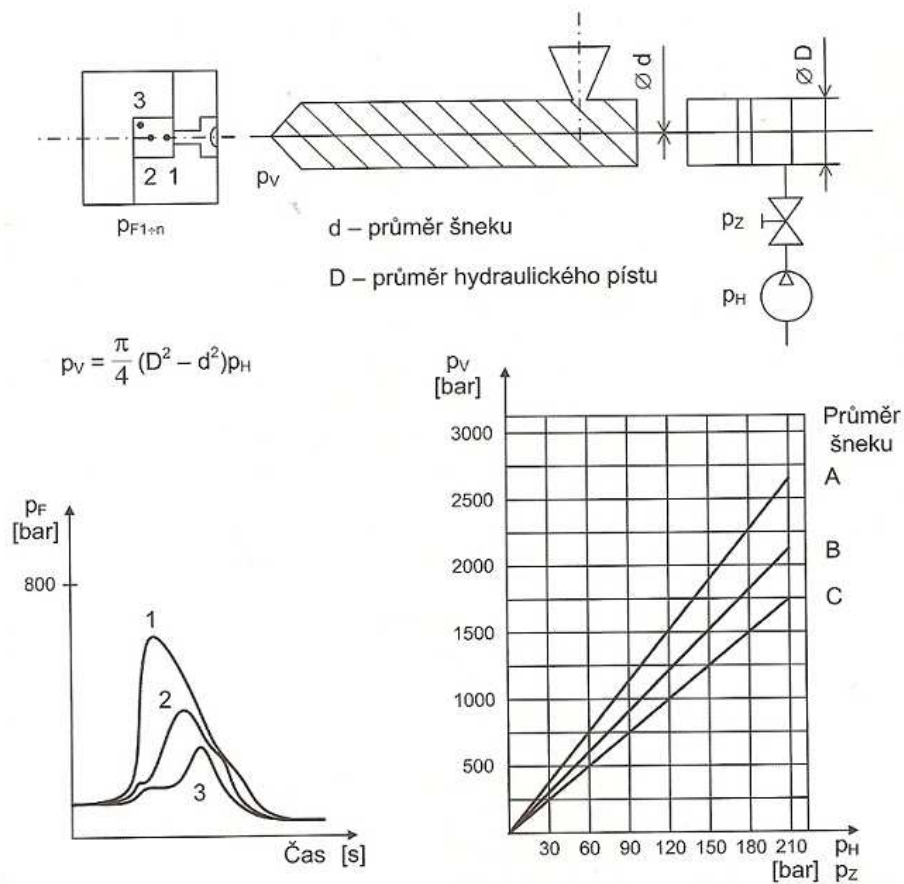
Je to tlak v dávce taveniny před čelem šneku při plnění formy taveninou. Jeho hodnota je svázána se systémovým tlakem a je určena průměry šneku a pístu vstřikovacího válce. Velikost systémového tlaku, resp. tlaku před čelem šneku, musí být taková, aby při požadované rychlosti nebo profilu rychlosti vstřikování tuto rychlost při překonávání všech

odporů proti dutiny formy taveninou realizovala ve všech místech tvarové dutiny formy. V případě nižšího vstřikovacího tlaku, který nebude schopen překonat odpory ve formě, se na základě hydraulických zákonů automaticky změní vstřikovací rychlost a vstřikování nebudou probíhat požadovanou rychlostí, ale rychlostí odpovídající příslušnému vstřikovacímu tlaku. V takové případě je nutné změnit poměr vstřikovací tlak – vstřikovací rychlost (buď zvýšit tlak, nebo snížit rychlost), aby vstřikování probíhalo korektně a reprodukovatelně, samozřejmě při splnění kvalitativních požadavků kladených na konkrétní výstřik. Tlak před čelem šneku může dosahovat hodnot až např. 2800 a více barů. I tento přepočítaný tlak může být zobrazován. [4]

3.3.3 Tlak v dutinně formy

Je nižší než tlak před čelem šneku a poplatný členitosti a složitosti tvarů výstřiku, délce toku taveniny v tvarové dutině, rozvodném systému taveniny, teplotě taveniny a formy atp., je snížena o hydraulické odpory působící při plnění tvarové dutiny formy. Tlak v dutině formy je i místně rozdílný, na začátku toku (u vtokového ústí) je největší a se vzdáleností od ústí vtoku taveniny klesá. V závislosti na zvolených parametrech a vstřikovaném tlaku materiálu se jeho hodnota pohybuje v rozmezí cca 200 až 900 barů. Střední hodnota je cca 500 barů. Na tyto hodnoty tlaků musí být dimenzována forma i uzavírací síla vstřikovacího stroje.

Vztah mezi typy tlaků při vstřikování zobrazuje obr. 10. [4]



$$\frac{D^2}{d^2} \cdot p_{\text{dotlak}} \leq p_{F \max} \leq \text{uzavírací síla vstřikovacího stroje / průmětná plocha v dělicí rovině}$$

Průměr šneku:

- $A = 40 \text{ mm}$, $p_v = 2678 \text{ bar}$
- $B = 45 \text{ mm}$, $p_v = 2116 \text{ bar}$
- $C = 50 \text{ mm}$, $p_v = 1714 \text{ bar}$

p_H – systémový hydraulický tlak, p_z – zpětný odpor, p_v – vstřikovací tlak, p_F – tlak v dutině formy

Obr. 10. Vztahy mezi typy tlaků při vstřikování [4]

3.3.4 Plastikační jednotka

Jedním z hlavních úkolů plastikační jednotky vstřikovacího stroje je příprava homogenní taveniny s minimálním obsah uzavřeného vzduchu – vzduchových bublin

K tomu slouží šneková plastikace. Pro zpracování prakticky všech na trhu vstřikovaných materiálů (kromě PVC) se používají tzv. univerzální šneky charakterizované poměrem délky ku průměru (obvyklý poměr se pohybuje v rozmezí od cca 1 : 16, do 1 : 25, nejčastěji 1 : 20 až 22) a kompresním poměrem, tj. objem závitů šneku u jeho špičky ku jednomu závitů pod násypkou. Typická hodnota kompresního poměru je 1 : 2. Samozřejmě jsou šneky a komory v úpravě pro zpracování plněných, vyztužených materiálů – odolnost proti abrazi.

S ohledem na korektní formu, resp. výstřik z předepsaného materiálu je důležité určit maximální přípustnou kapacitu vstřikovací jednotky přiřazené k uzavírací jednotce vstřikovacího stroje. Výrobci strojů obvykle nabízejí minimálně tři varianty plastikační jednotky s ohledem na jejich maximální plastikační kapacitu k jednomu typu uzávěru. Zde je nutné si uvědomit, že se zvětšující kapacitou (větší průměr šneku) klesá maximální vstřikovací tlak před čelem šneku.

Při určování správné velikosti plastikační jednotky je vždy nutné vzít v úvahu:

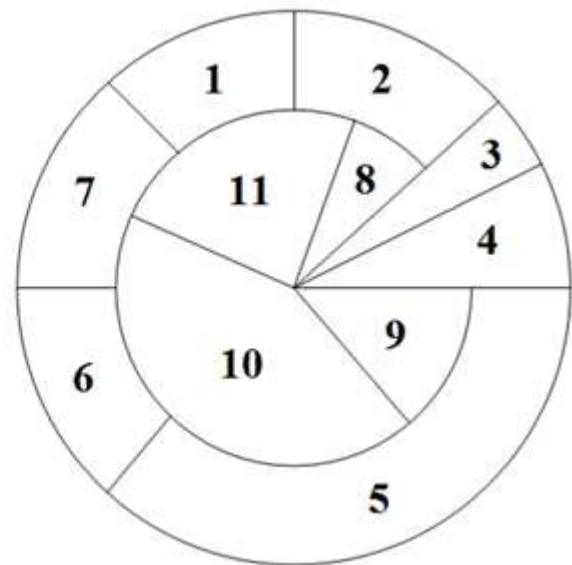
- Velikost zpracovávané dávky by se měla optimálně pohybovat v rozmezí 1 až 3 průměry šneku, přípustné jsou až 4 průměry šneku
- Dávka v rozmezí pod jedním průměrem šneku a nad čtyřmi průměry šneku může při vstřikování vyvolat problémy s ohledem na špatně termicky připravenou taveninu s velkým obsahem vzduchových bublin
- Dávka maximálně jednoho průměru šneku má být vyhrazena dekompresí (po a před plastikací) a polštáři
- Zdvih šneku při vstřikování by tedy neměl překročit pět jeho průměrů
- Zpracovávaný materiál, resp. jeho termickou stabilitu, kdy doba setrvání v plastikační komoře, včetně objemu případného horkého rozvodu nesmí překročit výrobcem stanovenou dobu. Nad touto dobou dochází již k teplotnímu rozkladu vstřikovaného materiálu. Obecně náchylnější k tepelné degradaci (požadavek na krátkou dobu setrvání na zpracovatelné teplotě) jsou materiály s vyšší teplotní odolností (např. PPS, PEI, PSU apod.), materiály s retardéry hoření a PVC
- Doba cyklu, velikost dávky (včetně objemu taveniny v horkém rozvodu) a výrobcem granulátu doporučená doba maximálního setrvání taveniny na zpracovatelské teplotě určuje maximální přípustný objem plastikační jednotky. [4]

Cyklus formy:

1. Příprava formy
2. Uzavření a přidržení formy
3. Vstříknutí
4. Dotlak
5. Chlazení
6. Otevření formy
7. Vyprázdnění formy

Cyklus jednotky:

8. Přisun plastikační jednotky
3. Vstříknutí
4. Dotlak
9. Odsunutí plastikační jednotky
10. Plastikace
11. Prodleva



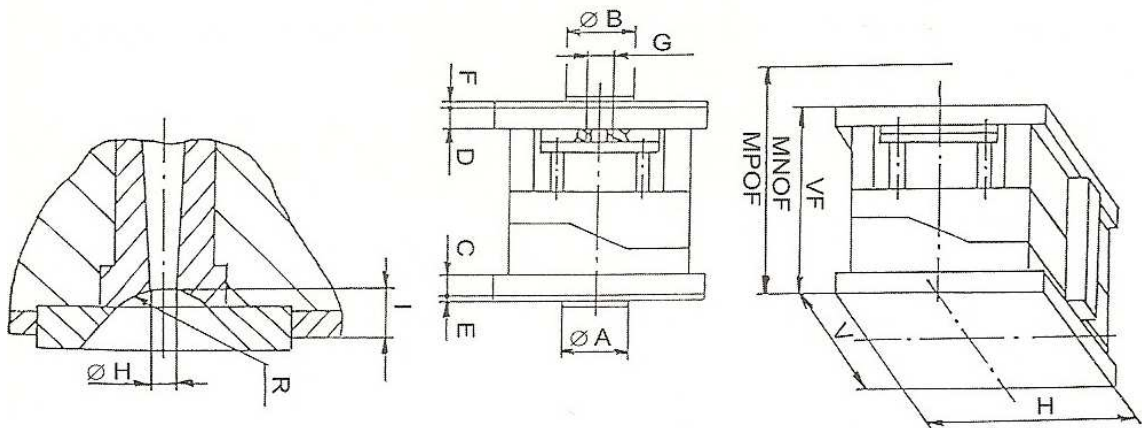
Obr. 11. Vstřikovací cyklus

3.4 Vstřikovací forma

Stejně jako výstřiky z termoplastů konstruované pro splnění požadovaných funkčních a jakostních ukazatelů jsou z pohledu těchto ukazatelů individuálními konstrukcemi, jsou i formy pro jejich výrobu individualitami a originály. Proto bychom před jejich převzetím pro vlastní výrobu výstřiků a jejich optimalizaci měli mít ke každé formě základní konstrukční a výrobní data. [4]

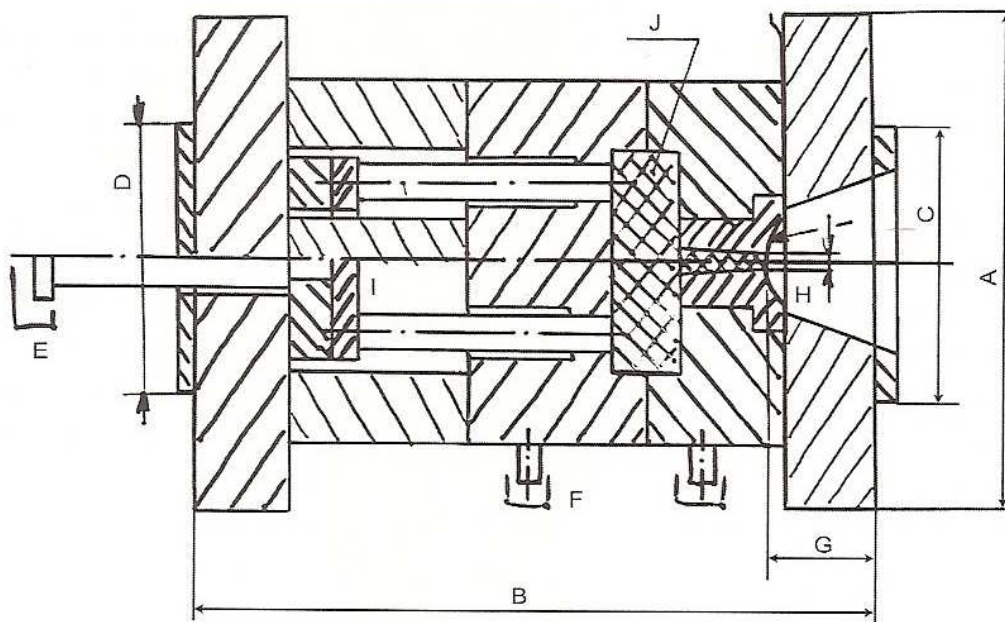
3.4.1 Parametry formy

Podle údajů přiložených k formě se provede identifikace vstřikovací formy – číslo zakázky, číslo formy, označení, poslední výstřik na formě atd. v případě, že se jedná o, pro vstřikovnu novou formu nebo má dojít k nasazení formy na jiný stroj než původně použitý, ověří se vhodnost přiřazení – forma x vstřikovací stroj obr 12.



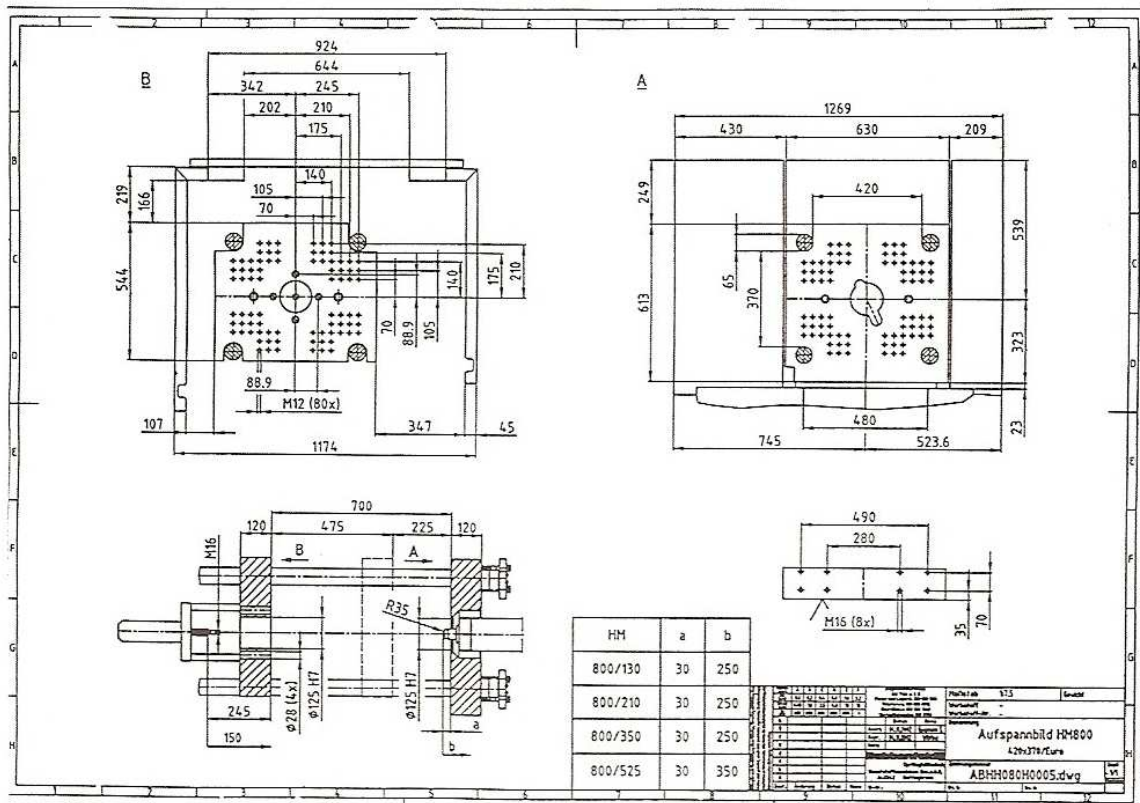
Obr. 12. Rozměry formy [4]

- A. Obvodové rozměry formy, $H \times V$ (horizontálně c vertikálně) – průchod mezi sloupky uzávěru vstřikovacího stroje obr. 13 a obr. 14, způsob fixace formy na upínací desky vstřikovacího stroje: upínky s podložkami a šrouby, upínací otvory pro šrouby v deskách formy – souřadnice upínacích otvorů nebo T drážek na upínacích deskách stroje, hydraulické upínky na uzávěru stroje, bajonetové upínače forem přes jejich centrovací kroužky, magnetické upínací desky – čidlo magnetizace musí být na styku kov formy – kov upínací desky stroje a ne kov desky stroje – prázdná prostor v desce formy.



Obr. 13. Důležité rozměry formy pro její upnutí do stroje [4]

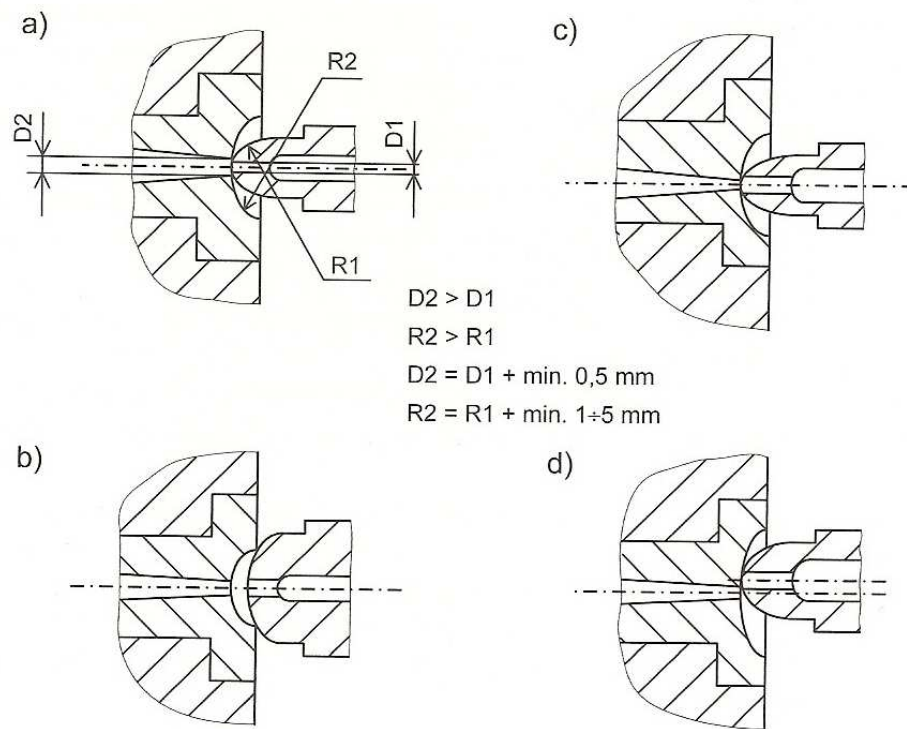
- B. Výška formy VF – minimální a maximální rozměr pro upnutí formy na vstřikovací stroj (obr. 13 a obr. 14), k tomuto porovnání přistupuje i zhodnocení možnosti maximálního otevření uzávěru stroje ve vztahu k rozměrům výstřiku (hloubka) ve směru jeho vyhazování – plochý výstřik = menší otevření formy pro vyhození z formy bez možného poškození dílu, hluboký výstřik = nutnost velkého otevření při velké výšce formy – velký vyhazovací zdvih.



Obr. 14. Upínací rozměry vstřikovacího stroje [4]

- C. Centrovací kroužek na pevné části formy, $\varnothing C$ – středící a upínací otvor v pevné upínací desce vstřikovacího stroje – z hlediska upínání formy velmi důležitá část formy, bez které nelze formu správně na stroj upnout, tolerance uložení musí být – $\varnothing Ch8/\varnothing$ otvoru v desce stroje H7, oba středící povrchy bez poškození – vrypy, ohnuté hrany atd., středění osy formy na osu vstřikovacího stroje.
- D. Centrovací kroužek na pohyblivé části formy $\varnothing D$ – otvor v pohyblivé upínací desce vstřikovacího stroje, tolerance centrovacího průměru $\varnothing D$ má být ca minus 0,2 mm, aby bylo umožněno správné sesouhlasení osy formy a vstřikovacího stroje.
- E. Propojení vyhazovacího systému formy se systémem vstřikovacího stroje - individuálně podle konkrétního provedení formy.

- F. Vstupy – výstupy médií – temperanční kapalina, vzduch, hydraulický olej, elektrická energie atp. – na formě ve vztahu ke vstřikovacímu stroji, resp. vybavení konkrétního vstřikovny individuálně.
- G. Ponoření trysky plastikací jednotky vstřikovacího stroje do formy, je možné řešit pomocí výměnných trysek stroje o různých délkách – přizpůsobení se dané formě. Může však vzniknout problém, zejména při použití delší trysky a při vstřikování PA, se zamrzáním výstupního otvoru trysky (topení trysky o malém příkonu, max. cca 200 až 330W je daleko od ústí trysky), jsou k dispozici trysky s teplosměnnými trubicemi, s vložkami z teplotně vodivých materiálů apod.
- H. Uzel styku vtokové vložky vstřikovací formy a trysky plastikací jednotky vstřikovacího stroje. Obr. 15 ukazuje vznik možných problémů, obr. 15a – definice správných rozměrů dotykové koule vtokové vložky formy a dosedu trysky stroje, včetně rozměrů vstupního průměru vtokové vložky a výstupního průměru trysky stroje, v některých případech není použit dotyk kulových ploch, které jsou nejvhodnější, protože umožňují určité najetí vstřikovací jednotky na formu oproti styku čelnímu, kdy je nutná dobrá souosost vstřikovací jednotky a formy. Ve všech případech je nutné zajistit, aby ob stykové plochy byly bez vrypů a drážek, kterými by mohla unikat tavenina. Obr. 15b ukazuje nesprávně zvolené radiusy stykových koulí a vznik problému, při kterém forma nebude pracovat v automatickém výrobním cyklu – v důsledku zatuhlé (sukénky) nepůjde vytáhnout vtokový kúl z vtokové vložky formy. Obr. 15c znázorňuje problém špatných vstupních a výstupních průměrů, kdy dojde i při správné funkci zpětného uzávěru šneku k nedefinovanému objemovému naplnění formy v důsledku úniku taveniny na styku forma – stroj. Obr. 15d ukazuje další z negativních důsledků špatného seřízení dosedu forma – stroj, tentokrát z důvodu nesouososti osy formy a osy vstřikovací jednotky.



Obr. 15. Spojení vstřikovacího stroje a formy (možné problémy) [4]

- I. Tuhost formy, zejména v prostoru podepření tvarové a kotevní desky tvarů mezi vyhazovači v pohyblivé části formy a ukotvení závěrečných klínů čelistí v obou částech formy – pohyblivé i pevné – protože u jednonásobných forem jednoznačně, u vícenásobných forem obvykle je největší tlak taveniny při plnění dutiny nebo dutin formy soustředěn v blízkosti osy formy, měly by i zde být rozpěrky zabraňující průhybu desek formy a možné tvorbě přetoků v dělící rovině formy. Bohužel velmi často jsou rozpěrky umístěny pouze po obvodu formy, což má za následek zmenšení technologického okna zpracovatelských parametrů – zejména vstřikovacího tlaku, rychlosti a dotlaku. Nesprávné uchycení a zakotvení závěrečných klínů, resp. jejich malá dimenze – tuhost opět mohou vést k přetokům. Nepřípustné je pouhé přišroubování závěrečných klínů na obvod desky formy, tyto musí být vždy zapuštěny do desky formy.
- J. Objem tvarové dutiny, dutiny formy, včetně vtokového rozvodu a velikosti platičnické jednotky vstřikovací formy – viz. kap.3.3.4.

Přestože forma po skončení předešlé výrobní dávky musí být uložena do skladu forem v plně provozuschopném stavu po provedení předepsané údržby nebo její opravy, je nutné před nasazením na stroj provést vizuální prohlídku zaměřenou zejména na kompletnost formy (přípravky, zařízení, propojovací hadice, rychlo-

spojky operačních okruhů, přívody a vývody topení horkých rozvodů, čidla teploty a tlaku, koncové spínače, propojení obou částí formy při transportu). Přípravenost formy dokumentuje i poslední shodný výstřik u ní přiložený. [4]

3.5 Periferní zařízení

Technologie vstřikování plastů je jednou z technologií, u kterých je nutné, kromě základních zařízení, jako jsou vstřikovací stroje a formy, používat celou řadu tzv. periferní zařízení. Tato zařízení jsou nutná z pohledu vlastní technologie – zařízení pro sušení navlhavých materiálů, zařízení pro chlazení nebo temperaci forem na předepsanou procesní teplotu, nebo slouží k plné či částečné automatizaci výrobního procesu.

Každý výstřik vyžaduje s ohledem na individuální požadavky na něj kladené – dohoda mezi výrobcem a odběratelem – samostatný přístup a tím i použití příslušných periferních zařízení.

Do souboru technologických periferních zařízení patří:

- Zařízení pro sušení granulátu
- Temperanční zařízení vstřikovacích forem
- Zařízení pro dávkování aditiv, nejčastěji barevných koncentrátů
- Separátory kovových částic při dávkování drtě do originálního materiálu nebo při práci s drtí
- Zařízení pro dopravu granulátu
- Roboty pro manipulaci s výstřiky při jejich vyjímání z formy a případných následujících výrobních operací
- Manipulátory pro odstraňování vtokových zbytků z výstřiku
- Dopravníky a další zařízení pro manipulaci s výstřiky po jejich vyhození z formy, která mohou sloužit i jako dochlazovací pole pro výstřiky
- Mlýny, nejčastěji nožové, pro přípravu drtě vracející se do technologického procesu
- Kontrolní zařízení, která jsou zařazena do výrobního procesu, např. kontrolní váhy, hodnocení dvojlomu, měření teplot, tlaků a rozměrů. [4]

4 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce je navrhnout vstřikovaný stěnový konstrukční prvek z vyztuženého plastu (poklop šachty kanalizační sítě).

Prvotní návrhy geometrie budou navrženy v parametrickém 2D skořepinovém tvaru v softwaru SolidWorks/Cosmos tools. Tloušťka stěn FEM modelu bude definována parametricky. Na základě výsledků pro různé tloušťky základní desky a žeber budou sestaveny závislosti sledovaných veličin (napětí, deformace, objem), podle kterých se vyhodnotí nejvhodnější návrh geometrie.

Vybrané varianty geometrie z 2D analýz budou podkladem pro tvorbu 3D modelů a analýz ve 3D tvaru v softwaru Catia V5R18.

