



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav mechaniky – Odbor pružnosti a pevnosti

**Analýza stavu napjatosti a prokluzů násobně nalisovaného spoje při
kombinovaném namáhání**

**The stress state and slip-fold analyses of the interference fit at the combined
stress**

diplomová práce

Autor práce: Jiří Černý

Vedoucí práce: Ing. Karel Vitek, Csc.

Praha 2015

Anotační list

Jméno autora:	Jiří ČERNÝ
Název DP:	Analýza stavu napjatosti a prokluzů násobně nalisovaného spoje při kombinovaném namáhání
Anglický název:	The stress state and slip-fold analyses of the interference fit at the combined stress
Rok:	2015
Obor studia:	Aplikovaná mechanika
Ústav/odbor:	12105.1 - Ústav mechaniky / Odbor pružnosti a pevnosti
Vedoucí práce:	Ing. Karel Vítek, Csc.
Konzultant:	Ing. Jiří Kuželka, Ph.D.
Bibliografické údaje:	Počet stran 79 Počet obrázků 108 Počet tabulek 3 Počet příloh 0
Klíčová slova:	nalisované spoje, analýza mechanických vlastností, distanční vložka
Keywords:	crimp connection, analysis of mechanical properties, spacing tube
Anotace:	Práce se zabývá mechanickými vlastnostmi násobně nalisovaného spoje při kombinovaném namáhání. Je zde zkoumán vliv úpravy distanční vložky na průběhy napětí a průběhy prokluzů.
Abstract:	The work deals with mechanical properties of the interference fit under the combined stress. The impact of spacing tube modification on the slip and stress state is analyzed.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně výhradně s použitím literatury uvedené v seznamu na konci práce.

V Praze dne 29.6.2015

.....

Podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Karlovi Vítkovi, CSc. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce. Ing. Jiřímu Kuželkovi, Ph.D za odborné konzultace k programu ABAQUS. Můj dík patří rovněž rodině za podporu při studiu a tvorbu potřebného zázemí.

SEZNAM POUŽITÝCH OZNAČENÍ A SYMBOLŮ.....	6
ÚVOD	8
1 STAV PROBLEMATIKY NALISOVANÉHO SPOJE.....	10
1.1 ANALÝZA NALISOVANÉHO SPOJE NAMÁHANÉHO KOMBINACÍ OHYBU A KRUTU.....	10
1.2 ANALÝZA OBJÍMKY.....	11
1.3 ANALÝZA HRÍDELE	14
1.4 ANALÝZA PROKLUZU	15
1.5 NAPIJATOST ELEMENTU PŘI KOMBINOVANÉM NAMÁHÁNÍ NALISOVANÉHO SPOJE	20
1.6 VLIV PŘESAHU NA VELIKOST PROKLUZU A STAV NAPIJATOSTI	22
1.7 VLIV ZMĚNY GEOMETRIE OBJÍMKY NA NAPĚŤOVÉ ŠPIČKY	22
1.8 NÁSOBNĚ NALISOVANÝ SPOJ	24
2 TEORETICKÉ VÝPOČTY NÁSOBNĚ NALISOVANÉHO SPOJE.....	26
2.1 OPTIMÁLNĚ NÁSOBNĚ NALISOVANÁ NÁDOBA.....	26
2.2 REDUKCE PŘESAHU NA POLOMĚRU R_2	28
2.3 REDUKCE PŘESAHU NA POLOMĚRU R_2 PŘI ZACHOVÁNÍ DOVOLENÉHO NAPĚTÍ NA NÁBOJI	31
2.4 REDUKCE PŘESAHU NA POLOMĚRU R_3 PŘI ZACHOVÁNÍ DOVOLENÉHO NAPĚTÍ NA VLOŽCE.....	34
2.5 KONTAKTNÍ TLAKY V ZÁVISLOSTI NA PŘESAZÍCH.....	38
2.6 SHODNÁ SCHOPNOST PŘENOSU KROUTÍCÍHO MOMENTU M_k	38
2.7 PARCIÁLNÍ DERIVACE KONTAKTNÍCH TLAKŮ	39
3 MKP ANALÝZA NÁSOBNĚ NALISOVANÉHO SPOJE	42
3.1 ZKOUMANÁ MÍSTA MODELU	44
3.2 ZMĚNA GEOMETRIE DÍLANČNÍ VLOŽKY	45
3.3 ANALÝZA SPOJE PRO RŮZNÉ GEOMETRIE DÍLANČNÍ VLOŽKY	46
3.4 ANALÝZA REDUKOVANÉHO NAPĚTÍ.....	46
3.5 VYHODNOCENÍ CHOVÁNÍ NAPĚTÍ PŘI ZMĚNĚ GEOMETRIE VLOŽKY	52
3.6 ANALÝZA PROKLUZŮ	52
3.7 TEČNÝ PROKLUZ	53
3.8 OSOVÝ PROKLUZ	56
3.9 VYHODNOCENÍ CHOVÁNÍ PROKLUZŮ PŘI ZMĚNĚ GEOMETRIE VLOŽKY	59
4 MKP ANALÝZA NÁSOBNĚ NALISOVANÉHO SPOJE S DĚLENOU VLOŽKOU	60
4.1 ROZDÍL V NAPIJATOSTI VÝCHOZÍ GEOMETRIE S DĚLENOU A NEDĚLENOU VLOŽKOU	61
4.2 ROZDÍL V PROKLUZECH VÝCHOZÍ GEOMETRIE S DĚLENOU A NEDĚLENOU VLOŽKOU.....	63
4.3 VYHODNOCENÍ CHOVÁNÍ NÁSOBNĚ NALISOVANÉHO SPOJE S DĚLENOU VLOŽKOU	65
5 MKP ANALÝZA NÁSOBNĚ NALISOVANÉHO SPOJE S UKOTVENOU VLOŽKOU	66
5.1 ROZDÍL V NAPIJATOSTI VÝCHOZÍ GEOMETRIE S NEUKOTVENOU A UKOTVENOU VLOŽKOU	67
5.2 ROZDÍL V PROKLUZECH VÝCHOZÍ GEOMETRIE S NEUKOTVENOU A UKOTVENOU VLOŽKOU	72
5.3 VYHODNOCENÍ CHOVÁNÍ NÁSOBNĚ NALISOVANÉHO SPOJE S UKOTVENOU VLOŽKOU	74
6 CHOVÁNÍ MODELU PŘI ZJEMNĚNÍ SÍTĚ	75
7 ZÁVĚR.....	77
BIBLIOGRAFIE	79

Seznam použitých označení a symbolů

označení	význam	jednotky
σ_o	Osové napětí	[MPa]
σ_r	Radiální napětí	[MPa]
σ_t	Tečné napětí	[MPa]
τ_k	Smykové napětí	[MPa]
τ_{to}	Osové třecí napětí	[MPa]
τ_{tk}	Tečné třecí napětí	[MPa]
M_o	Ohybový moment	[Nmm]
M_k	Kroutící moment	[Nmm]
r_1	Vnitřní poloměr hřídele	[mm]
r_2	Vnější poloměr hřídele, vnitřní poloměr distanční vložky	[mm]
r_3	Vnější poloměr distanční vložky, vnitřní poloměr náboje	[mm]
r_4	Vnější poloměr náboje	[mm]
p_1	Kontaktní tlak na poloměru r_1	[MPa]
p_2	Kontaktní tlak na poloměru r_2	[MPa]
p_3	Kontaktní tlak na poloměru r_3	[MPa]
p_4	Kontaktní tlak na poloměru r_4	[MPa]
σ_{dov}	Dovolené napětí	[MPa]
σ_{red}	Redukované napětí	[MPa]
Δr_2	Přesah hřídele vůči distanční vložce	[mm]
Δr_3	Přesah distanční vložky vůči náboji	[mm]
μ	Poissonovo číslo	[-]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]

Úvod

Nalisování je jedna ze základních metod vytvoření rozebíratelného spoje hřídele s nábojem. Nalisování je obvykle dimenzováno tak, že dochází k elastické deformaci obou dílů a ustálení jejich původních rozdílných průměrů na průměru společném. Při tomto jevu vzniká mezi díly radiální napětí, tlak v jehož důsledku ve spoji vzniká třecí síla, která drží namáhaný spoj pohromadě [1].

Výhodou nalisovaného spoje je jednoduchost konstrukce. Ke spojení dílů není potřeba žádný další pomocný díl. Za další výhodu se považuje vysoká únosnost spoje. Díky těmto kladům má nalisovaný spoj v konstrukcích celou řadu uplatnění. Používá se k upevnění ozubených kol, řemenic, spojek a na tomto principu k uložení dalších součástí [1].

Nevýhodou nalisovaného spoje je náročnost na přesnost výroby dílů ve spoji. Pokud chceme ve spoji dosáhnout určitých požadovaných napětí, je třeba vyrobít hřídel i náboj s určitým a přesně tolerovaným kontaktním průměrem. Tuto nevýhodu lze částečně eliminovat použitím distanční vložky. Distanční vložka je další díl spoje, který je nalisován mezi hřídel a náboj. Mluvíme tak o násobně nalisovaném spoji. Výhodou násobně nalisovaného spoje je možnost použití standardizovaných dílů pouze s dodatečnou výrobou distanční vložky o rozměrech zjištěných dle velikostí již vyrobeného hřídele a náboje.

V této diplomové práci se právě problematice kontaktní úlohy násobně nalisovaného spoje, tedy spoje s použitím distanční vložky, věnuji. Navíc se zabývám i patentovanou variantou podélně dělené distanční vložky [2]. Ta má výhodu v jejím snadnějším nalisování.

Cílem této diplomové práce je za pomoci elastického modelu analyzovat průběhy napětí a průběhy prokluzů v kombinovaně namáhaném násobně nalisovaném spoji při různých geometrických úpravách distanční vložky pro konkrétní vybranou konstrukci.

V první kapitole je zaznamenán souhrn získaných poznatků o nalisovaných spojích z mé bakalářské práce a z již publikovaných bakalářských prací mých kolegů. Uvedený souhrn mi dává přehled o problematice nalisovaných spojů a slouží jako výchozí bod pro analýzu spoje násobně nalisovaného.

V kapitole „Teoretické výpočty násobně nalisovaného spoje“ se zabývám teoretickým chováním spoje s distanční vložkou. Především jsem zde ukázal, jak se mění průběhy napětí při změnách přesahů mezi vložkou, hřídelí a nábojem.

V kapitole „MKP (metoda konečných prvků) analýza násobně nalisovaného spoje“ prezentuji výstupy z analýz mnou vytvořených modelů nalisovaných spojů s různě upravenou geometrií distanční vložky. Násobně nalisované spoje jsou namáhány kombinací ohybového a kroutícího momentu.

V kapitole „MKP analýza násobně nalisovaného spoje s dělenou vložkou“ zkoumám možnost užití dělené distanční vložky v násobně nalisovaném spoji.

V kapitole „MKP analýza násobně nalisovaného spoje s ukotvenou vložkou“ analyzuji možnost ukotvení distanční vložky k hřídeli za pomoci koutového svaru. Zkoumám vliv takto upraveného spoje na průběh napětí a prokluzů oproti spoji neupravenému.

V kapitole „Chování modelu při zjemnění sítě“ zkoumám vliv jemnosti sítě na průběh vybraných lokálních napěťových špiček.

1 Stav problematiky nalisovaného spoje

Kapitola slouží především jako souhrn získaných poznatků z mé bakalářské práce a bakalářských prací mých kolegů, kteří se problematikou nalisovaného spoje zabývali.

1.1 Analýza nalisovaného spoje namáhaného kombinací ohybu a krutu

Analýzou nalisované objímky na hřídeli namáhané kombinací ohybu a krutu, se ve své bakalářské práci zabývá Libor Navrátil[3]. Navazuje tak na bakalářskou práci Jana Perníčka [4], který se zaměřil na namáhání krutem, a mojí bakalářskou práci [1], ve které jsem se soustředil na spoj namáhaný pouze ohybem.

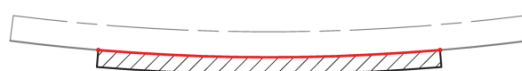
Schéma modelu, se kterým Libor Navrátil pracoval, spolu s hodnotami vnějšího zatížení je na obr. 1.5. Model byl vytvořen v programu ABAQUS (obr. 1.6) [3].

Nejkritičtější místo modelu se nachází v místě styku objímky s hřídelí. Po zavedení ohybového momentu je ideální rozbor čtyř důležitých vláken v rovině momentu [1].

- Vlákna na vnitřní straně objímky namáhaného na tlak (obr. 1.1).
- Vlákna na vnitřní straně objímky namáhaného na tah (obr. 1.2).
- Vlákna na vnější straně hřídele namáhaného na tlak (obr. 1.3).
- Vlákna na vnější straně hřídele namáhaného na tah (obr. 1.4).



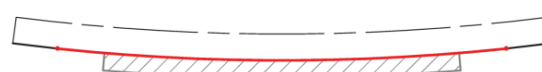
Obr. 1.1: Vlákno na vnitřní straně objímky namáhané na tlak [1]



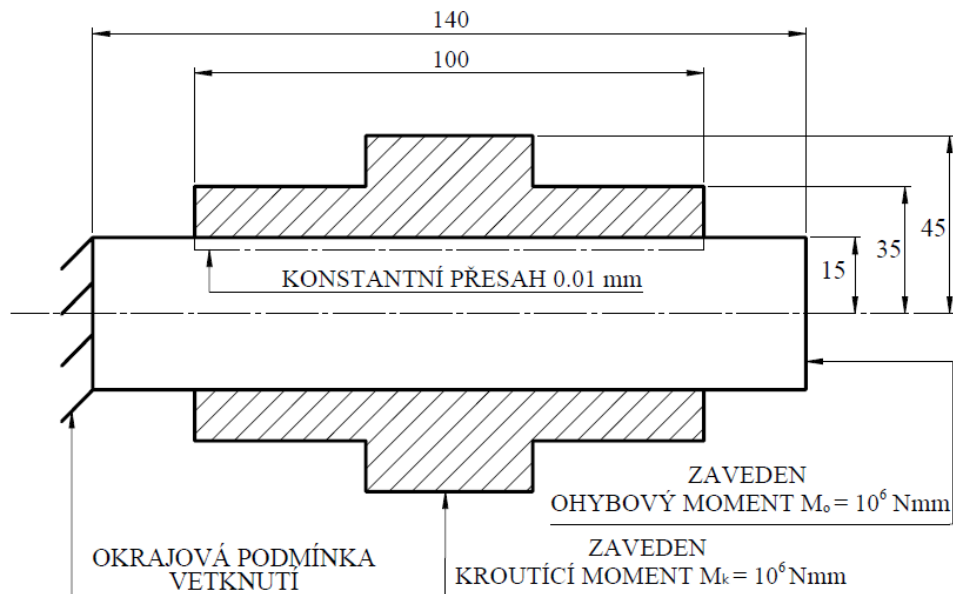
Obr. 1.2: Vlákno na vnitřní straně objímky namáhané na tah [1]



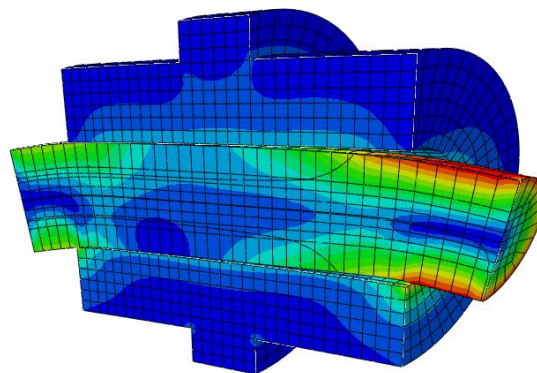
Obr. 1.3: Vlákno na vnější straně hřídele namáhané na tlak [1]



Obr. 1.4: Vlákno na vnější straně hřídele namáhané na tah [1]



Obr. 1.5: Schéma modelu nalisovaného spoje [3]

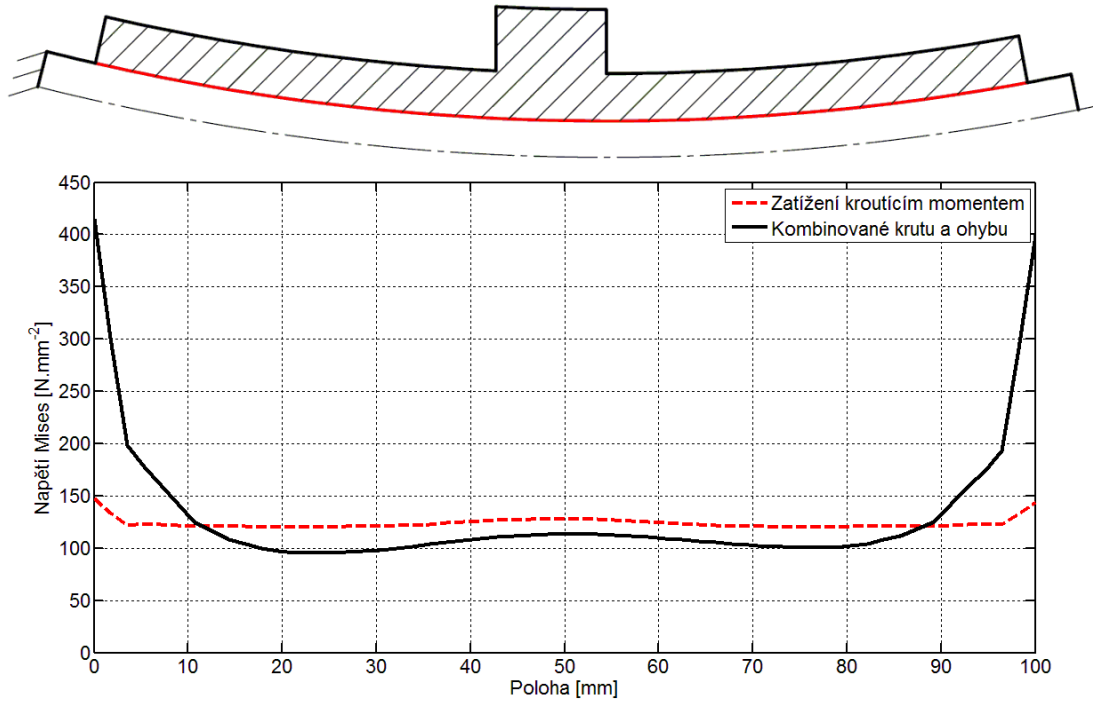


Obr. 1.6: Znáznorněné redukované napětí po zatížení modelu [3]

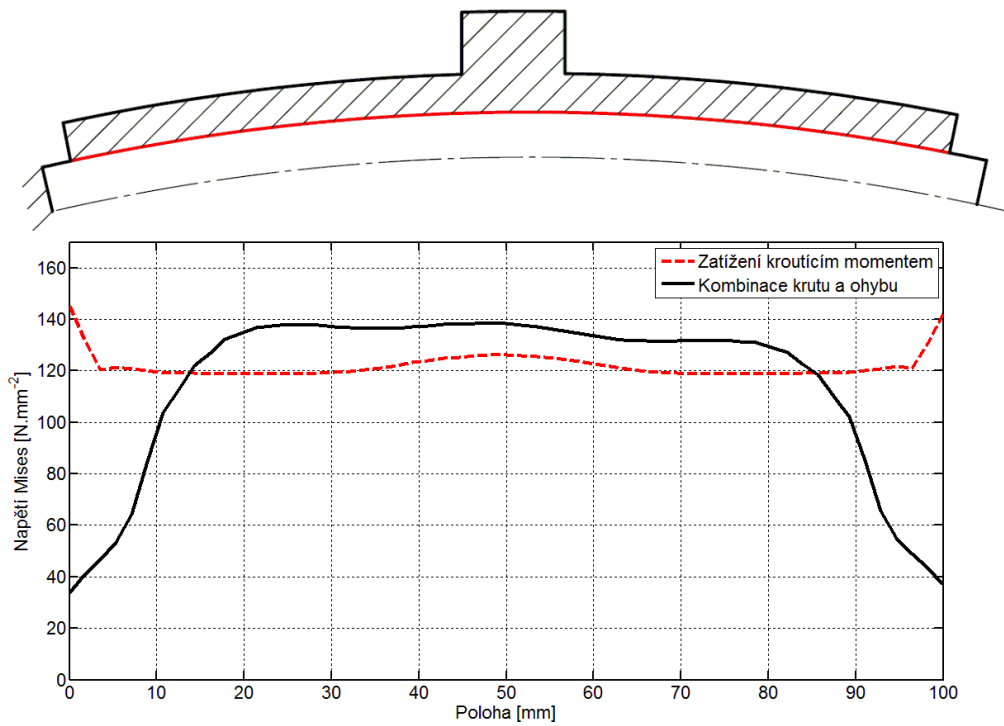
1.2 Analýza objímky

Na obr. 1.7 a obr. 1.8 je zobrazen průběh redukovaného napětí na objímce. Model byl nejdříve zatížen kroučícím momentem, posléze byl zatížen i o moment ohybový. V důsledku nehomogenity tuhosti objímky vznikají na jejím okraji napěťové špičky již při samotném nalisování. Na okrajích objímky je menší tuhost než na jejím středu. Po zavedení ohybového momentu vstupuje do role i deformace hřídele a s tou související změna vůle mezi hřídelí a objímkou (obr. 1.9 a obr. 1.10) [3].

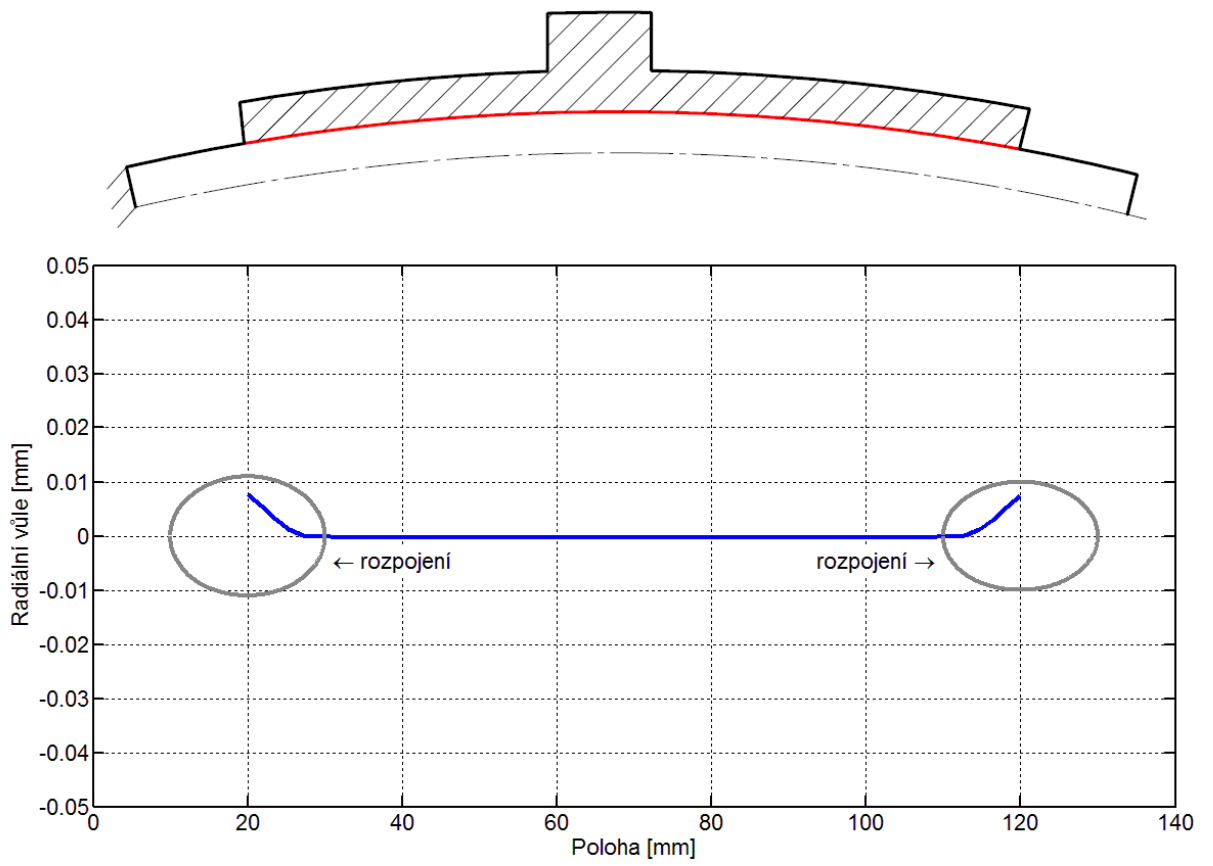
Z analýzy je vidět, že napěťové špičky ve vlákně namáhaném na tlak dosahují několikanásobně větších hodnot než je napětí uprostřed spoje. Tyto špičky snižují únosnost spoje [3].