Navržená geometrie poklopu vychází z komerčního stěnového prvku, který v praxi podléhá zkoušce dle normy ČSN EN 124. Zkouška předepisuje přesný postup zatížení, předepsané zatížení a limitní hodnoty. Na základě výsledků analýz bude vybrána nejvhodnější varianta splňující požadavky normy.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 NORMA ČSN EN 124

Navržený poklop se bude zkoušet podle normy ČSN EN 124, která předepisuje přesný postup zkoušení, předepsané zatížení a limitní hodnoty.

Norma platí pro poklopy a vtokové mříže určené pro zakrytí otvorů se světlým rozměrem do 1000 mm umístěné v dopravních plochách.

Obsah normy:

- názvosloví,
- třídění,
- materiály,
- konstrukční zásady,
- zkoušení,
- označování a řízení jakosti poklopů a vtokových mříží.

5.1 Názvosloví

Seznam vybraných definic pojmů uvedených v normě.

Tab. 3. Seznam definic

č.	Termín	Definice
1	Dešťová vpust'	Objekt sloužící k odvádění povrchové vody do stokové sítě
2	Šachta	Objekt sloužící pro přístup do podzemní sítě
3	Vtoková mříž	Horní část dešťové vpusti uložená na tělese vpusti, skládající se z rámu a mříže a/nebo víka
4	Poklop	Horní uzávěr šachty nebo jiného objektu složený z rámu a víka a/nebo mříže
5	Rám	Pevně usazená část vtokové mříže nebo poklopu spojená s mříží nebo s víkem, sloužící k jeho uložení
6	Mříž	Otevíratelná nebo vyjímatelná část vtokové mříže umožňující vtok povrchové vody
7	Víko	Otevíratelná nebo vyjímatelná část poklopu nebo vtokové mříže zakrývající otvor šachty nebo dešťové vpusti
8	Větrací otvory	Otvory ve víku nebo poklopu, které slouží k větrání
9	dosedací plochy	Plochy, na nichž je v rámu uložena mříž nebo víko
10	Uložení rámu	Dosedací plocha spodní části rámu
11	Zkušební zatížení	Zatížení působící na poklop nebo vtokovou mříž při zkoušení

5.2 Zkoušení

Poklopy a vtokové mříže se zkoušejí sestavené v celek tak, jak budou používány. Víka s výplní, která se budou dopravovat nevyplněná, musí být podrobena zkoušce bez výplně.

5.2.1 Zkušební zatížení

Pro poklopy a vtokové mříže se světlym rozměrem (SR) větším nebo rovným 250 mm je v tabulce 4 uvedeno zkušební zatížení přiřazené jednotlivým třídám. Pokud je rozměr (SR) menší než 250 mm vypočítá se zkušební zatížení vynásobením hodnoty v tabulce a zlomkem SR/250.

Tab. 4. Zkušební zatížení

Třída	Zkušební zatížení [kN]
A 15	15
B 125	125
C 250	250
D 400	400
E 600	600
F 900	900

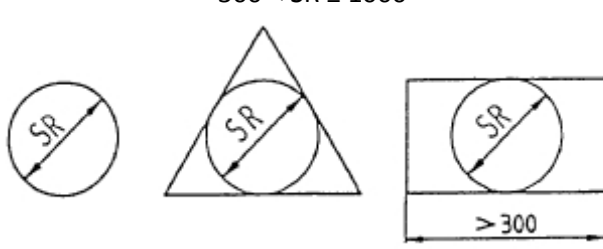
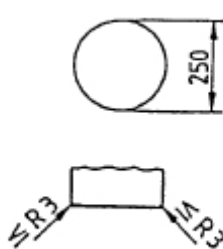
5.2.2 Zkušební stroj

Zkušební stroj (hydraulický lis) musí být konstruován tak, aby byl schopen vyvinout pro třídy A 15 až D 400 nejméně o 25% větší a pro třídy E 600 a F 900 nejméně o 10% větší, než je odpovídající zkušební zatížení. Tolerance zatížení musí být v rozsahu $\pm 3\%$.

5.2.3 Zkušební nástroj

Rozměry a tvar zkušební nástroje pro navrhovaný případ jsou uvedeny v tabulce 5.

Tab. 5. Rozměry zkušební nástroje

Tvar a rozměr poklopů a vtokových mříží [mm]	Rozměry zkušební nástroje [mm]
<p>300 < SR ≤ 1000</p> 	

5.2.4 Příprava zkoušky

Zkušební nástroj se umístí na zkušební dílec tak, aby jeho osa byla kolmá na podstavu celku a aby procházela geometrickým středem víka nebo mříže. U vík nebo mříží ze dvou kusů musí být zkušební nástroj umístěn do geometrického středu.

Zkušební zatížení musí být rovnoměrně rozloženo na celou plochu zkušebního nástroje a případné nerovnosti jsou vyrovnány vložením mezivrstvy např. měkkého dřeva, dřevovláknité desky, plsti nebo obdobného materiálů mezi víko nebo mříž a zkušební nástroj. Rozměry mezivrstvy nesmí být větší než rozměry zkušebního nástroje.

Při zkoušení poklopů nebo vtokových mříží s nerovným povrchem se kontaktní plocha zkušebního nástroje vytvaruje tak, aby byla přizpůsobena tvaru víka nebo mříže. Kontaktní plocha nemusí být přizpůsobena jemnému protiskluzovému tvarování povrchu.

5.2.5 Metoda zkoušení

Všechny poklopy a vtokové mříže se ověřují následujícími zkouškami:

- Měření trvalého přetvoření víka nebo mříže za použití 2/3 zkušebního zatížení,
- Měření při plném zkušebním zatížení.

Měření trvalého přetvoření víka nebo mříže při použití 2/3 zkušebního zatížení. Dříve než začne zatěžování, je třeba v geometrickém středu víka nebo mříže vynulovat měřicí přístroj.

Zatížení se plynule zvyšuje při rychlosti zatěžování od $1 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ do $5 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ až do 2/3 zkušebního zatížení, potom je zatěžování přerušeno. Tento postup se provede 5 krát, pak následuje konečné měření v geometrickém středu.

Trvalé přetvoření se stanoví jako rozdíl hodnoty naměřené před prvním a po pátém zatěžovacím cyklu. Trvalé přetvoření nesmí překročit údaje v tabulce 6.

Měření při plném zkušebním zatížení. Bezprostředně v návaznosti na zkoušku trvalého přetvoření se zatížení zvyšuje stejnou rychlostí zatěžování, až do dosažení zkušebního zatížení. Následně se nechá zatížení působit 3_0^{+2} s.

Tab. 6. Mezní trvalé přetvoření

Třída	Mezní trvalé přetvoření [mm]	
A 15 a B 125	$\frac{SR^1)}{100}$	
C 250 až F 900	$\frac{SR^2)}{300}$	$\frac{SR^3)}{500}$
1) $\frac{SR}{50}$ pro $SR < 450$ mm 2) max. 1 mm pro $SR < 300$ mm 3) max. 1 mm pro $SR < 500$ mm		

6 LINEÁRNÍ 2D ANALÝZA

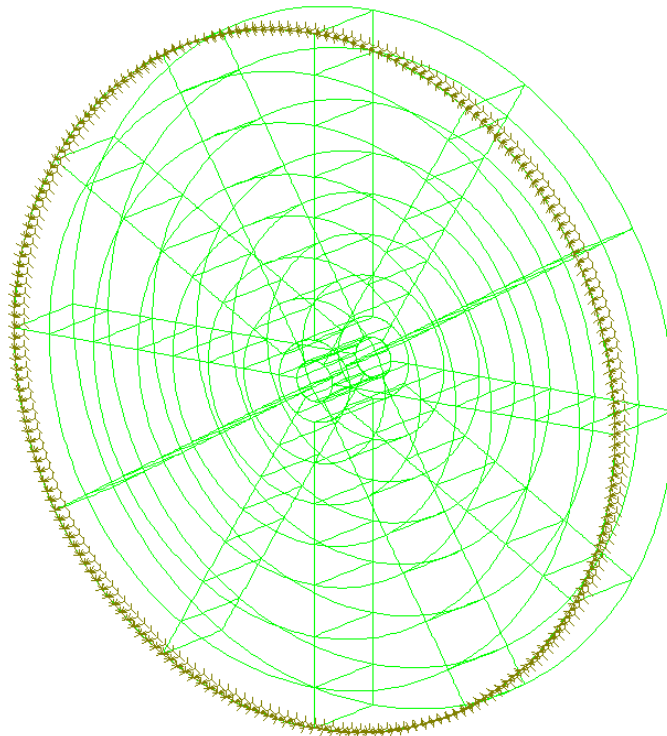
Pro prvotní návrhy geometrie byl zvolen software SolidWorks/Cosmos tools, kde proběhlo několik návrhů geometrie ve skořepinovém tvaru. Řešení bylo provedeno jako lineární analýza napětí a deformace, použitý model materiálu byl lineárně elastický. Cílem návrhů bylo zjistit vhodné uspořádání radiálních a obvodových žebér s co nejmenším možným objemem a deformací poklopu, obě podmínky musí zároveň vydržet předepsané zatížení normou při dodržení pevnostní podmínky.

6.1 Okrajové podmínky

Pro správně fungující FEM model je nutné zadání okrajových podmínek. Dvě hlavní podmínky jsou zatížení a uložení viz kapitola 6.1.1 a 6.1.2.

6.1.1 Uložení

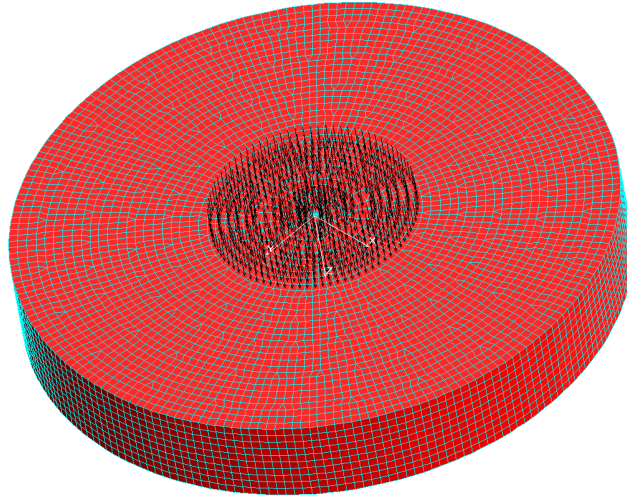
Uložení modelu se musí přiblížit reálným podmínkám, jaké panují v rámu pro poklop. Pro přiblížení ideálního stavu bylo nutné vložit nový souřadný systém v cylindrických souřadnicích viz. kapitola 6.1.5. První typ uložení zabraňuje potočení poklopu a druhý podepírá poklop proti směru zatížení.



Obr. 16. Uložení poklopu

6.1.2 Zatížení

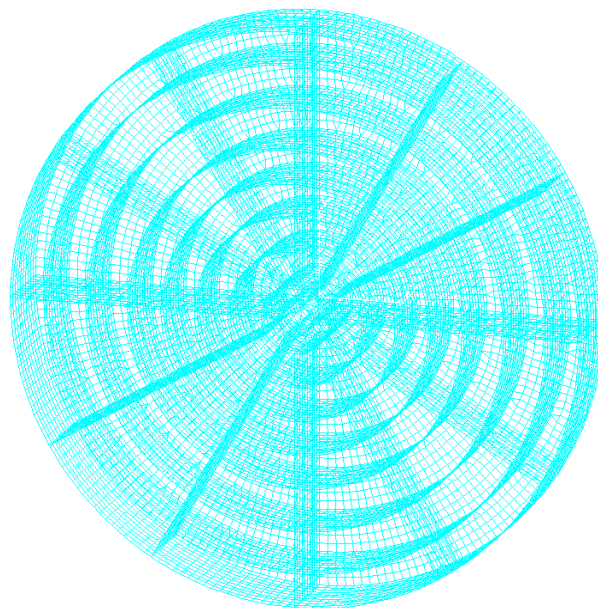
Poklop je navrhován pro třídu D400 v tab. 4 odečteme adekvátní zatížení pro danou třídu 400kN. Uvedené centrální zatížení bývá při praktické zkoušce vyvoláno trnem o průměru 250 mm.



Obr. 17. Zatížení poklopu

6.1.3 Síť

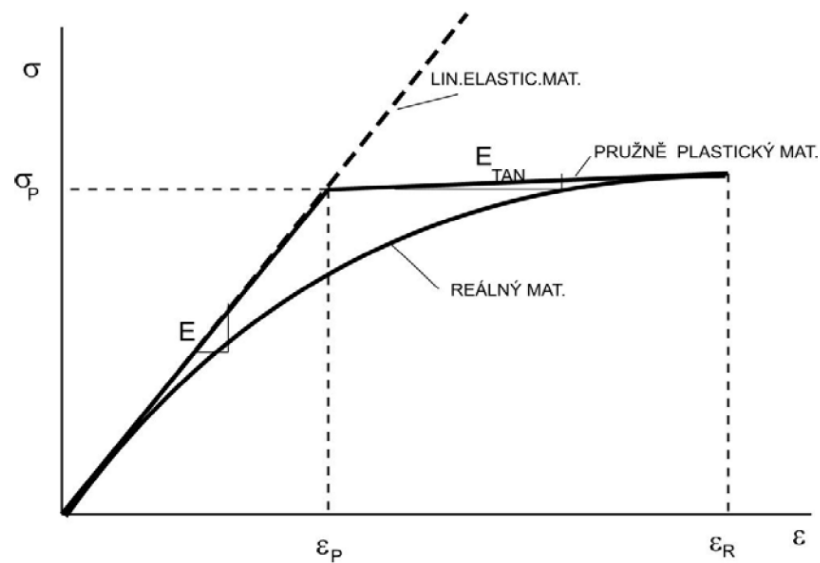
Konečně prvkovou síť na modelu tvoří elementy typu SHELL4 o délce hrany 10 mm. Tloušťka základní desky a žebek byla zadávána pomocí parametru RC. Základní deska měla parametr RC1, obvodová a radiální žebra parametr RC2.



Obr. 18. FEM síť

6.1.4 Materiálová charakteristika

Poklop bude vstříkovan z polypropylenu s obsahem sklených vláken. Chování materiálu při zkoušce tahem znázorňuje obr. 19, kde jsou vyneseny tři druhy chování materiálu – lineárně elastický materiál, pružně plastický materiál a reálný materiál. V ideálním případě, by bylo nejvhodnější, aby se analýza chovala, jako reálný materiál bez odchylek jako tomu je u lineární analýzy v našem případě. Materiálové hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.



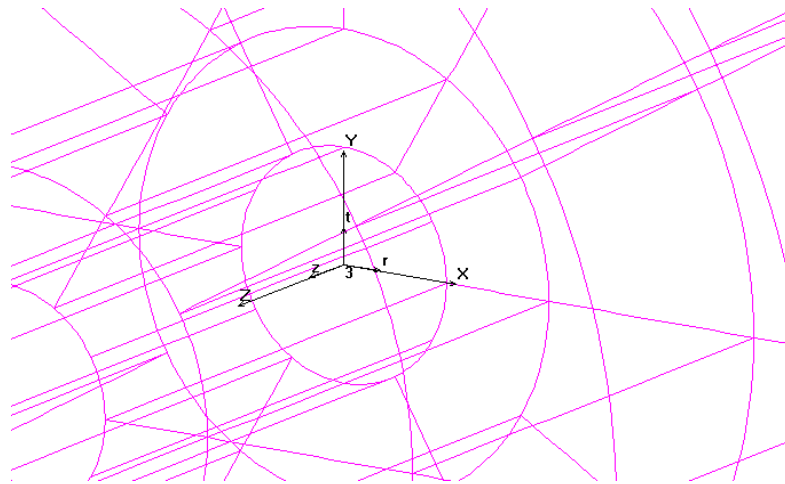
Obr. 19. Materiálové charakteristiky

Tab. 7. Materiálová charakteristiky

Výpočtová hodnota modulu pružnosti	$E = 10000 \text{ MPa}$
Poissonův poměr	$\nu = 0,35$
Výpočtová mez kluzu	$\sigma_p = 130 \text{ MPa}$
Tangenciální modul	$E_{tan} = 10 \text{ MPa}$
Relativní deformace na mezi kluzu	$\epsilon_p = 0,013 = 1,3\%$
Relativní deformace na mezi porušení	$\epsilon_R = 0,03 = 3\%$

6.1.5 Souřadný systém

Při vkládání uložení v kartézském systému (x, y, z) , docházelo k nereálnému chování při deformaci poklopu. Vložení nového souřadného systému v cylindrických souřadnicích (r, t, z) se napětí rozložilo po celém poklopu bez lokálních extrémů (napěťových špiček).



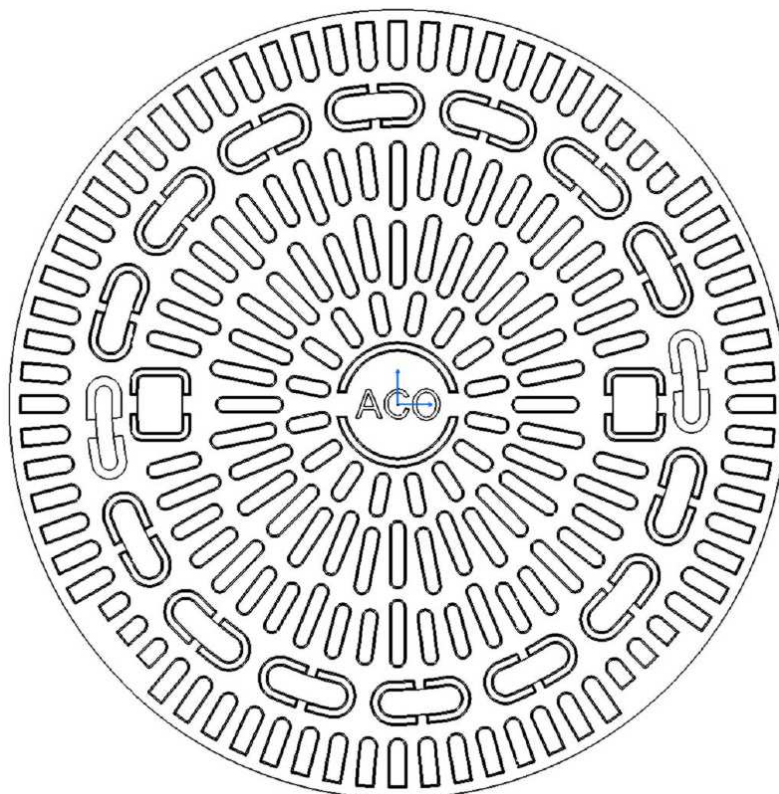
Obr. 20. Souřadný systém

6.2 Návrh geometrie

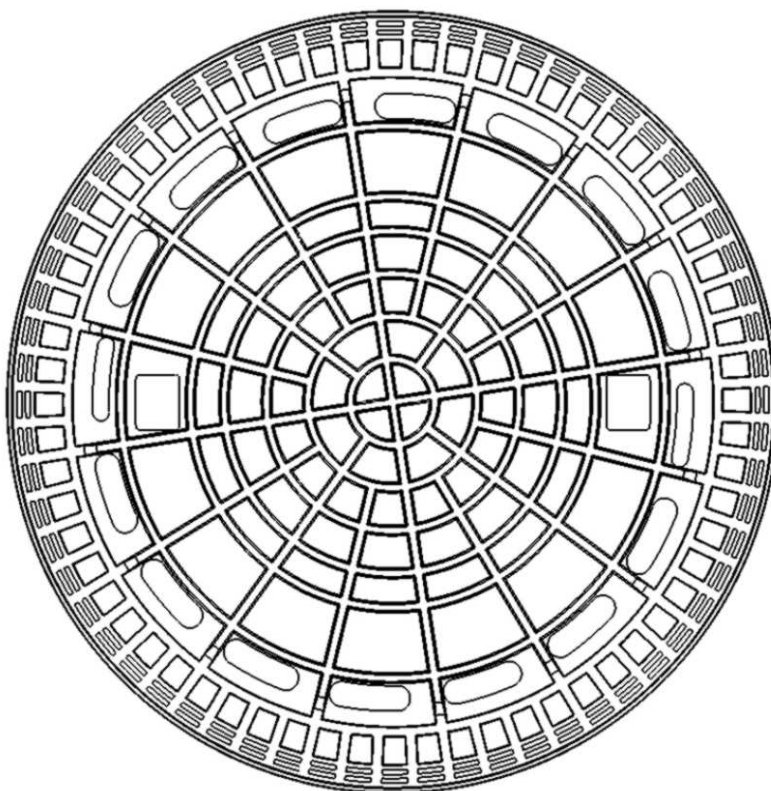
Návrh geometrie (obr. 21 a obr. 22) vychází z komerčního stěnového prvku firmy ACO s.r.o.. Kapitoly 6.2.1 až 6.2.7 ukazují volené varianty při prvotním parametrickém návrhu.

Obsah kapitol:

- Zakótované schéma poklopu
- Tabulka počítaných variant v softwaru SolidWorks/Cosmos tools
- Grafy jednotlivých závislostí

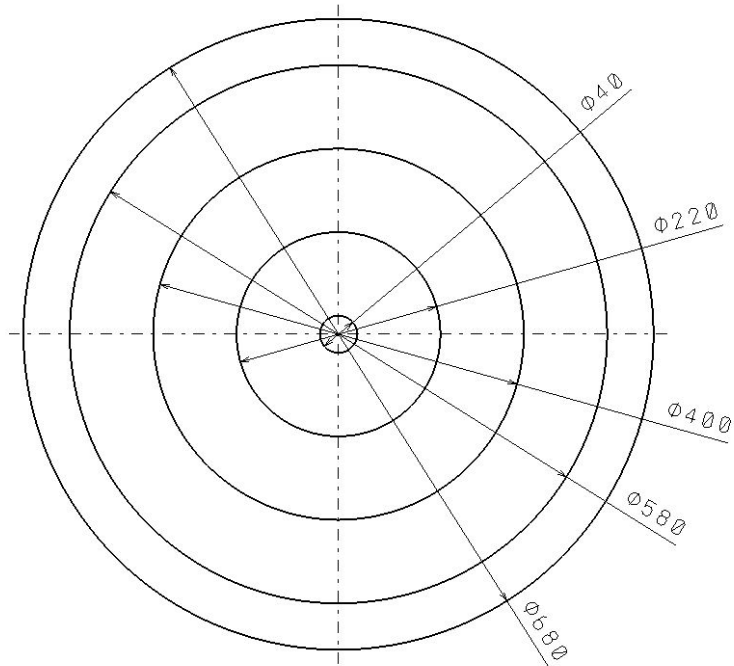


Obr. 21. Komerční poklop – horní pohled



Obr. 22. Komerční poklop – spodní pohled

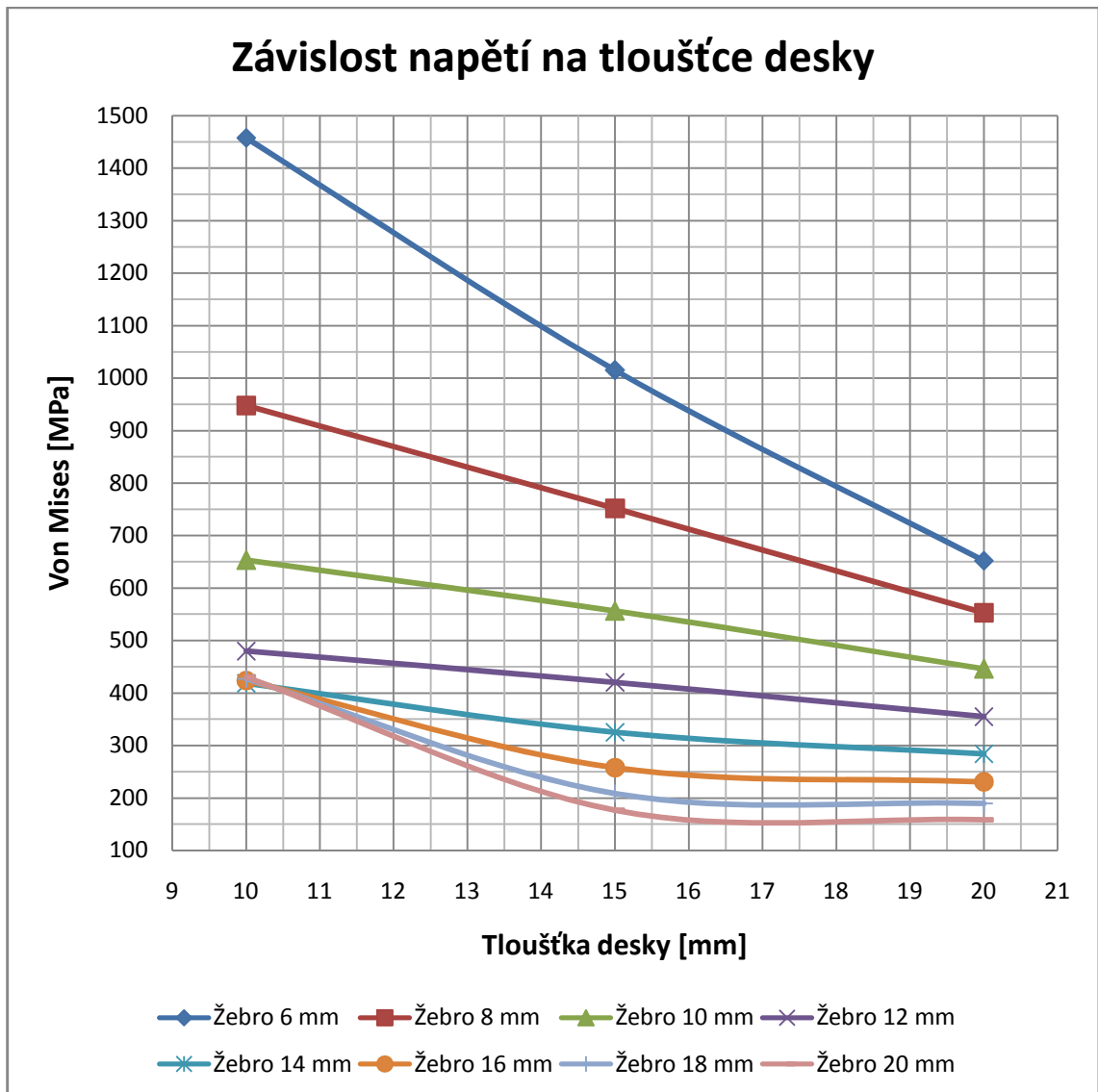
6.2.1 Geometrie č. 1



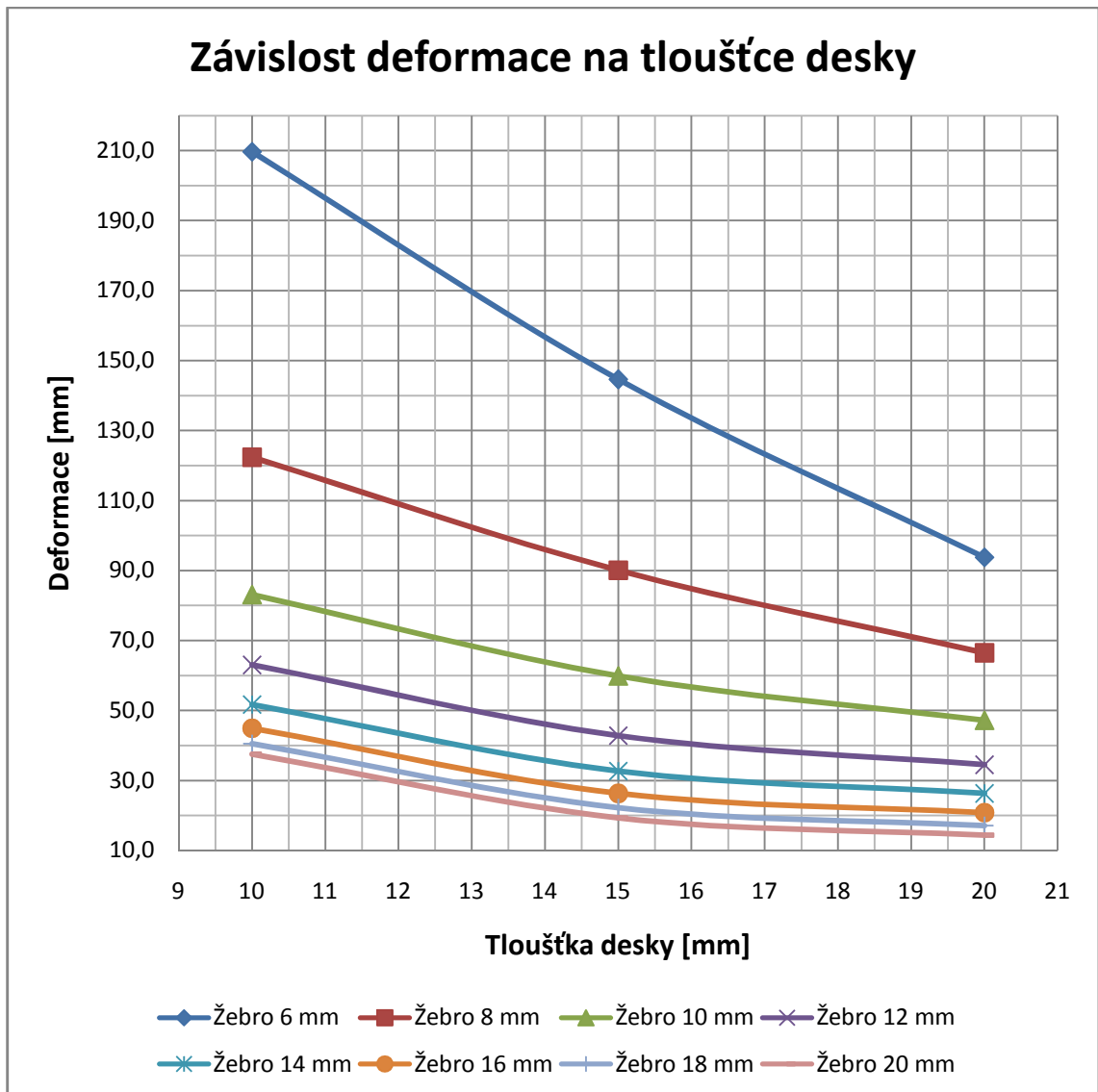
Obr. 23. Schéma geometrie č. 1 (výška žeber 80 mm)

Tab. 8. Hodnoty geometrie č. 1

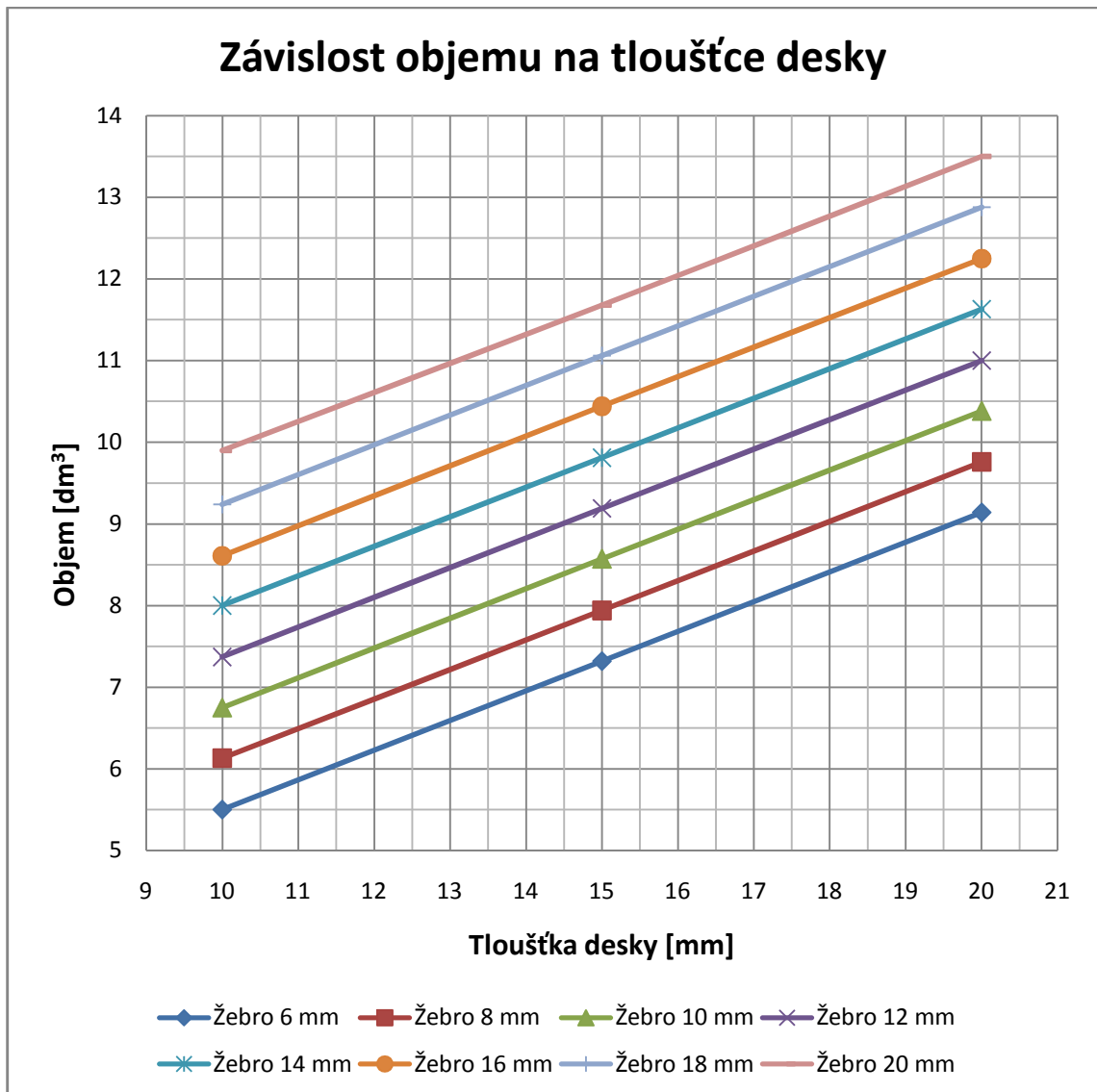
Tloušťka desky		Tloušťka žebra							
		6	8	10	12	14	16	18	20
10	Von Mises	1457,5	947,6	653,0	479,9	418,4	423,7	427,3	430,0
	Deformace	209,7	122,4	83,1	63,0	51,7	44,9	40,5	37,5
	Objem	5,50	6,13	6,75	7,37	8,00	8,61	9,24	9,90
15	Von Mises	1015,0	751,8	556,3	420,1	325,1	257,6	208,5	176,7
	Deformace	144,6	90,1	59,9	42,8	32,7	26,3	22,2	19,3
	Objem	7,32	7,94	8,57	9,19	9,81	10,44	11,06	11,68
20	Von Mises	652,2	553,0	445,7	354,9	284,3	230,6	189,6	158,2
	Deformace	93,8	66,5	47,2	34,5	26,3	20,8	17,1	14,4
	Objem	9,14	9,76	10,38	11,00	11,63	12,25	12,88	13,50



Graf 1. Závislost napětí na tloušťce desky č. 1

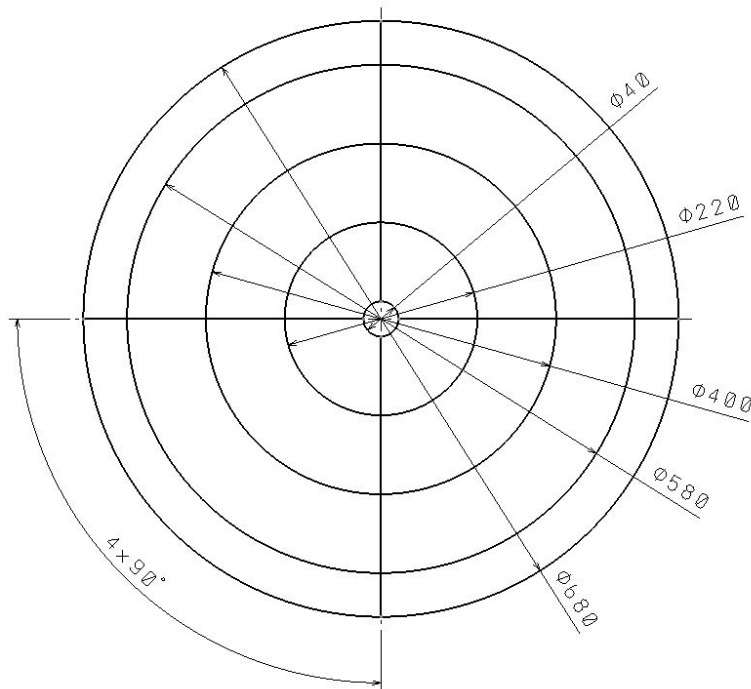


Graf 2. Závislost deformace na tloušťce desky č. 1



Graf 3. Závislost objemu na tloušťce desky č. 1

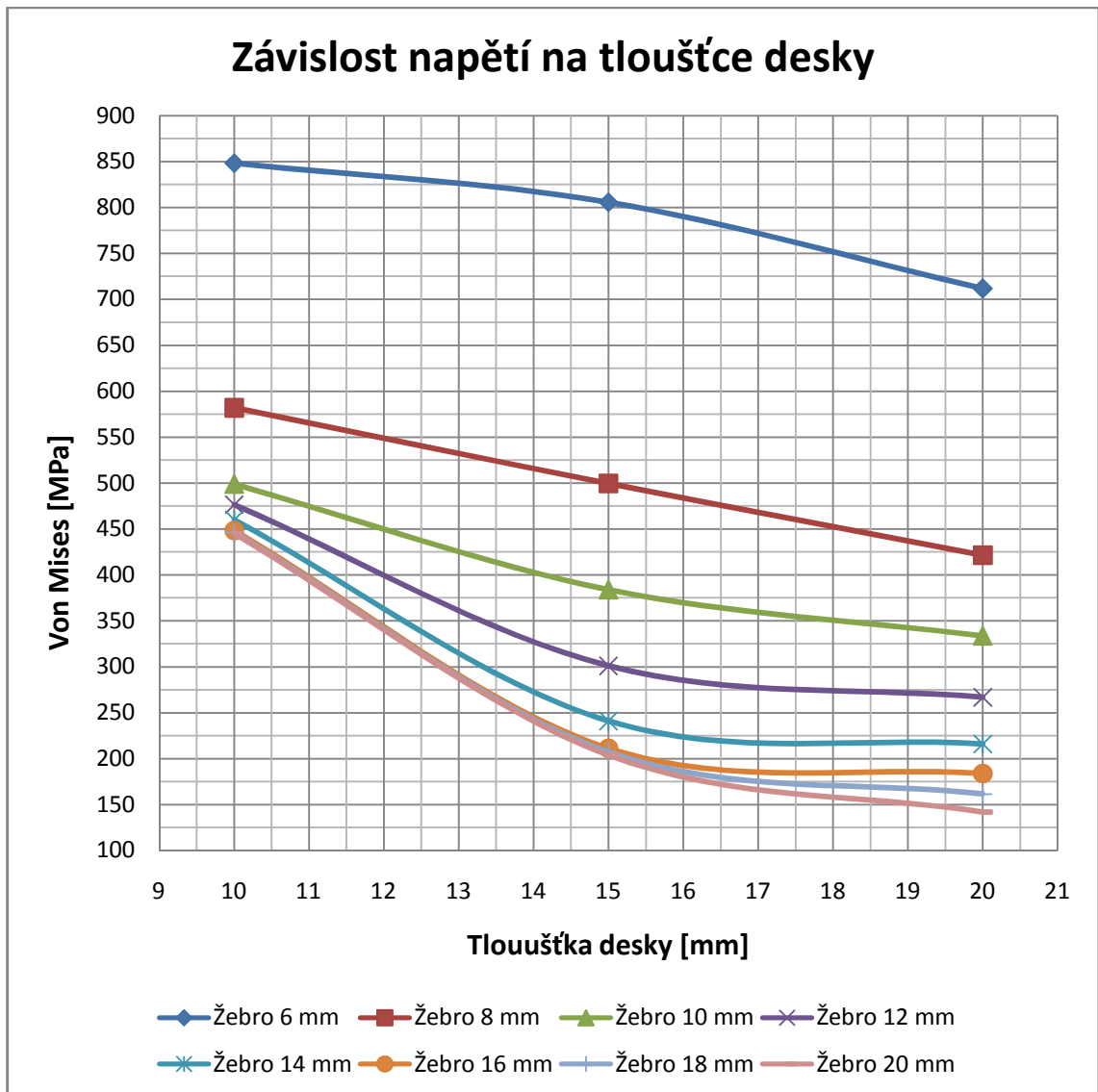
6.2.2 Geometrie č. 2



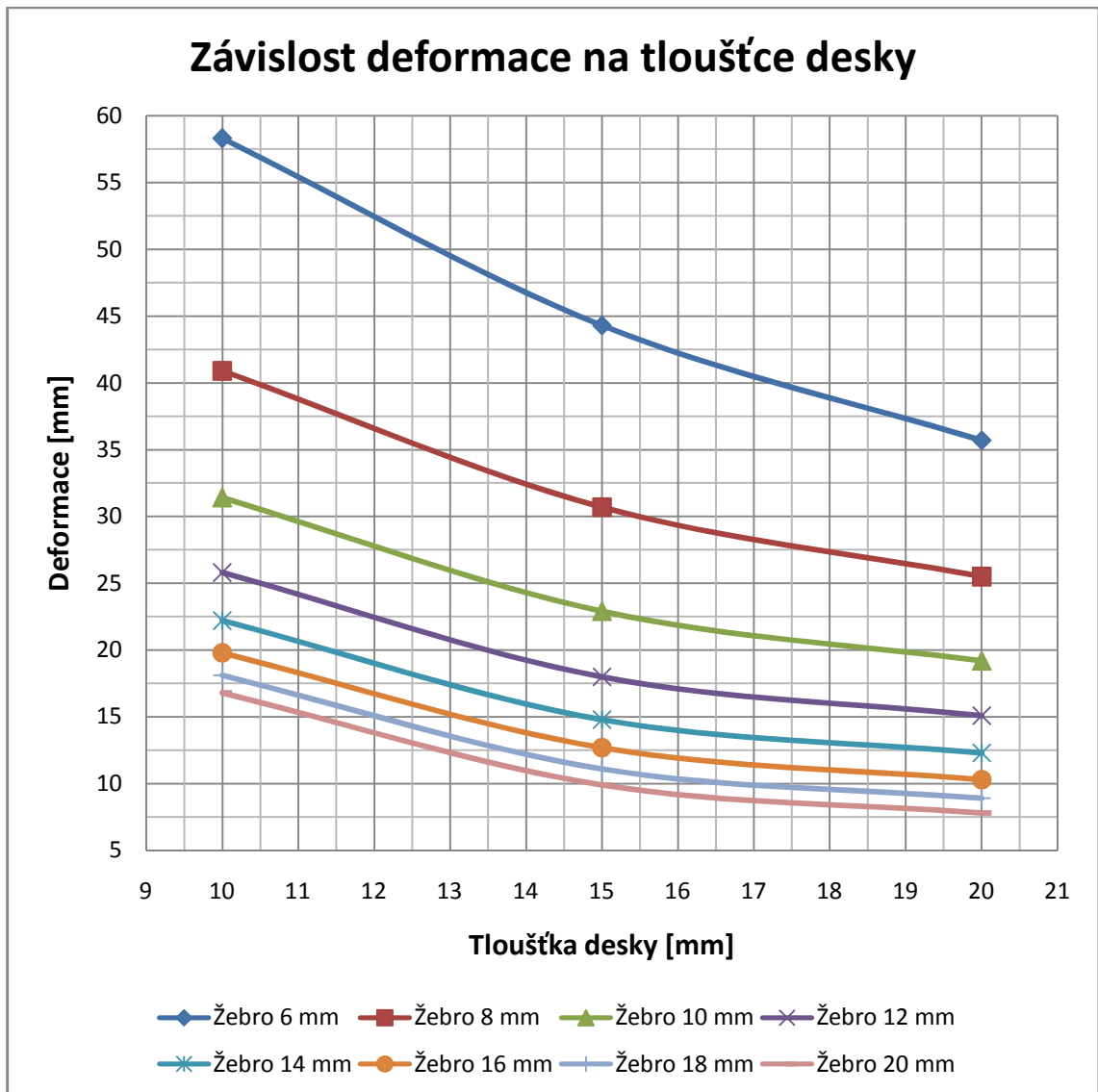
Obr. 24. Schéma geometrie č. 2 (výška žeber 80 mm)

Tab. 9. Hodnoty geometrie č. 2

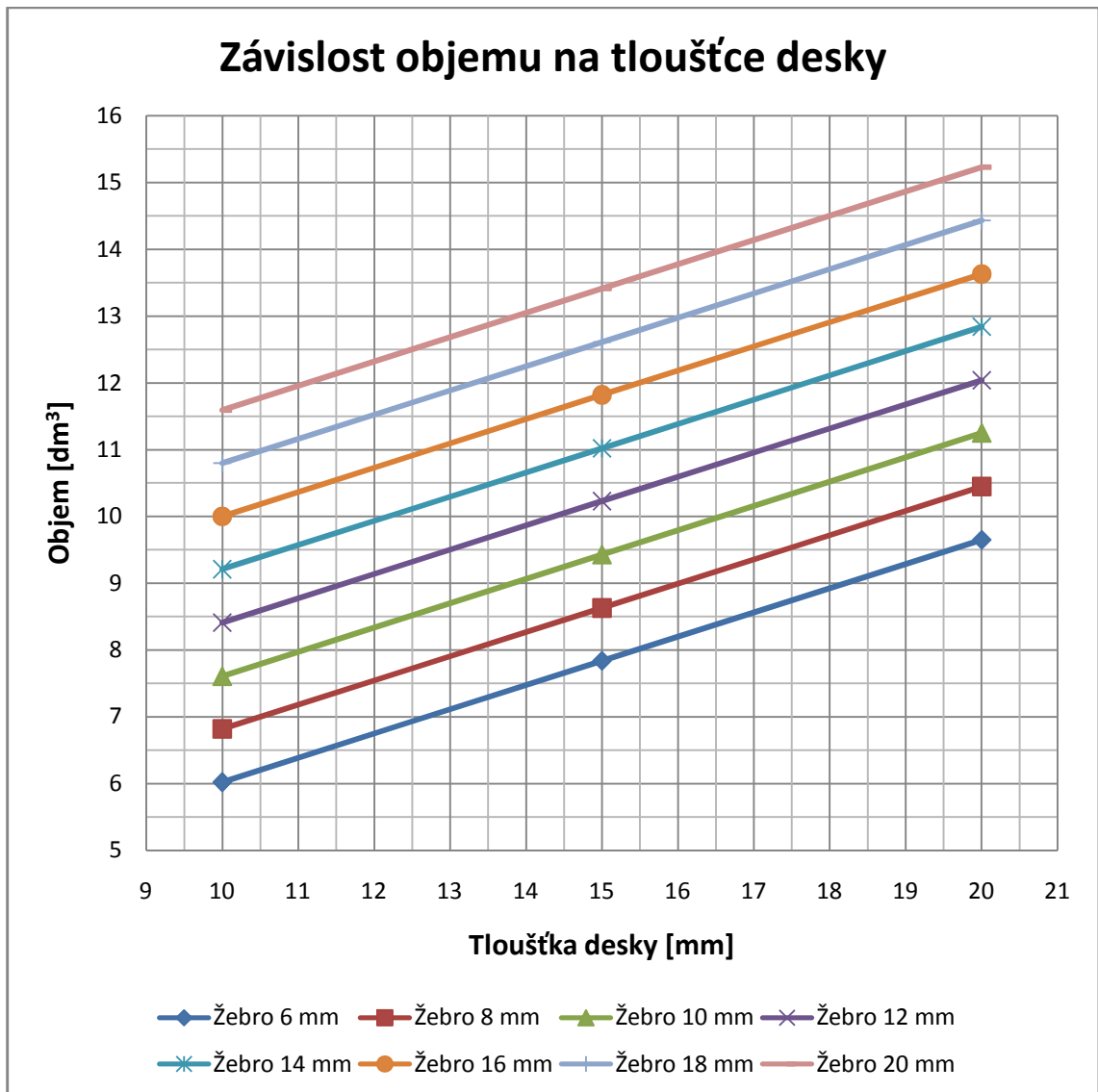
Tloušťka desky		Tloušťka žebra							
		6	8	10	12	14	16	18	20
10	Von Mises	848,2	581,9	498,8	476,5	459,9	448,2	446,1	445,3
	Deformace	58,3	40,9	31,4	25,8	22,2	19,8	18,1	16,8
	Objem	6,02	6,82	7,61	8,41	9,21	10	10,8	11,59
15	Von Mises	805,8	499,7	383,8	301,0	240,9	211,3	207,3	203,8
	Deformace	44,3	30,7	22,9	18,0	14,8	12,7	11,1	9,9
	Objem	7,84	8,63	9,43	10,23	11,02	11,82	12,61	13,41
20	Von Mises	711,7	421,5	333,5	266,8	216,0	183,7	161,4	141,9
	Deformace	35,7	25,5	19,2	15,1	12,3	10,3	8,9	7,8
	Objem	9,65	10,45	11,25	12,04	12,84	13,63	14,43	15,23



Graf 4. Závislost napětí na tloušťce desky č. 2

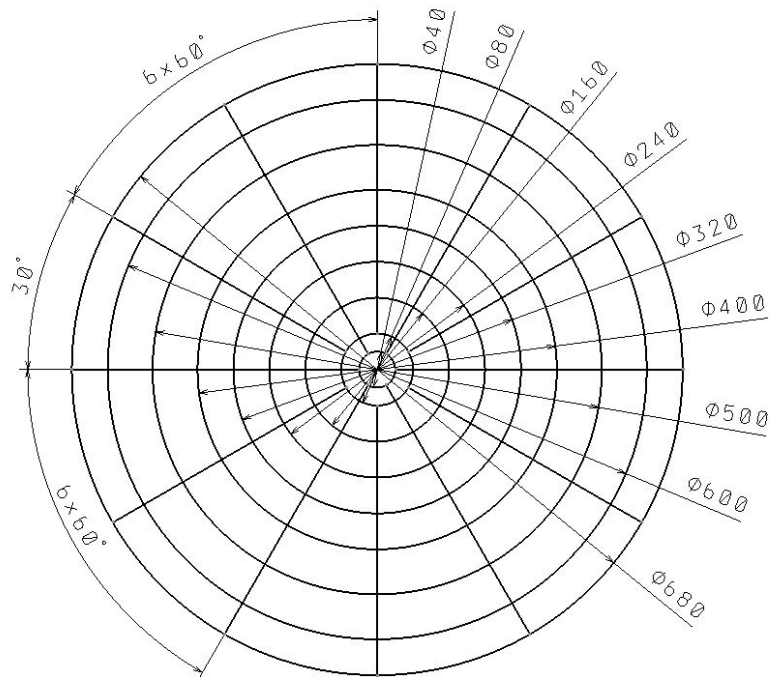


Graf 5. Závislost deformace na tloušťce desky č. 2



Graf 6. Závislost objemu na tloušťce desky č. 2

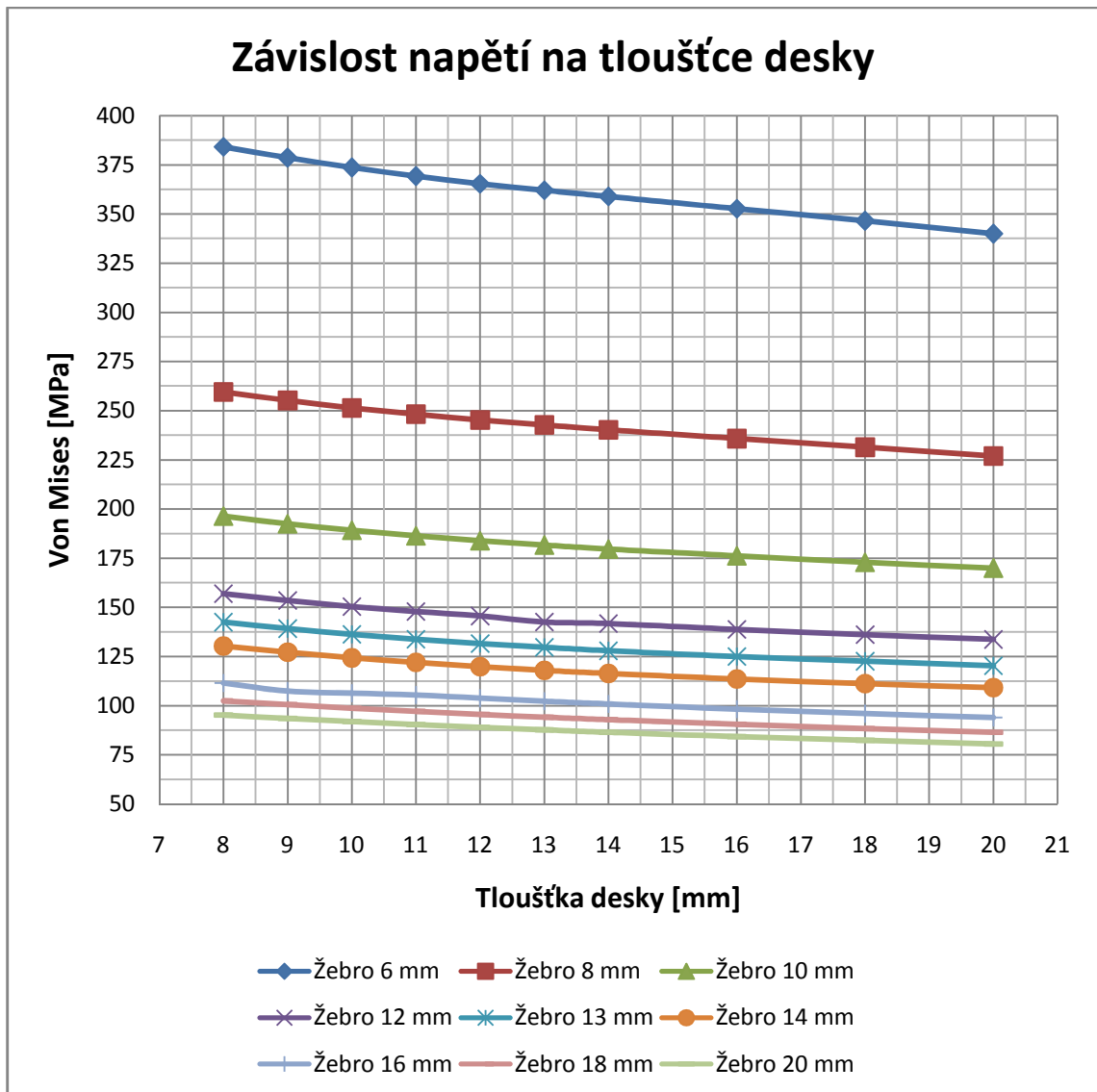
6.2.3 Geometrie č. 3



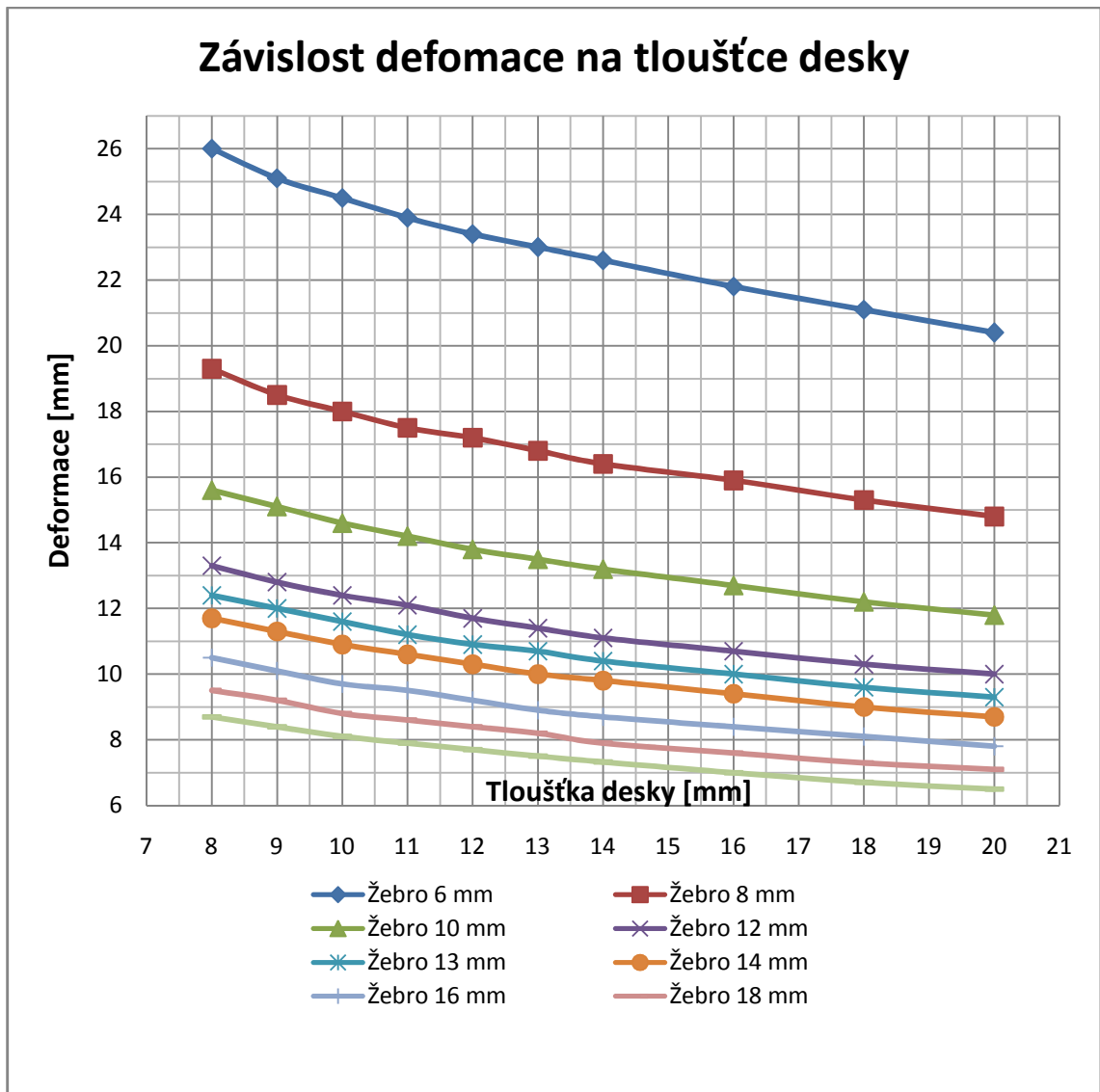
Obr. 25. Schéma geometrie č. 3 (výška žeber 80 mm)