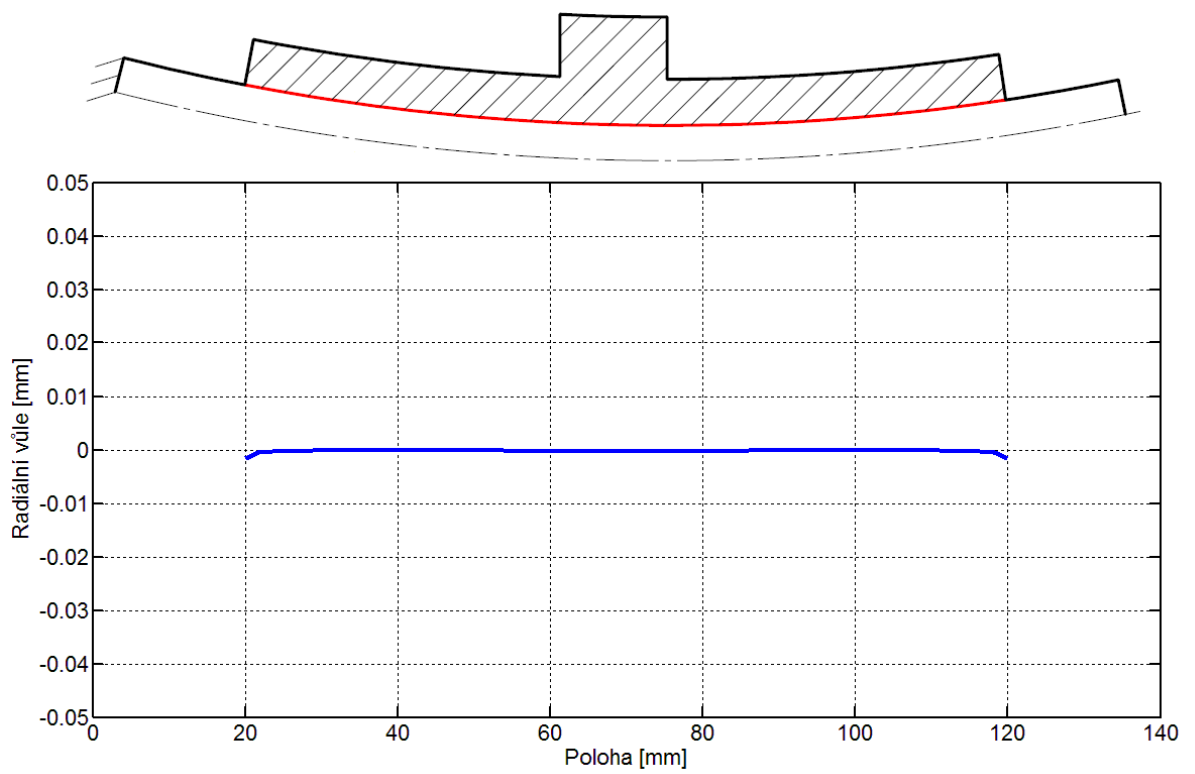
Obr. 1.7: Průběh redukovaného napětí na vlákne objímky namáhaném na tlak [3]



Obr. 1.8: Průběh redukovaného napětí na vlákne objímky namáhaném na tah [3]



Obr. 1.9: Průběh vůle mezi objímkou a hřídelí na vlákně namáhaném na tah [3]

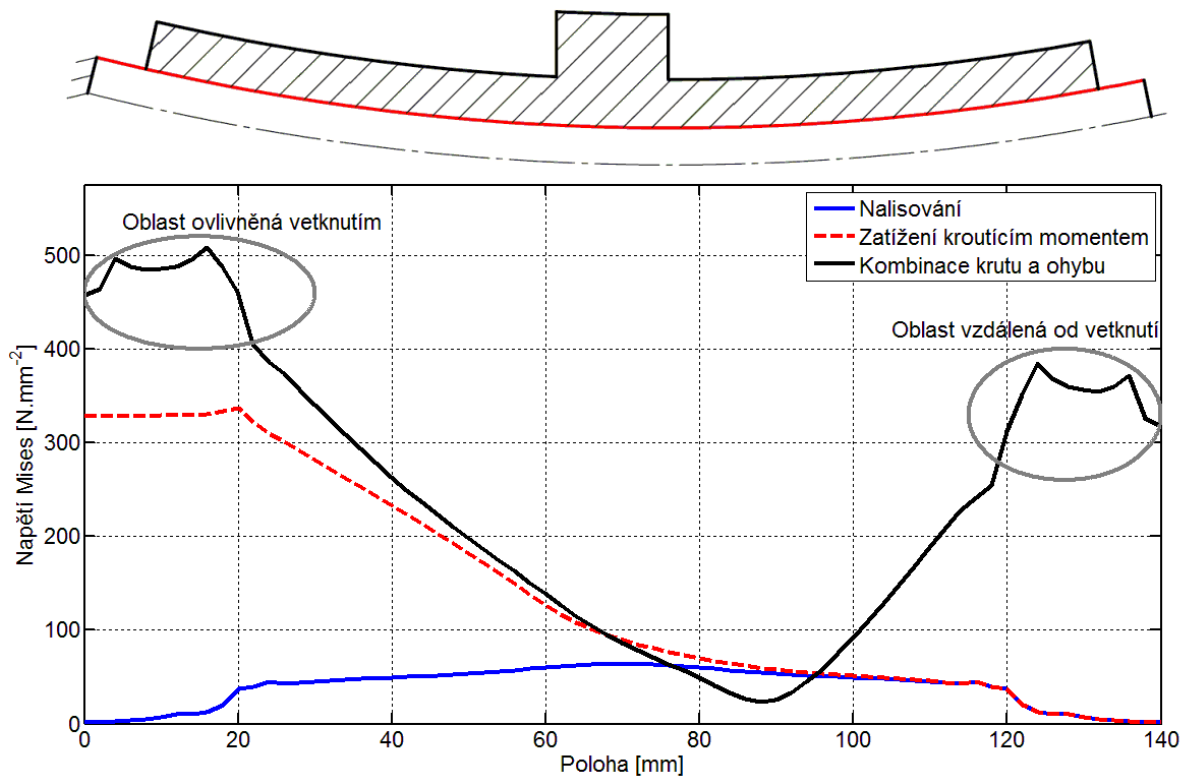


Obr. 1.10: Průběh vůle mezi objímkou a hřídelí na vlákně namáhaném na tlak [3]

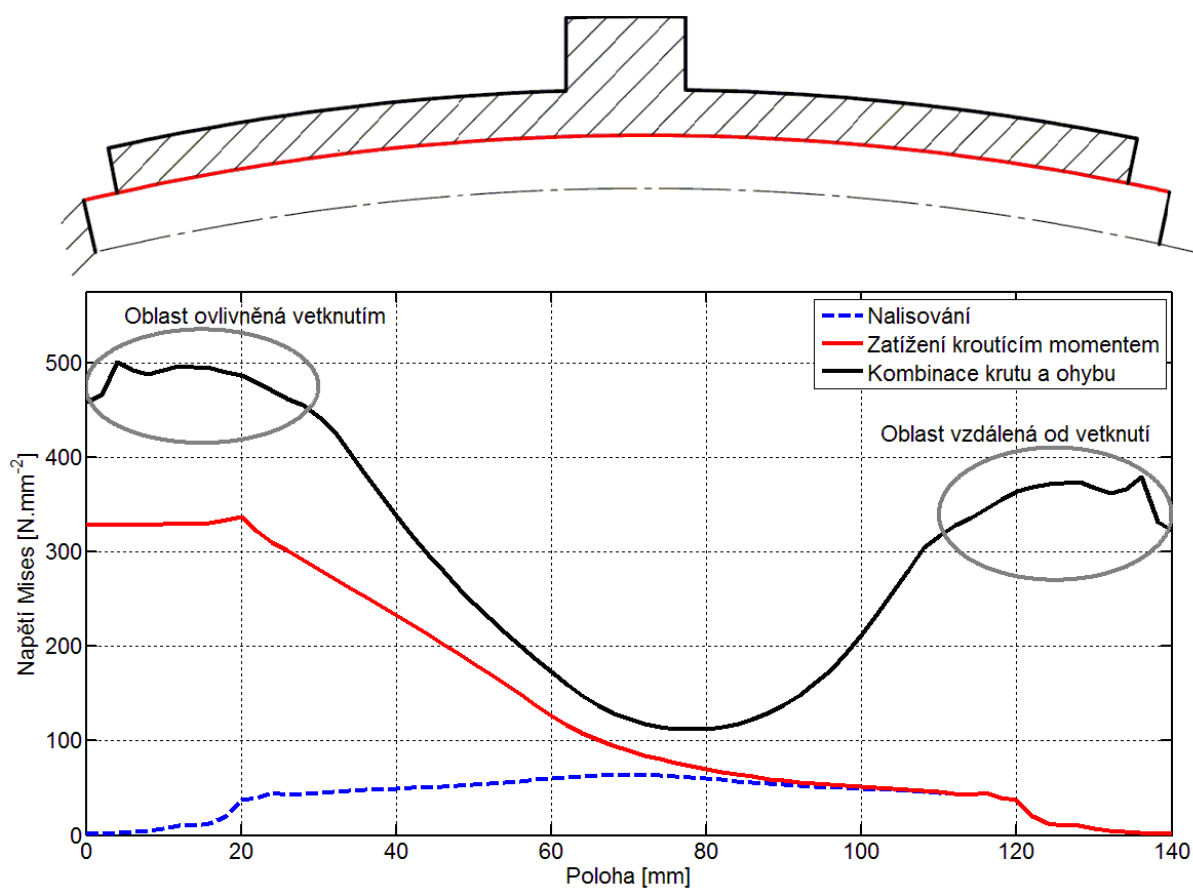
1.3 Analýza hřídele

Na obr. 1.11 a obr. 1.12 jsou znázorněny průběhy redukovaného napětí na hřídeli. Nejprve při samotném nalisování, poté po přidání krouťícího momentu a v poslední řadě při kombinaci momentu ohybového a krouťícího. Na obrázcích je vidět, že hodnoty redukovaného napětí blíže vetknutí dosahují vyšších hodnot. To způsobuje tečný prokluz objímky po hřídeli (kapitola 1.4.1), který vzniká při zavedení krouťícího momentu, a který je u oblasti vetknutí větší [3].

Na obr. 1.11 a obr. 1.12 je také vidět, že redukované napětí je vyšší na okrajích objímky než uprostřed spoje. Může za to axiální prokluz objímky po hřídeli (kapitola 1.4.2), který vzniká při zavedení ohybového momentu. Objímka na krajích po hřídeli klouže, ohybový moment je pak přenášen samotnou hřídelí [1].



Obr. 1.11: Průběh redukovaného napětí na vlákně hřídele namáhaném na tlak [3]



Obr. 1.12: Průběh redukovaného napětí na vlákně hřídele namáhaném na tah [3]

1.4 Analýza prokluzu

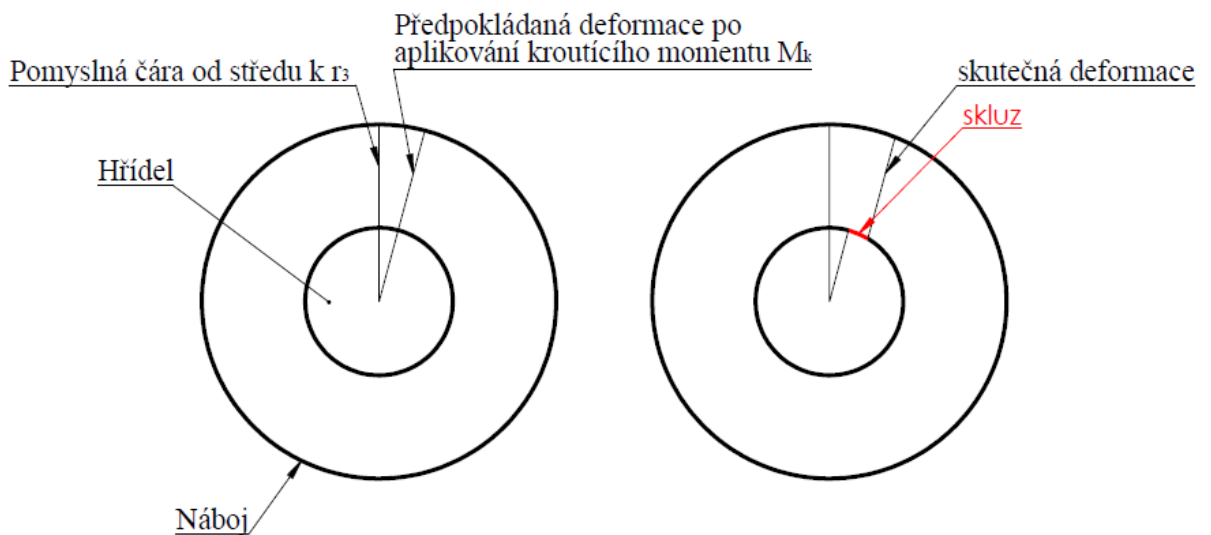
Při zavedení kroutícího momentu na nalisovaný spoj dochází v určitých místech k tečnému prokluzu náboje po hřídeli [4]. Stejně tak při zavedení ohybového momentu dochází k prokluzu, tentokrát ve směru axiálním. Současně se vznikem těchto prokluzů dochází ke vzniku tečných napětí. Prokluz navíc způsobuje opotřebení frettingem, což snižuje únavovou pevnost spoje [3]. Snažíme se ho proto eliminovat.

Prokluz v tečném směru i ve směru axiálním analyzoval ve své bakalářské práci Libor Navrátil [3]. Jeho poznatky jsem shrnul v následujících kapitolách 1.4.1 a 1.4.2.

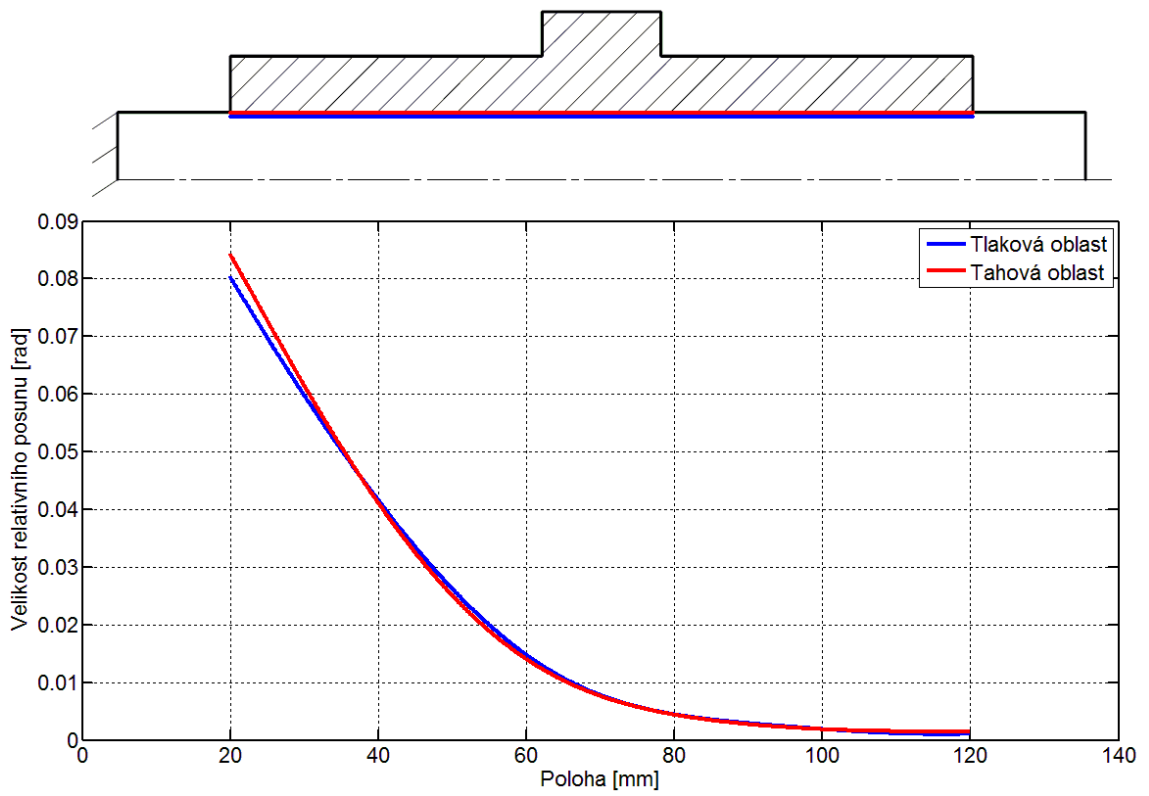
1.4.1 Prokluz v tečném směru

Prokluz v tečném směru vzniká v důsledku zavedení kroutícího momentu. Než se objímka na hřídeli ustálí, dojde k prokluzu objímky po hřídeli. Tento stav je názorně vidět na obr. 1.13. Ze závislosti tečného prokluzu na poloze (obr. 1.14) je vidět, že objímka prokluzuje nejvíce na okraji objímky blíže vetknutí. Na okraji objímky blíže volnému konci objímka téměř neprokluzuje.

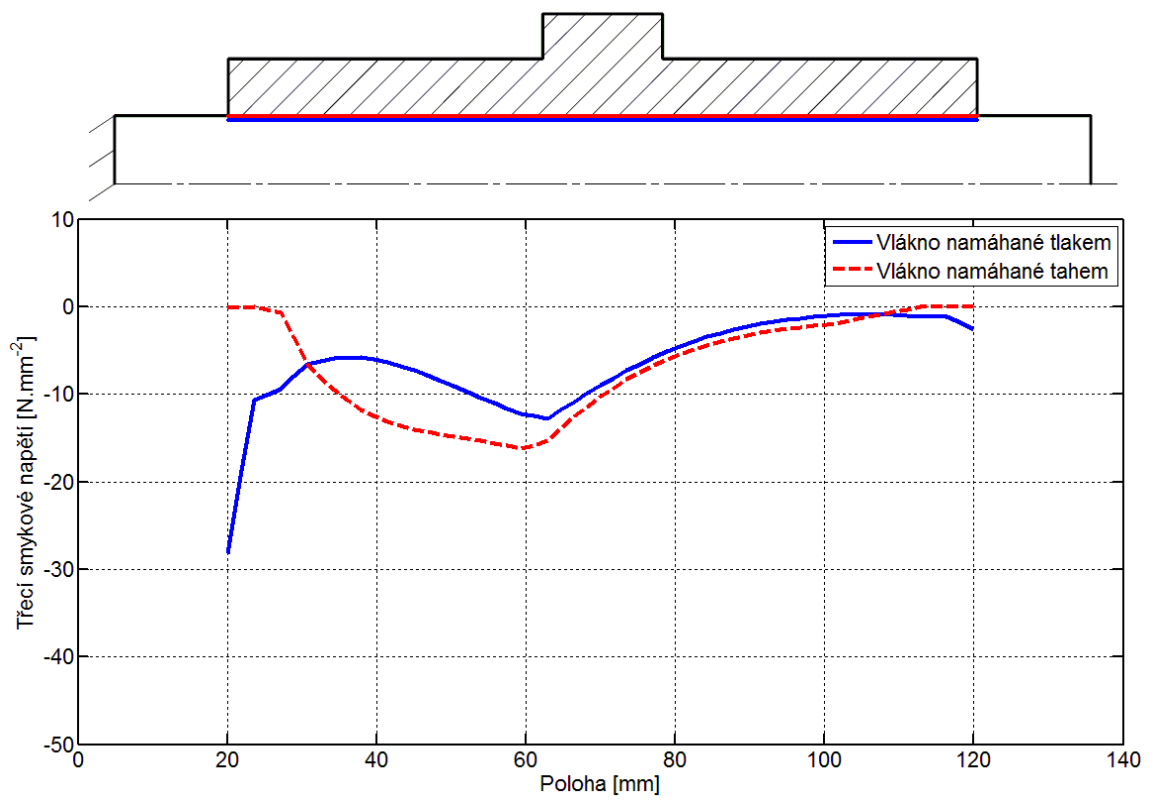
Se vznikem prokluzu souvisí vznik tečného třecího napětí τ_{tk} (kapitola 1.5), jehož průběh je znázorněn na obr. 1.15. Tečné třecí napětí na vláknu namáhaném tlakem dosahuje největší hodnoty na okraji objímky, v místě největšího prokluzu. Naopak nejmenší hodnoty dosahuje v místě nejmenšího prokluzu. U vlákna namáhaného tahem je situace o trochu složitější, neboť na okraji objímky, v místě největšího prokluzu, je třecí napětí nulové. To je způsobeno vznikem vůle mezi objímkou a hřídelí (obr. 1.9).



Obr. 1.13: Legenda k tečnému prokluzu objímky po hřídeli [3]



Obr. 1.14: Závislosti tečného prokluzu na poloze [3]



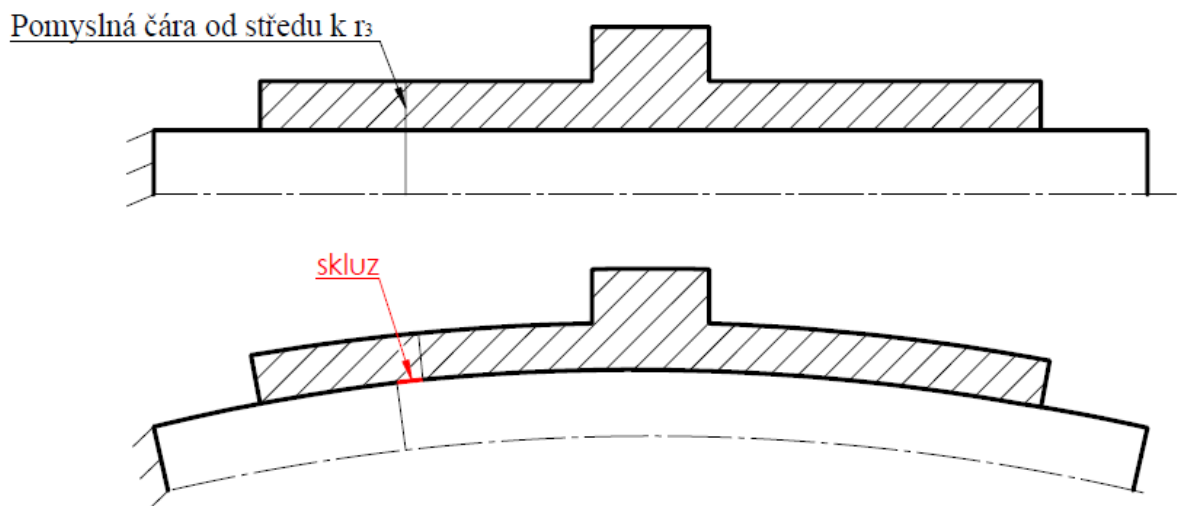
Obr. 1.15: Průběh tečného třecího napětí v závislosti na poloze [3]

1.4.2 Prokluz v axiálním směru

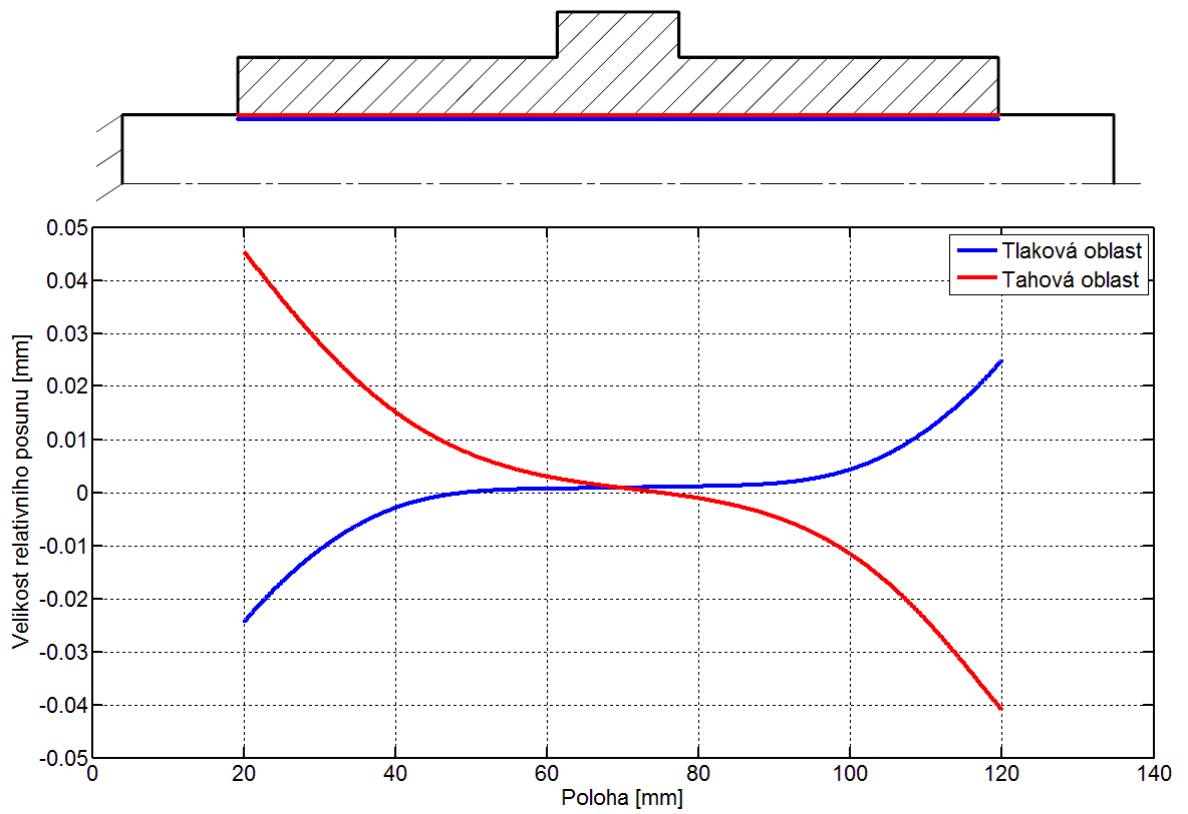
Prokluz v axiálním směru je způsoben ohybovým momentem a jím způsobenou deformací hřídele. Schéma prokluzu v axiálním směru je názorně vidět na obr. 1.16.

Axiální prokluz je maximální na okraji objímky. Uprostřed objímky je prokluz nulový (obr. 1.17). Tahové vlákno dosahuje vyšších hodnot prokluzu kvůli větší vůli, která mezi objímkou a hřídelí vzniká.

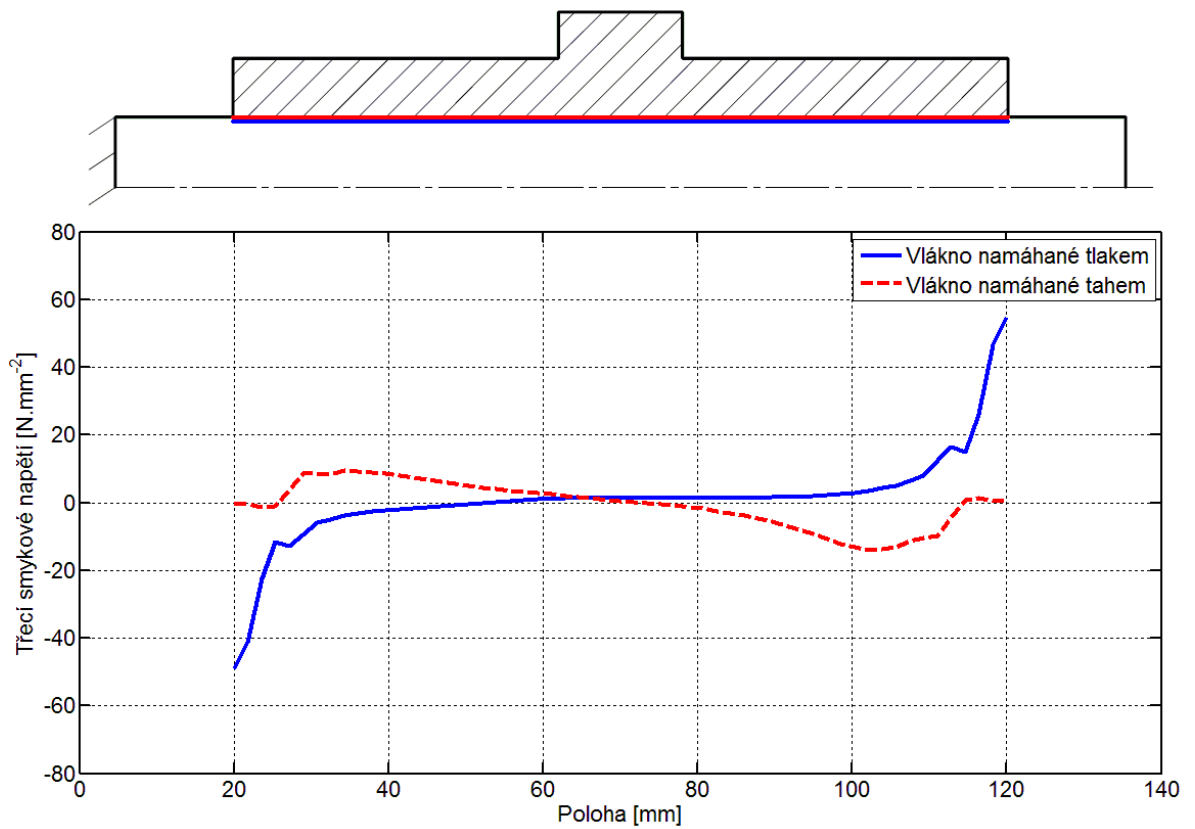
Stejně jako prokluz v tečném směru je i prokluz v axiálním směru spojen se vznikem třecího napětí. Tentokrát se jedná o osové třecí napětí τ_{to} (kapitola 1.5). Průběh osového třecího napětí na jednotlivých vláknech (obr. 1.18) se řídí stejnými zákonitostmi, jako tečné třecí napětí způsobené prokluzem v tečném směru (obr. 1.15).



Obr. 1.16: Schéma prokluzu v axiálním směru [3]



Obr. 1.17: Závislost axiálního prokluzu na poloze [3]



Obr. 1.18: Průběh osového třecího napětí v závislosti na poloze [3]

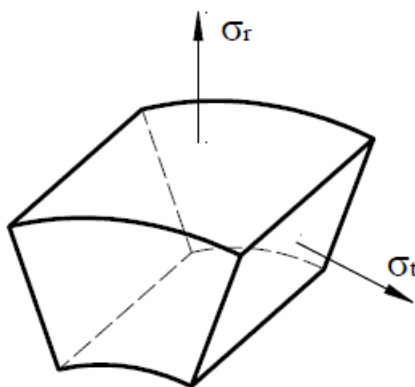
1.5 Napjatost elementu při kombinovaném namáhání nalisovaného spoje

Redukované napětí v nalisovaném spoji namáhaném kombinací ohybu a krutu je závislé na několika složkách napětí. Tyto složky napětí jsou znázorněny na vytknutém elementu [3]. Při samotném nalisování vzniká na objímce radiální napětí σ_r (kontaktní tlak) a s ním spojená složka tečného napětí σ_t (obr. 1.19).

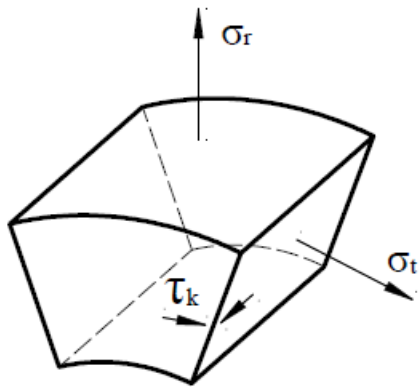
Po zavedení kroutícího momentu se na objímce objeví složka smykového napětí τ_k (obr. 1.20) a složka tečného třecího napětí τ_{tk} (obr. 1.21). Složka smykové napětí je způsobena samotným kroutícím momentem. Složka tečného třecího napětí pak vzniká při vzájemném prokluzu objímky po hřídeli v tečném směru (kapitola 1.4.1).

Zatížíme-li model ještě ohybovým momentem, vzniká v objímce složka osového napětí σ_o a složka osového třecího napětí τ_{to} . Osově napětí je způsobeno samotným ohybovým momentem. Složka osového třecího napětí pak vzniká při vzájemném prokluzu objímky po hřídeli v osovém směru (kapitola 1.4.2).

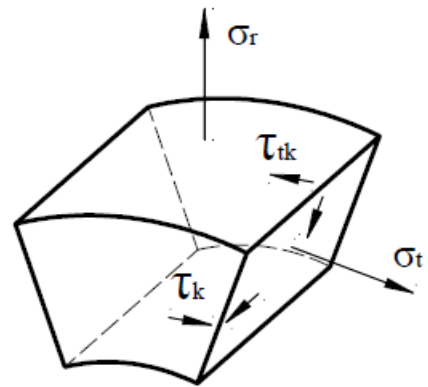
Na obr. 1.22 jsou vidět složky napětí při zatížení kombinací krutu a ohybu bez vzájemného prokluzu. Obr. 1.23 ukazuje složky napětí při uvažování vzájemného tečného prokluzu objímky po hřídeli. Na obr. 1.24 jsou zakresleny složky napětí při prokluzu objímky po hřídeli v osovém směru. Všechny složky napětí, které se na objímce vyskytují, jsou pak znázorněny na obr. 1.25.



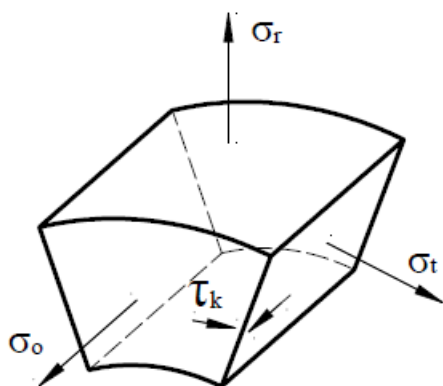
Obr. 1.19: Složky napětí po samotném nalisování [3]



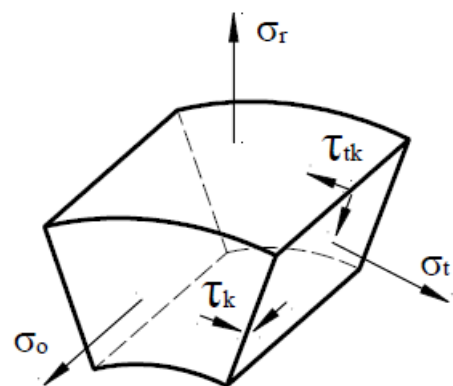
Obr. 1.20: Složky napětí po nalisování a zavedení
kroučícího momentu [3]



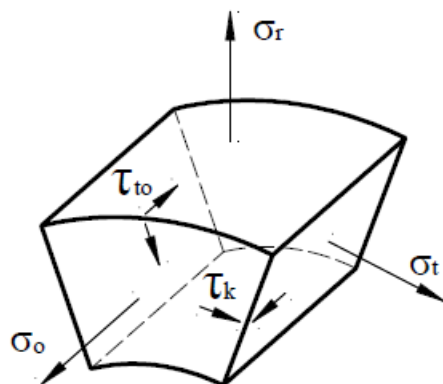
Obr. 1.21: Složky napětí po nalisování a zavedení
kroučícího momentu a uvažování prokluzu [3]



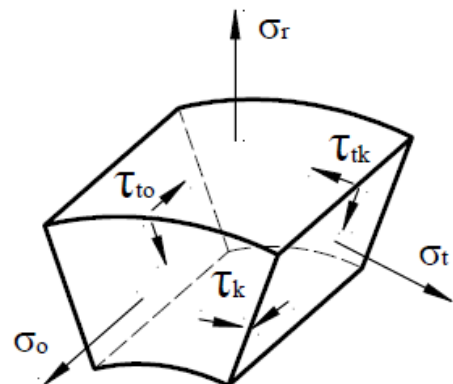
Obr. 1.22: Složky napětí po zatížení kombinací
krotu a ohybu bez vzájemného prokluzu [3]



Obr. 1.23: Složky napětí po zatížení kombinací
krotu a ohybu při tečném prokluzu [3]



Obr. 1.24: Složky napětí po zatížení kombinací
krotu a ohybu při axiálním prokluzu [3]



Obr. 1.25: Složky napětí po zatížení kombinací
krotu a ohybu při obousměrném prokluzu [3]

1.6 Vliv přesahu na velikost prokluzu a stav napjatosti

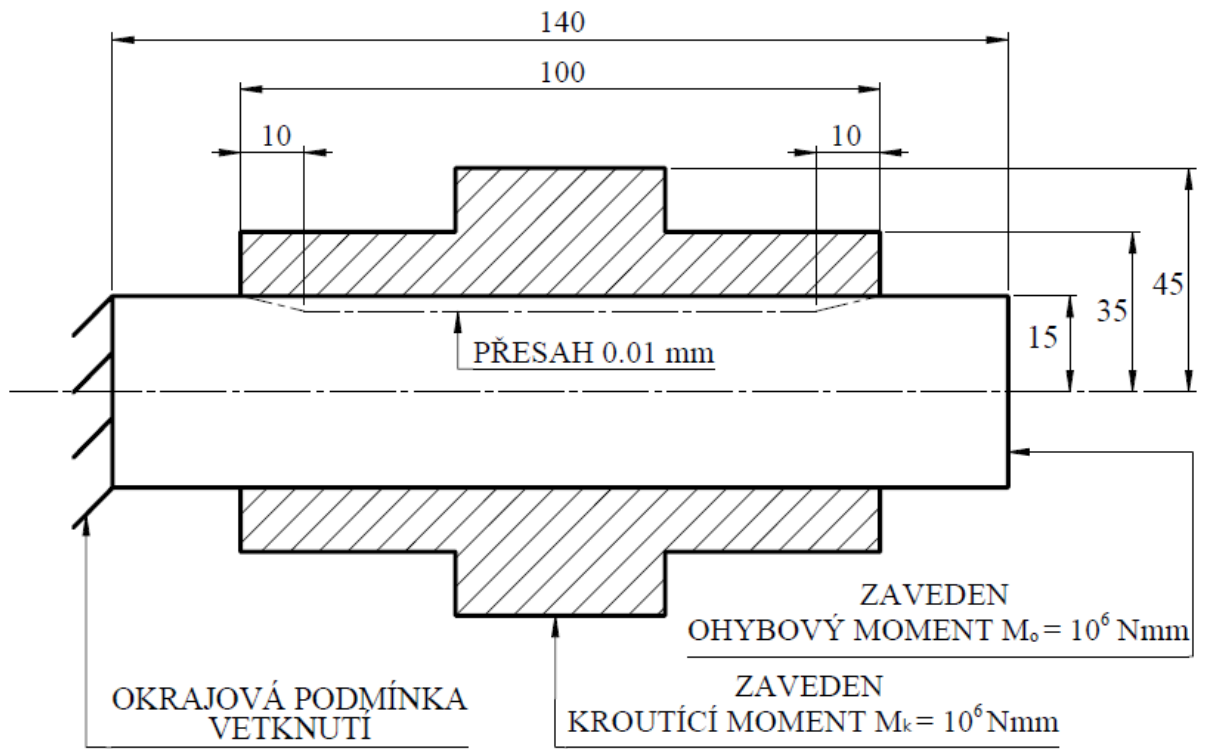
Z obr. 1.15 a obr. 1.18 je viditelné, že třecí smyková napětí mají přímou souvislost s velikostí kontaktního tlaku, respektive velikostí přesahu. Libor Navrátil ve své bakalářské práci [3] tyto zákonitosti zkoumal a dospěl k následujícím závěrům. Zvětšíme-li přesah, snížíme prokluz mezi objímkou a hřídelí, avšak dojde k nepatrnému nárůstu tečného a osového třecího napětí. Zároveň navíc narůstá radiální a tečné napětí od nalisování. Tato napětí se však dají regulovat změnou geometrie objímky (kapitola 1.7).

1.7 Vliv změny geometrie objímky na napět'ové špičky

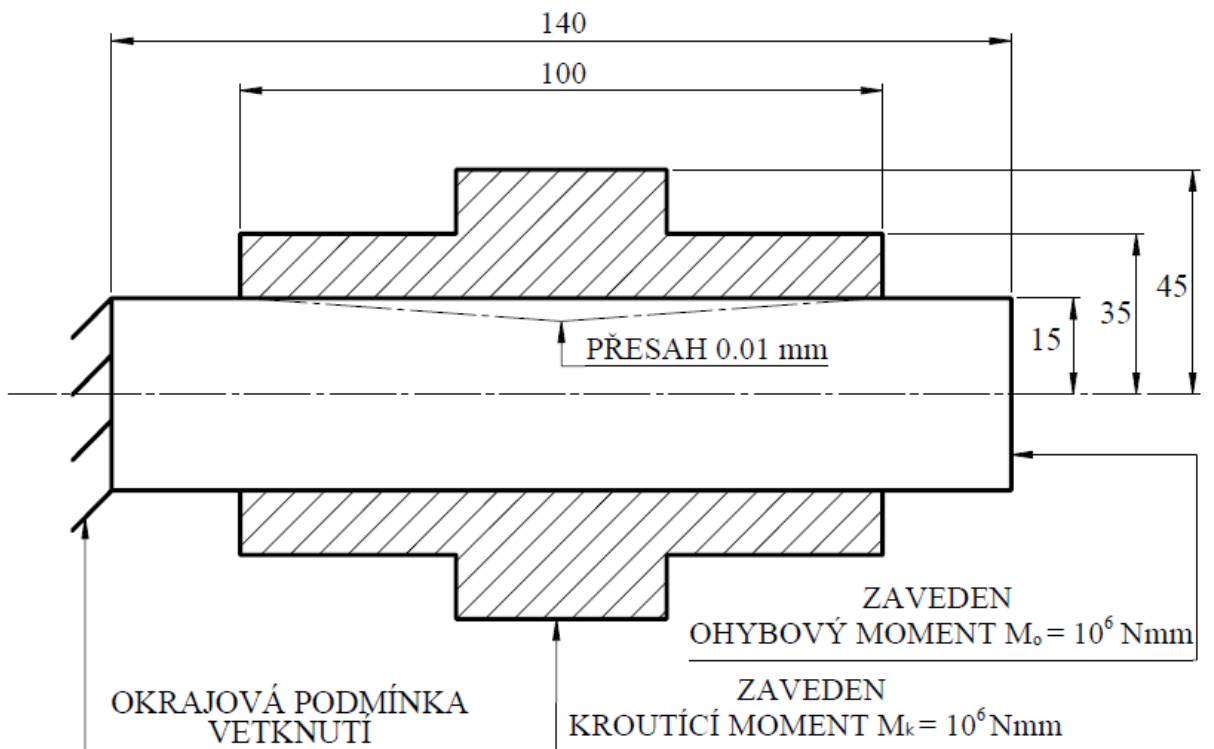
V nalisovaném spoji dokážeme regulovat špičky napětí pomocí změny geometrie objímky. Jan Perníček se ve své bakalářské práci [4] zaměřil na vliv geometrie objímky při zatížení kroutícím momentem. Dospěl k závěru, že napět'ové špičky, které vznikají od kroutícího momentu na okraji objímky (obr. 1.7 a obr. 1.8), lze pomocí vhodně zvolené geometrie dobře regulovat. Jako optimální varianty změny geometrie objímky určil částečné vnitřní zkosení (obr. 1.26), které se hodí pro dlouhé objímky zatížené větším momentem. Celkové vnitřní zkosení (obr. 1.27) by doporučil pro kratší objímky a menší kroutící momenty.

Také Libor Navrátil provedl ve své bakalářské práci [3] analýzu těchto geometrií. Zaměřil se na kombinaci ohybu a krutu. Špičky napětí pomocí geometrií vnitřního zkosení také dokázal regulovat. Zejména špičky napětí vzniklé od kroutícího momentu. Také poukázal na význam prokluzu objímky po hřídeli. Díky tomuto faktu vyhodnotil jako lepší variantu objímku s částečným vnitřním zkosením, neboť u ní dochází k menším prokluzům než u objímky s celkovým vnitřním zkosením. Prokluz se snažíme minimalizovat z důvodu rizika opotřebení frettingem.

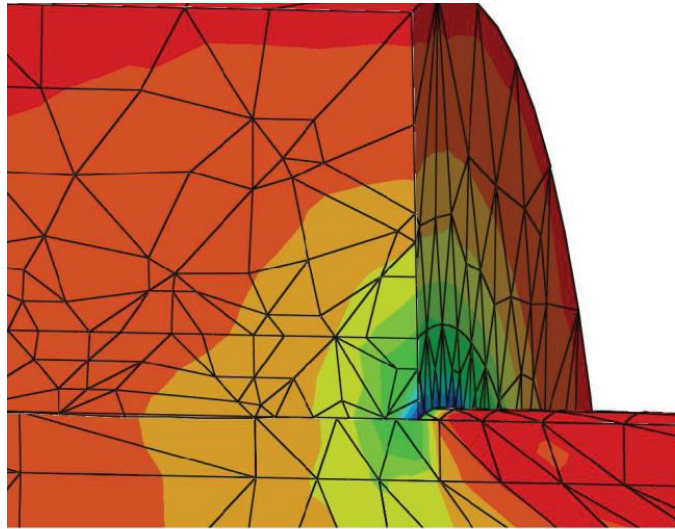
Já jsem ve své bakalářské práci [1] analyzoval nalisovaný spoj s upravenou geometrií zatížený ohybovým momentem. Narazil jsem na fakt, že na tlakovém vláknu upravené objímky vznikají dokonce špičky napětí větší než na objímce s přesahem konstantním. Jev nastává z důvodu deformace hřídele. Jedná se však o velmi lokální špičky napětí (obr. 1.28), u kterých se předpokládá, že by v reálném plastickém modelu došlo k jejich plastizaci a tím by se tyto špičky zredukovaly na nižší hodnoty než u geometrie objímky s konstantním přesahem.