Tab. 10. Hodnoty geometrie č. 3

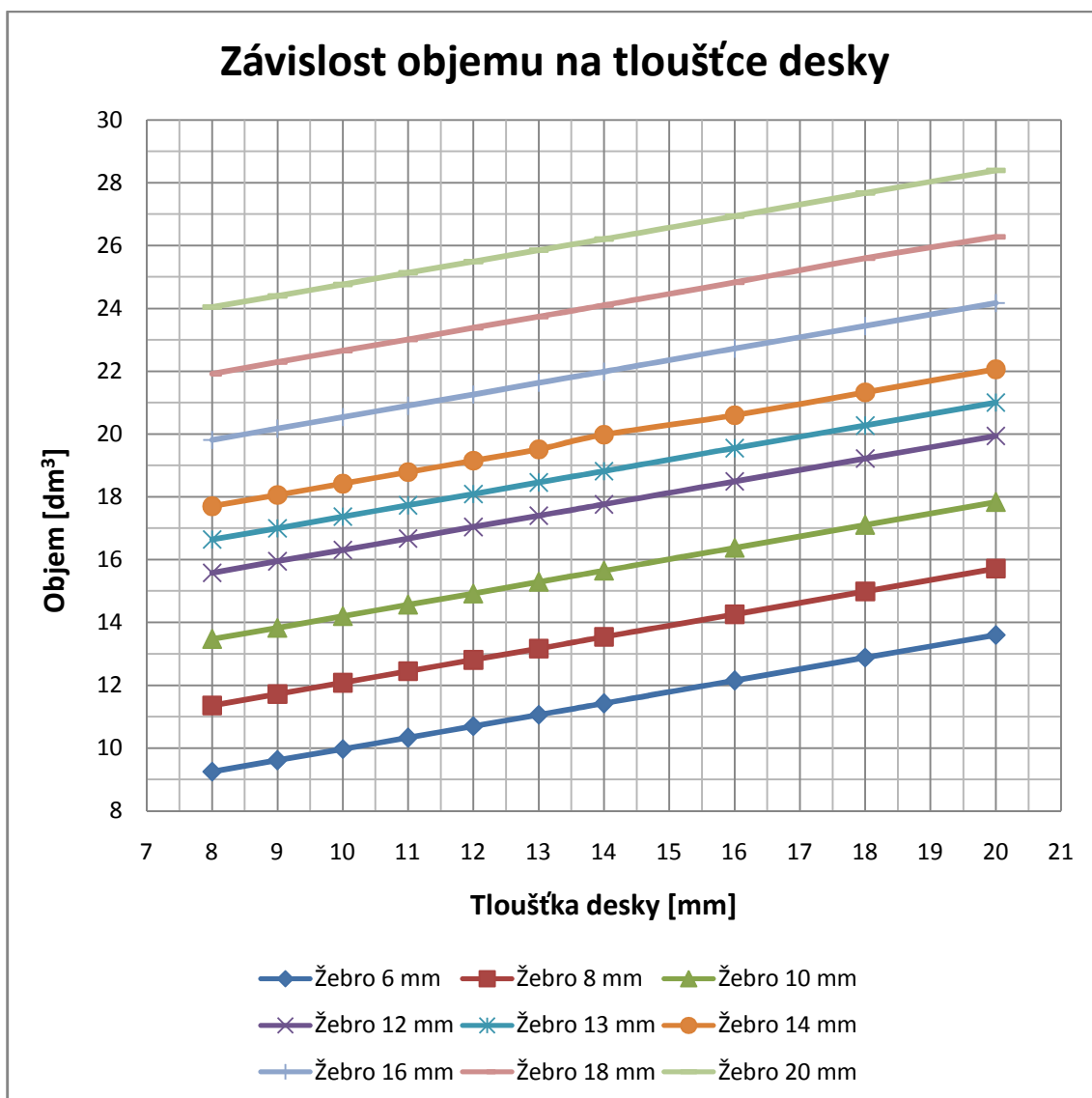
Tloušťka desky		Tloušťka žebra								
		6	8	10	12	13	14	16	18	20
8	Von Mises	384,2	259,5	196,4	157,0	142,5	130,3	111,6	102,5	95,3
	Deformace	26,0	19,3	15,6	13,3	12,4	11,7	10,5	9,5	8,7
	Objem	9,25	11,36	13,47	15,58	16,64	17,70	19,81	21,92	24,04
9	Von Mises	378,6	255,2	192,5	153,5	139,2	127,2	106,4	100,6	93,5
	Deformace	25,1	18,5	15,1	12,8	1,0	11,3	10,1	9,2	8,4
	Objem	9,61	11,72	13,83	15,95	17,00	18,06	20,17	22,29	24,40
10	Von Mises	373,6	251,4	189,2	150,4	136,3	124,3	107,4	98,7	91,9
	Deformace	24,5	18,0	14,6	12,4	11,6	10,9	9,7	8,8	8,1
	Objem	9,97	12,08	14,20	16,31	17,37	18,42	20,54	22,65	24,76
11	Von Mises	369,2	248,2	186,4	147,9	133,8	122,0	105,5	97,1	90,4
	Deformace	23,9	17,5	14,2	12,1	11,2	10,6	9,5	8,6	7,9
	Objem	10,33	12,45	14,56	16,67	17,73	18,79	20,90	23,01	25,13
12	Von Mises	365,4	245,3	183,9	145,6	131,6	119,9	103,8	95,5	89,0
	Deformace	23,4	17,2	13,8	11,7	10,9	10,3	9,2	8,4	7,7
	Objem	10,70	12,81	14,92	17,04	18,09	19,15	21,26	23,38	25,49
13	Von Mises	362,1	242,8	181,7	142,6	129,7	118,0	102,3	94,2	87,7
	Deformace	23,0	16,8	13,5	11,4	10,7	10,0	8,9	8,2	7,5
	Objem	11,06	13,17	15,29	17,40	18,46	19,51	21,63	23,74	25,85
14	Von Mises	358,9	240,3	179,7	141,8	127,9	116,4	100,9	92,9	86,5
	Deformace	22,6	16,4	13,2	11,1	10,4	9,8	8,7	7,9	7,3
	Objem	11,42	13,54	15,65	17,76	18,82	19,98	21,99	24,10	26,21
16	Von Mises	352,7	235,8	176,2	138,8	125,0	113,6	98,3	90,5	84,3
	Deformace	21,8	15,9	12,7	10,7	10,0	9,4	8,4	7,6	7,0
	Objem	12,15	14,26	16,38	18,49	19,55	20,60	22,72	24,83	26,94
18	Von Mises	346,5	231,4	172,9	136,1	122,6	111,2	96,0	88,4	82,4
	Deformace	21,1	15,3	12,2	10,3	9,6	9,0	8,1	7,3	6,7
	Objem	12,88	14,99	17,10	19,22	20,27	21,33	23,44	25,60	27,67
20	Von Mises	339,9	227,0	169,9	133,7	120,3	109,2	94,0	86,5	80,6
	Deformace	20,4	14,8	11,8	10,0	9,3	8,7	7,8	7,1	6,5
	Objem	13,60	15,72	17,83	19,94	21,00	22,06	24,17	26,28	28,39



Graf 7. Závislost napětí na tloušťce desky č. 3

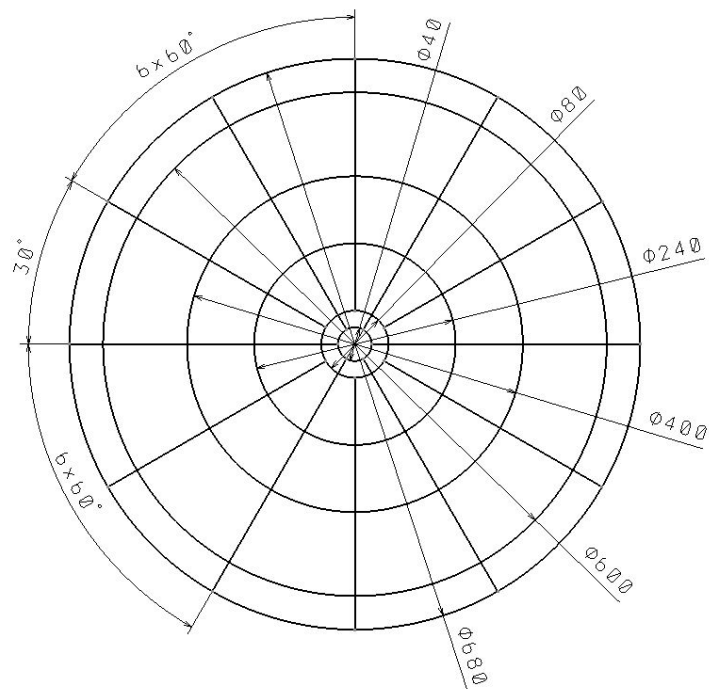


Graf 8. Závislost deformace na tloušťce desky č. 3



Graf 9. Závislost objemu na tloušťce desky č. 3

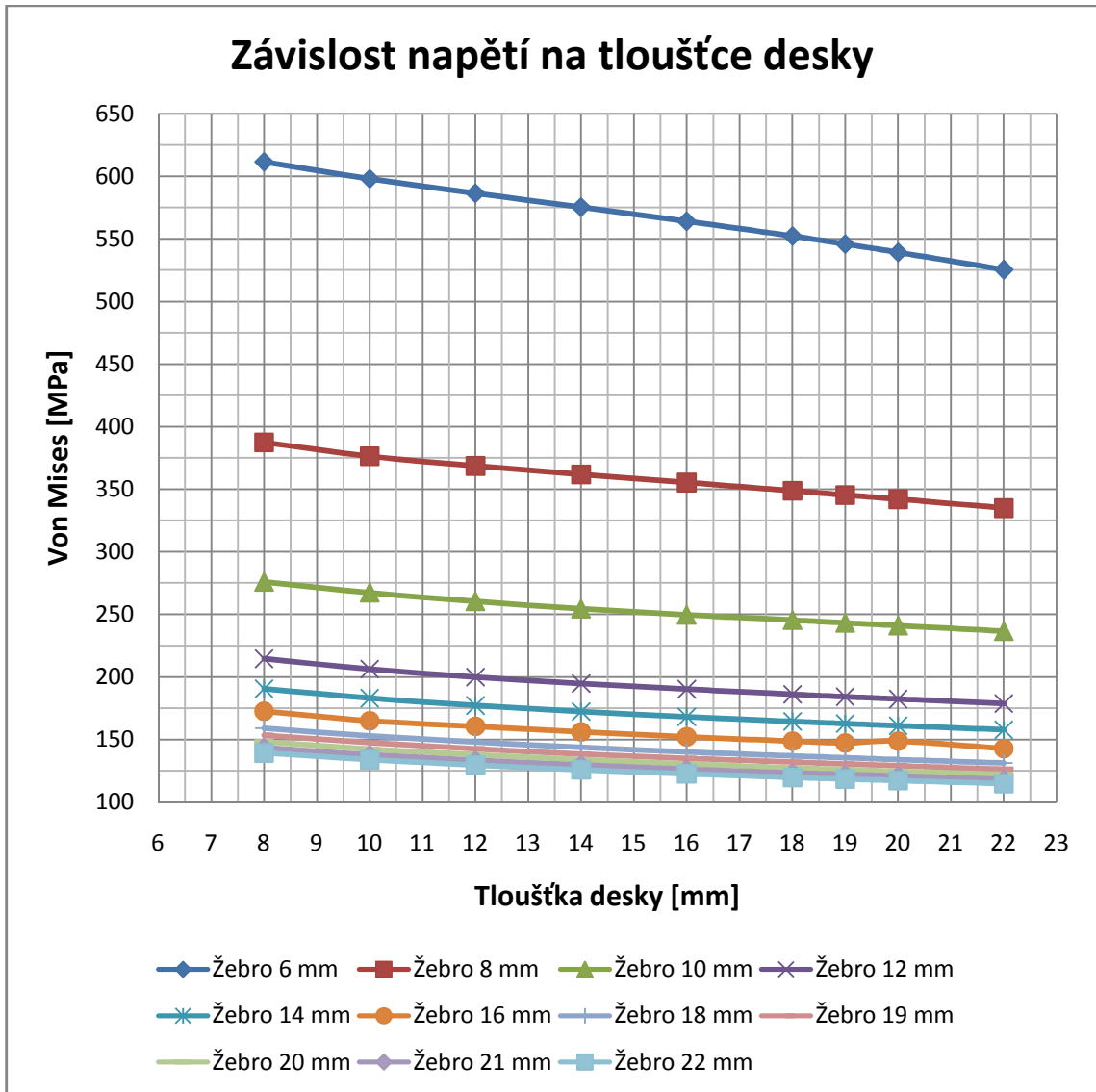
6.2.4 Geometrie č. 4



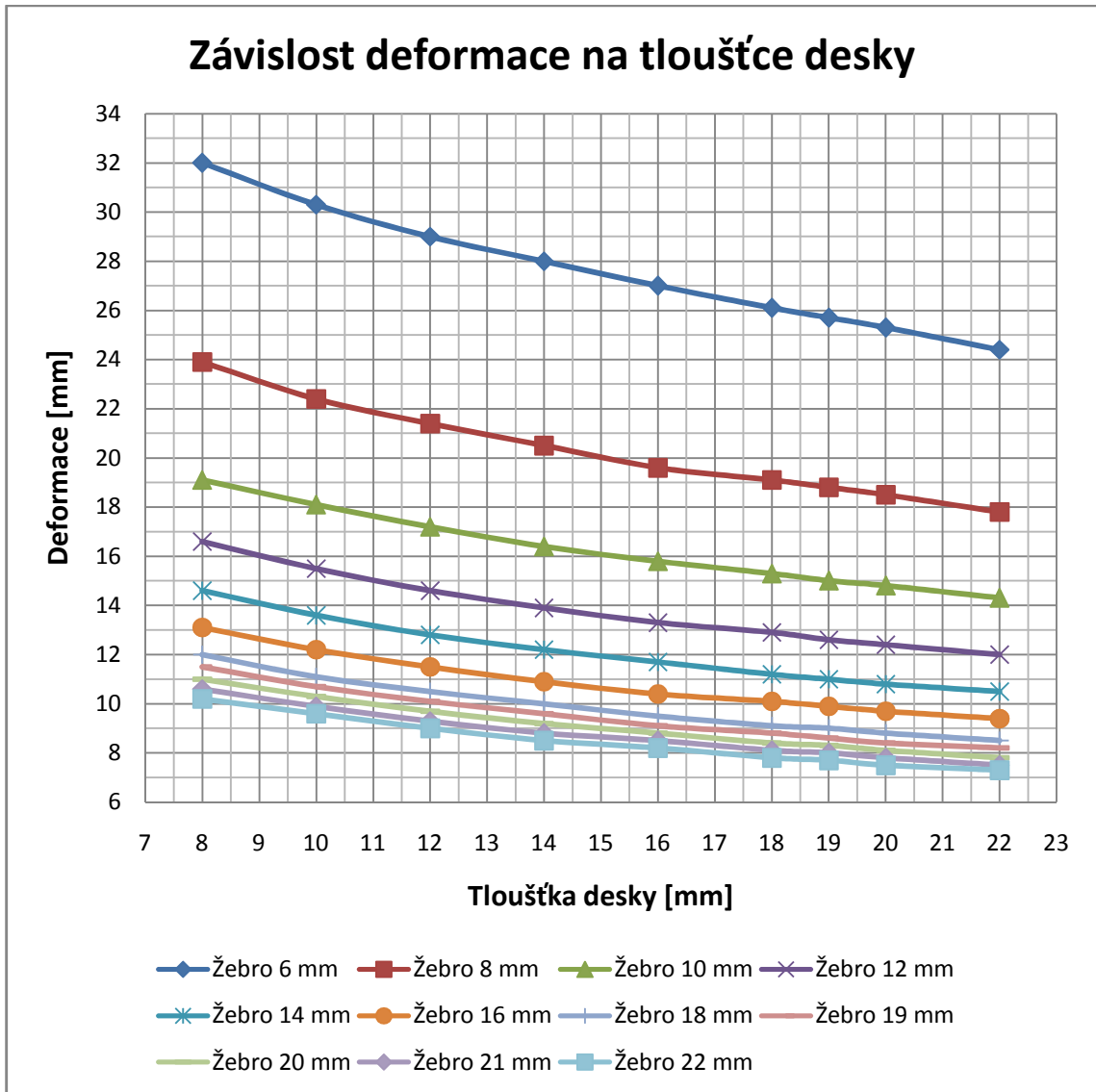
Obr. 26. Schéma geometrie č. 4 (výška žeber 80 mm)

Tab. 11. Hodnoty geometrie č. 4

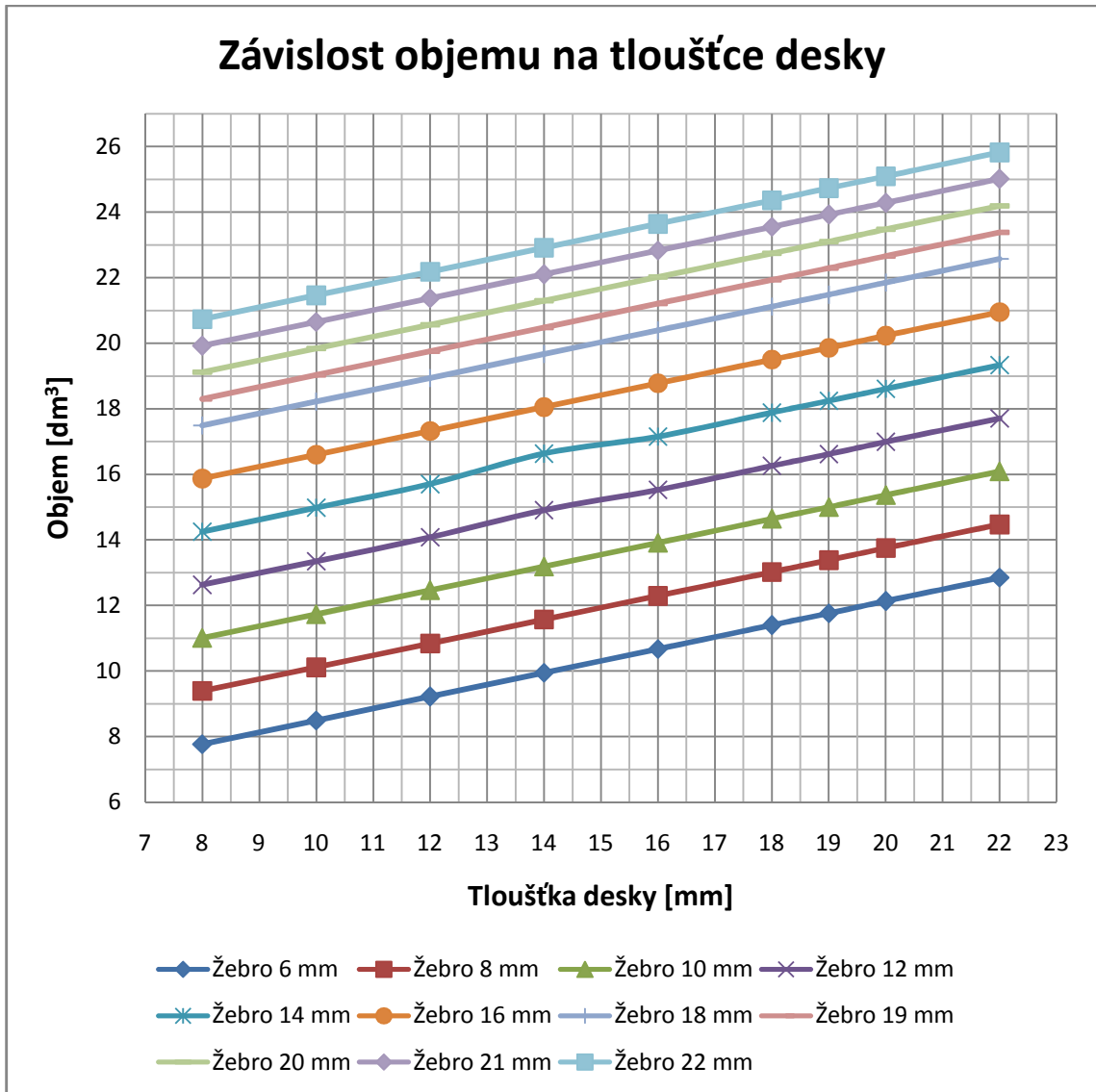
Tloušťka desky		Tloušťka žebra										
		6	8	10	12	14	16	18	19	20	21	22
8	Von Mises	611,6	387,5	275,9	214,6	190,5	172,7	159,1	153,3	148,2	143,5	139,3
	Deformace	32,0	23,9	19,1	16,6	14,6	13,1	12,0	11,5	11,0	10,6	10,2
	Objem	7,77	9,39	11,01	12,63	14,25	15,87	17,49	18,30	19,11	19,92	20,73
10	Von Mises	598,0	376,3	267,2	206,4	183,1	165,0	152,9	147,4	142,4	138,0	133,9
	Deformace	30,3	22,4	18,1	15,5	13,6	12,2	11,1	10,7	10,3	9,9	9,6
	Objem	8,49	10,11	11,73	13,35	14,98	16,60	18,22	19,03	19,84	20,65	21,46
12	Von Mises	586,4	368,6	260,3	200,0	177,2	160,6	147,9	142,6	137,8	133,5	129,6
	Deformace	29,0	21,4	17,2	14,6	12,8	11,5	10,5	10,1	9,7	9,3	9,0
	Objem	9,22	10,84	12,46	14,08	15,70	17,32	18,94	19,75	20,56	21,37	22,18
14	Von Mises	575,4	361,8	254,5	194,7	172,4	156,1	143,7	138,5	133,9	129,7	125,9
	Deformace	28,0	20,5	16,4	13,9	12,2	10,9	10,0	9,6	9,2	8,8	8,5
	Objem	9,95	11,57	13,19	14,91	16,63	18,05	19,67	20,48	21,29	22,10	22,91
16	Von Mises	564,1	355,3	249,7	190,2	168,2	152,2	140,1	135,0	130,5	126,4	122,7
	Deformace	27,0	19,6	15,8	13,3	11,7	10,4	9,5	9,1	8,8	8,5	8,2
	Objem	10,67	12,29	13,91	15,53	17,15	18,78	20,39	21,21	22,02	22,83	23,64
18	Von Mises	552,2	348,8	245,4	186,1	164,5	148,8	136,9	131,9	127,4	123,4	119,8
	Deformace	26,1	19,1	15,3	12,9	11,2	10,1	9,1	8,8	8,4	8,1	7,8
	Objem	11,40	13,02	14,64	16,26	17,88	19,50	21,12	21,93	22,74	23,55	24,36
19	Von Mises	545,9	345,4	243,2	184,2	162,8	147,2	135,4	130,4	126,0	122,1	118,5
	Deformace	25,7	18,8	15,0	12,6	11,0	9,9	9,0	8,6	8,3	8,0	7,7
	Objem	11,76	13,38	15	16,62	18,24	19,86	21,48	22,29	23,10	23,92	24,73
20	Von Mises	539,3	342	241	182,3	161,1	148,7	133,9	129,1	124,7	120,8	117,2
	Deformace	25,3	18,5	14,8	12,4	10,8	9,7	8,8	8,4	8,1	7,8	7,5
	Objem	12,13	13,75	15,37	16,99	18,61	20,23	21,85	22,66	23,47	24,28	25,09
22	Von Mises	525,3	334,9	236,6	178,7	157,9	142,8	131,2	126,4	122,2	118,3	114,8
	Deformace	24,4	17,8	14,3	12,0	10,5	9,4	8,2	8,2	7,8	7,5	7,3
	Objem	12,85	14,47	16,09	17,71	19,33	20,95	22,57	23,38	24,19	25,01	25,82



Graf 10. Závislost napětí na tloušťce desky č. 4

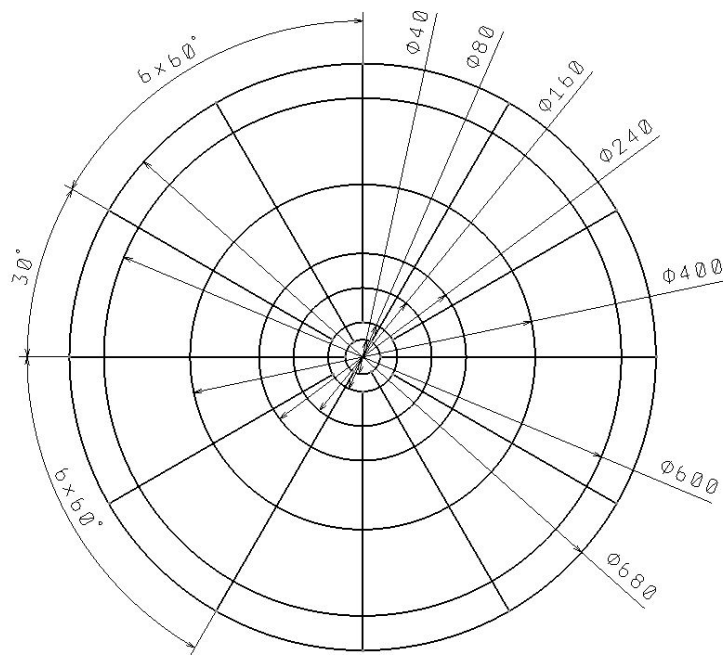


Graf 11. Závislost deformace na tloušťce desky č. 4



Graf 12. Závislost objemu na tloušťce desky č. 4

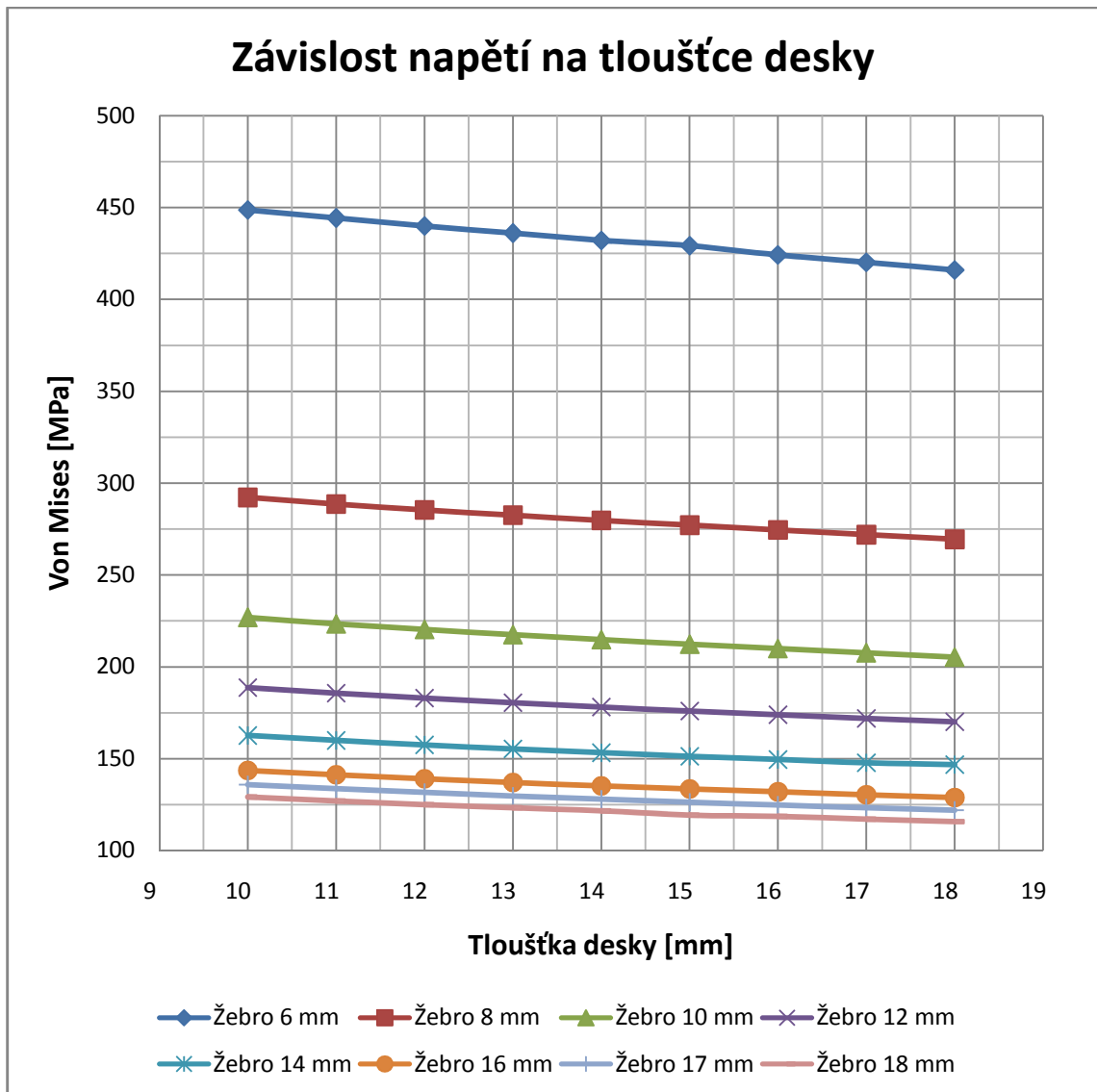
6.2.5 Geometrie č. 5



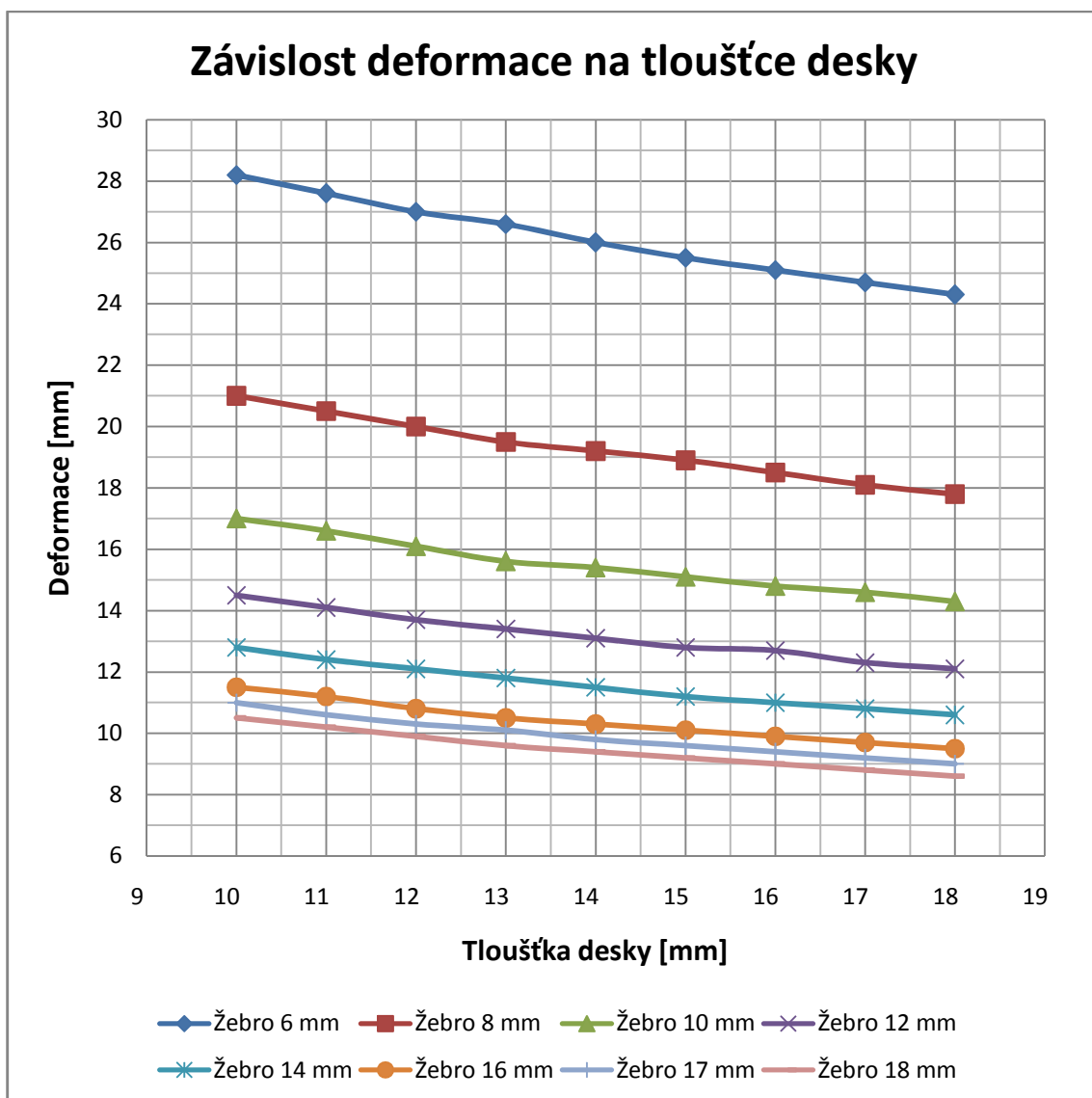
Obr. 27. Schéma geometrie č. 5 (výška žeber 80 mm)

Tab. 12. Hodnoty geometrie č. 5

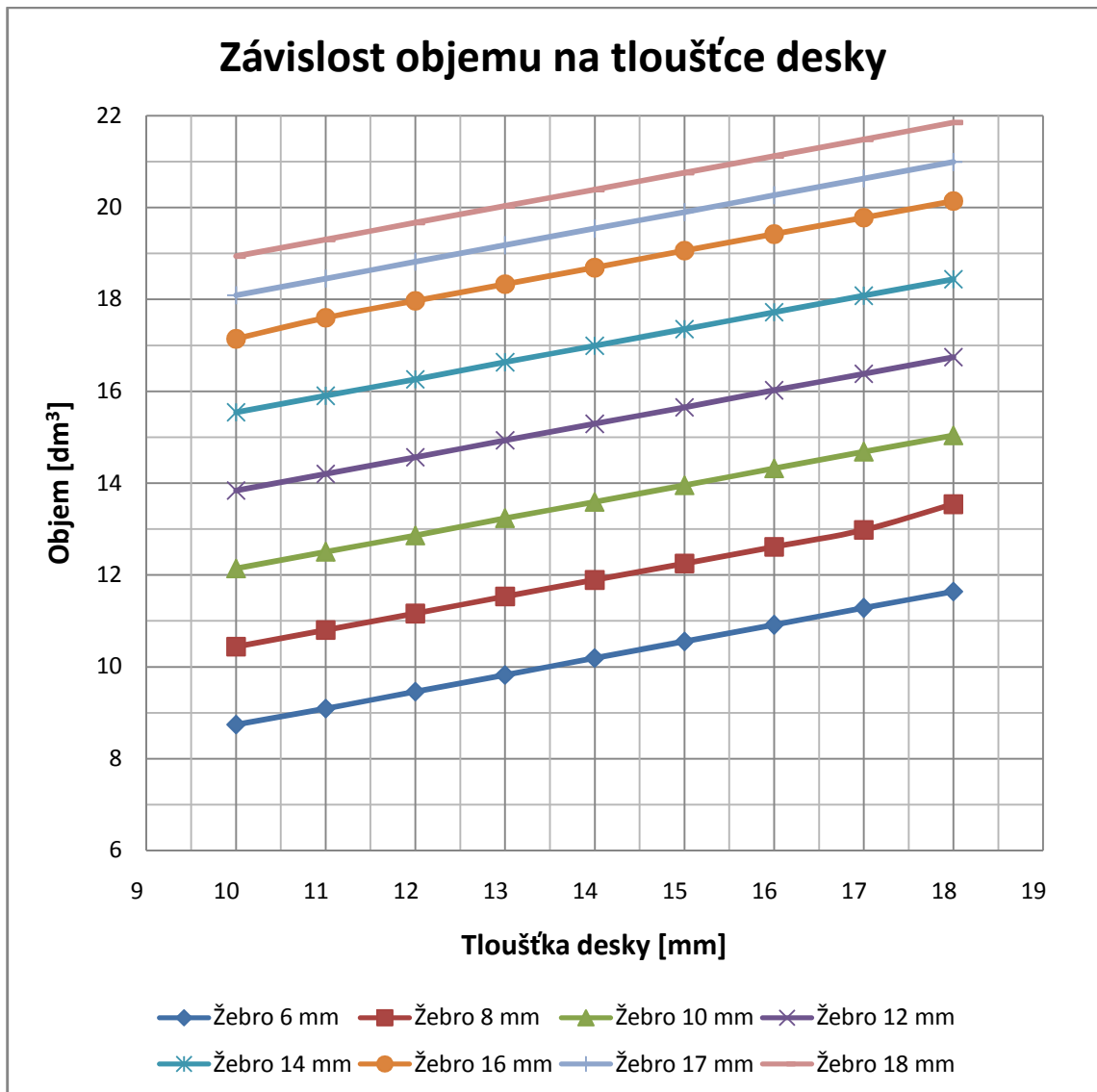
Tloušťka desky		Tloušťka žebra							
		6	8	10	12	14	16	17	18
10	Von Mises	448,7	292,2	226,8	188,6	162,6	143,6	135,9	129,1
	Deformace	28,2	21,0	17,0	14,5	12,8	11,5	11,0	10,5
	Objem	8,74	10,44	12,14	13,84	15,54	17,14	18,09	18,94
11	Von Mises	444,2	288,6	223,4	185,6	159,9	141,2	133,7	127,0
	Deformace	27,6	20,5	16,6	14,1	12,4	11,2	10,6	10,2
	Objem	9,09	10,80	12,50	14,20	15,90	17,60	18,45	19,30
12	Von Mises	440,0	285,4	220,3	182,9	157,5	139,0	131,6	125,0
	Deformace	27,0	20,0	16,1	13,7	12,1	10,8	10,3	9,9
	Objem	9,46	11,16	12,86	14,56	16,26	17,97	18,82	19,67
13	Von Mises	436,0	282,5	217,5	180,4	155,3	137,0	129,7	123,2
	Deformace	26,6	19,5	15,6	13,4	11,8	10,5	10,1	9,6
	Objem	9,82	11,53	13,23	14,93	16,63	18,33	19,18	20,39
14	Von Mises	432,1	279,7	214,8	178,1	153,2	135,2	127,9	121,5
	Deformace	26,0	19,2	15,4	13,1	11,5	10,3	9,8	9,4
	Objem	10,19	11,89	13,59	15,29	16,99	18,69	19,54	20,59
15	Von Mises	429,2	277,1	212,3	175,9	151,3	133,5	126,3	119,2
	Deformace	25,5	18,9	15,1	12,8	11,2	10,1	9,6	9,2
	Objem	10,55	12,25	13,95	15,65	17,35	19,06	19,9	20,76
16	Von Mises	424,2	274,5	209,9	173,9	149,5	131,9	124,7	118,5
	Deformace	25,1	18,5	14,8	12,7	11,0	9,9	9,4	9,0
	Objem	10,91	12,61	14,32	16,02	17,72	19,42	20,27	21,12
17	Von Mises	420,2	271,9	207,5	171,9	147,8	130,3	123,3	117,1
	Deformace	24,7	18,1	14,6	12,3	10,8	9,7	9,2	8,8
	Objem	11,28	12,98	14,68	16,38	18,08	19,78	20,63	21,48
18	Von Mises	416,0	269,4	205,2	170,0	146,8	128,8	121,9	115,7
	Deformace	24,3	17,8	14,3	12,1	10,6	9,5	9,0	8,6
	Objem	11,64	13,54	15,04	16,74	18,44	20,14	20,99	21,85



Graf 13. Závislost napětí na tloušťce desky č. 5

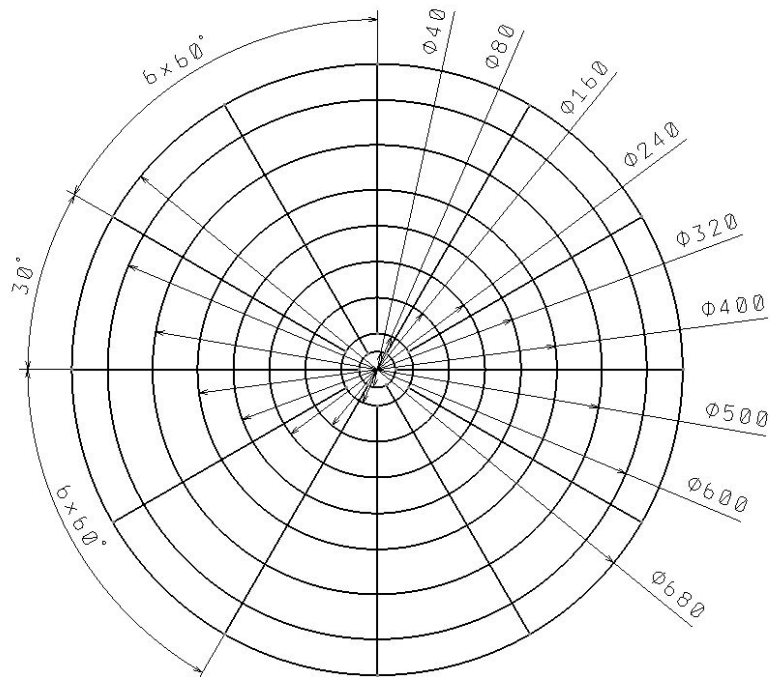


Graf 14. Závislost deformace na tloušťce desky č. 5



Graf 15. Závislost objemu na tloušťce desky č. 5

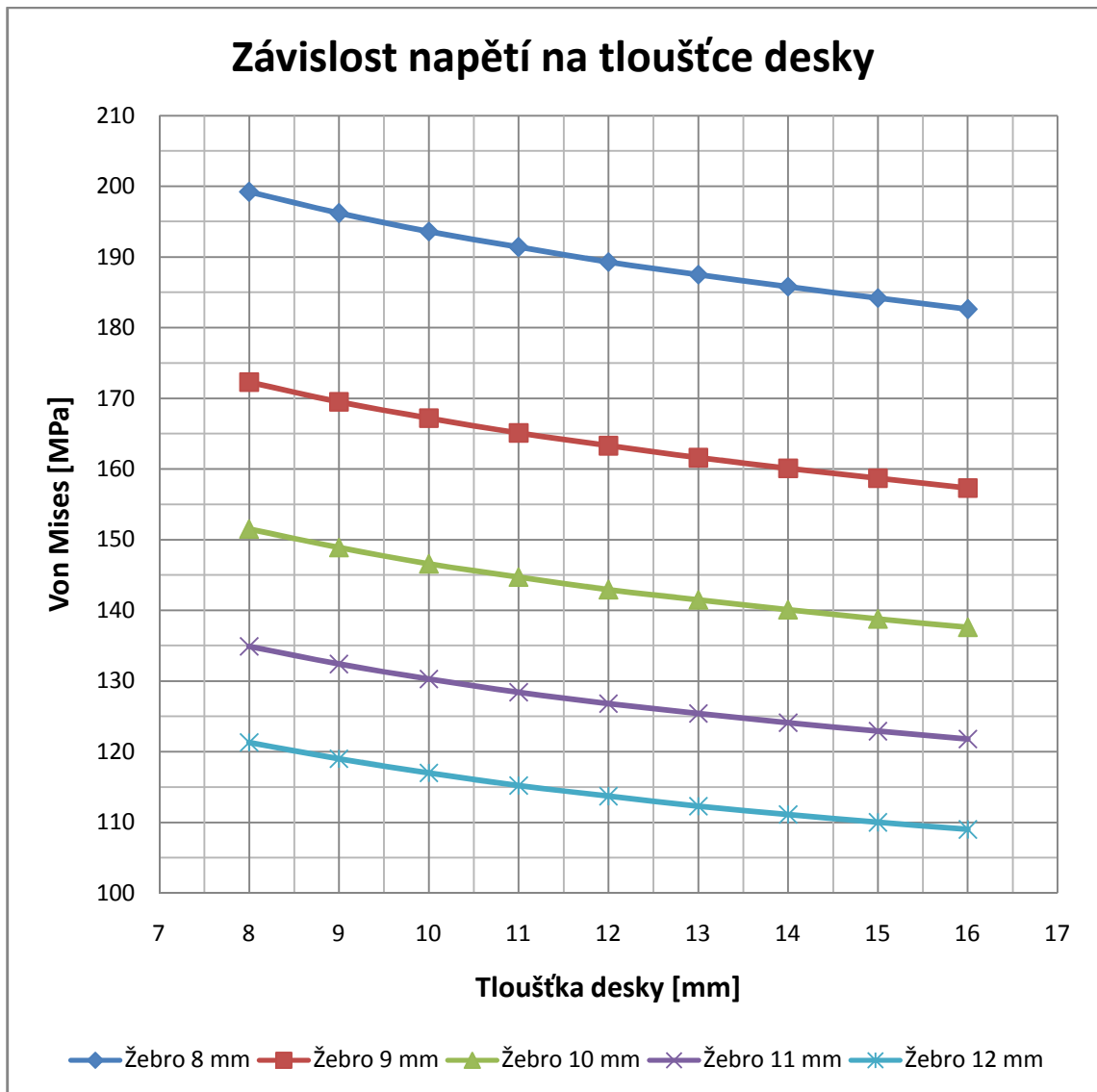
6.2.6 Geometrie č. 6



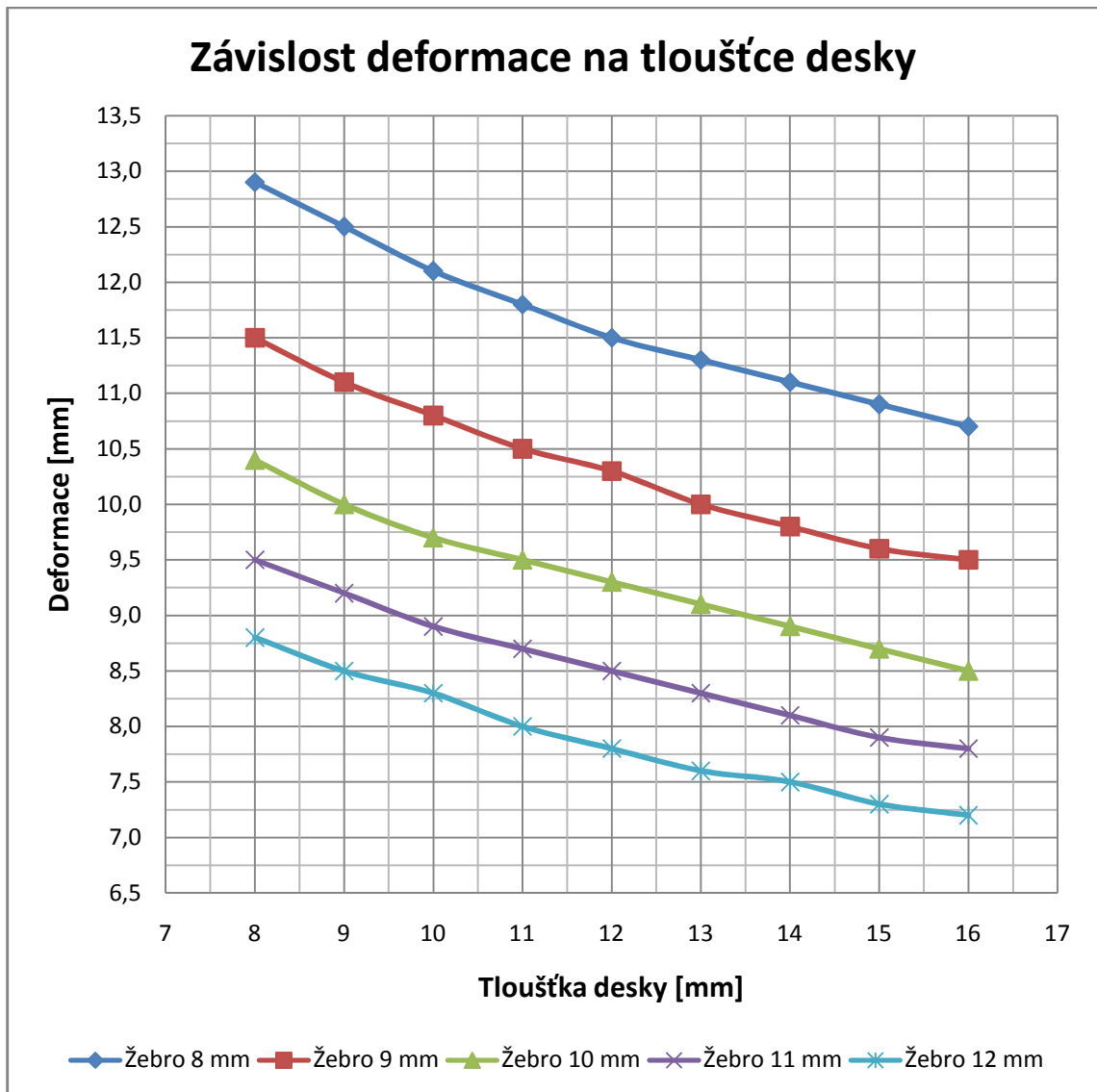
Obr. 28. Schéma geometrie č. 6 (výška žeber 90 mm)