Obr. 1.26: Částečné vnitřní zkosení objímky [3]



Obr. 1.27: Celkové vnitřní zkosení [3]



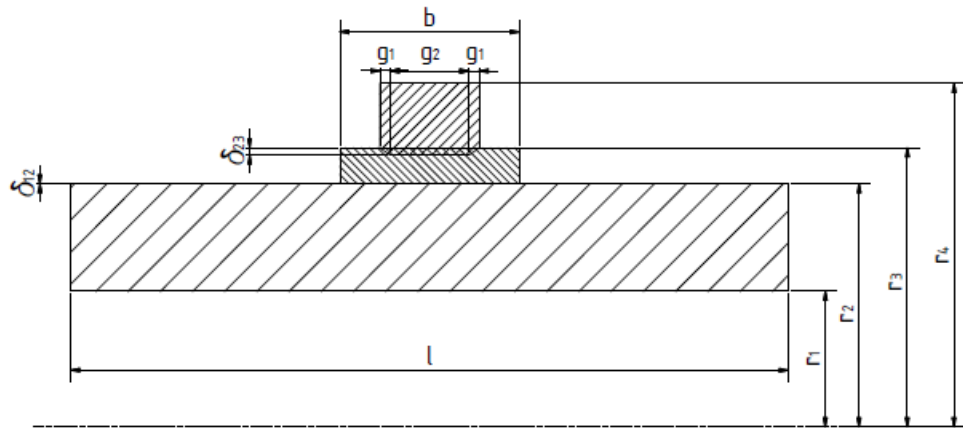
Obr. 1.28: Lokální špička napětí na objímce, při použití oboustranného vnitřního zkosení [1]

1.8 Násobně nalisovaný spoj

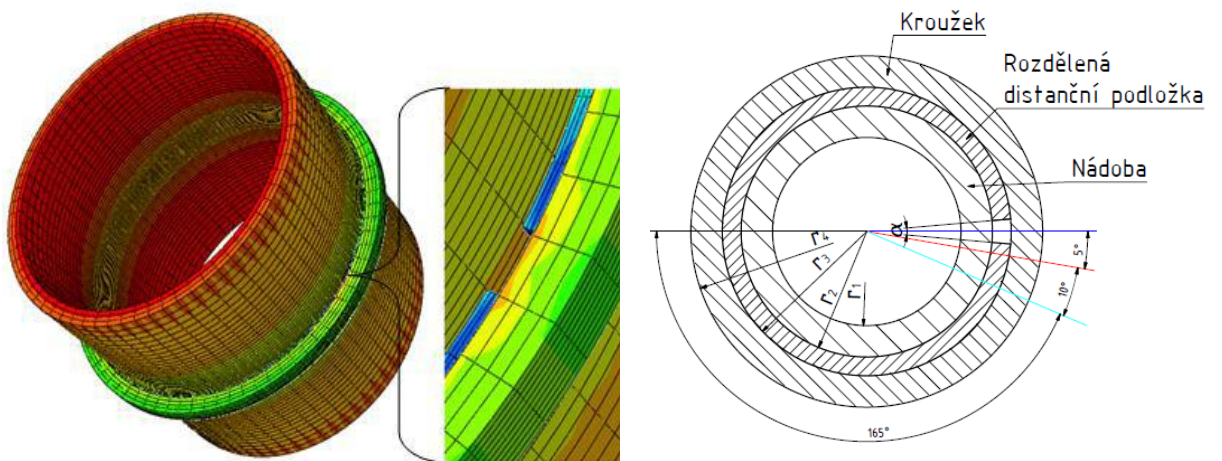
V mé diplomové práci se budu zabývat násobně nalisovaným spojem. To znamená, že mezi náboj a hřídel bude nalisovaná distanční vložka. Distanční vložka navíc bude podélně rozříznuta, kvůli snazšímu nalisování. Rozříznutou distanční vložku použil už ve své bakalářské práci Dominik Mochar [5]. Za pomoci nalisovaného kroužku a distanční vložky snižoval napětí v tlustostěnné nádobě. Schéma jeho modelu je znázorněno na obr. 1.29.

Pro jeho potřeby se jako nejlepší varianta úpravy geometrie spoje jeví oboustranně zkosený kroužek na jeho vnitřním poloměru (obr. 1.29). Díky této úpravě se mu podařilo zredukovat špičky napětí na okrajích distanční vložky.

Dále se zabýval vlivem velikosti mezery v distanční vložce (obr. 1.30). Zjistil, že čím menší mezera, tím menší špičky v okolí mezery vznikají. Nejkritičtější místo, na které je třeba zaměřit pozornost, se nachází v místě středu mezery. Na obr. 1.30 je toto místo znázorněno tmavě modrou čarou [5].



Obr. 1.29: Schéma modelu tlustostěnné nádoby s nalisovaným kroužkem a distanční vložkou [5]



Obr. 1.30: Čelní řez modelem se znázorněním mezery v distanční vložce [5]

2 Teoretické výpočty násobně nalisovaného spoje

V této kapitole se budu zabývat teoretickým chováním násobně nalisovaného spoje [6]. Zmapované teoretické chování násobně nalisované soustavy mi poslouží jako výchozí aparát při tvorbě MKP modelu.

2.1 Optimálně násobně lisovaná nádoba

Základní zvolené parametry modelu pro můj výpočet jsou uvedeny v tab. 2.1 a jsou společně s vypočteným poloměrem r_3 v celé kapitole 2 konstantní. Označení poloměrů jsem zvolil stejné jako na obr. 1.29. Tedy číslování poloměrů je vzestupně od nejmenšího po největší.

r_1 [mm]	r_2 [mm]	r_4 [mm]	E [N/mm]	p_4 [mm]	σ_{dov} [MPa]
0	15	45	2,1e5	0	150

Tab. 2.1: Zvolené hodnoty

Poloměr r_3 jsem vypočetl z podmínky maximálního tlakového spádu (2.1).

$$r_3 = \sqrt{r_2 \cdot r_4} \quad (2.1)$$

Tlaky p_3 a p_2 pak z podmínky pro redukované napětí (2.2).

$$p_3 = \frac{\sigma_{dov}}{2} \cdot \left(1 - \frac{r_3^2}{r_4^2}\right)$$

$$p_2 = \frac{\sigma_{dov}}{2} \cdot \left(1 - \frac{r_2^2}{r_3^2}\right) + p_3 \quad (2.2)$$

Přesahy Δr_2 a Δr_3 jsou vypočteny díky již známým tlakům pomocí rovnic (2.3).

$$\Delta r_2 = \frac{2 \cdot r_2}{E} \cdot (K^{II} - K^I)$$

$$\Delta r_3 = \frac{2 \cdot r_3}{E} \cdot (K^{III} - K^{II}) \quad (2.3)$$

Za konstanty K^i je dosazen vztah (2.4).

$$K^i = \frac{p_i \cdot r_i^2 - p_{i+1} \cdot r_{i+1}^2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \quad (2.4)$$

Průběh jednotlivých napětí σ_t a σ_r je vykreslen do obr. 2.1 pomocí vztahů (2.5).

$$\begin{aligned}\sigma_t^i &= K^i + \frac{C^i}{x^2} \\ \sigma_r^i &= K^i - \frac{C^i}{x^2}\end{aligned}\quad (2.5)$$

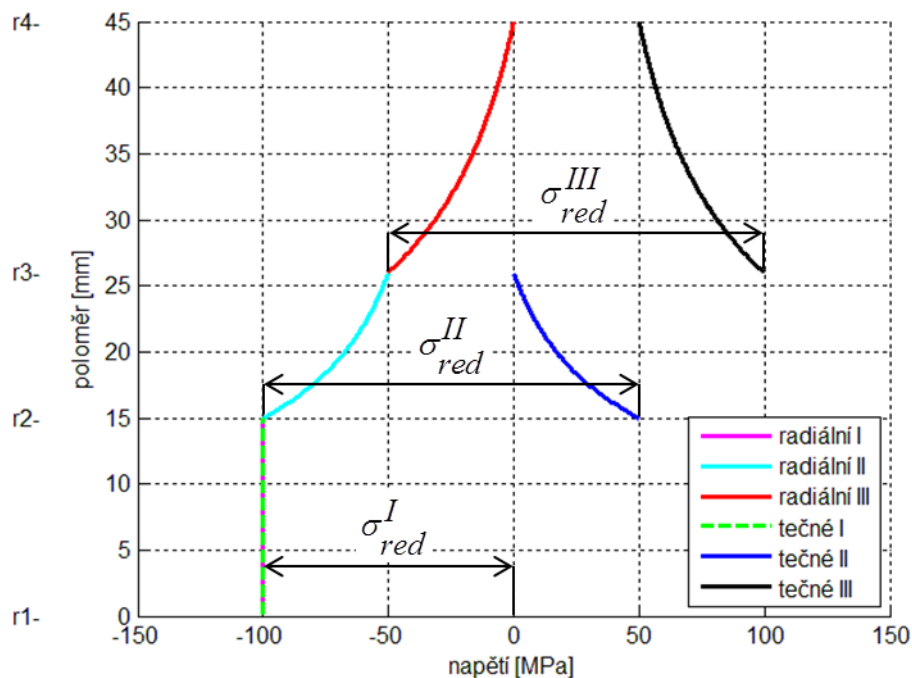
Kdy za C^i je dosazen vztah (2.6) a za x je dosazen proměnný poloměr od r_1 do r_4 , tedy v mém případě od 0 do 45 [mm].

$$C^i = (p_i - p_{i+1}) \frac{r_i^2 \cdot r_{i+1}^2}{r_{i+1}^2 - r_i^2} \quad (2.6)$$

Z předešlých rovnic byly vypočteny hodnoty, které jsou zapsány v tab. 2.2.

r_3 [mm]	$p_1=p_2$ [MPa]	p_3 [MPa]	Δr_2 [mm]	Δr_3 [mm]
25.9808	100	50	0.010714	0.012375

Tab. 2.2: Vypočtené hodnoty pro optimální nádobu



Obr. 2.1: Průběh napětí optimálně nalisované nádoby ($\Delta r_2=0.011$ [mm] a $\Delta r_3=0.012$ [mm])

Na obr. 2.1 je znázorněn průběh radiálních a tečných napětí. Maximální redukované napětí na vložce σ_{red}^{II} i na náboji σ_{red}^{III} je rovno napětí dovolenému $\sigma_{dov}=150$ [MPa]. Jedná se tedy o optimální průběh napětí.

2.2 Redukce přesahu na poloměru r_2

Po jednoduché úpravě rovnic (2.3) a dosazení za konstanty \mathbf{K} , získáme následující soustavu rovnic (2.7). Z ní je možno vypočítat tlaky \mathbf{p}_2 a \mathbf{p}_3 .

$$\begin{aligned} \frac{\Delta r_2 \cdot E \cdot (r_3^2 - r_2^2)}{2 \cdot r_3^2 \cdot r_2} &= p_2 - p_3 \\ \frac{\Delta r_3 \cdot E \cdot (r_3^2 - r_2^2)}{2 \cdot r_3} &= -p_2 \cdot r_2^2 + p_3 \cdot r_3^2 \cdot \left(\frac{r_3^2 - r_2^2}{(r_4^2 - r_3^2)} + 1 \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Z rovnic (2.7) je patrné, že tlaky \mathbf{p}_2 a \mathbf{p}_3 jsou funkcí změny přesahů Δr_2 a Δr_3 .

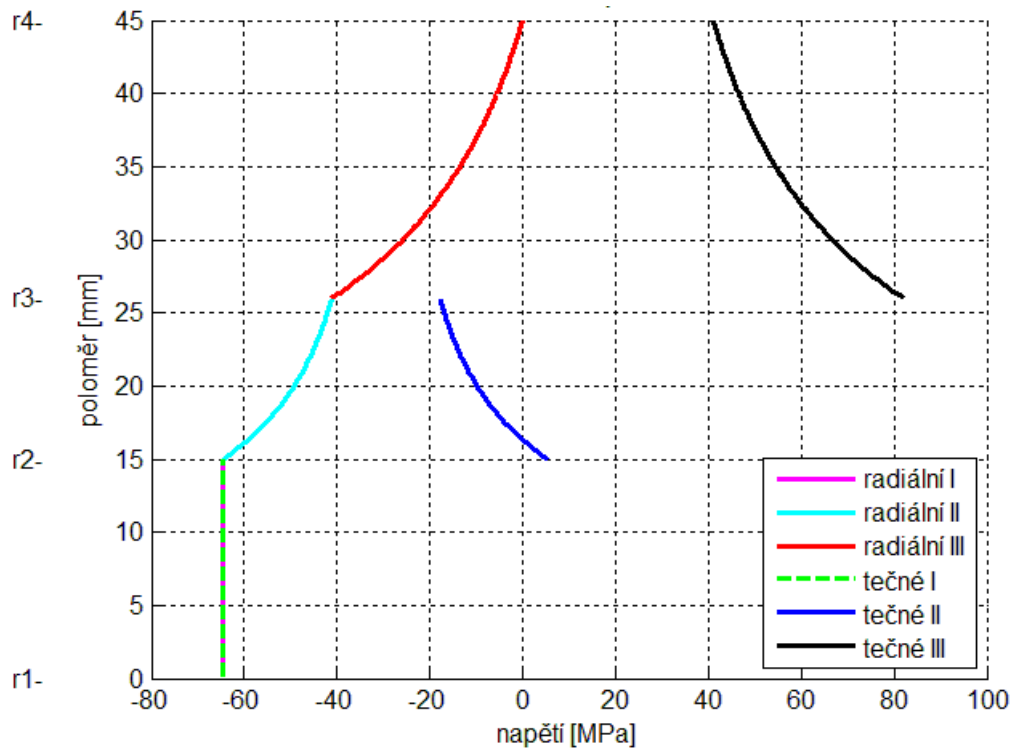
$$\begin{aligned} p_2(\Delta r_2, \Delta r_3) \\ p_3(\Delta r_2, \Delta r_3) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Postupně snižuji přesah Δr_2 a sleduji chování soustavy. Zatímco přesah Δr_3 zachovám stejný jako v kapitole 2.1.

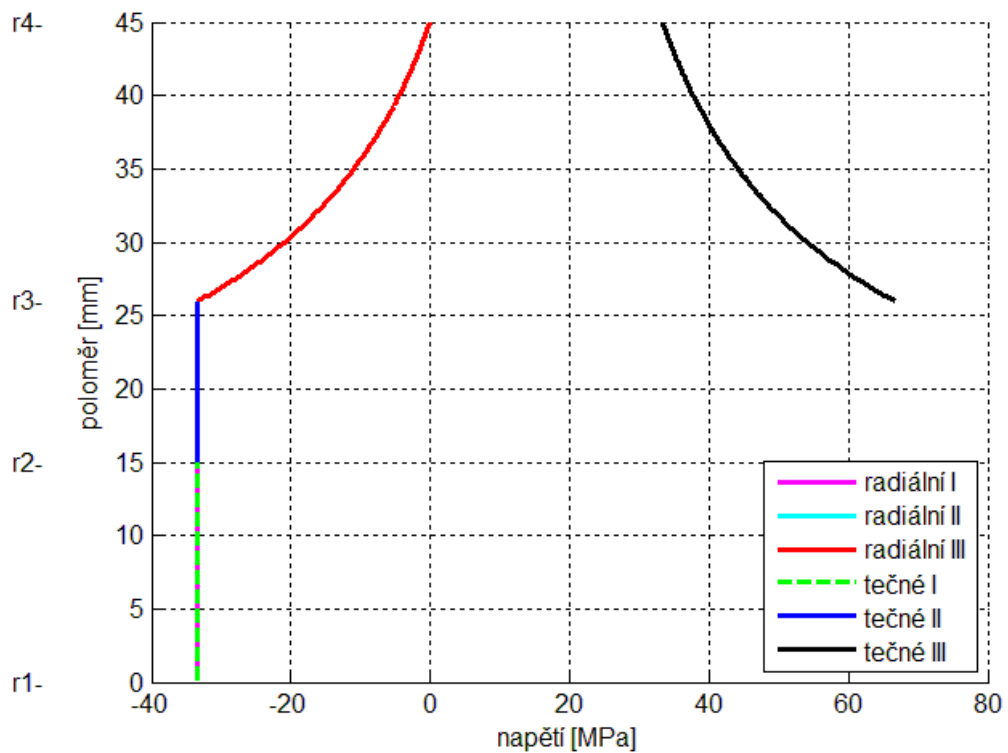
Při postupném zmenšování přesahu Δr_2 se zprvu snižuje jak redukované napětí na hřídeli $\sigma_{\text{red}}^{\text{I}}$, redukované napětí na vložce $\sigma_{\text{red}}^{\text{II}}$, tak i redukované napětí na náboji $\sigma_{\text{red}}^{\text{III}}$. Názorně je to vidět na obr. 2.2 ve srovnání s optimálně nalisovaným spojem (obr. 2.1). Redukované napětí na jednotlivých dílech odečítáme stejným způsobem, jak je ukázáno na obr. 2.1.

Při přesahu $\Delta r_2=0$ se radiální napětí na vložce rovná tečnému napětí na vložce. To znamená, že redukované napětí na vložce $\sigma_{\text{red}}^{\text{II}}$ dosahuje nejmenší možné hodnoty (obr. 2.3).

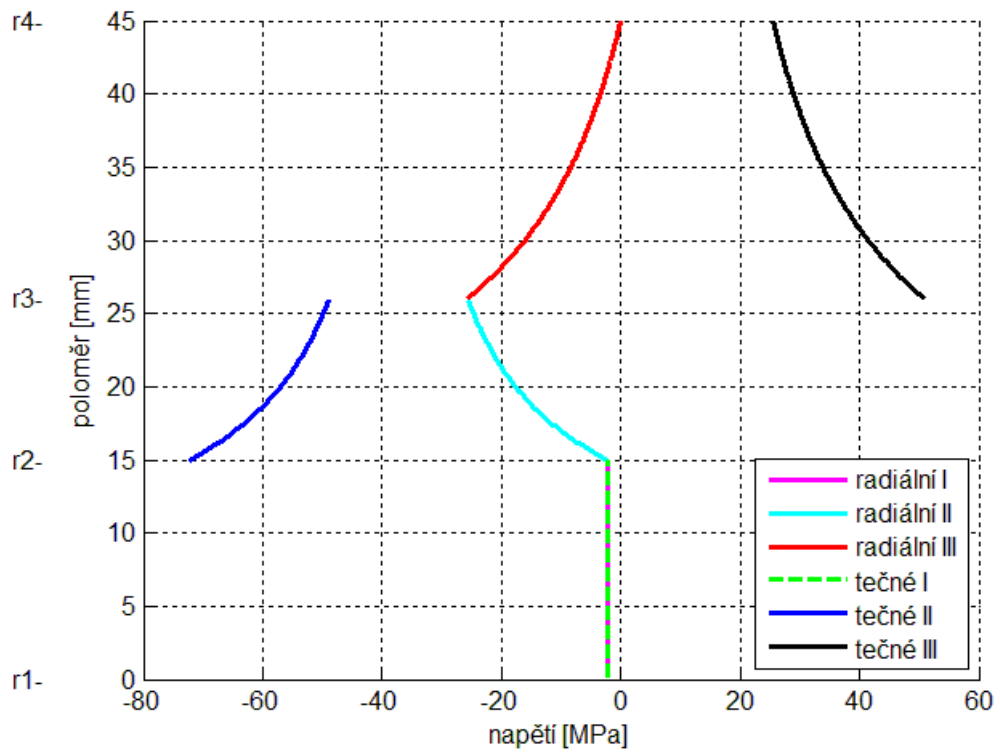
Při dalším snižování přesahu Δr_2 až do záporných hodnot, redukované napětí na vložce $\sigma_{\text{red}}^{\text{II}}$ narůstá. Ostatní redukované napětí stále klesají (obr. 2.4). V určité velikosti přesahu Δr_2 se kontaktní tlak na hřídeli \mathbf{p}_2 vynuluje. To znamená, že vložka ztratí s hřídelí kontakt. Další snižování přesahu tedy nemá smysl uvažovat. Kdy dosáhne kontaktní tlak \mathbf{p}_2 nulové hodnoty je čitelné z obr. 2.5, kde je vykreslen kontaktní tlak \mathbf{p}_2 v závislosti na velikosti přesahu Δr_2 .



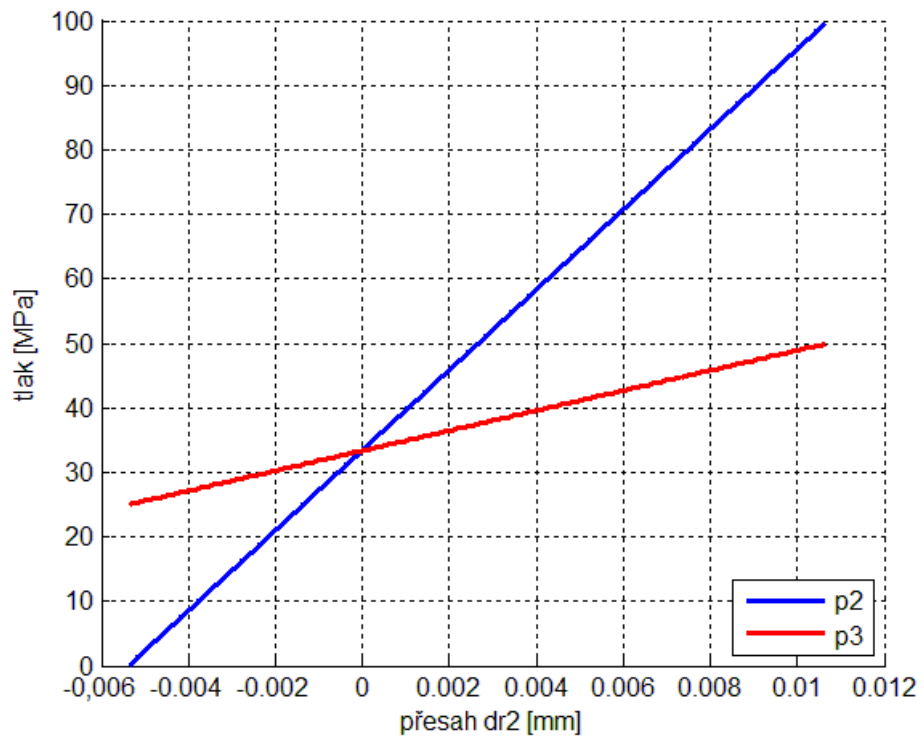
Obr. 2.2: Průběh napětí při přesazích $\Delta r_2=0.005$ [mm] a $\Delta r_3=0.012$ [mm]



Obr. 2.3: Průběh napětí při přesazích $\Delta r_2=0.000$ [mm] a $\Delta r_3=0.012$ [mm]



Obr. 2.4: Průběh napětí při přesazích $\Delta r_2 = -0.005$ [mm] $\Delta r_3 = 0.012$ [mm]



Obr. 2.5: průběh tlaků při změně přesahu Δr_2 a konstantním přesahu Δr_3

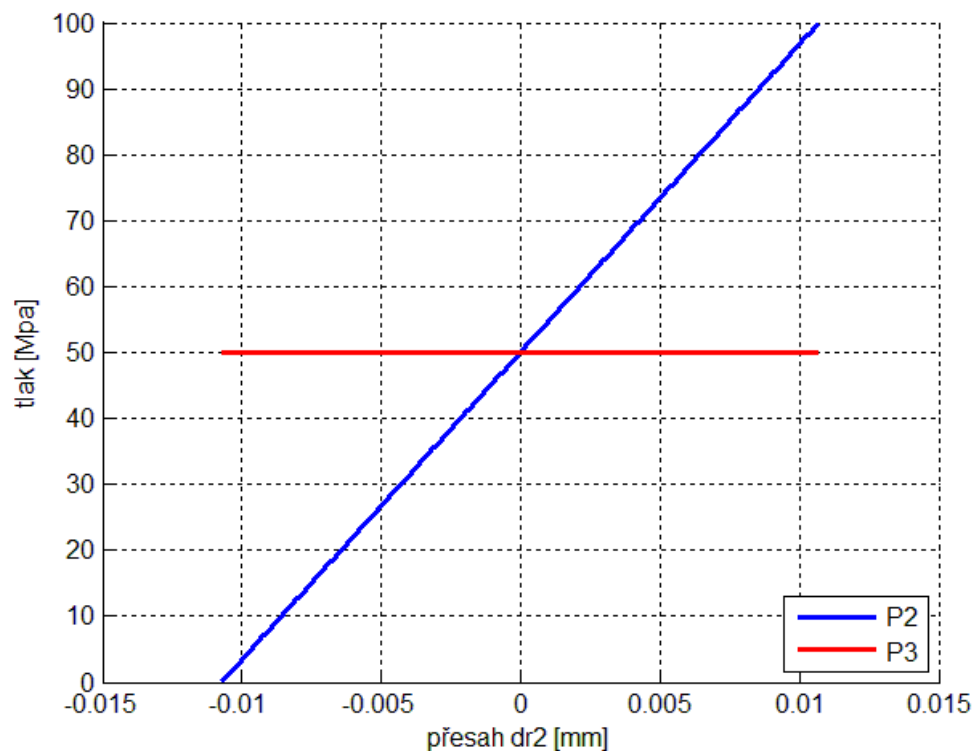
2.3 Redukce přesahu na poloměru r_2 při zachování dovoleného napětí na náboji

Jelikož zachovávám σ_{dov} na náboji, mohu dosazovat $\sigma_{\text{dov}} = \sigma_{\text{red}}^{\text{III}}$. Kontaktní tlak p_3 pak mohu vypočítat rovnou z rovnice (2.2) a je konstantní.

Kontaktní tlak p_2 jsem vypočetl pomocí jednoduché úpravy rovnice (2.3), viz rovnice (2.9).