Tab. 13. Hodnoty geometrie č. 6

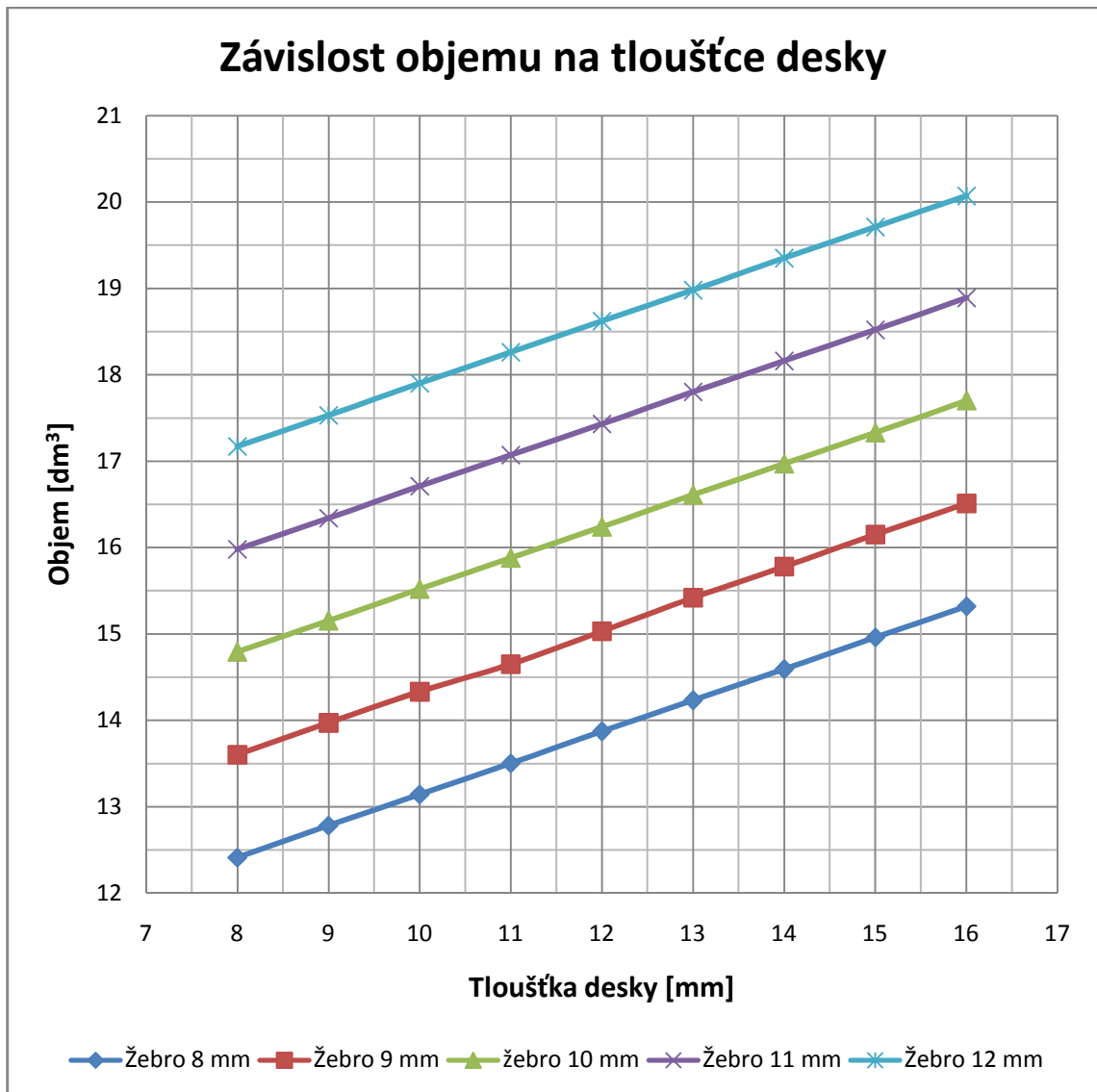
Tloušťka desky		Tloušťka žebra				
		8	9	10	11	12
8	Von Mises	199,2	172,3	151,5	134,9	121,3
	Deformace	12,9	11,5	10,4	9,5	8,8
	Objem	12,41	13,60	14,79	15,98	17,17
9	Von Mises	196,2	169,4	148,9	132,4	119,0
	Deformace	12,5	11,1	10,0	9,2	8,5
	Objem	12,78	13,97	15,15	16,34	17,53
10	Von Mises	193,6	167,2	146,6	130,3	117,0
	Deformace	12,1	10,8	9,7	8,9	8,3
	Objem	13,14	14,33	15,52	16,71	17,90
11	Von Mises	191,4	165,1	144,7	128,4	115,2
	Deformace	11,8	10,5	9,5	8,7	8,0
	Objem	13,50	14,65	15,88	17,07	18,26
12	Von Mises	189,3	163,3	142,9	126,8	113,7
	Deformace	11,5	10,3	9,3	8,5	7,8
	Objem	13,87	15,03	16,24	17,43	18,62
13	Von Mises	187,5	161,6	141,5	125,4	112,3
	Deformace	11,3	10,0	9,1	8,3	7,6
	Objem	14,23	15,42	16,61	17,8	18,98
14	Von Mises	185,8	160,1	140,1	124,1	111,1
	Deformace	11,1	9,8	8,9	8,1	7,5
	Objem	14,59	15,78	16,97	18,16	19,35
15	Von Mises	184,2	158,7	138,8	122,9	110,0
	Deformace	10,9	9,6	8,7	7,9	7,3
	Objem	14,96	16,15	17,33	18,52	19,71
16	Von Mises	182,6	157,3	137,6	121,8	109,0
	Deformace	10,7	9,5	8,5	7,8	7,2
	Objem	15,32	16,51	17,7	18,89	20,07



Graf 16. Závislost napětí na tloušťce desky č. 6

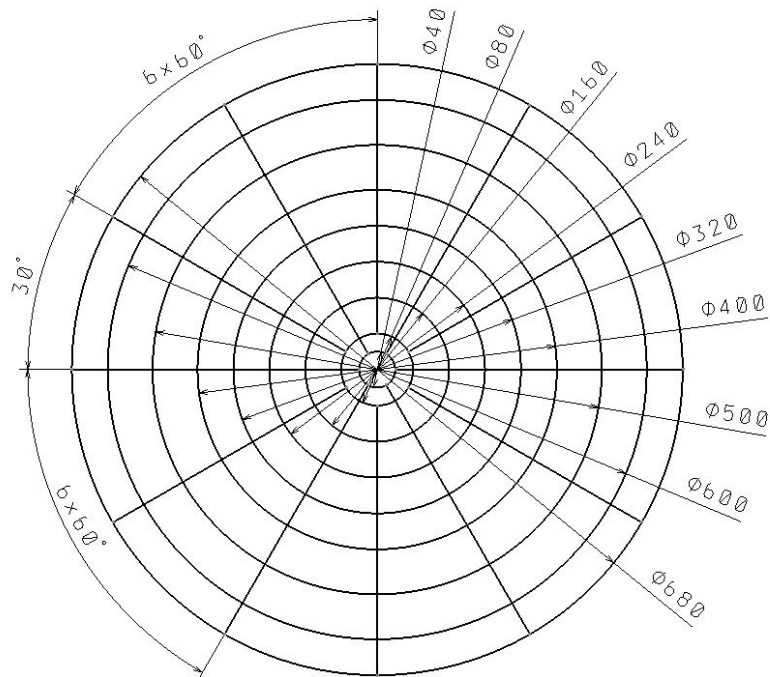


Graf 17. Závislost deformace na tloušťce desky č. 6



Graf 18. Závislost objemu na tloušťce desky č. 6

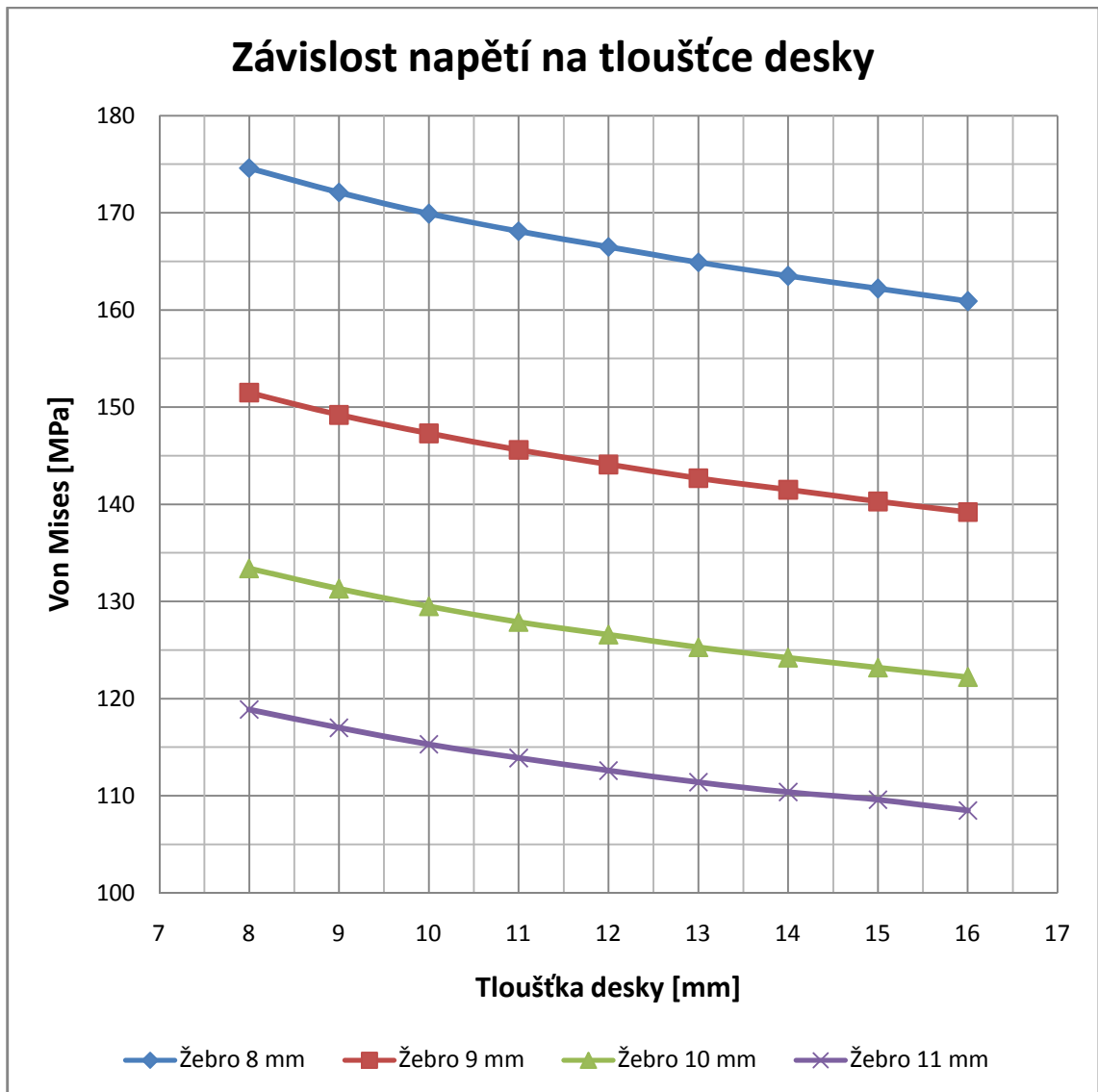
6.2.7 Geometrie č. 7



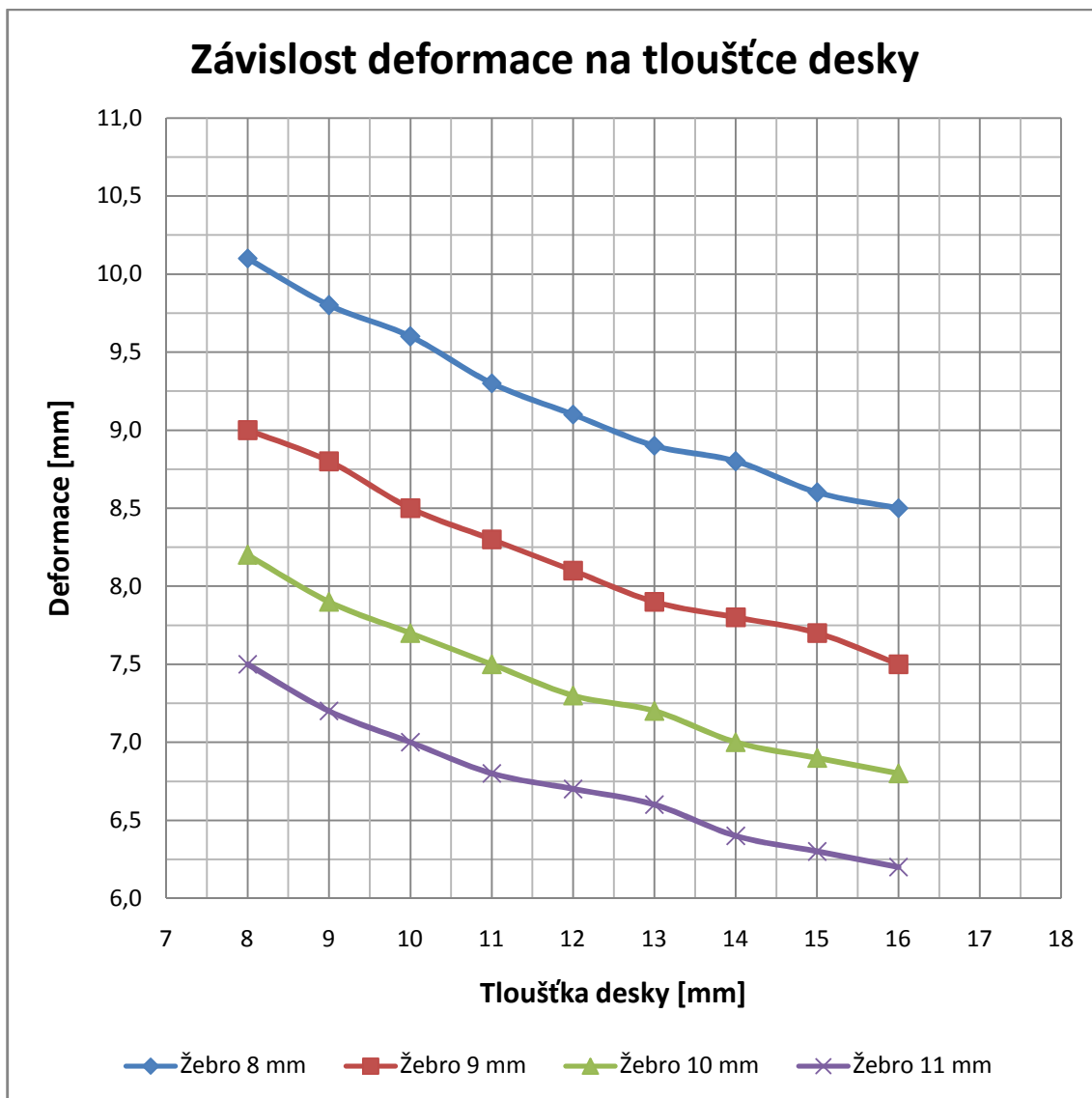
Obr. 29. Schéma geometrie č. 7 (výška žeber 100 mm)

Tab. 14. Hodnoty geometrie č. 7

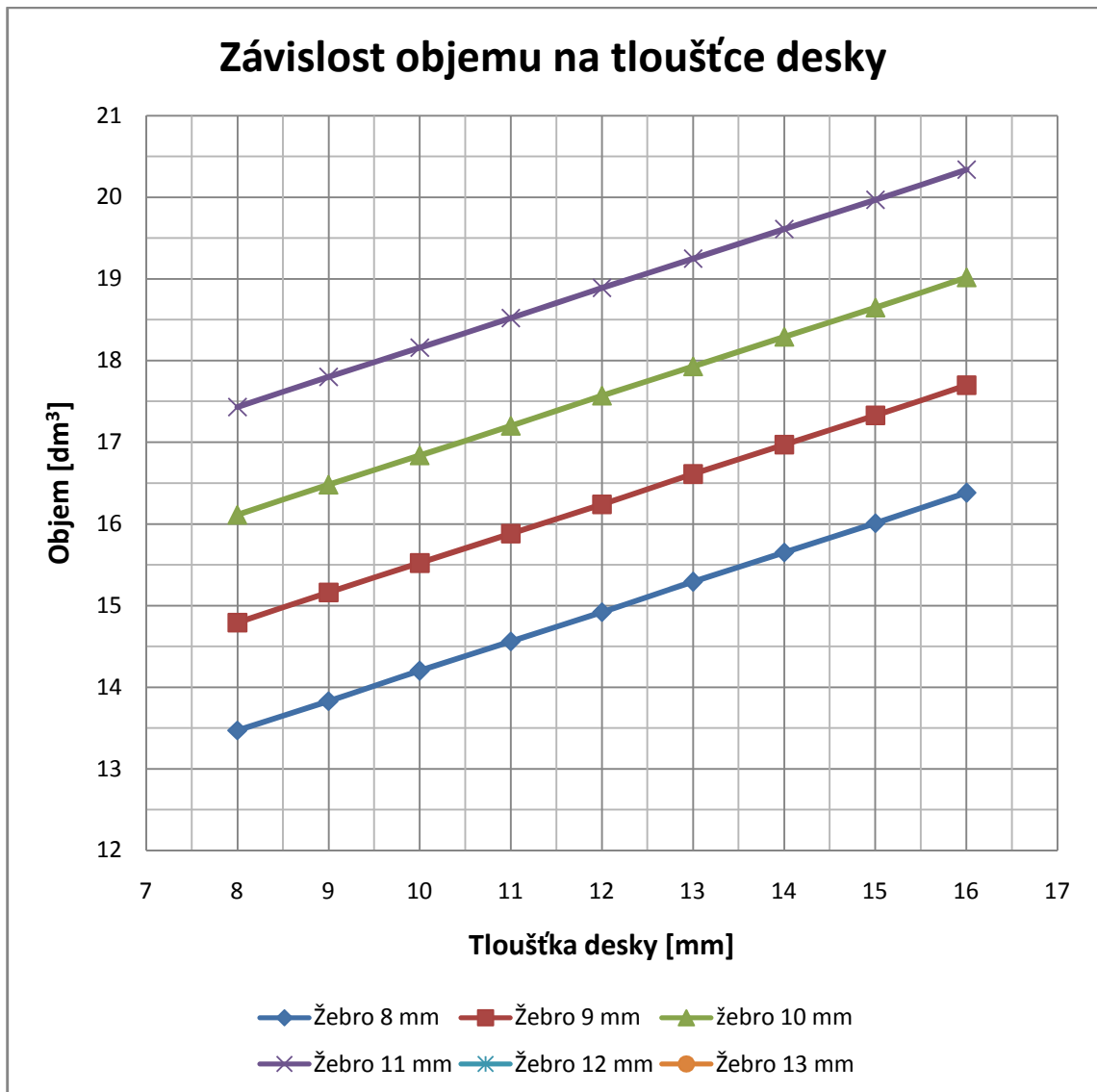
Tloušťka desky		Tloušťka žebra			
		8	9	10	11
8	Von Mises	174,6	151,5	133,4	118,9
	Deformace	10,1	9,0	8,2	7,5
	Objem	13,47	14,79	16,11	17,43
9	Von Mises	172,1	149,2	131,3	117,0
	Deformace	9,8	8,8	7,9	7,2
	Objem	13,83	15,16	16,48	17,80
10	Von Mises	169,9	147,3	129,5	115,3
	Deformace	9,6	8,5	7,7	7,0
	Objem	14,20	15,52	16,84	18,16
11	Von Mises	168,1	145,6	127,9	113,9
	Deformace	9,3	8,3	7,5	6,6
	Objem	15,56	15,88	17,20	18,52
12	Von Mises	166,5	144,1	126,6	112,6
	Deformace	9,1	8,1	7,3	6,7
	Objem	14,92	16,24	17,57	18,89
13	Von Mises	164,9	142,7	125,3	111,4
	Deformace	8,9	7,9	7,2	6,6
	Objem	15,29	16,61	17,93	19,25
14	Von Mises	163,5	141,5	124,2	110,4
	Deformace	8,8	7,8	7,0	6,4
	Objem	15,65	16,97	18,29	19,61
15	Von Mises	162,2	140,3	123,2	109,6
	Deformace	8,6	7,7	6,9	6,3
	Objem	16,01	17,33	18,65	19,97
16	Von Mises	160,9	139,2	122,2	108,5
	Deformace	8,5	7,5	6,8	6,2
	Objem	16,38	17,7	19,02	20,34



Graf 19. Závislost napětí na tloušťce desky č. 7



Graf 20. Závislost deformace na tloušťce desky č. 7



Graf 21. Závislost objemu na tloušťce desky č. 7

6.3 Zhodnocení 2D lineární analýzy

Získané grafy jednotlivých návrhů budou podkladem pro konečné alternativy návrhů geometrie poklopu ve 3D softwaru Catia V5R18.

Hlavní podmínkou přípustných návrhů je napětí na mezi kluzu v maximální hodnotě 130 MPa. Vedlejšími podmínkami je návrh s co nejmenším objemem a deformací.

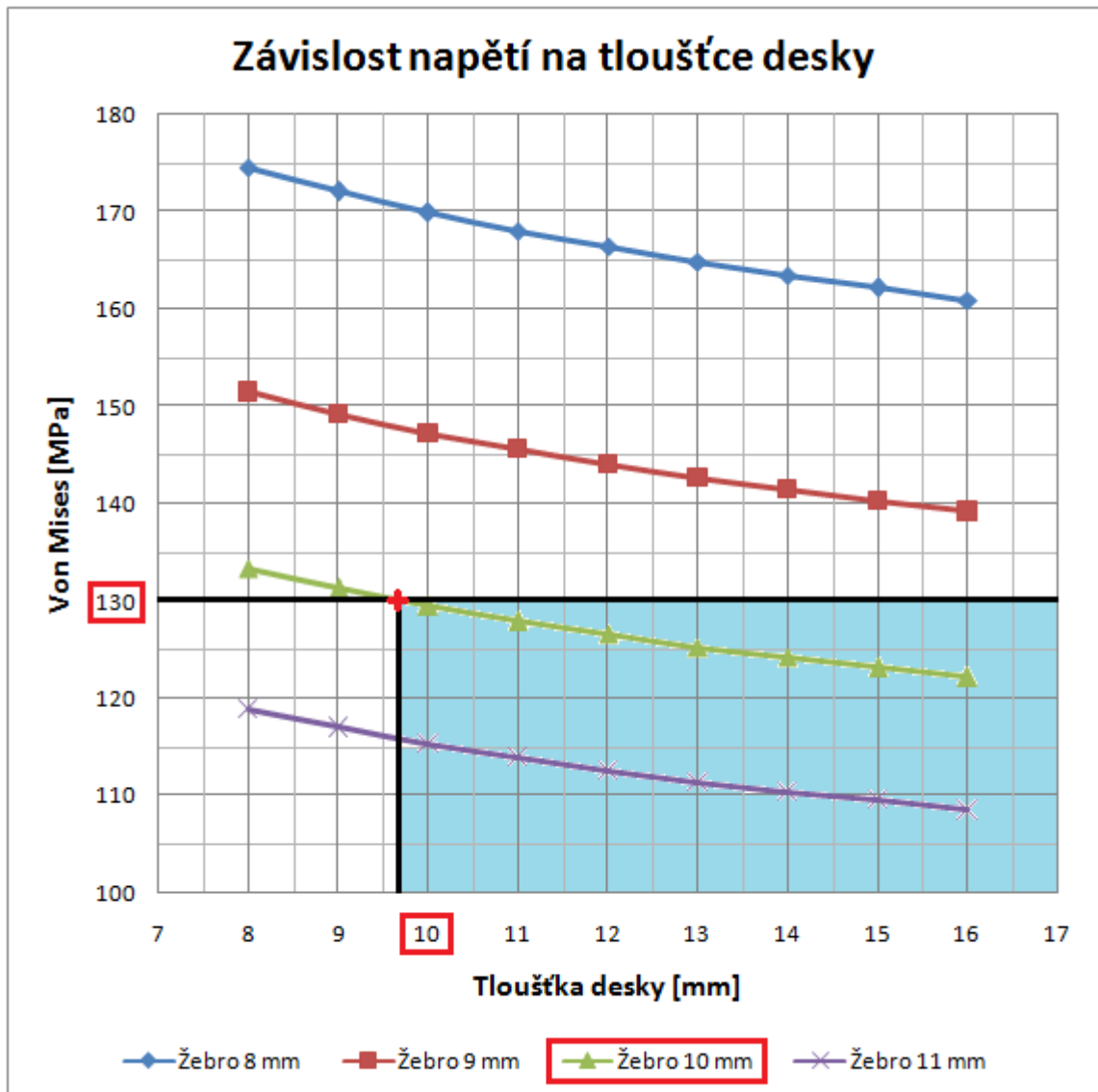
Sestrojený graf závislosti napětí (Von Mises) na tloušťce desky nám umožňuje zjednodušení dalších návrhů. Grafem lze proložit přímka v požadovaném dovoleném napětí, které

záleží na použitém materiálu. V místech, kde se protne myšlená přímka některou z vynesných křivek (velikost tloušťky žebra), je jedno z ideálních řešení. V získaných průsečících se odečte jejich hodnota na ose x (velikost tloušťky základní desky).

Při více průsečících budou dále rozhodovat vedlejší podmínky co nejmenší objem a deformace. Pro objemovou podmínku bude platit čím menší tloušťky desky a žeber tím menší bude objem, ale musíme sledovat i velikost maximální deformace průhybu ve středu desky a výsledkem bude nalezení kompromisu mezi tloušťkami a objemem.

Graf závislosti napětí na tloušťce desky č. 22 ukazuje nalezení konkrétního ideálního řešení návrhu u geometrie č. 7. Dimenzování probíhalo na mez kluzu, hodnotu meze kluzu 130 MPa zjistíme v tabulce č. 7. Danou hodnotou proložíme přímku. Přímka se protнула s křivkou velikosti tloušťky žebra 10 mm. Na ose x odečteme hodnotu průsečíku přímky a křivky a zjistíme velikost tloušťky desky. Ostatní přípustná řešení se nalézají v označené části grafu (modrá oblast) tyto varianty se budou lišit od ideálního řešení:

- Větší únosností → nižší napětí ve výrobku
- Menší deformací – průhyb
- Větší tloušťky desky a žeber → větší objem



Graf 22. Nalezení ideálního řešení

Tabulka 15 znázorňuje nejvhodnější řešení z jednotlivých geometrií 3 až 7.

Tab. 15. Vybrané nejvhodnější návrhy

Varianta	Geometrie	Sledovaná veličina	hodnota	Tl. desky [mm]	Tl. žebra [mm]
1	3	Von Mises [MPa]	129,7	13	13
		Deformace [mm]	10,7		
		Objem [dm ³]	18,46		
2	4	Von Mises [MPa]	130,4	19	19
		Deformace [mm]	8,6		
		Objem [dm ³]	22,29		
3	5	Von Mises [MPa]	130,3	17	16
		Deformace [mm]	9,7		
		Objem [dm ³]	17,78		
4	6	Von Mises [MPa]	128,4	11	11
		Deformace [mm]	8,7		
		Objem [dm ³]	17,07		
5	7	Von Mises [MPa]	129,5	10	10
		Deformace [mm]	7,7		
		Objem [dm ³]	16,84		

Varianta 2 a 5 byly vyhodnoceny jako vhodné pro další 3D lineární analýzy v softwaru Catia V5R18.

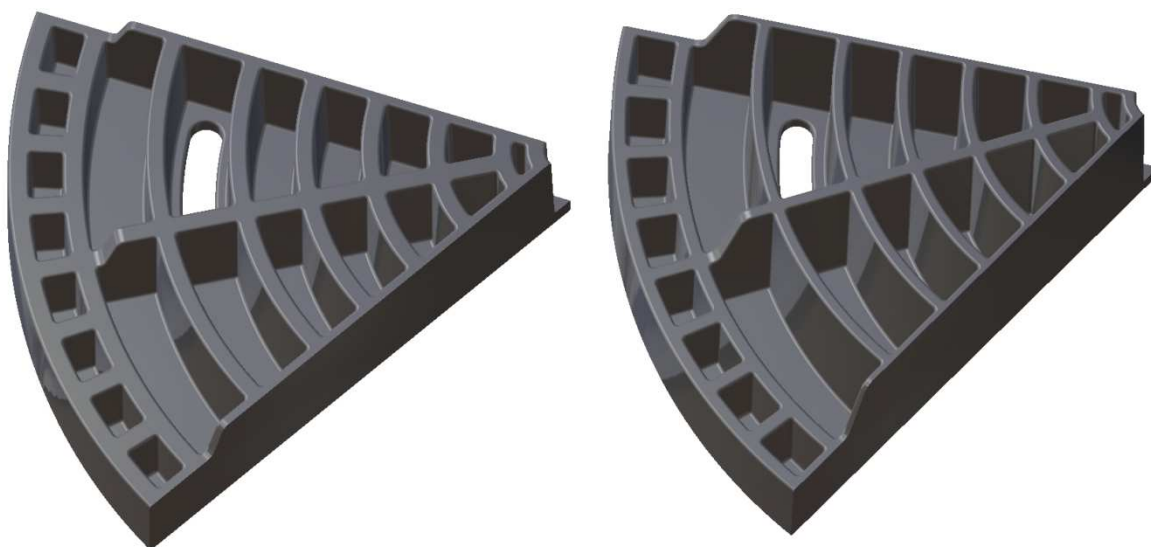
7 LINEÁRNÍ 3D ANALÝZA

Cílem 3D analýzy bude ověření a zpřesnění získaných výsledků z předchozí parametrické 2D analýzy v softwaru SolidWorks/Cosmos tools. Predikovat výsledky experimentálních zkoušek, tj. kvalifikovaně odhadnout, zda dané zkušební zatížení 400 kN bude na mezi porušení - destrukce poklopu.

7.1 Modely pro 3D analýzu

Geometrie modelů pro 3D analýzu (obr. 30) vychází z vybraných variant (varianta 2 a 5) 2D parametrické analýzy.

Modely byly vymodelovány v softwaru Catia V5R18. Některá místa musela být ještě upravena jako okraj poklopu pro uložení do rámu, odvodnění a protiskluzová úprava. Úpravy poklopu popsány v kapitole 6.4.



Obr. 30. Šestiny poklopu pro analýzu (levý – model č. 1; pravý – model č. 2)

7.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky byly nastaveny stejně jako ve 2D analýze (viz kapitola 5.1) :

- Podepření v ose z v místě uložení v rámu a zabránění rotaci
- Přidání vazby kruhové symetrie
- Zkušební zatížení podle zvolení třídy podle normy ČSN EN 124 – 400 kN na ploše o průměru 250 mm

- Základní FEM síť byla vytvořena čtyřstěnnými elementy o délce hrany 10 mm a hodnotě sagu 0,5 mm, síť byla nakonec automaticky upravena a bylo dosaženo 11 %ního odklonu od ideální sítě u modelu č. 1 a 10 %ního u modelu č. 2.

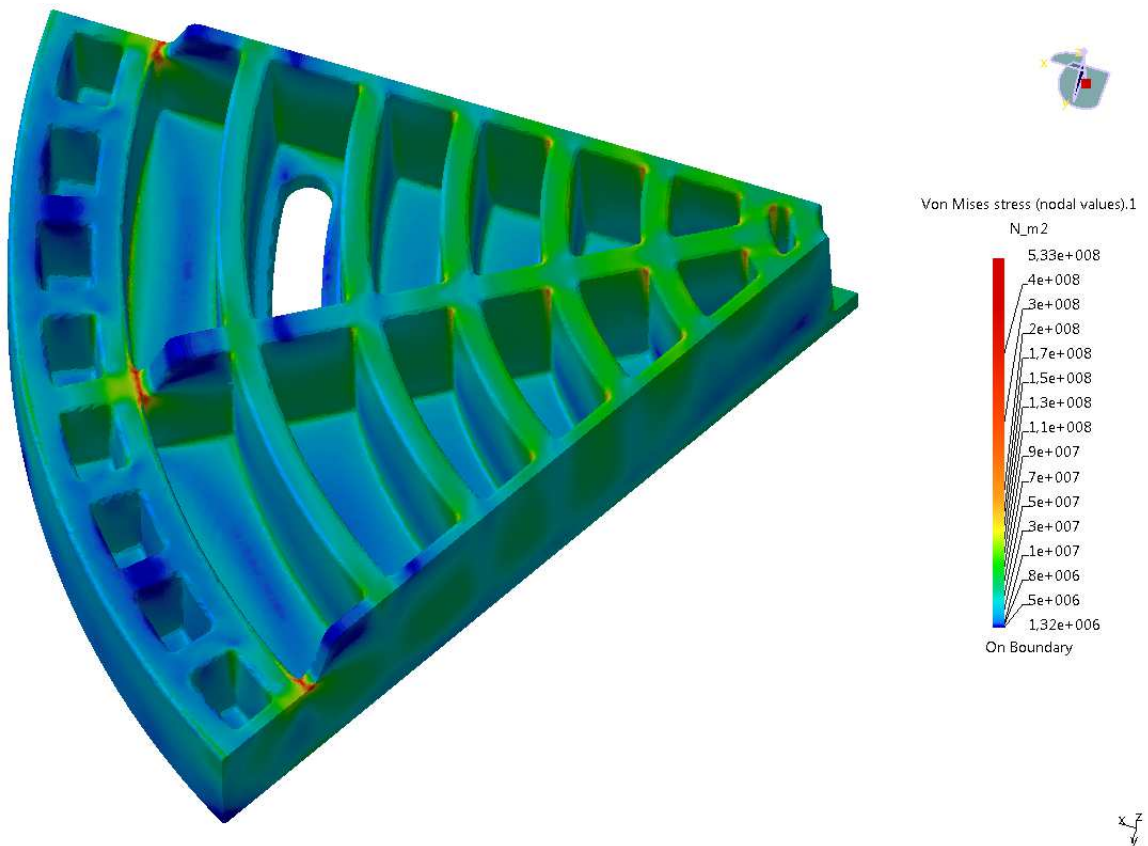
7.3 Varianty modelu poklopu

Na následujících obrázcích v kapitolách 6.3.1 a 6.3.2 jsou uvedeny výsledky konečných alternativ 3D modelu poklopu a příslušné analýzy napěťově deformačního stavu. Sledované stavy napětí byly Von Mises, hlavní napětí a deformace.

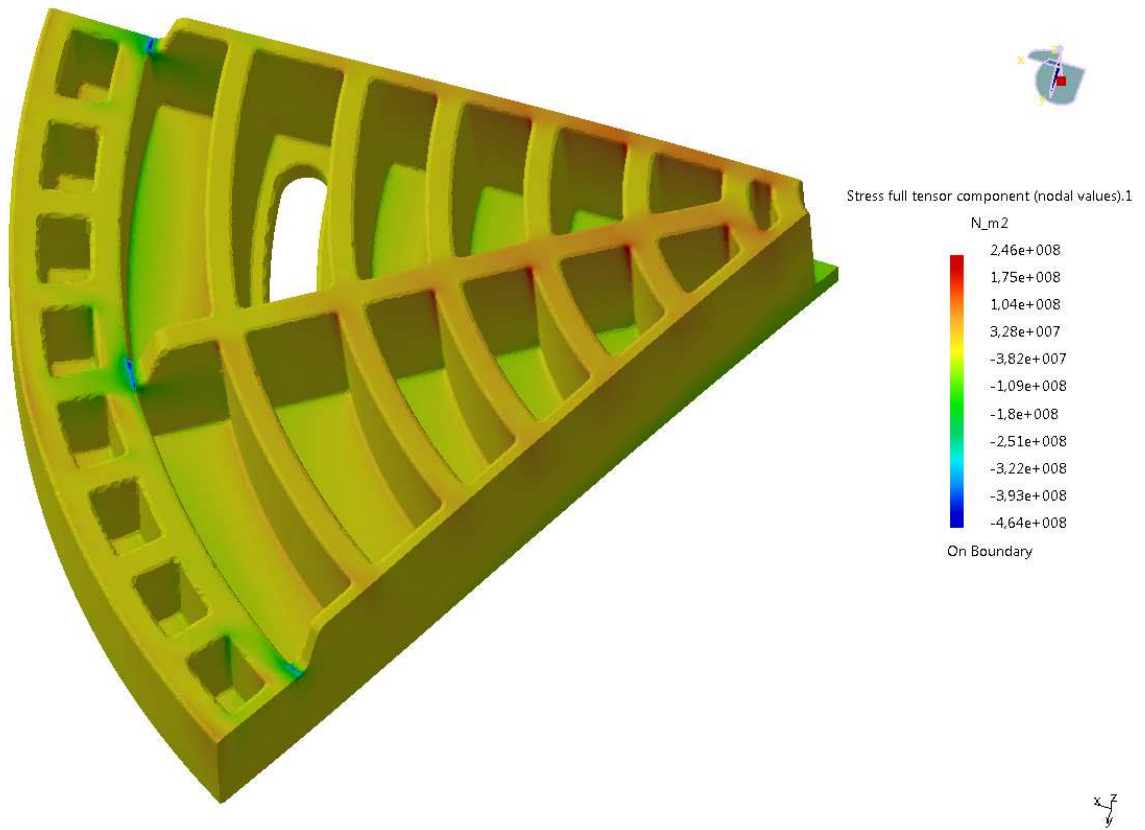
7.3.1 Model č. 1

Rozměry modelu č. 1:

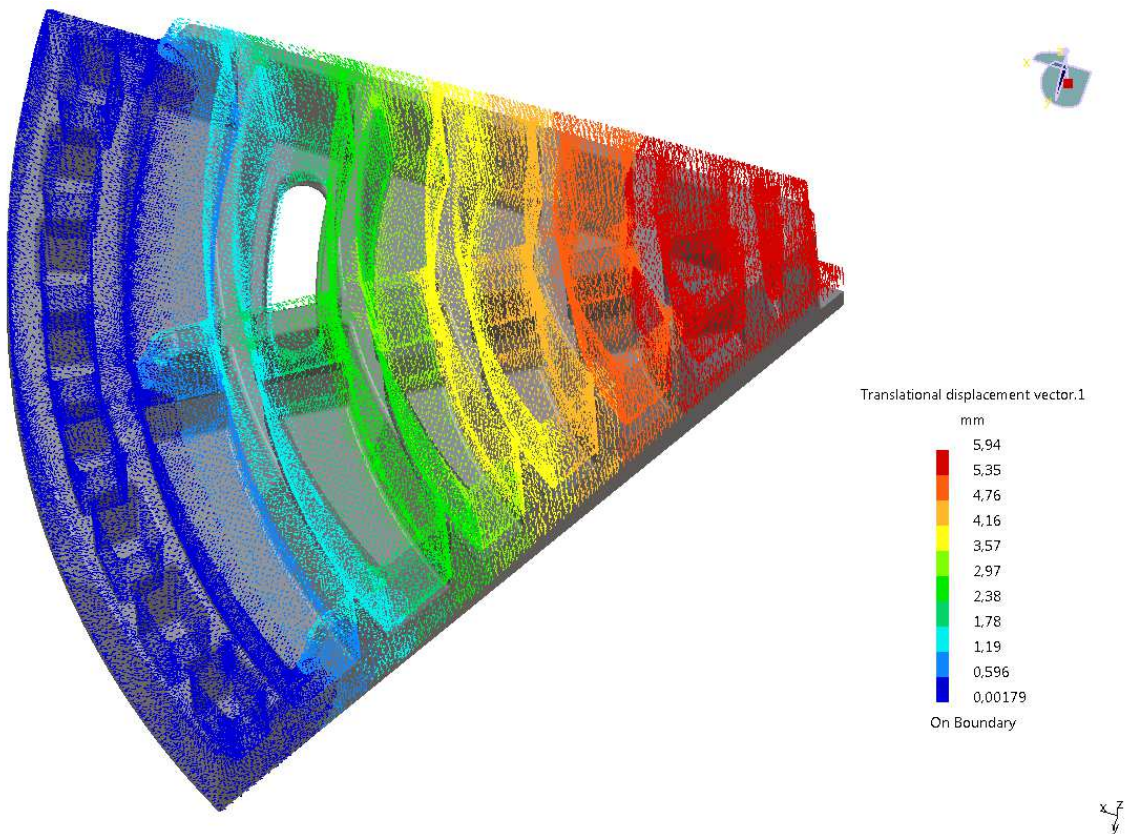
- Tloušťka žeber 13 mm
- Tloušťka desky 13 mm
- Výška žeber 80 mm



Obr. 31. Průběh napětí – model č. 1



Obr. 32. Průběh hlavního napětí – model č. 1

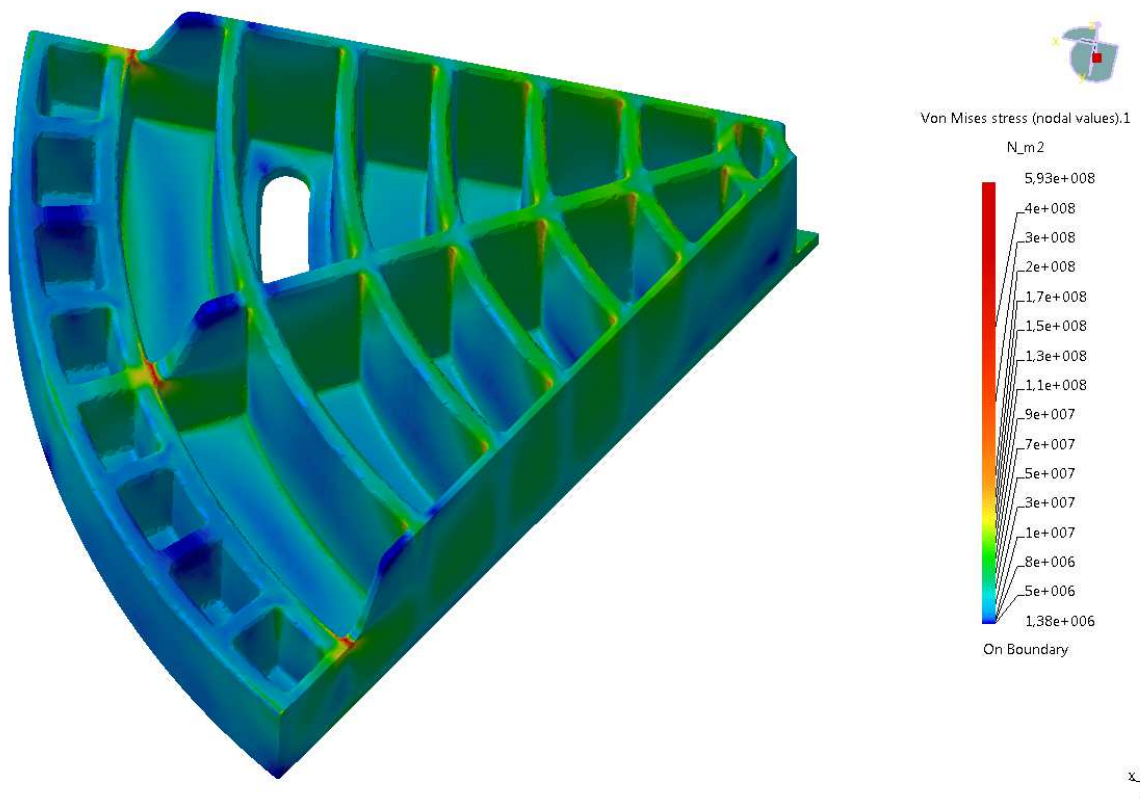


Obr. 33. Průběh deformace – model č. 1

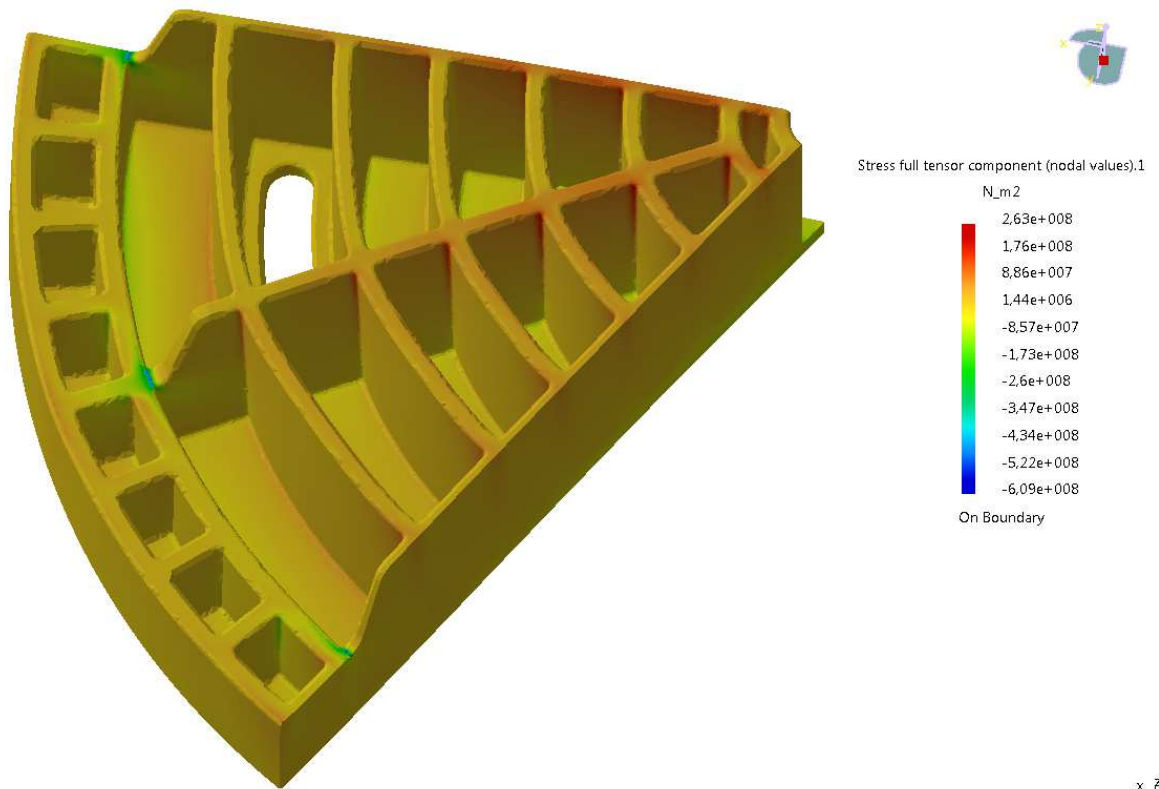
7.3.2 Model č. 2

Rozměry modelu č. 2:

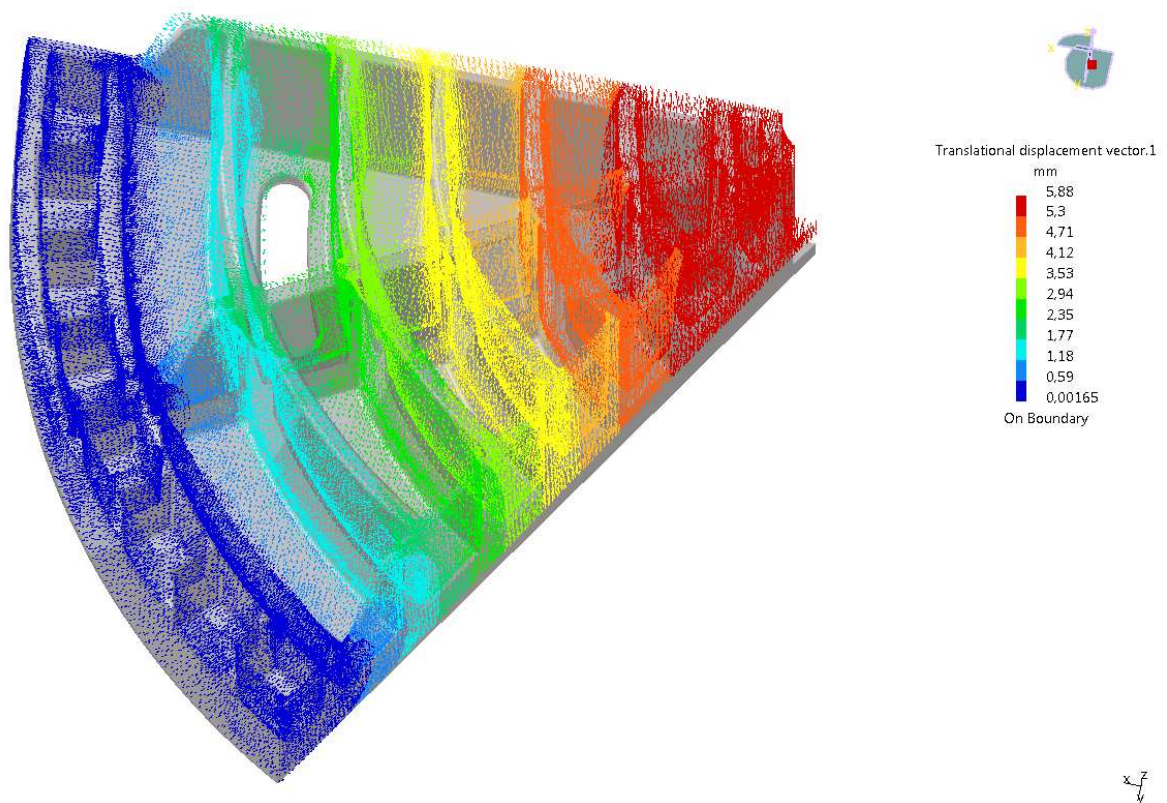
- Tloušťka žeber 10 mm
- Tloušťka desky 10 mm
- Výška žeber 100 mm



Obr. 34. Průběh napětí – model č. 2



Obr. 35. Průběh napětí – model č. 2

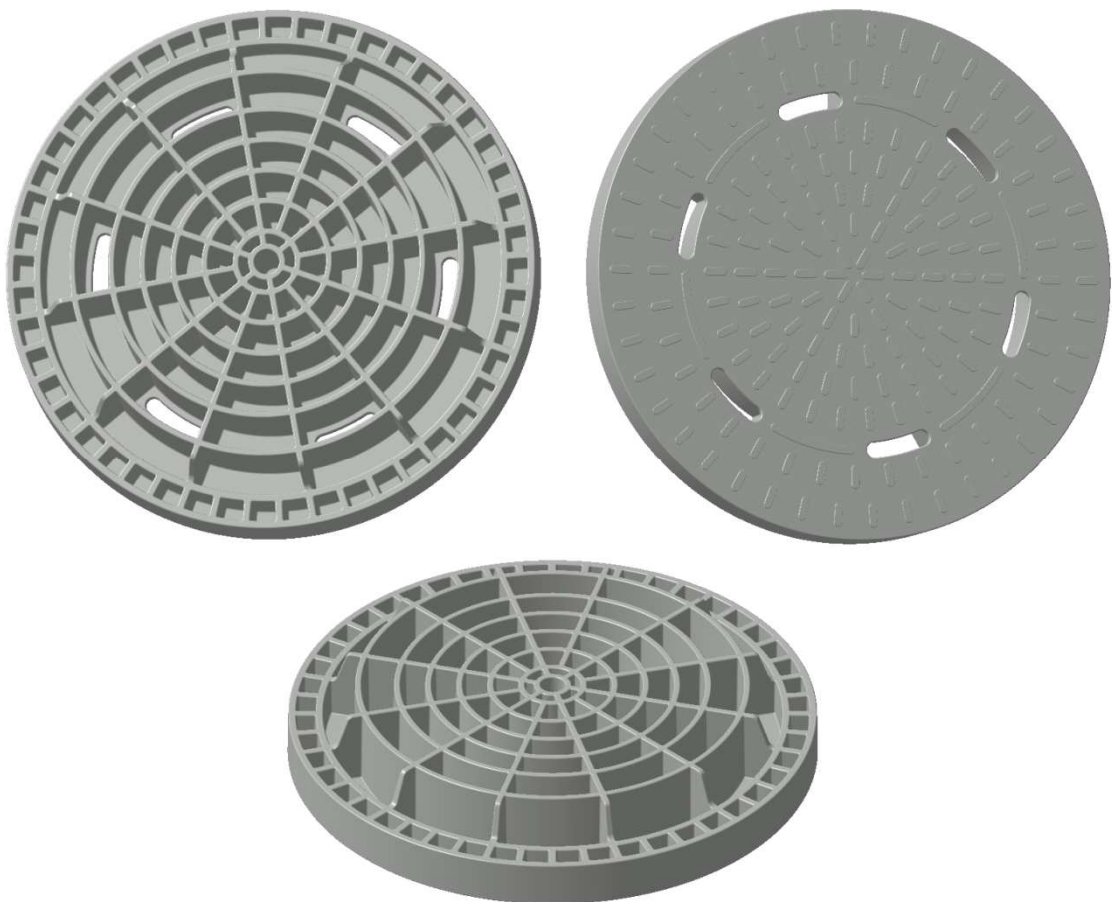


Obr. 36. Průběh deformace – model č. 2

7.4 Úpravy konečného 3D modelu

Modely konečných 3D návrhů musely být upraveny pro praktické použití, obr. 37 ilustruje konečné úpravy modelů. Oblasti úprav byly:

- Vytvoření plochy pro uložení poklopu do rámu, tato operace obnášela odstranění části poklopu a poté ji vyztužit žebry v místě kontaktu s rámem. Výška poklopu v místě dosednutí poklopu a rámu byla určena na 60 mm a průměr 600 mm
- Navržení protiskluzového dezénu na vrchní straně poklopu
- Vytvoření šesti otvorů pro odvod vody z povrchu poklopu
- Odstranění ostrých hran z poklopu zaoblením všech hran



Obr. 37. Konečný 3D model poklopu

Hlavní kóty modelu jsou vyznačeny v příloze P VI a model č. 2 je součástí přílohy P VII na CD disku.

7.5 Zhodnocení 3D lineární analýzy

Z uvedených obrázků konečných 3D modelů poklopů bylo kapitole 6.4 odečteno maximální Von Misesovo napětí, hlavní napětí a deformace.

Maximální dosažené napětí (hodnoty uvedeny v tab. 16) v obou modelech překračuje dovolenou hodnotu meze kluzu 130 MPa. Překročení meze kluzu dochází v místě uložení, kde dochází ke styku poklopu s rámem. Pro posouzení těchto napětíových špiček bylo potřeba znát výsledky hlavního napětí. Z obr. 30 a obr. 33 bylo odečteno hlavní napětí v místě uložení, kde bylo dosaženo lokálních překročení dovoleného napětí. Hodnoty napětí jsou uvedeny v tab. 16. Záporné hodnoty ukazují, že napětíové špičky jsou v oblasti tlaku a bude docházet k otlacení poklopu, proto můžeme tyto lokální extrémny zanedbat a posuzovat Von Misesovo napětí bez uvedených extrémů. Při hodnocení bez extrému můžeme říci, že při normovém zatížení nepřekročí napětí v modelu mez kluzu 130 MPa.

Maximální deformace byla získána z obr. 31 a obr. 34, hodnoty deformace byly velmi podobné lišící se až v řádu desetin mm, což lze považovat za zanedbatelné a z pohledu deformace považovat za shodné.

Poslední sledovanou veličinou byl objem modelů, což je hodnota, které má vliv na množství použitého materiálu při výrobě a tedy na cenu. Model 2 disponuje objemem 13,8 což je o 1,43 dm³ méně než model 1, z pohledu objemu bude preferovaný model č. 2.

Tab. 16. Shrnutí sledovaných hodnoty 3D modelů

	Model 1	Model 2
Von Mises [MPa]	533	593
Hlavní napětí [MPa]	-464	-609
Deformace [mm]	5,94	5,88
Objem [dm ³]	15,23	13,80
Hmotnost [kg]	23,76	21,53

ZÁVĚR

V Teoretické části byly řešeny okruhy znalostí potřebné pro další postup v praktické části, a to zejména mechanické chování polymerů, vlastnosti polymerů, plnění polymerů a technologie vstřikování.

Praktická část diplomové práce se zabývala návrhem vhodné geometrie a 3D modelem poklopů. Při návrhu poklopu se vycházelo ze základních rozměrů kovového rámu. Byla provedena celá řada návrhů, které se postupně dolad'ovaly až do výsledné předložené podoby. V průběhu navrhování se objevila celá řada problémů, který bylo potřeba odstranit.

Problémy nastaly při 2D parametrické analýze při uložení geometrie a simulování předpokládaného chování poklopu při deformaci. Problém byl vyřešen vložením nového souřadného systému a uložení geometrie v cylindrických souřadnicích. Druhý problém nastal u 3D lineární analýze při odečítání Von Misesova napětí, docházelo v místě uložení poklopu v rámu k lokálním extrémům. Zanedbání těchto napět'ových špiček umožnilo až odečtení hodnot hlavního napětí, které ukázalo, že extrémny se pohybují v tlakové oblasti.