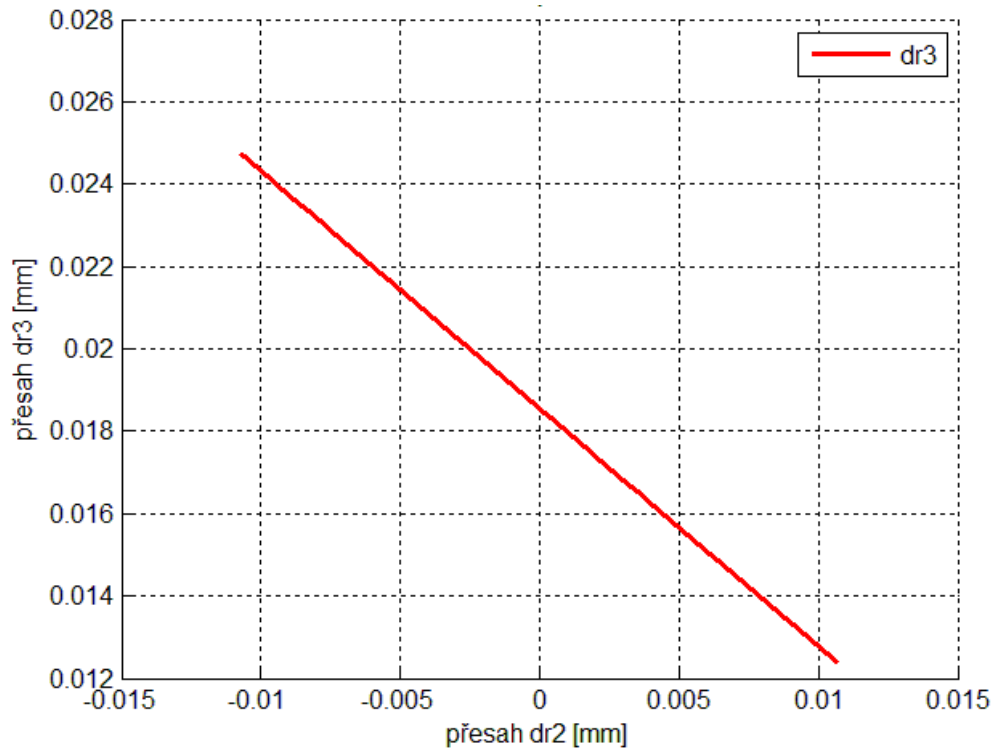
$$p_2 = \frac{\Delta r_2 \cdot E \cdot (r_3^2 - r_2^2)}{2 \cdot r_2 \cdot r_3^2} + p_3 \quad (2.9)$$

Na obr. 2.6 je vidět, že při zachování redukovaného napětí na náboji $\sigma_{\text{red}}^{\text{III}}$ dosáhne tlak p_2 nulové hodnoty až při vyšší záporné hodnotě přesahu Δr_2 , než tomu bylo při neměnném přesahu Δr_2 (obr. 2.5).



Obr. 2.6: Průběh tlaků při změně Δr_2 a zachování $\sigma_{\text{red}}^{\text{III}} = \sigma_{\text{dov}}$

Přesah Δr_3 jsem vypočetl pomocí rovnice (2.3). Vzájemný průběh přesahů je zobrazen na obr. 2.7. Mezi oběma veličinami je nepřímá úměra, tedy když snižuji přesah Δr_2 a chci zachovat σ_{dov} na náboji, musím zvýšit přesah Δr_3 .

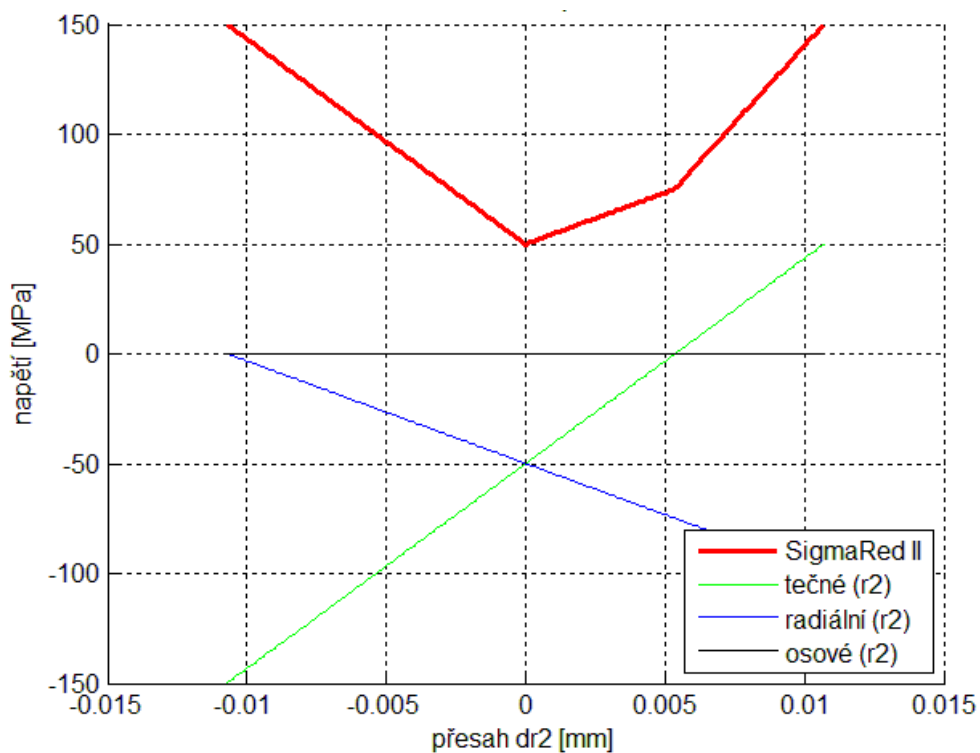


Obr. 2.7: Průběh Δr_3 při změně Δr_2 a zachování $\sigma_{red}^{III} = \sigma_{dov}$

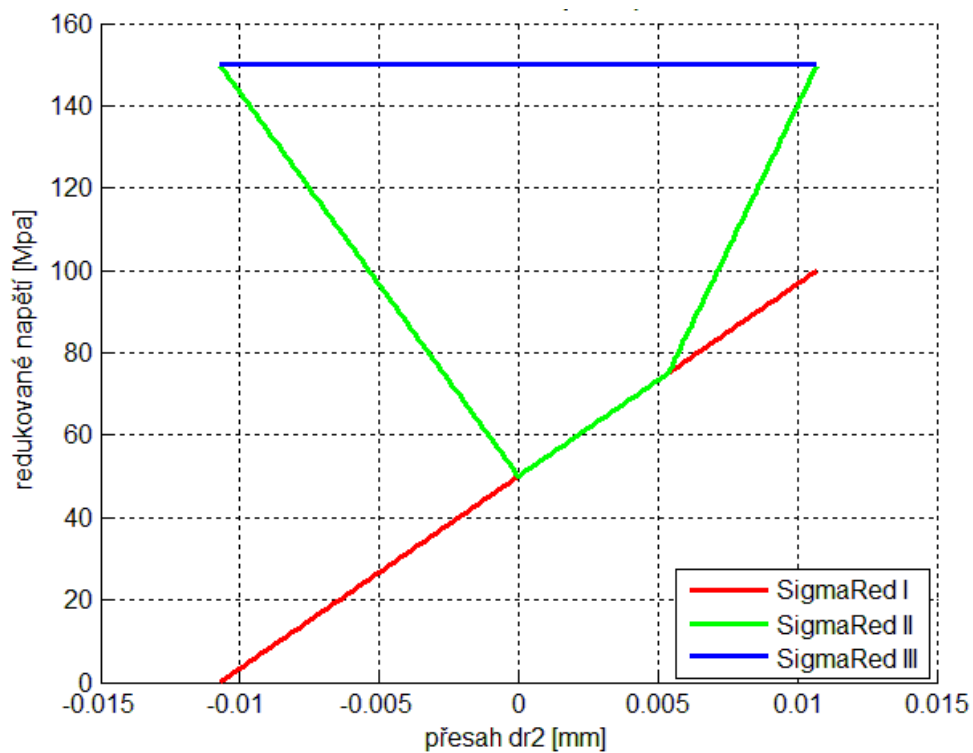
Na obr. 2.8 je průběh redukovaného napětí na distanční vložce σ_{red}^{II} a průběh jednotlivých složek napětí na poloměru r_2 .

Celkové redukované napětí na vložce σ_{red}^{II} lze vypočítat dle známého vztahu (2.10). Redukované napětí pro ostatní součásti nalisovaného spoje vypočteme analogicky. Průběh redukovaných napětí na hřídeli, vložce a náboji při změně přesahu Δr_2 a zachování dovoleného napětí na náboji $\sigma_{red}^{III} = \sigma_{dov}$, je znázorněn na obr. 2.9.

$$\sigma_{red}^{II} = \max(\sigma_{r_2}) - \min(\sigma_{r_2}) \quad (2.10)$$



Obr. 2.8: Průběh napětí na vnitřním poloměru vložky při změně Δr_2 a zachování $\sigma_{red}^{III} = \sigma_{dov}$



Obr. 2.9: Průběh redukovaných napětí na součástech spoje při změně přesahu Δr_2 a zachování redukovaného napětí na náboji $\sigma_{red}^{III} = \sigma_{dov}$

2.4 Redukce přesahu na poloměru r_3 při zachování dovoleného napětí na vložce

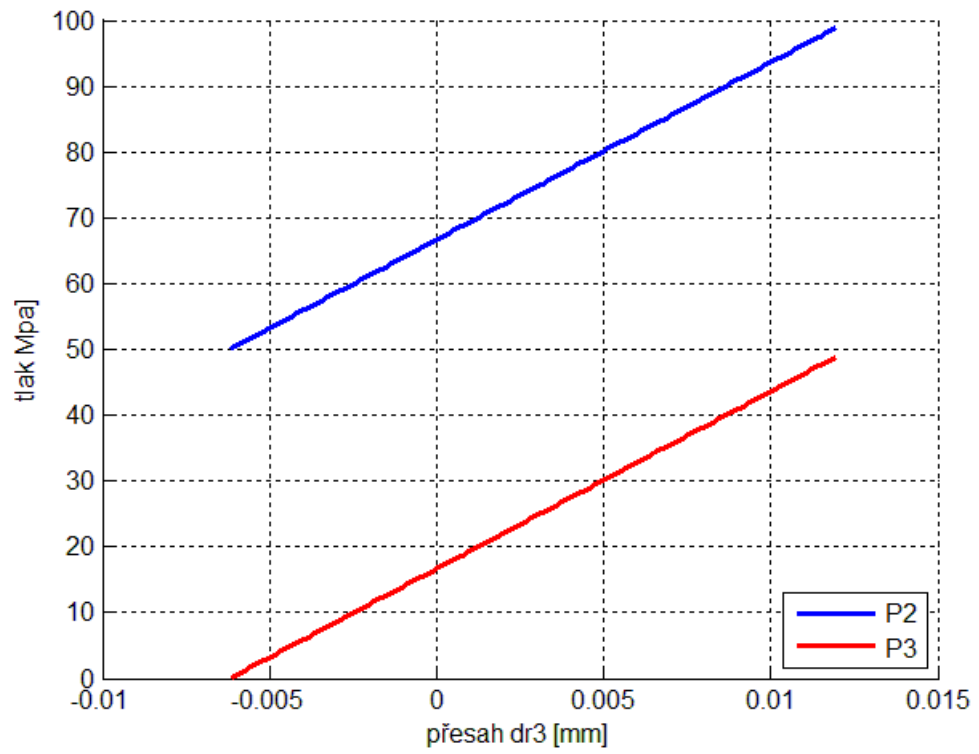
Postupuji obdobně jako v kapitole 2.2. Pomocí soustavy rovnic (2.7) vypočtu průběhy tlaků p_2 a p_3 při proměnném přesahu Δr_3 . Na obr. 2.10 je vidět, že rozdíl tlaků p_2 a p_3 se při konstantním přesahu Δr_2 a změnou přesahu Δr_3 nemění. Redukované napětí na vložce σ_{red}^{II} závisí pouze na rozdílu tlaků p_2 a p_3 (2.11), a proto je σ_{red}^{II} při jakékoliv změně přesahu Δr_3 konstantní (obr. 2.15).

Na obr. 2.11 jsou znázorněny průběhy napětí optimálně nalisovaného spoje, kdy $\sigma_{red}^{II} = \sigma_{red}^{III} = \sigma_{dov}$.

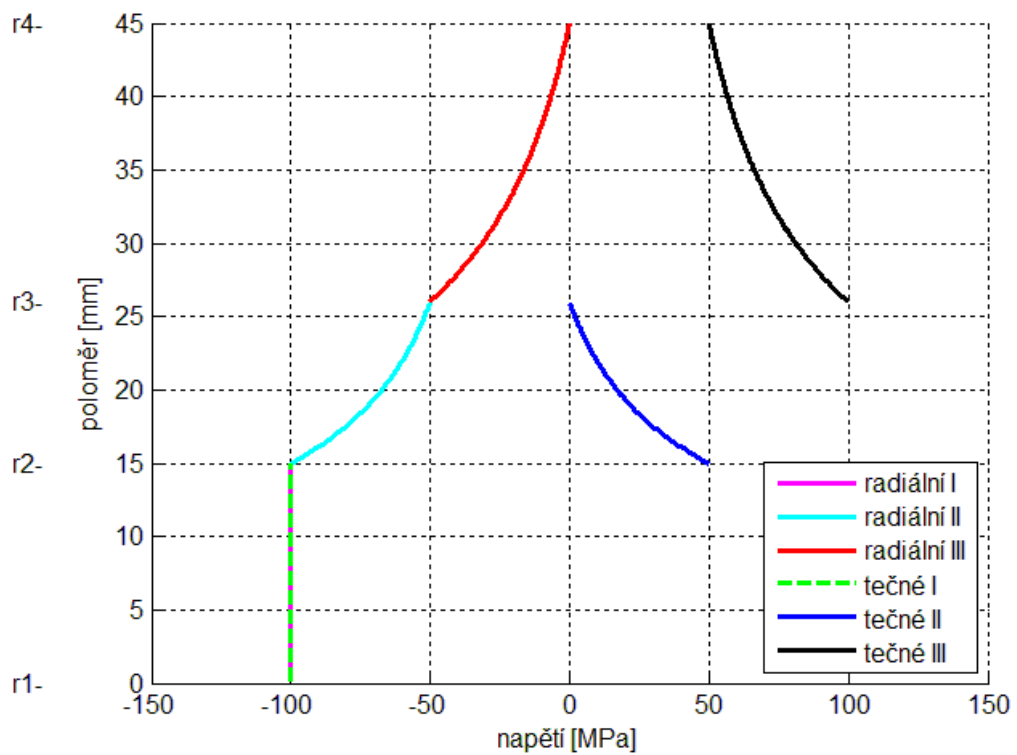
Na obr. 2.12 jsou průběhy napětí při zmenšeném přesahu Δr_3 . Je vidět, že při zmenšeném přesahu Δr_3 se redukované napětí na náboji σ_{red}^{III} také zmenšuje a redukované napětí na distanční vložce σ_{red}^{II} zůstává konstantní.

Při nulovém přesahu Δr_3 se nalisovaný spoj teoreticky chová jako spoj z jednoho celku (obr. 2.13). Při určitém záporném přesahu Δr_3 se kontaktní tlak p_3 , respektive radiální napětí mezi vložkou a nábojem, vynuluje. Ztratí se tedy kontakt mezi nábojem a vložkou. Další snižování přesahu Δr_3 nemá smysl uvažovat. Průběhy napětí při záporném přesahu Δr_3 jsou vidět na obr. 2.14.

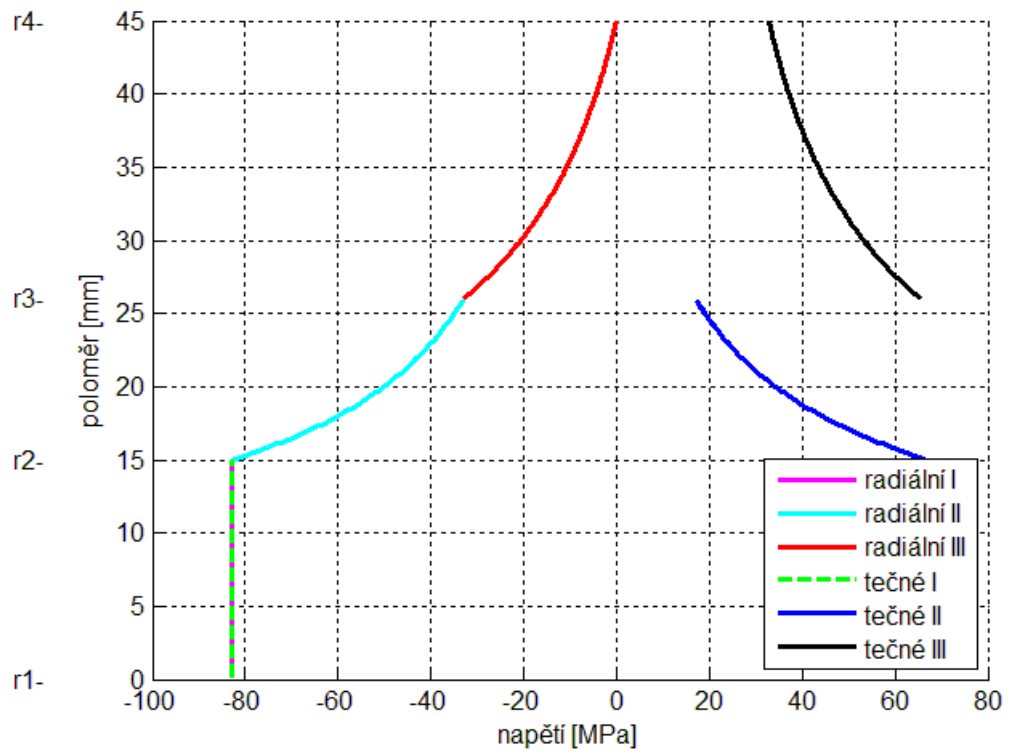
$$\sigma_{red}^{II} = 2 \cdot (p_2 - p_3) \cdot \frac{r_3^2}{r_3^2 - r_2^2} \quad (2.11)$$



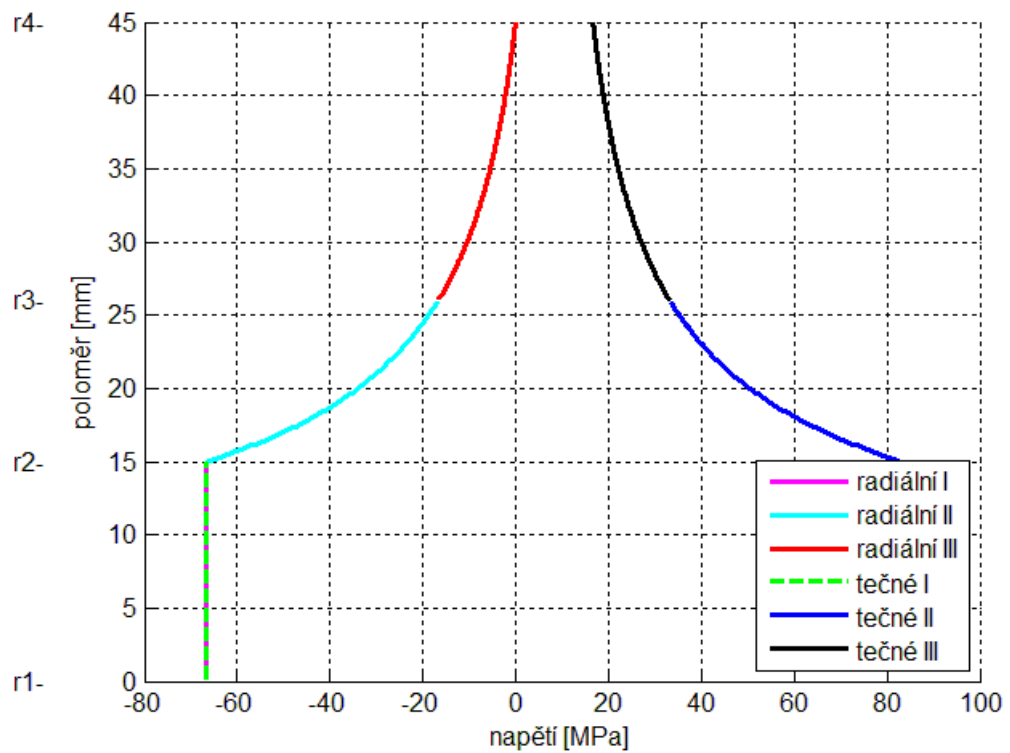
Obr. 2.10: průběh kontaktních tlaků při konstantním přesahu Δr_2 a změně přesahu Δr_3



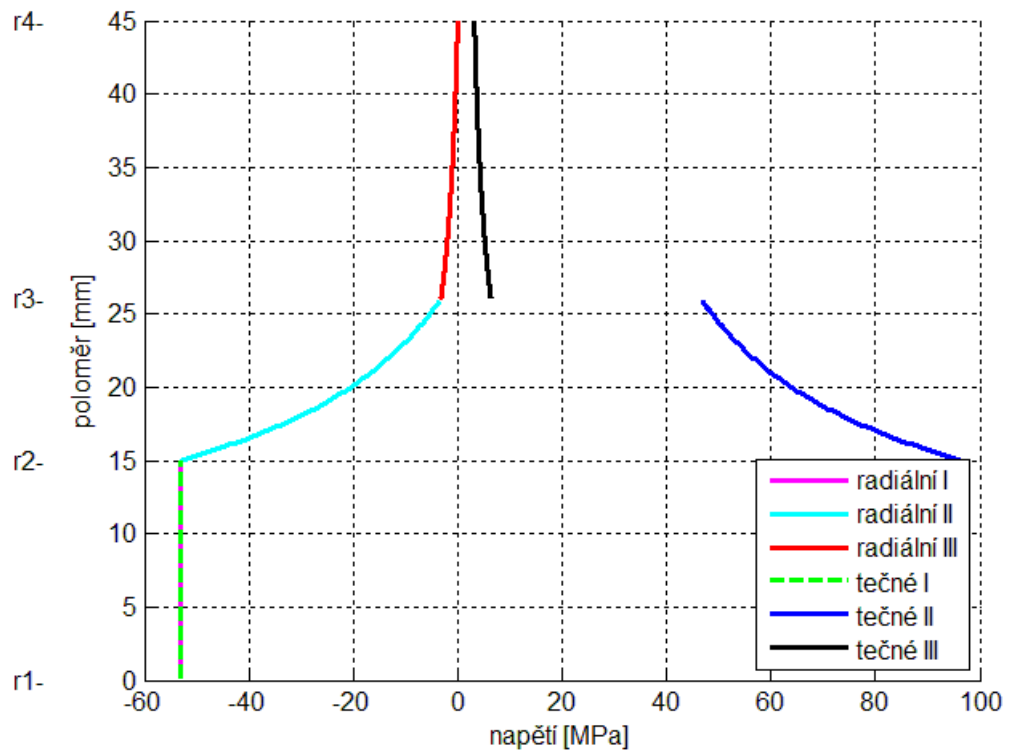
Obr. 2.11: Průběh napětí při přesazích $\Delta r_3=0.011$ [mm] a $\Delta r_3=0.012$ [mm]