Cílem výpočtů byl pokus o predikci výsledků experimentálních zkoušek, tj. odhadnout zde dané zkušební zatížení bude na mezi porušení (destrukce) poklopu. Ve 2D parametrické analýze proběhlo několik návrhů, z nichž byly vybrány dvě varianty do další 3D analýzy. Pro 3D analýzu bylo potřeba vymodelovat reálné modely obou variant. Z důvodu ušetření času při výpočtu a symetrie poklopu mohl být výpočet prováděn jen na šestině poklopu.

V konečných 3D poklopech nedošlo k překročení dovoleného napětí na mezi kluzu při zanedbání extrémů v místě uložení, jak bylo popsáno v kapitole 7.5. Deformace se výrazně nelišily, proto rozhodující sledovanou veličinou byl objem. Model č. 2 s nižším objem byl zvolen jako konečná výsledná varianta, která vyhovuje všem uvedeným požadavkům.

Výsledky výpočtů opravňují kvalifikovaně odhadovat, že navržené poklopy by při zkušebním testu odolaly porušení při normovém zatížení 400 N.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Šuba, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [2] Šuba, Oldřich. *Mechanické chování těles*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. ISBN 978-80-7318-792-7.
- [3] Šuba, Oldřich. *Mechanika polymerů a kompozitů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011. ISBN 978-80-7454-015-8.
- [4] Zeman, Lubomír. *Vstřikování plastů*. Praha: BEN, 2009. ISBN 978-80-7300-250-3
- [5] Technik.iHNed: *Začalo století plastů* [online]. Srpen 12, 2002, 11:30 [cit. 2012-5-7]. Dostupné z <http://technik.ihned.cz/c1-11352820-zacalo-stoleti-plastu>
- [6] ČSN EN 124. *Poklopy a vtokové mříže pro dopravní plochy – Konstrukční zásady, zkoušení, označování, řízení jakosti*. Praha: Český normalizační institut, 1996. 39 s.
- [7] Leiveber, Jan a Vávra, Pavel. *Strojnické tabulky*. Praha: Albra, 2007. ISBN 978-80-7361-051-7.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

- $\tau_{ij}; \tau_{ji}$ Smykové složky tenzoru napjatosti.
- [A] Matice směrových cosinů.
- $[A]^T$ Matice směrových cosinů v pootočeném souřadném systému.
- ν Poissonova konstanta.
- e Poměrná změna objemu.
- p Tlak.
- ε Relativní deformace.
- σ Tahové napětí.
- τ Smykové napětí.
- G Modul pružnosti ve smyku.
- E Modul pružnosti v tahu.
- γ Smyková deformace.
- K Objemový modul pružnosti.
- W Měrná energie napjatosti.
- M Ohybový moment.
- J Kvadratický moment průřezu.
- W_o Modul průřezu v ohybu.
- M_m Mezní ohybový moment.
- r Poloměr.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Složky prostorové napjatosti [1]</i>	23
<i>Obr. 2. Deformace elementu [1]</i>	25
<i>Obr. 3. Hydrostatická napjatost [1]</i>	25
<i>Obr. 4. Rozdělení obecné napjatosti [1]</i>	26
<i>Obr. 5. Diagram $\sigma - \varepsilon$ [1]</i>	28
<i>Obr. 6. Obecný průřez zatížený momentem [1]</i>	29
<i>Obr. 7. Zkouška ohybem kruhové desky [1]</i>	31
<i>Obr. 8. Zatížená kruhová deska [1]</i>	32
<i>Obr. 9. Výsledky analýz [1]</i>	33
<i>Obr. 10. Vztahy mezi typy tlaků při vstřikování [4]</i>	42
<i>Obr. 11. Vstřikovací cyklus</i>	44
<i>Obr. 12. Rozměry formy [4]</i>	45
<i>Obr. 13. Důležité rozměry formy pro její upnutí do stroje [4]</i>	45
<i>Obr. 14. Upínací rozměry vstřikovacího stroje [4]</i>	46
<i>Obr. 15. Spojení vstřikovacího stroje a formy (možné problémy) [4]</i>	48
<i>Obr. 16. Uložení poklopu</i>	56
<i>Obr. 17. Zatížení poklopu</i>	57
<i>Obr. 18. FEM síť</i>	57
<i>Obr. 19. Materiálové charakteristiky</i>	58
<i>Obr. 20. Souřadný systém</i>	59
<i>Obr. 21. Komerční poklop – horní pohled</i>	60
<i>Obr. 22. Komerční poklop – spodní pohled</i>	60
<i>Obr. 23. Schéma geometrie č. 1 (výška žeber 80 mm)</i>	61
<i>Obr. 24. Schéma geometrie č. 2 (výška žeber 80 mm)</i>	65
<i>Obr. 25. Schéma geometrie č. 3 (výška žeber 80 mm)</i>	69
<i>Obr. 26. Schéma geometrie č. 4 (výška žeber 80 mm)</i>	74
<i>Obr. 27. Schéma geometrie č. 5 (výška žeber 80 mm)</i>	79
<i>Obr. 28. Schéma geometrie č. 6 (výška žeber 90 mm)</i>	84
<i>Obr. 29. Schéma geometrie č. 7 (výška žeber 100 mm)</i>	89
<i>Obr. 30. Šestiny poklopu pro analýzu (levý – model č. 1; pravý – model č. 2)</i>	97
<i>Obr. 31. Průběh napětí – model č. 1</i>	98
<i>Obr. 32. Průběh hlavního napětí – model č. 1</i>	99

<i>Obr. 33. Průběh deformace – model č. 1</i>	99
<i>Obr. 34. Průběh napětí – model č. 2</i>	100
<i>Obr. 35. Průběh napětí – model č. 2</i>	101
<i>Obr. 36. Průběh deformace – model č. 2</i>	101
<i>Obr. 37. Konečný 3D model poklopu</i>	102

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Vliv tvaru plniva na vlastnosti termoplastů [4]</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 2. Vlastnosti plniv do kompozitních materiálů s termoplastickou maticí [4]</i>	<i>22</i>
<i>Tab. 3. Seznam definic</i>	<i>52</i>
<i>Tab. 4. Zkušební zatížení.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 5. Rozměry zkušebního nástroje</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 6. Mezní trvalé přetvoření</i>	<i>55</i>
<i>Tab. 7. Materiálová charakteristiky</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 8. Hodnoty geometrie č. 1.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 9. Hodnoty geometrie č. 2.....</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 10. Hodnoty geometrie č. 3.....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 11. Hodnoty geometrie č. 4.....</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 12. Hodnoty geometrie č. 5.....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 13. Hodnoty geometrie č. 6.....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 14. Hodnoty geometrie č. 7.....</i>	<i>90</i>
<i>Tab. 15. Vybrané nejvhodnější návrhy</i>	<i>96</i>
<i>Tab. 16. Shrnutí sledovaných hodnoty 3D modelů</i>	<i>103</i>

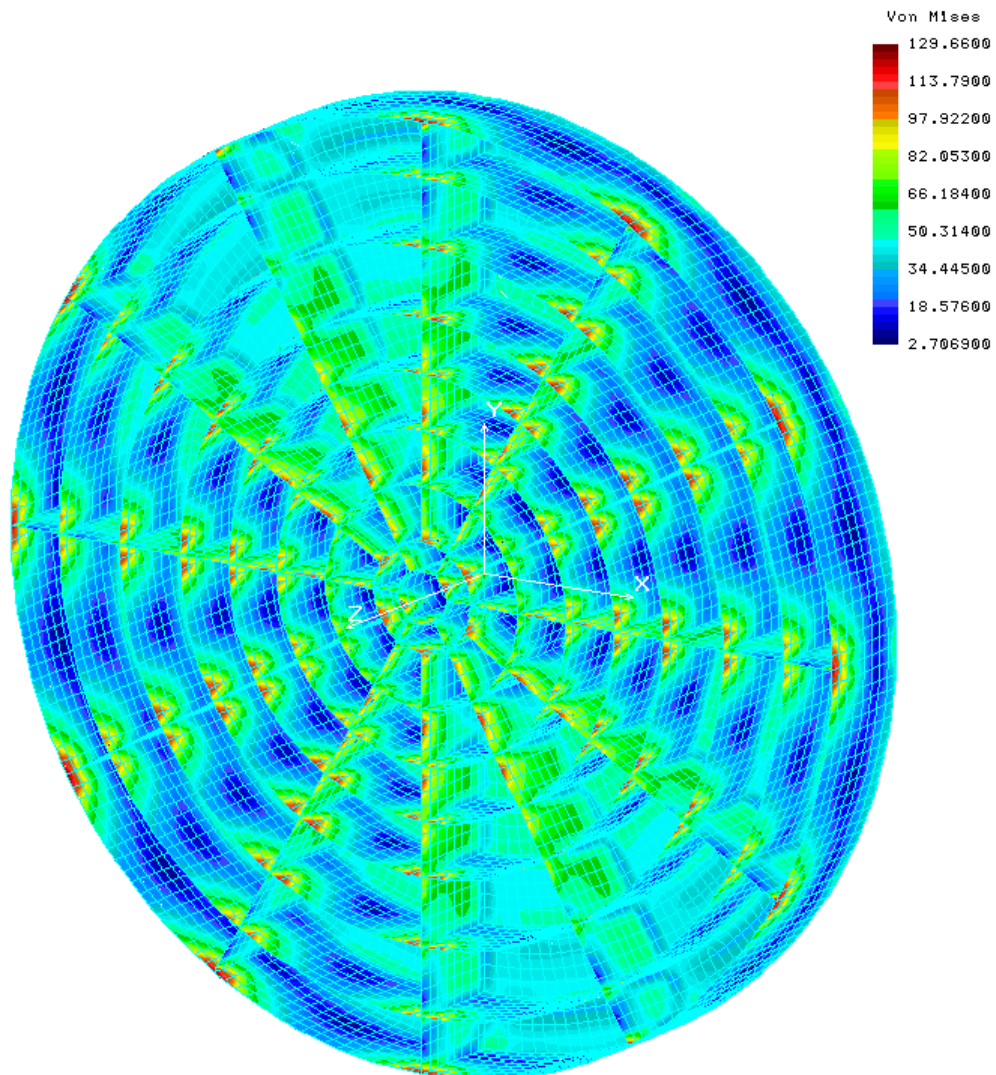
SEZNAM GRAFŮ

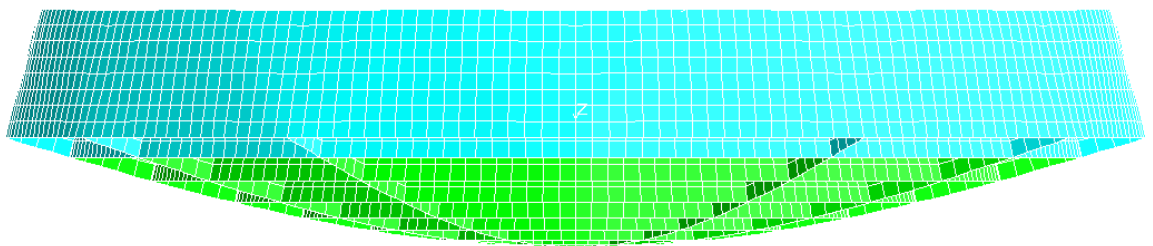
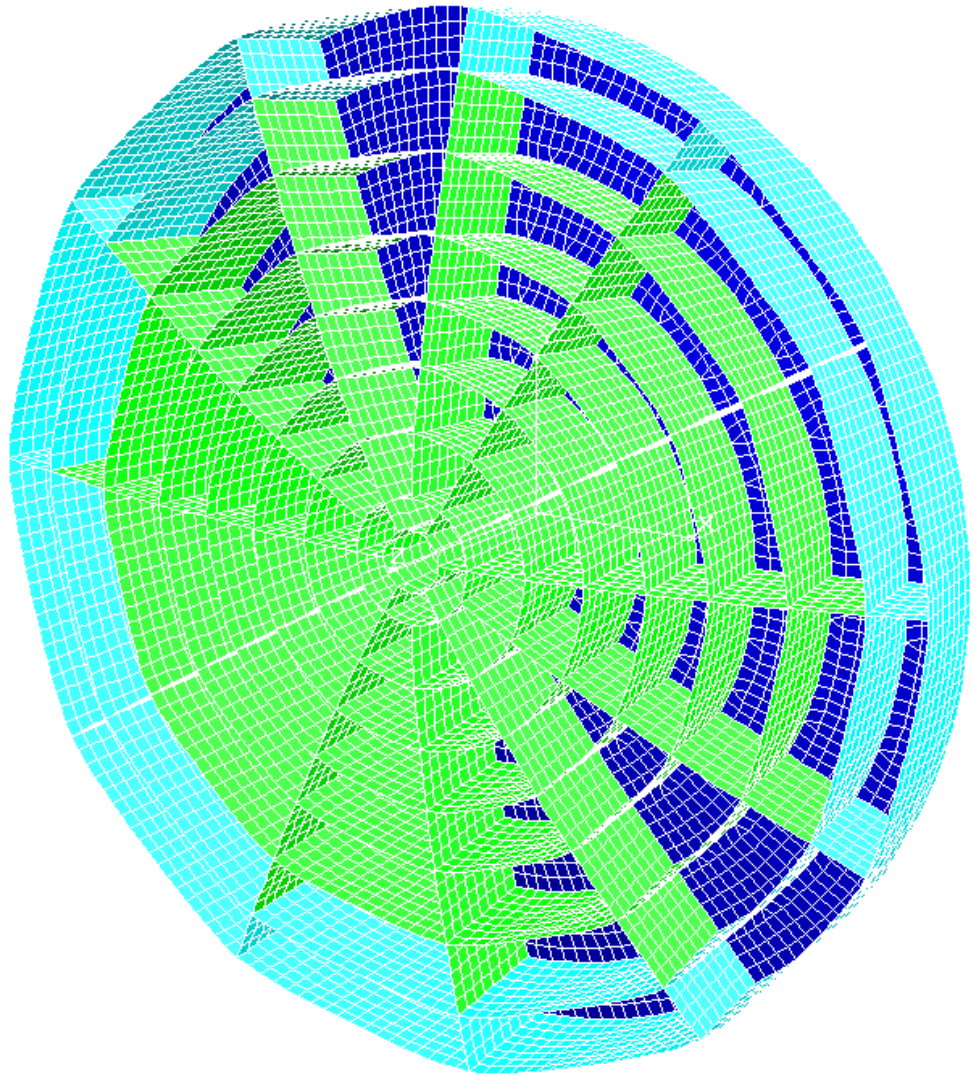
<i>Graf 1. Závislost napětí na tloušťce desky č. 1</i>	62
<i>Graf 2. Závislost deformace na tloušťce desky č. 1</i>	63
<i>Graf 3. Závislost objemu na tloušťce desky č. 1</i>	64
<i>Graf 4. Závislost napětí na tloušťce desky č. 2</i>	66
<i>Graf 5. Závislost deformace na tloušťce desky č. 2</i>	67
<i>Graf 6. Závislost objemu na tloušťce desky č. 2</i>	68
<i>Graf 7. Závislost napětí na tloušťce desky č. 3</i>	71
<i>Graf 8. Závislost deformace na tloušťce desky č. 3</i>	72
<i>Graf 9. Závislost objemu na tloušťce desky č. 3</i>	73
<i>Graf 10. Závislost napětí na tloušťce desky č. 4</i>	76
<i>Graf 11. Závislost deformace na tloušťce desky č. 4</i>	77
<i>Graf 12. Závislost objemu na tloušťce desky č. 4</i>	78
<i>Graf 13. Závislost napětí na tloušťce desky č. 5</i>	81
<i>Graf 14. Závislost deformace na tloušťce desky č. 5</i>	82
<i>Graf 15. Závislost objemu na tloušťce desky č. 5</i>	83
<i>Graf 16. Závislost napětí na tloušťce desky č. 6</i>	86
<i>Graf 17. Závislost deformace na tloušťce desky č. 6</i>	87
<i>Graf 18. Závislost objemu na tloušťce desky č. 6</i>	88
<i>Graf 19. Závislost napětí na tloušťce desky č. 7</i>	91
<i>Graf 20. Závislost deformace na tloušťce desky č. 7</i>	92
<i>Graf 21. Závislost objemu na tloušťce desky č. 7</i>	93
<i>Graf 22. Nalezení ideálního řešení</i>	95

SEZNAM PŘÍLOH

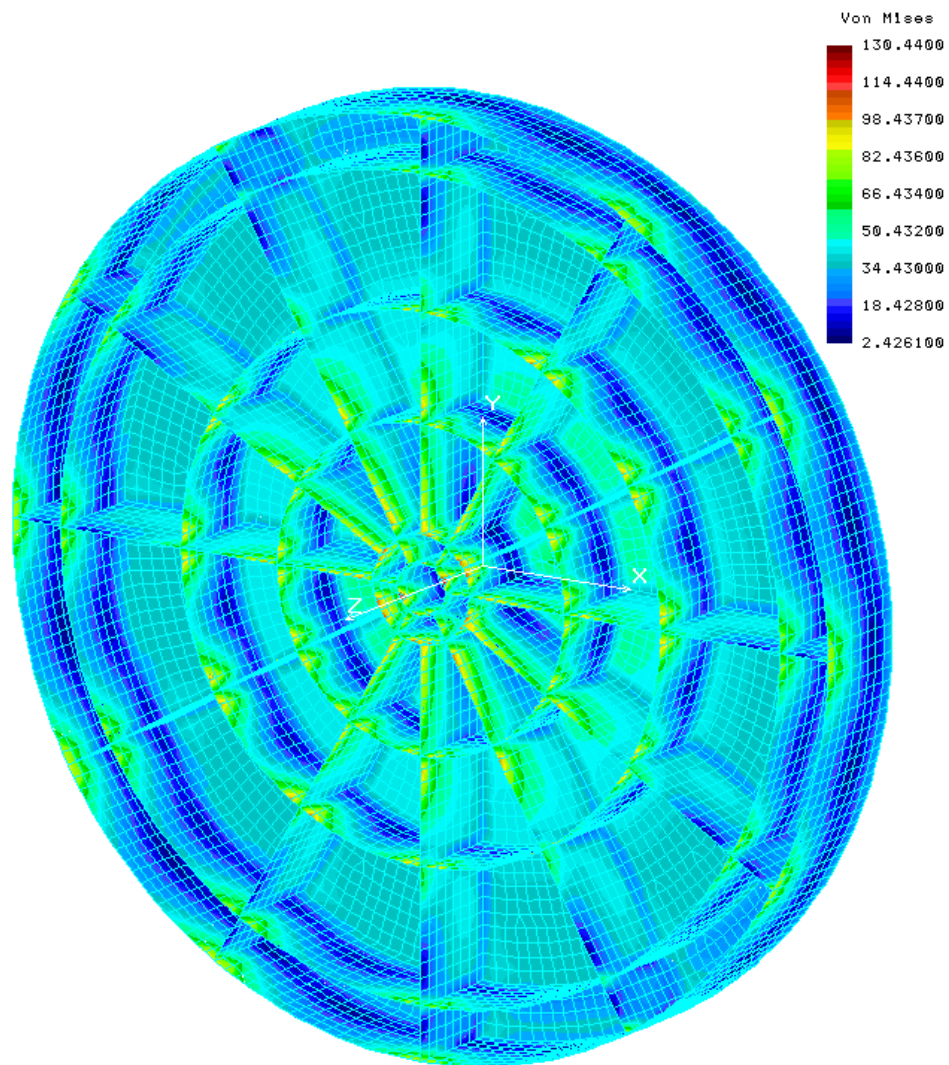
- P I Vykreslení napětí a deformace vybrané varianty z geometrie č. 3
- P II Vykreslení napětí vybrané varianty z geometrie č. 4
- P III Vykreslení napětí vybrané varianty z geometrie č. 5
- P IV Vykreslení napětí vybrané varianty z geometrie č. 6
- P V Vykreslení napětí a deformace vybrané varianty z geometrie č. 7
- P VI Výkres modelu poklopu č. 2
- P VII CD disk

PŘÍLOHA P I: VYKRESLENÍ NAPĚTÍ A DEFORMACE VYBRANÉ VARIANTY Z GEOMETRIE Č. 3

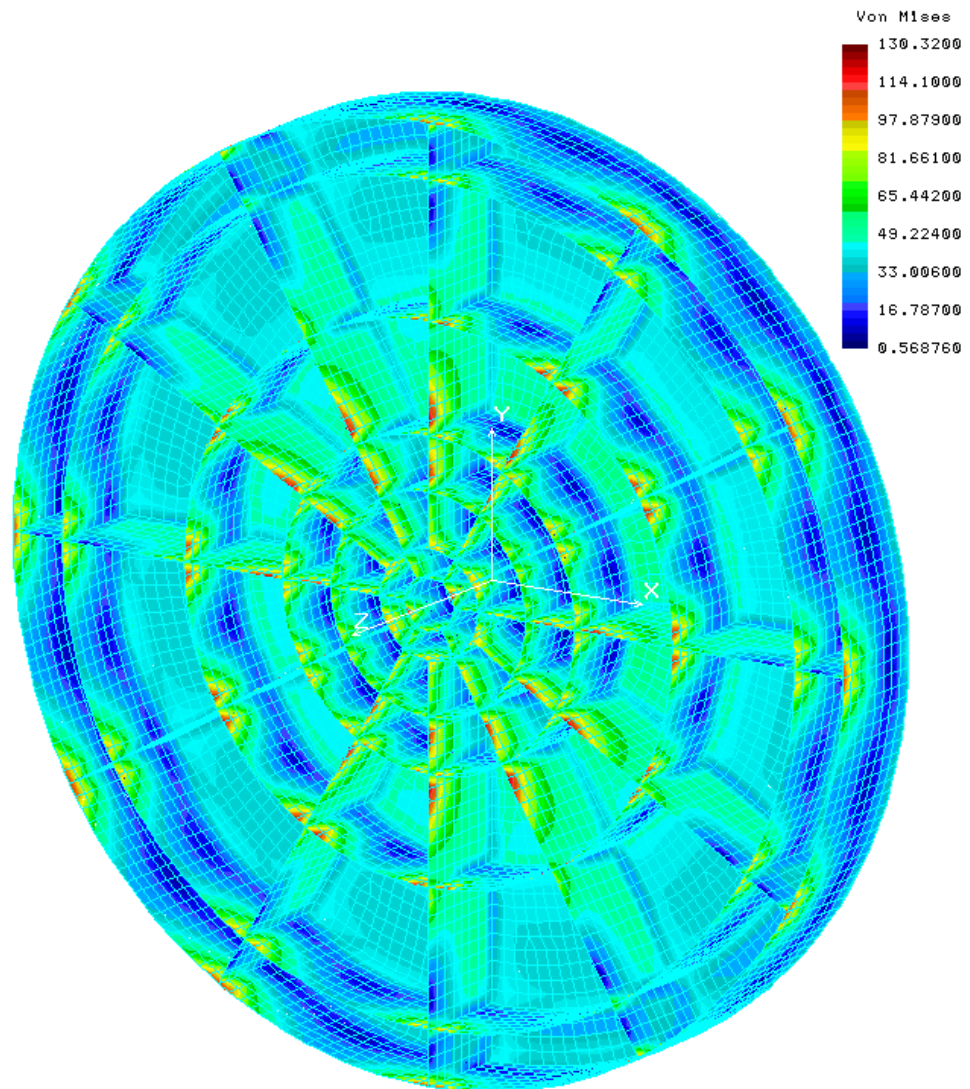




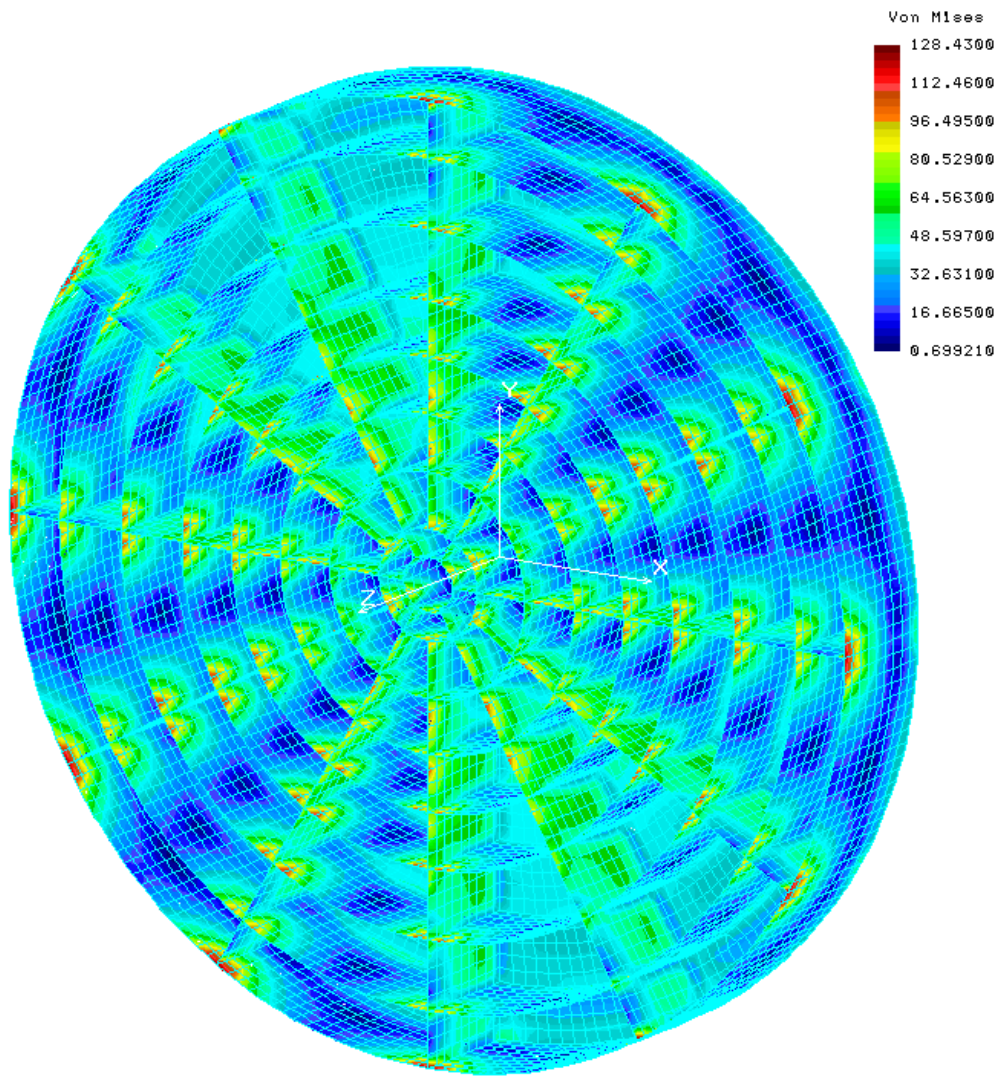
PŘÍLOHA P II: VYKRESLENÍ NAPĚTÍ VYBRANÉ VARIANTY Z GEOMETRIE Č. 4



PŘÍLOHA P III: VYKRESLENÍ NAPĚTÍ VYBRANÉ VARIANTY Z GEOMETRIE Č. 5



PŘÍLOHA P IV: VYKRESLENÍ NAPĚTÍ VYBRANÉ VARIANTY Z GEOMETRIE Č. 6



**PŘÍLOHA P V: VYKRESLENÍ NAPĚTÍ A DEFORMACE VYBRANÉ
VARIANTY Z GEOMETRIE Č. 7**