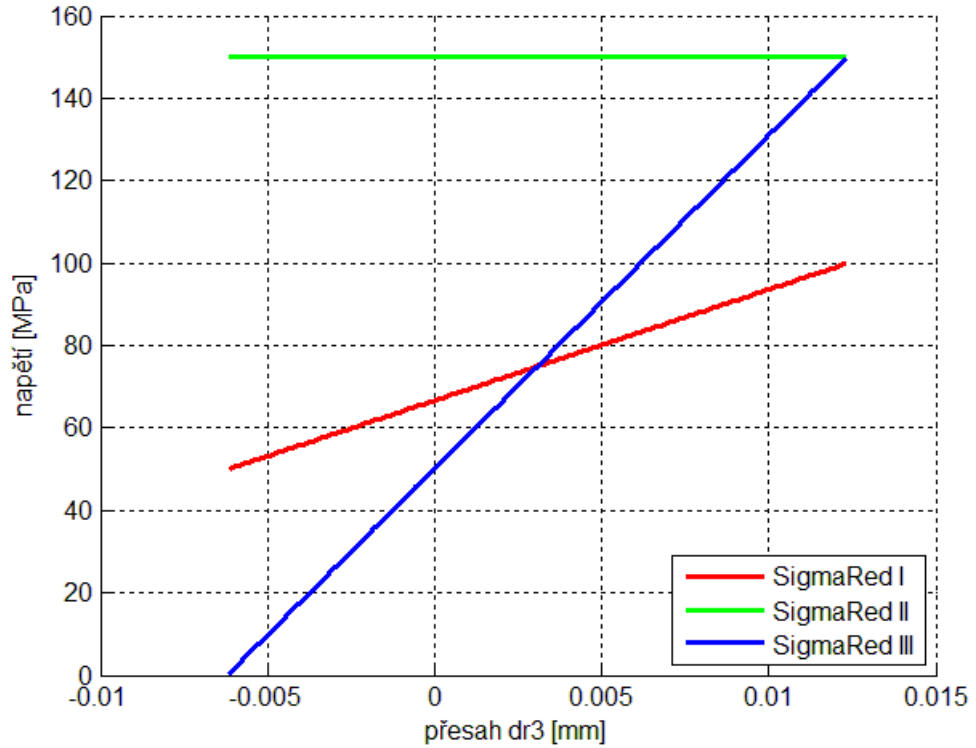
Obr. 2.12: Průběh napětí při přesazích $\Delta r_3=0.011$ [mm] a $\Delta r_3=0.006$ [mm]



Obr. 2.13: Průběh napětí při přesazích $\Delta r_3=0.011$ [mm] a $\Delta r_3=0.000$ [mm]



Obr. 2.14: Průběh napětí při přesazích $\Delta r_3=0.011$ [mm] a $\Delta r_3=-0.005$ [mm]



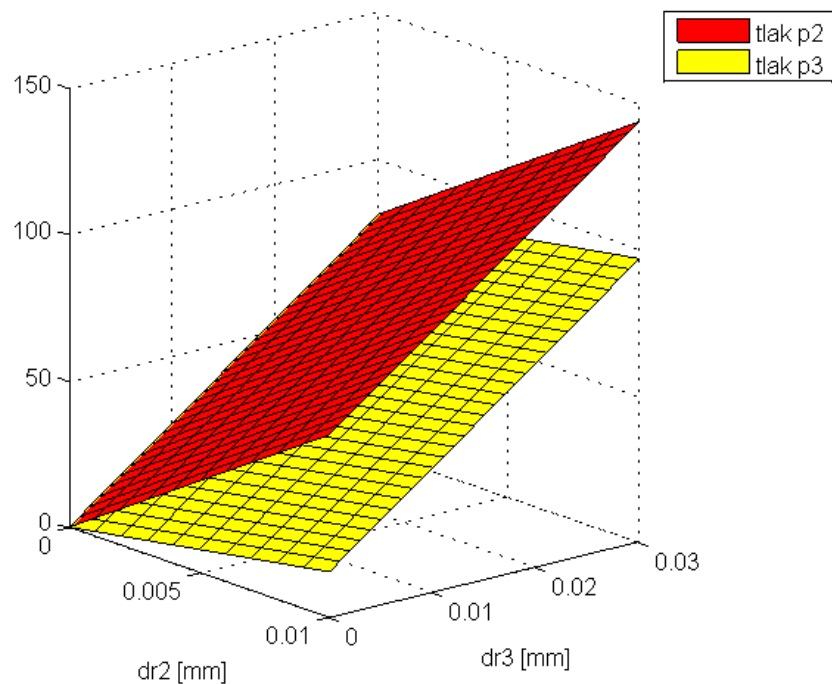
Obr. 2.15: Průběh redukovaných napětí na součástech spoje při změně přesahu Δr_3 a konstantním přesahu Δr_2

2.5 Kontaktní tlaky v závislosti na přesazích

Z rovnice (2.9) jsem vyjádřil funkce kontaktních tlaků (2.12). Na obr. 2.16 jsou znázorněny změny kontaktních tlaků v závislosti na změnách přesahů.

$$p_2(\Delta r_2, \Delta r_3) = - \frac{E \cdot \Delta r_2 \cdot r_2^2 \cdot r_3 + E \cdot \Delta r_3 \cdot r_2 \cdot r_3^2 - E \cdot \Delta r_3 \cdot r_2 \cdot r_4^2 - E \cdot \Delta r_2 \cdot r_3 \cdot r_4^2}{2 \cdot r_2 \cdot r_3 \cdot r_4^2} \quad (2.12)$$

$$p_3(\Delta r_2, \Delta r_3) = - \frac{E \cdot \Delta r_3 \cdot r_3^3 + E \cdot \Delta r_2 \cdot r_2 \cdot r_3^2 - E \cdot \Delta r_3 \cdot r_3 \cdot r_4^2 - E \cdot \Delta r_2 \cdot r_2 \cdot r_4^2}{2 \cdot r_3^2 \cdot r_4^2}$$

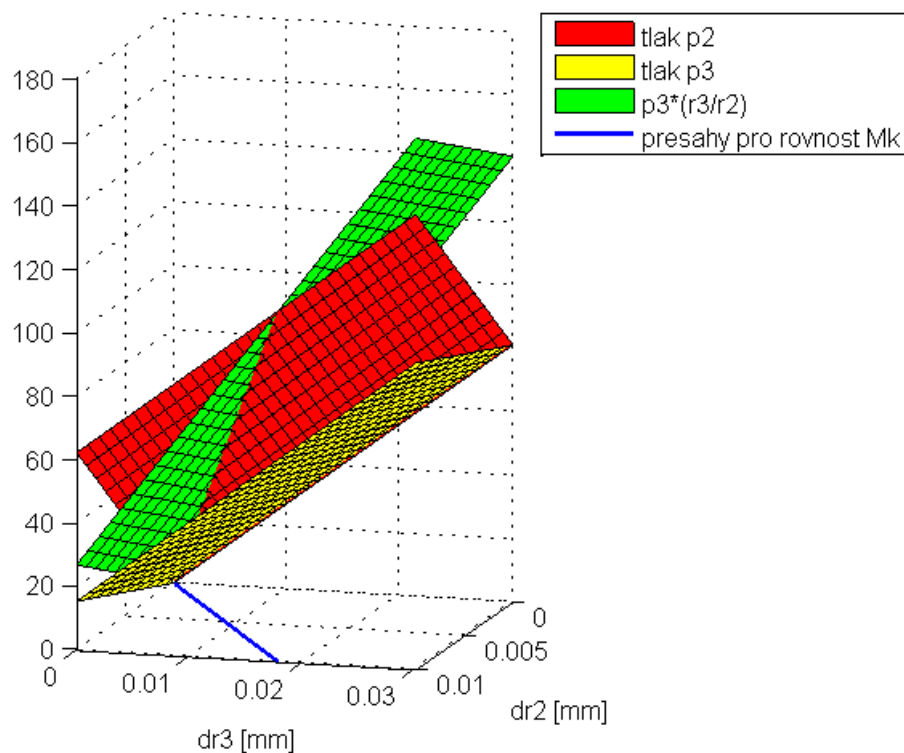


Obr. 2.16: Průběh kontaktních tlaků při změnách přesahů

2.6 Shodná schopnost přenosu kroutícího momentu M_k

Rovnice (2.13) udává kontaktní tlak p_2 vyjádřený pomocí kontaktního tlaku p_3 , tak aby kontakt vložky s hřídelí měl stejnou schopnost přenosu kroutícího momentu M_k jako kontakt náboje s vložkou. Na obr. 2.17 to znázorňuje zelená plocha. Modrá čára znázorňuje, pro které přesahy se funkce pp_2 (zelená plocha) rovná tlaku p_2 (červená plocha), který můžeme pro zvolenou lisovanou nádobu reálně získat.

$$pp_2(\Delta r_2, \Delta r_3) = p_3(\Delta r_2, \Delta r_3) \cdot \frac{r_3}{r_2} \quad (2.13)$$



Obr. 2.17: Velikost přesahů pro shodný přenos kroutícího momentu

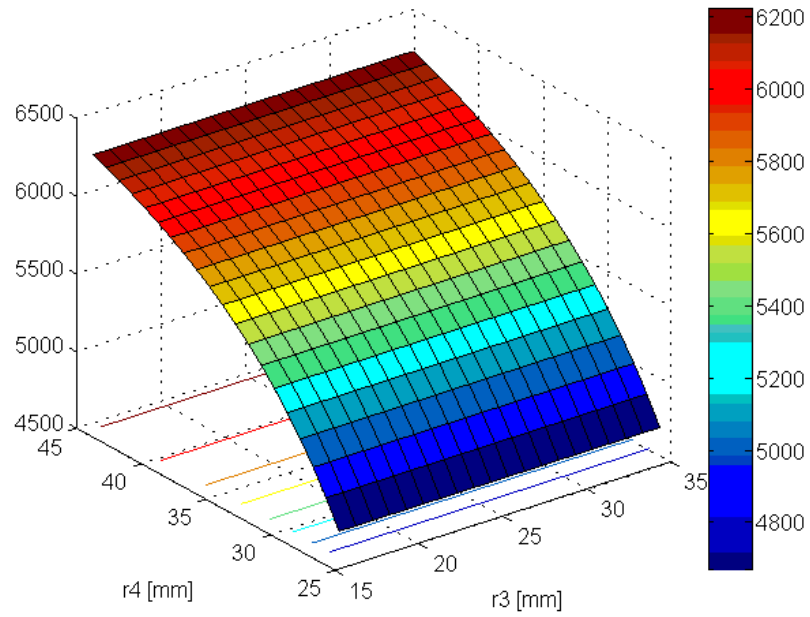
2.7 Parciální derivace kontaktních tlaků

Parciální derivace kontaktního tlaku podle přesahu vyjadřuje citlivost daného kontaktního tlaku na změnu daného přesahu. Tyto derivace jsem níže vyjádřil (2.14), (2.15), (2.16), (2.17) a graficky znázornil.

Na obr. 2.18 je znázorněna citlivost tlaku p_2 na změnu přesahu Δr_2 při různých velikostech poloměrů r_2 a r_3 . Je vidět, že citlivost tlaku p_2 je nezávislá na velikosti poloměru r_3 a je tím větší, čím je větší poloměr r_2 .

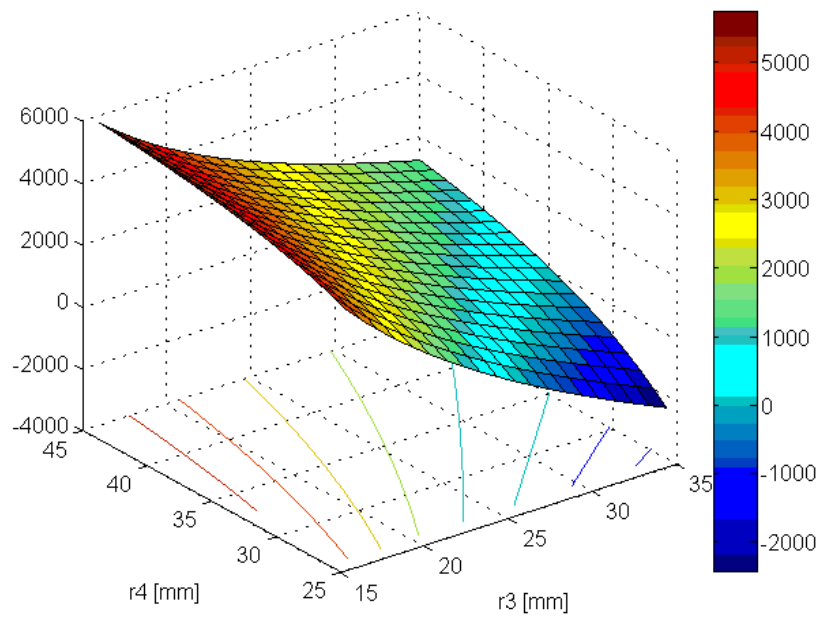
Citlivost tlaku p_2 na změnu přesahu Δr_3 je závislá na změnách obou poloměrů r_2 i r_3 a to v přímé úměře (obr. 2.19). Stejně tak citlivost p_3 na přesahu Δr_2 i Δr_3 (obr. 2.20 a obr. 2.21).

$$\frac{\partial p_2}{\partial \Delta r_2}(r_3, r_4) = -\frac{E \cdot r_2^2 - E \cdot r_4^2}{2 \cdot r_2 \cdot r_4^2} \quad (2.14)$$



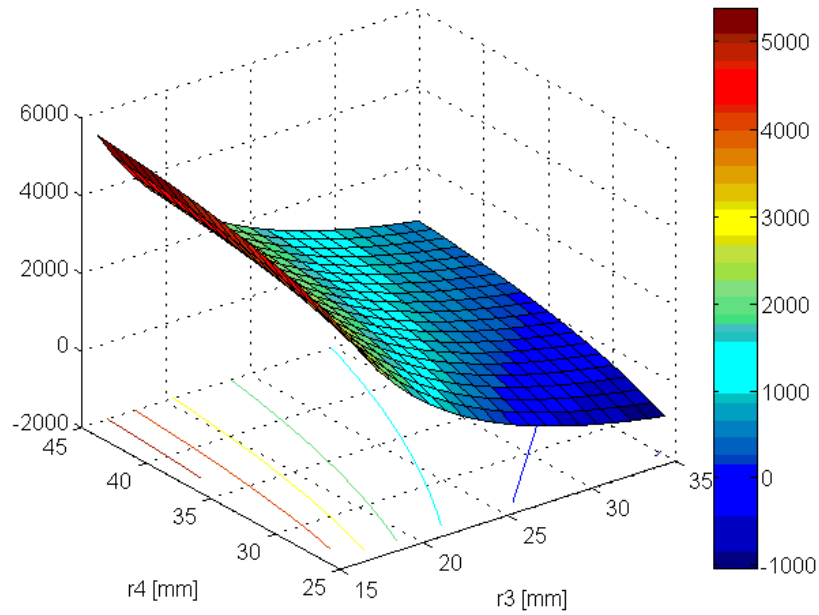
Obr. 2.18: Citlivost kontaktního tlaku p_2 na změnu přesahu Δr_2

$$\frac{\partial p_2}{\partial \Delta r_3}(r_3, r_4) = -\frac{E \cdot r_3^2 - E \cdot r_4^2}{2 \cdot r_3 \cdot r_4^2} \quad (2.15)$$



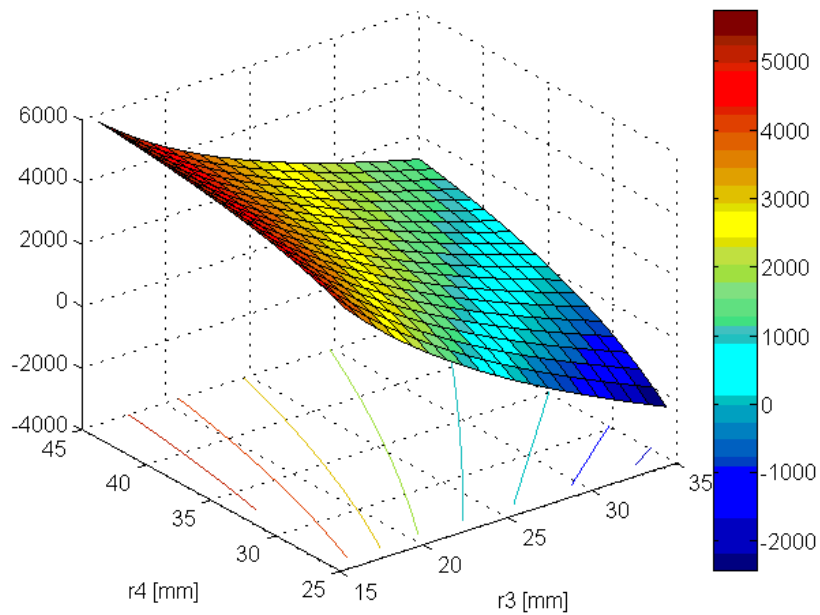
Obr. 2.19: Citlivost kontaktního tlaku p_2 na změnu přesahu Δr_3

$$\frac{\partial p_3}{\partial \Delta r_2}(r_3, r_4) = -\frac{E \cdot r_2 \cdot r_3^2 - E \cdot r_2 \cdot r_4^2}{2 \cdot r_3^2 \cdot r_4^2} \quad (2.16)$$



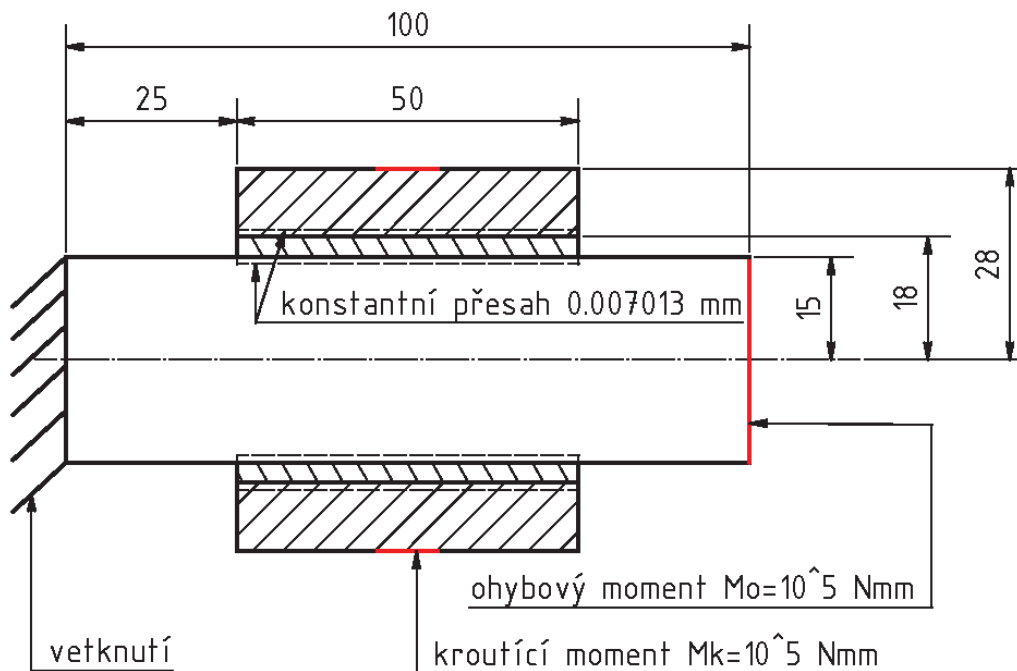
Obr. 2.20: Citlivost kontaktního tlaku p_3 na změnu přesahu Δr_2

$$\frac{\partial p_3}{\partial \Delta r_3}(r_3, r_4) = -\frac{E \cdot r_3^2 - E \cdot r_4^2}{2 \cdot r_3 \cdot r_4^2} \quad (2.17)$$



Obr. 2.21: Citlivost kontaktního tlaku p_3 na změnu přesahu Δr_3

3 MKP analýza násobně nalisovaného spoje



Obr. 3.1: Výchozí geometrie násobně nalisovaného spoje

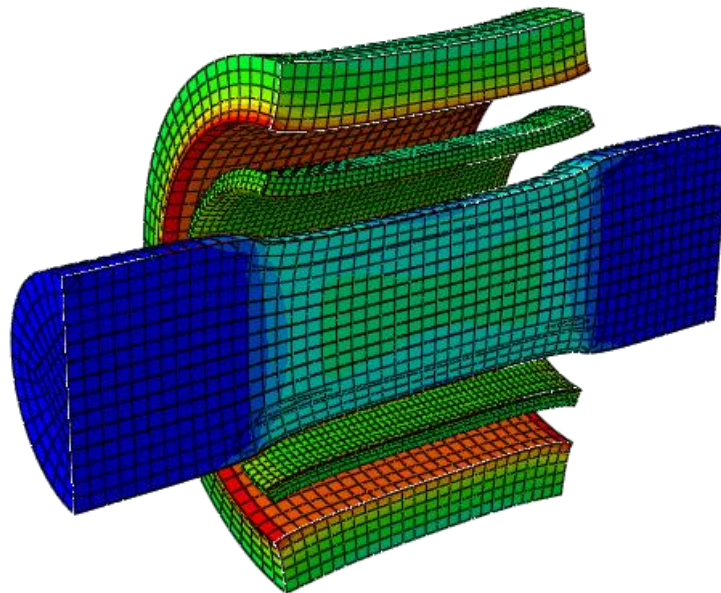
Na obr. 3.1 je výchozí geometrie mnou zkoumaného násobně nalisovaného spoje. Spoj se skládá z hřídele, distanční vložky a náboje. Tyto součásti jsou na sebe nejprve vzájemně nalisovány, následně zatíženy kroutícím momentem a nakonec doplněny i momentem ohybovým. Analyzovaný model jsem vytvořil v programu ABAQUS. Nalisování distanční vložky i náboje jsem zavedl pomocí funkce SURFACE TO SURFACE. Oba momenty jsou do modelu zavedeny pomocí funkce COUPLING. Hodnoty přesahů, zatížení a jejich místa působení jsou znázorněny na obr. 3.1.

Velikost přesahu mezi distanční vložkou a nábojem je dimenzována tak, aby při nalisování na náboji teoreticky vzniklo redukované napětí 150 [MPa]. K výpočtu přesahu jsem použil rovnici (2.3). Shodnou velikost přesahu jsem zvolil i mezi distanční vložkou a hřídelí. Velikost momentů jsem určil s ohledem na únosnost spoje. Při volbě rozměrů mého modelu jsem vycházel z již analyzovaných modelů prezentovaných v kapitole 1. Současně jsem bral ohledy na náročnost na výpočetní kapacitu, která s velikostí modelu souvisí. Analyzované chování tohoto modelu má vypovídající hodnotu i u spoje s parametry odlišnými, neboť lze předpokládat jeho podobné chování.

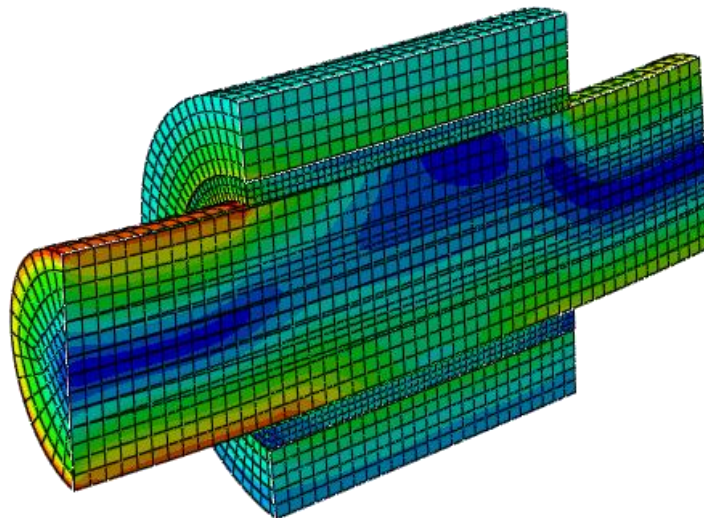
Na obr. 3.2 je vidět MKP model po nalisování s několikanásobně zvětšenými deformacemi. Na obr. 3.3 je poté model, který je již zatížen kroutícím a ohybovým momentem. Na obou obrázcích je barevně znázorněno redukované napětí. Parametry mého modelu jsou uvedeny v tab. 3.1.

r_2 [mm]	r_3 [mm]	r_4 [mm]	$\Delta r_2 = \Delta r_3$ [mm]	E [MPa]	μ [-]	M_k [Nmm]	M_o [Nmm]	f [-]
15	18	28	0.007013	2,1e5	0.3	10e5	10e5	0.3

Tab. 3.1: Parametry MKP modelu



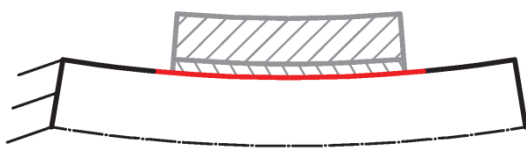
Obr. 3.2: MKP model po nalisování se zvětšenými deformacemi



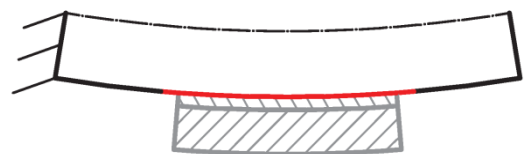
Obr. 3.3: MKP model po kombinovaném namáhání se zvětšenými deformacemi

3.1 Zkoumaná místa modelu

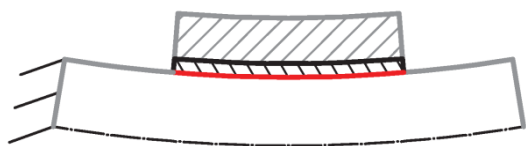
Stejně jako v kapitole 1.1 jsou i zde nejkritičtější vlákna v místech styku jednotlivých součástí. Tento fakt můžeme vidět v kapitole 2.1 na optimálně nalisované nádobě (obr. 2.1), kde je patrné, že v těchto místech je redukované napětí největší. Po zavedení ohybového momentu je pak dobré zkoumat 8 vláken v rovině momentu (obr. 3.4).



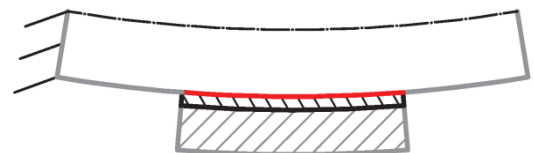
Vlákno na vnější straně hřídele namáhané na tlak



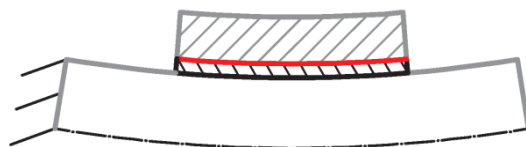
Vlákno na vnější straně hřídele namáhané na tah



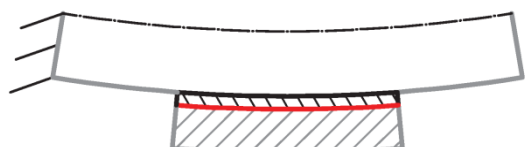
Vlákno na vnitřním poloměru distanční vložky
namáhané na tlak



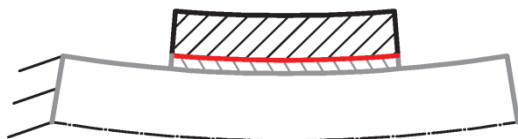
Vlákno na vnitřním poloměru distanční vložky
namáhané na tah



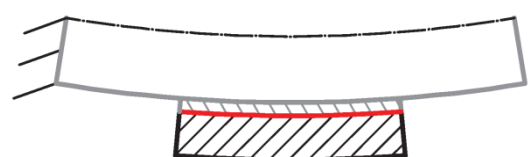
Vlákno na vnějším poloměru distanční vložky
namáhané na tlak



Vlákno na vnějším poloměru distanční vložky
namáhané na tah



Vlákno na vnitřním poloměru náboje namáhané
na tlak

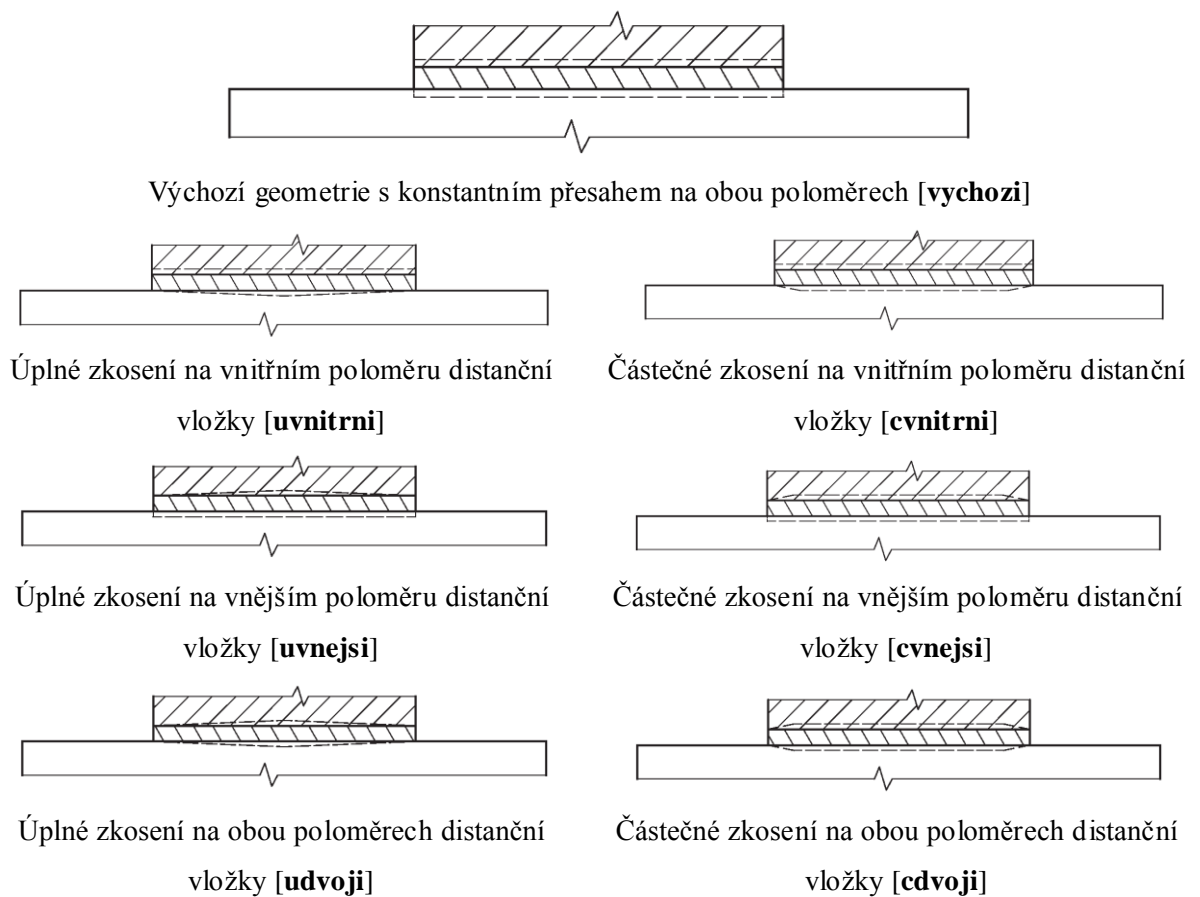


Vlákno na vnitřním poloměru náboje namáhané
na tah

Obr. 3.4: Zkoumaná vlákna modelu

3.2 Změna geometrie distanční vložky

Cílem mého násobně nalisovaného spoje je mít vložku jako jedinou upravovanou součást spoje. Distanční vložka se bude upravovat podle již vyrobeného hřídele a náboje. Kvůli správnému přesahu nalisování je možné upravovat samotnou velikost vložky. Další možností úpravy vložky je změna její geometrie. Touto změnou se pokusím regulovat napěťové špičky a prokluzu ve spoji. Z výsledků předešlých bakalářských prací a vlastních zkušeností jsem zvolil 6 změn výchozí geometrie distanční vložky. Všechny geometrie distanční vložky mají maximální přesah shodný s přesahem výchozí geometrie a tedy 0.007013 [mm]. Na okrajích vložky je přesah nastaven vždy nulový. Vložky s částečným zkosením mají délku zkosení 5 [mm]. Kvůli snazší orientaci v grafech jsem každé geometrii přiřadil jednoslovný název (obr. 3.5). Na obrázku je průběh přesahů u jednotlivých geometrií znázorněn přerušovanou čarou.



Obr. 3.5: Zkoumané geometrie distanční vložky

3.3 Analýza spoje pro různé geometrie distanční vložky

Provedl jsem analýzu pro sedm různých geometrií vložky v osmi kritických vláknech. Zkoumám průběh redukovaného napětí ve spoji a výskyt prokluzů mezi součástmi.

Cílem analýzy redukovaného napětí je zjistit, zda je možné pomocí speciálně upravených geometrií distanční vložky regulovat průběhy napětí ve spoji namáhaném kombinovaným zatížením. Zejména pak, zda jsme schopni regulovat napěťové špičky, které vznikají u výchozí geometrie bez upravené vložky. Napětí je důležité umět regulovat především na náboji a hřídeli. Distanční vložka je vůči hřídeli a náboji malá součást, kterou můžeme v případě výskytu nežádoucího napětí vyrobit z odolnějšího materiálu.

Dále je důležité za pomoci upravené geometrie vložky dokázat regulovat výskyt prokluzů mezi součástmi. Prokluzu se snažíme redukovat, neboť dávají za vznik nežádoucímu frettingu. Obecně nezáleží na tom, jak velký prokluz ve spoji vzniká, důležitý je faktor jeho výskytu. V mé diplomové práci se však budu zabývat i velikostí prokluzů. Menší prokluzu jsou výhodnější, neboť lze očekávat, že při snižování velikosti vnějšího zatížení menší prokluzu vymizí nejdříve.

3.4 Analýza redukovaného napětí

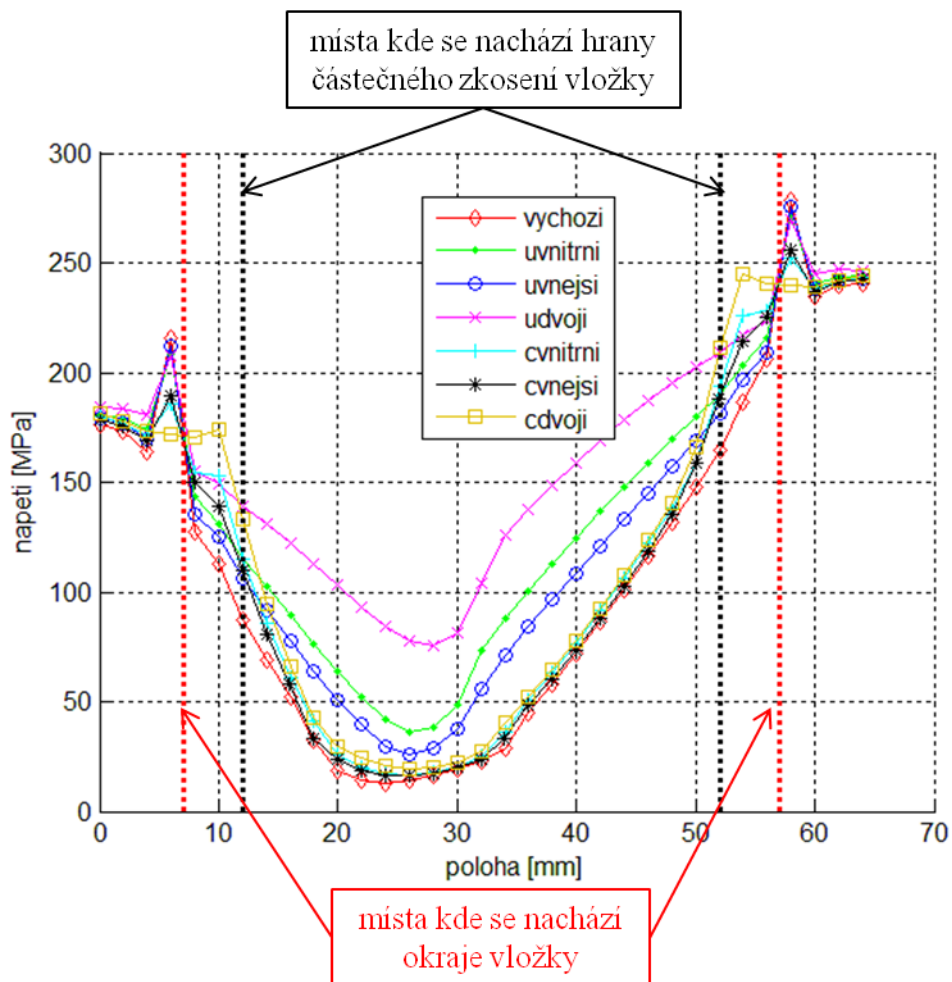
Redukované napětí slouží jako základní údaj o namáhání spoje. Jedná se o skalární veličinu, která se vypočte z hlavních napětí dle určité hypotézy. V následujících grafech je vyneseno redukované napětí, vypočteno programem ABAQUS pomocí hypotézy HMM. V této kapitole analyzuji, jak se redukované napětí chová v závislosti na změnách geometrie vložky.

3.4.1 Vlákna namáhaná na tlak

Vzhledem k tomu, že je spoj namáhan ohybovým momentem, je třeba rozlišovat vlákna v rovině momentu namáhaná tlakem a namáhaná tahem. Zde se zaměřím na vlákna ohybovým momentem “tlačena“, tedy namáhaná na tlak.

Vlákno na vnějším poloměru hřídele namáhané na tlak

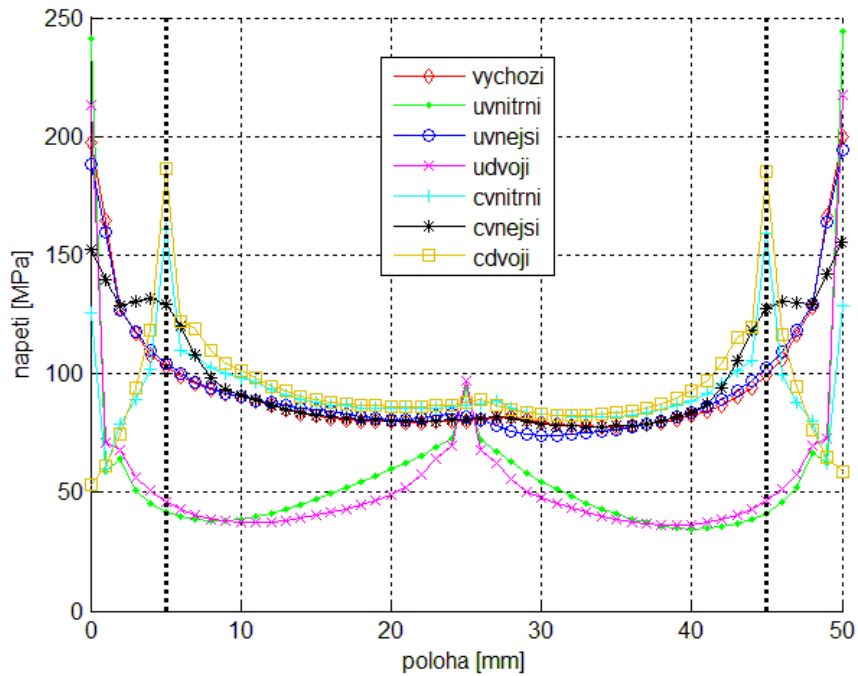
Vlivem deformace hřídele, po zavedení ohybového momentu, vznikají na hřídeli, v místě dotyku s hranou objímky, napěťové špičky. Tyto špičky jsou menší u geometrií s částečným zkosením [cvnitřni, cvnější]. U distanční vložky s částečným zkosením na obou poloměrech [cdvoji] dokonce žádné napěťové špičky nevznikají (obr. 3.6). Nesymetrie je způsobena odvodem krouticího momentu po hřídeli směrem k vetknutí.



Obr. 3.6: Redukované napětí na vnějším vlákně hřídele namáhaném na tlak

Vlákno na vnitřním poloměru distanční vložky namáhané na tlak

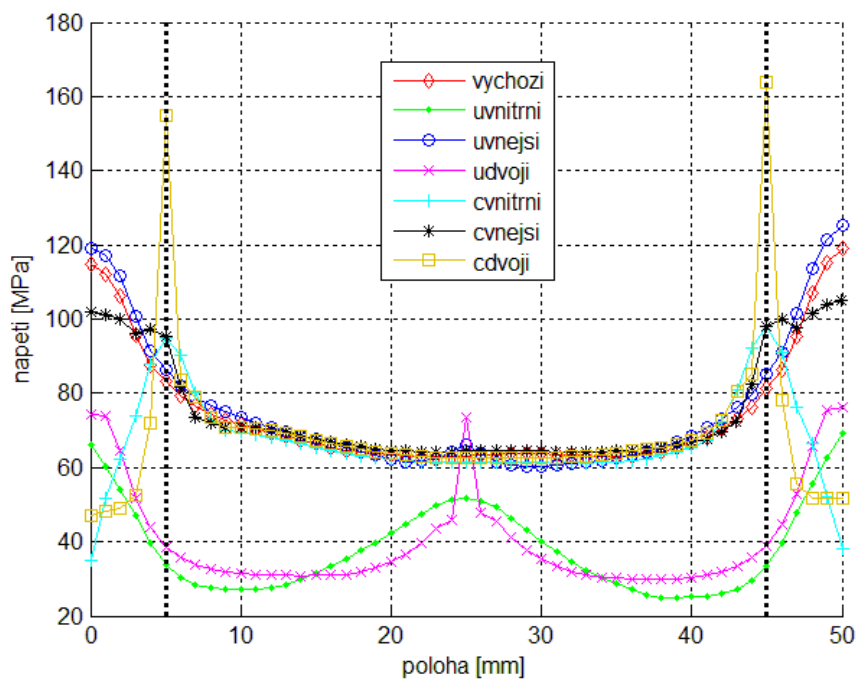
Na tlakovém vlákně vložky dochází ke stejnému jevu jako na tlakovém vlákně hřídele. Vlivem tlaku hřídele na okraj vložky vznikají na okraji vložky napěťové špičky a to u výchozí geometrie a geometrií s úplným zkosením. Distanční vložka s částečným zkosením posouvá napěťové špičky blíže ke středu spoje (obr. 3.7). Všechny tyto napěťové špičky jsou však velmi lokálního charakteru, vznikají působením síly na ostrou hranu spoje. Shodný poznatek jsem uvedl ve své bakalářské práci [1].



Obr. 3.7: Redukované napětí na vnitřním vlákne vložky namáhaném na tlak

Vlákno na vnějším poloměru distanční vložky namáhané na tlak

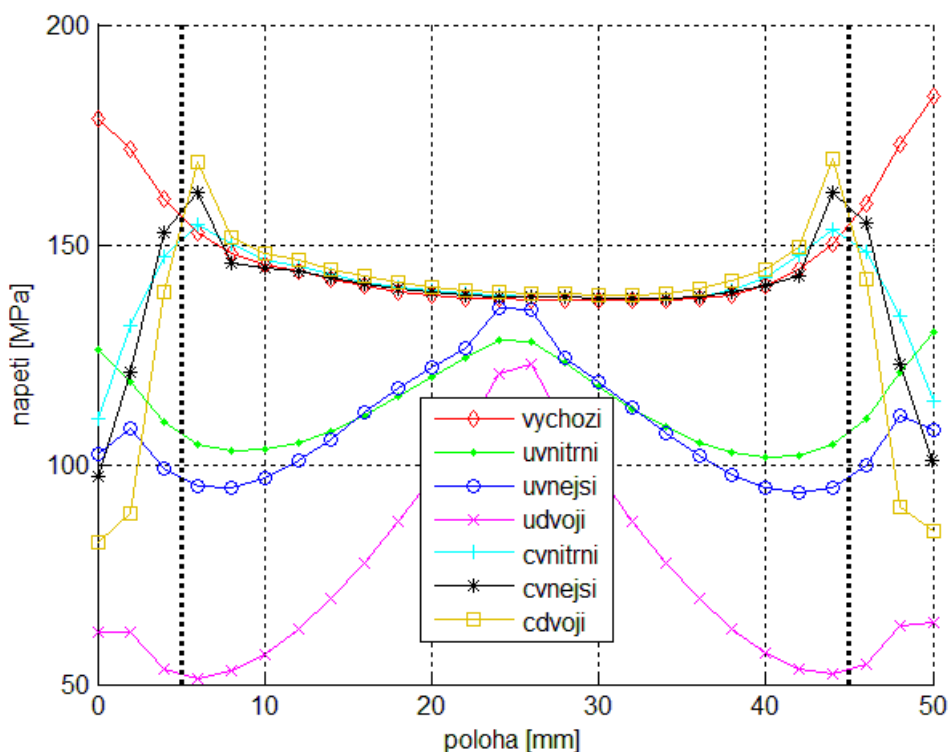
U tohoto vlákna u geometrie s částečným zkosením na obou poloměrech [**cdvoji**] vznikají výrazné napětové špičky. Tyto špičky vznikají již při samotném nalisování a mají velmi lokální charakter. Ke snížení napětových špiček na okraji vložky dochází u všech geometrií vložek, kromě geometrie s úplným zkosením na vnějším poloměru [**uvnejsi**] (obr. 3.8).



Obr. 3.8: Redukované napětí na vnějším vlákne vložky namáhaném na tlak

Vlákno na vnitřním poloměru náboje namáhané na tlak

Maximální hodnota redukovaného napětí na vlákně náboje namáhaném na tlak je u všech mnoh zvolených spojů menší než u spoje s neupravenou vložkou [vychozi]. Napěťové špičky nejvíce snižují geometrie vložek s úplným zkosením [uvnitrni, udvoji, uvnejsi] (obr. 3.9).



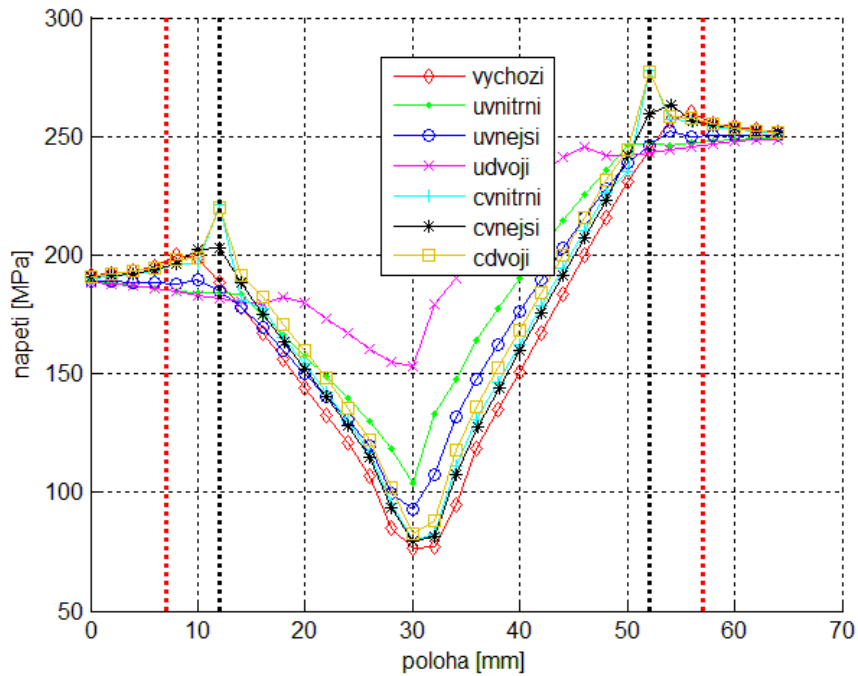
Obr. 3.9: Redukované napětí na vnitřním vlákně náboje namáhaném na tlak

3.4.2 Vlákna namáhaná na tah

Dále jsem se zaměřil na vlákna ohybovým momentem “tažená“, tedy namáhaná na tah.

Vlákno na vnějším poloměru hřídele namáhané na tah

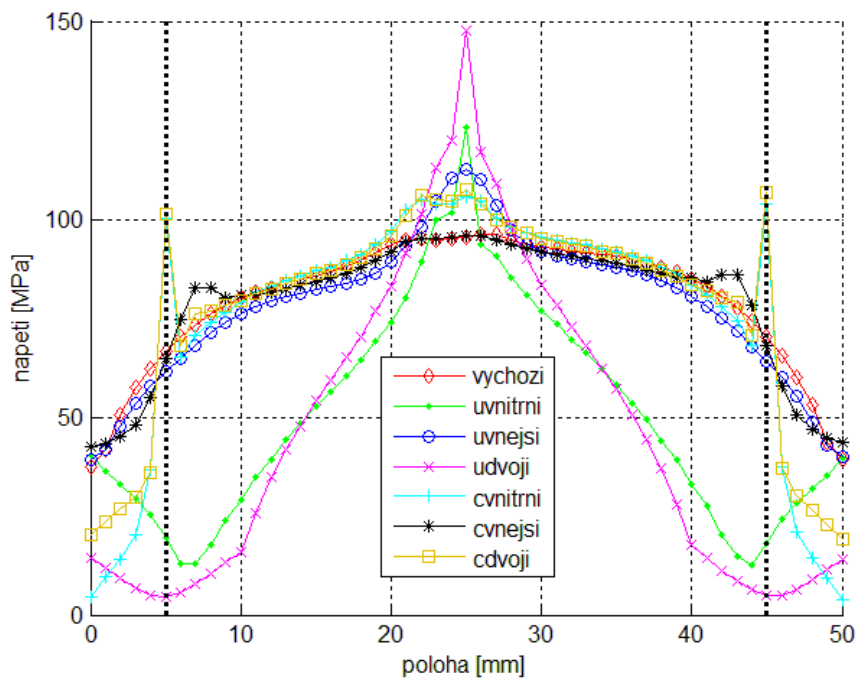
U geometrií s vnitřním částečným zkosením (**cvnitri**, **cdvoji**), vznikají v místě hrany zkosení napěťové špičky (obr. 3.10). Tyto špičky jsou velmi lokálního charakteru.



Obr. 3.10: Redukované napětí na vnějším vlákně hřídele namáhaném na tah

Vlákně na vnitřním poloměru distanční vložky namáhané na tah

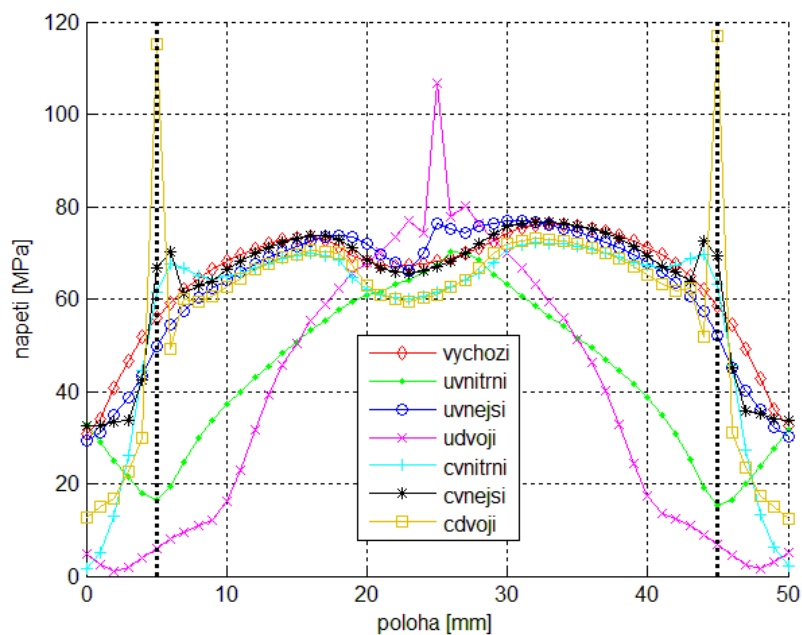
Zde dochází k největší napět'ové špičce u geometrie vložky s úplným zkosením na obou poloměrech [**udvoji**] a to uprostřed spoje (obr. 3.11). Jedná se znovu o špičku lokálního charakteru.



Obr. 3.11: Redukované napětí na vnitřním vlákně vložky namáhaném na tah

Vlákno na vnějším poloměru distanční vložky namáhané na tah

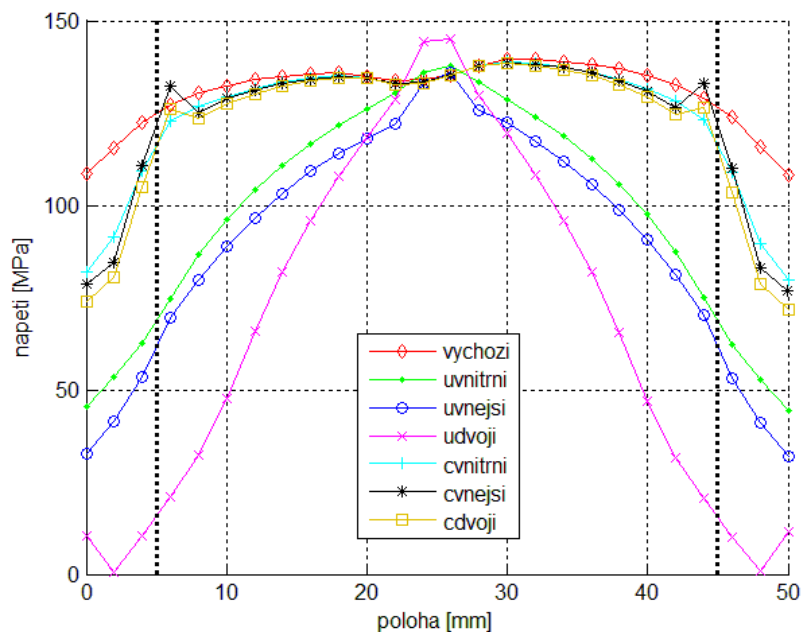
Lokální špičky zde vznikají u geometrií se zkosením na obou poloměrech [**cdvoji**, **udvoji**], viz obr. 3.12. Tyto špičky jsou způsobené taktéž vlivem koncentrované síly na ostrou hranu.



Obr. 3.12: Redukované napětí na vnějším vlákně vložky namáhaném na tah

Vlákno na vnitřním poloměru náboje namáhané na tah

Na tahovém vlákně náboje k výrazným napěťovým špičkám nedochází. Největší hodnoty redukovaného napětí v tomto vlákně jsou u spoje s vložkou s úplným zkosením na obou poloměrech [**udvoji**] (obr. 3.13).



Obr. 3.13: Redukované napětí na vnitřním vlákně náboje namáhaném na tah

3.5 Vyhodnocení chování napětí při změně geometrie vložky

Díky analýze (kapitola 3.4) jsem zjistil, že na náboji dokážeme napětí regulovat pomocí všech mnou zkoumaných geometrií distanční vložky. Maximální hodnoty redukovaného napětí na náboji dosahují u všech spojů s upravenou vložkou menších hodnot než u spoje s vložkou neupravenou. Napětí na náboji nejvíce snižují vložky s úplným zkosením [**udvoji**, **uvnitřni**, **uvnější**] (obr. 3.9 a obr. 3.13).

Na hřídeli je důležité analyzovat jak vlákno namáhané na tlak, tak i vlákno namáhané na tah. V tlakovém vláknu je kritické místo s maximálními napětími ve styku hřídele s okrajem distanční vložky. Tahové vlákno je třeba analyzovat zejména pro spoje s částečně zkosenými vložkami. Na tahovém vláknu je kritické místo ve styku hřídele s hranou zkosení vložky. Jediná geometrie vložky, která snižuje maximální hodnotu redukovaného napětí na hřídeli oproti výchozí, je geometrie s částečným vnějším zkosením [**cvnější**]. Snižuje maximální hodnotu redukovaného napětí na hřídeli přibližně o 6% (obr. 3.6 a obr. 3.10).

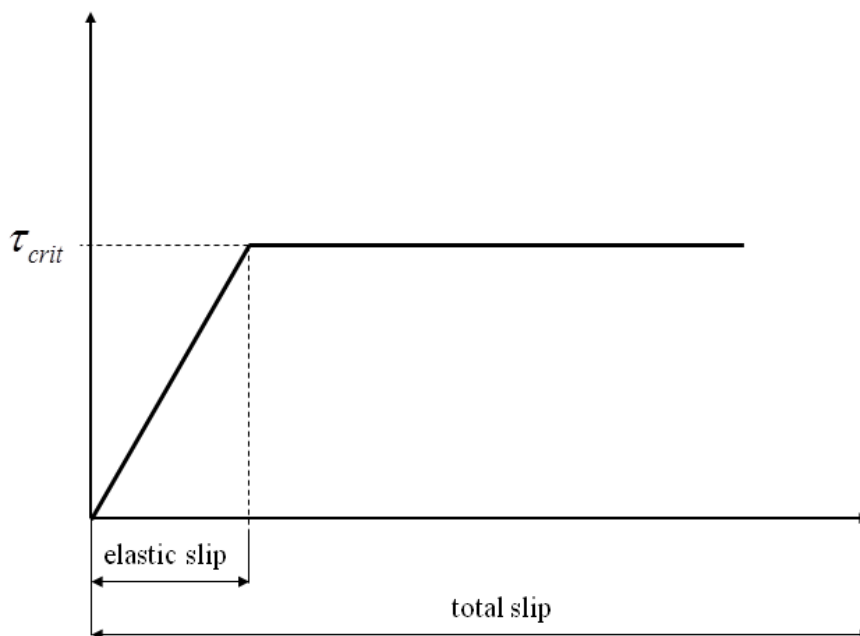
U vložky vznikají největší napěťové špičky na jejím okraji ve vláknech namáhaných na tlak. Daří se je posunout a redukovat díky vložkám s částečnými zkoseními na jednom z poloměrů [**cvnější**, **cvnitřni**] (obr. 3.7 a obr. 3.8).

Celkově se tedy jako nejlepší varianta jeví geometrie s částečným vnějším zkosením [**cvnější**], neboť jako jediná snižuje napětí na všech dílech spoje.

3.6 Analýza prokluzů

Pokud po sobě prokluzují dvě kontaktní plochy, hrozí jejich poškození v podobě frettingu. K analýze prokluzu mi poslouží výstup z MKP analýzy CSLIP. Jedná se o relativní prokluz uzlů v kontaktních plochách. Pokud tyto plochy v určitých místech v kontaktu nejsou, CSLIP se v těchto místech nevyskytuje. To odpovídá mým požadavkům, neboť pokud se vůči sobě posouvají dvě plošky, které nejsou v kontaktu, pochopitelně fretting nevzniká. Program ABAQUS ve výchozím nastavení dovoluje při svém výpočtu relativně vysoký ELASTIC SLIP, tato hodnota by nám však výsledné prokluzy zkreslovala, neboť ABAQUS započítává ELASTIC SLIP do výsledného prokluzu ploch. Tedy do výstupu CSLIP. V reálném modelu jsou však tyto plochy stále pevně spojené a k reálnému prokluzu nedochází.

Průběh prokluzu v závislosti na smykovém napětí je názorně vidět na obr. 3.14. Reálnému průběhu by odpovídal model s nulovým ELASTIC SLIP, neboť k reálnému prokluzu dochází skokově po překročení kritického smykového napětí. Při nastavení nulového ELASTIC SLIP však úlohy v ABAQUSU nekonvergovaly k řešení, proto jsem nastavil hodnotu ELASTIC SLIP tak malou, aby byla řádově menší než vyskytující se prokluzu a tedy $1e-4$ [mm].



Obr. 3.14: Závislost prokluzu na smykovém napětí dle programu ABAQUS

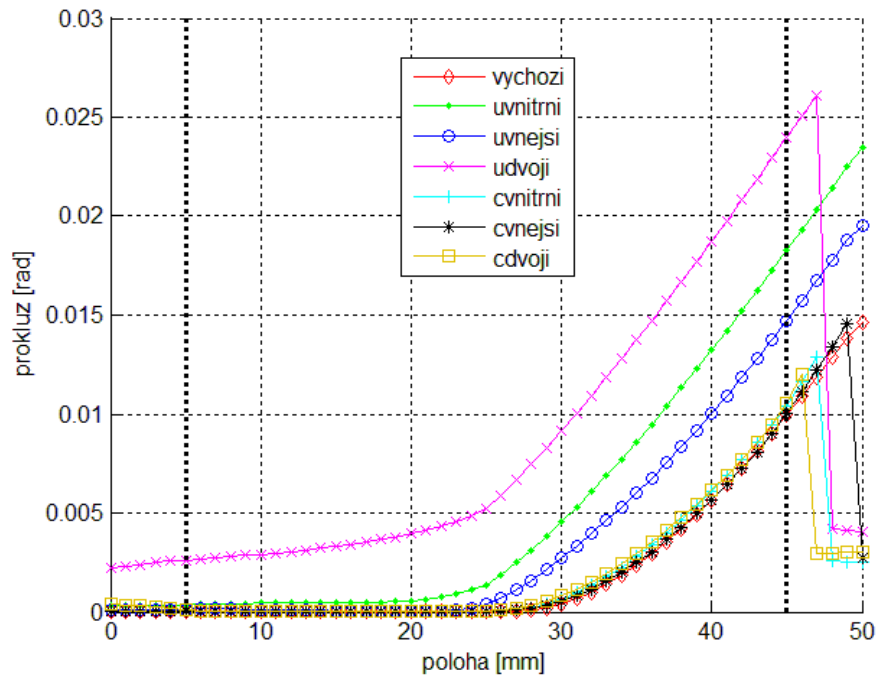
3.7 Tečný prokluz

Tečný prokluz v nalisovaném spoji vzniká vlivem zatížení kroučícím momentem, jak již bylo uvedeno v kapitole 1.4.1. Výstup z programu ABAQUS, který v mém případě udává relativní pohyb uzlů kontaktních ploch v tečném směru, se nazývá CSLIP1. Tento prokluz v jednotlivých vláknech je vyneseno v závislosti na poloze v následujících grafech.

3.7.1 Vlákna namáhaná na tlak

Vlákno na vnitřním poloměru distanční vložky namáhané na tlak

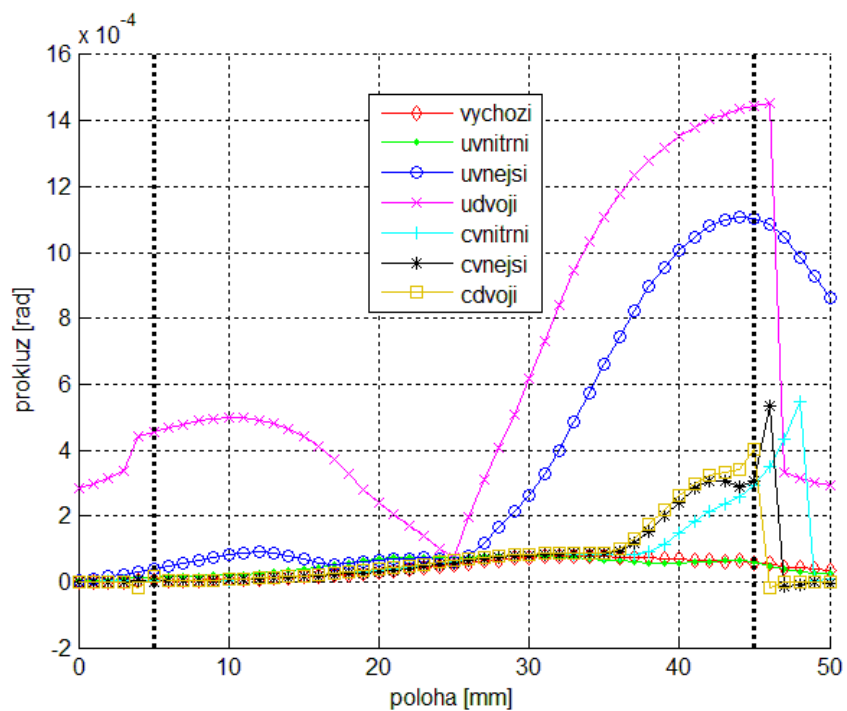
Tečný prokluz se zvětšuje směrem k vetknutí, neboť tímto směrem se kroučící moment odvádí. Největších tečných prokluzů v tomto vlákne dosahuje geometrie [**udvoji**], avšak na okraji vložky dochází k jejímu poklesu vlivem nulového kontaktního tlaku mezi okrajem vložky a hřídelí. U geometrií s částečným zkosením [**cvnitřni**, **cvnejsi**, **cdvoji**] dochází ke stejnému jevu (obr. 3.15).



Obr. 3.15: Tečný prokluz na vlákne vnitřního poloměru vložky namáhaném na tlak

Vlákno na vnějším poloměru distanční vložky namáhané na tlak

Na vnějším poloměru se speciální geometrie vložky chovají podobně jako na poloměru vnitřním. Hodnoty prokluzů jsou však přibližně o řád menší, neboť většina krouticího momentu je zachycena ve styku distanční vložky s hřídelí (obr. 3.16).

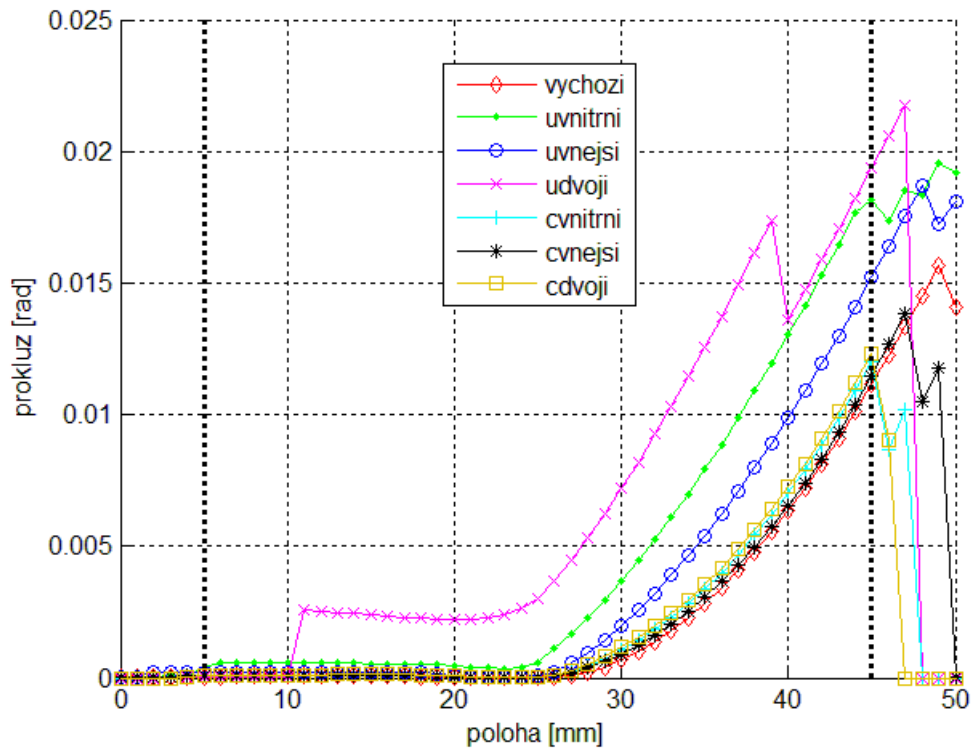


Obr. 3.16: Tečný prokluz na vlákne vnějšího poloměru vložky namáhaném na tlak

3.7.2 Vlákna namáhaná na tah

Vlákno na vnitřním poloměru distanční vložky namáhané na tah

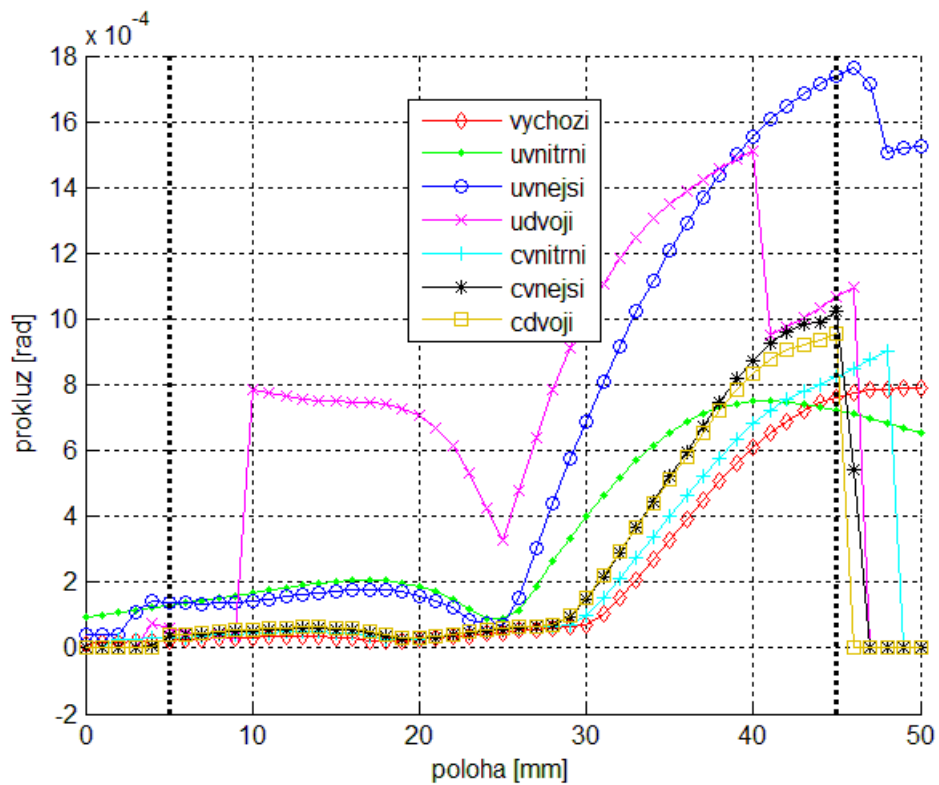
Tečné prokluzy na vnitřním poloměru distanční vložky na vlákne namáhaném na tah se chovají obdobně jako u vlákna namáhaného na tlak, avšak na okraji distanční vložky prokluzy klesají u všech geometrií, neboť vlivem ohybového momentu dochází v tahovém vláknu k odlehnutí hřídele (obr. 3.17).



Obr. 3.17: Tečný prokluz na vlákne vnitřního poloměru vložky namáhaném na tah

Vlákno na vnějším poloměru distanční vložky namáhané na tah

Na vnějším poloměru vložky jsou prokluzy opět o řád menší než na poloměru vložky vnitřním. V tahovém vnějším vláknu vložky (obr. 3.18) jsou však maximální hodnoty prokluzů u všech geometrií vyšší než u tlakového vnějšího vlákna vložky (obr. 3.16).



Obr. 3.18: Tečný prokluz na vlákne vnějšího poloměru vložky namáhaném na tah

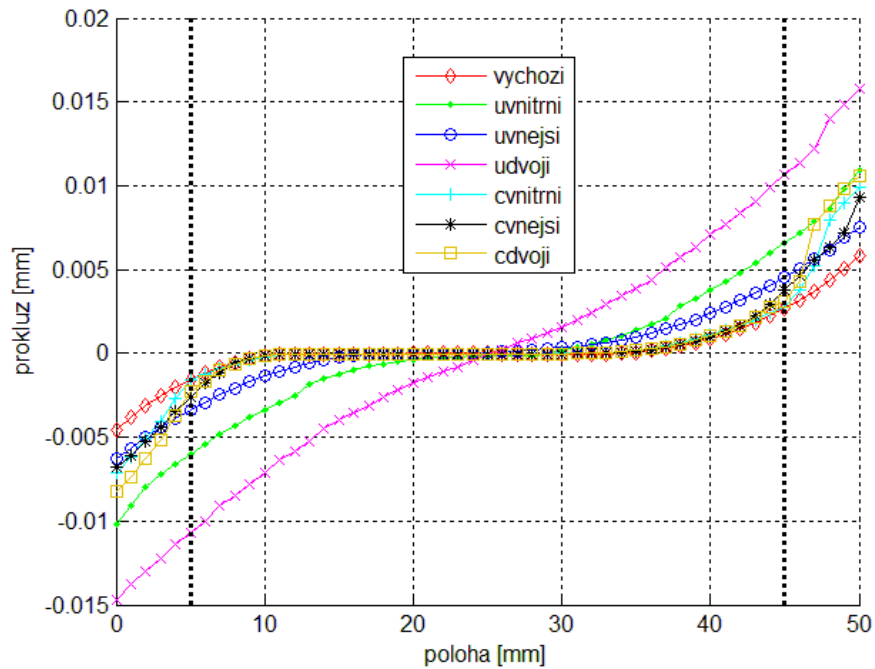
3.8 Osový prokluz

Osový prokluz vzniká v nalisovaném spoji vlivem zatížení ohybovým momentem viz kapitola 1.4.2. Výstup z programu ABAQUS, který v mém případě popisuje relativní pohyb uzlů kontaktních ploch v axiálním směru, se nazývá CSLIP2.

3.8.1 Vlákna namáhaná na tlak

Vlákno na vnitřním poloměru distanční vložky namáhané na tlak

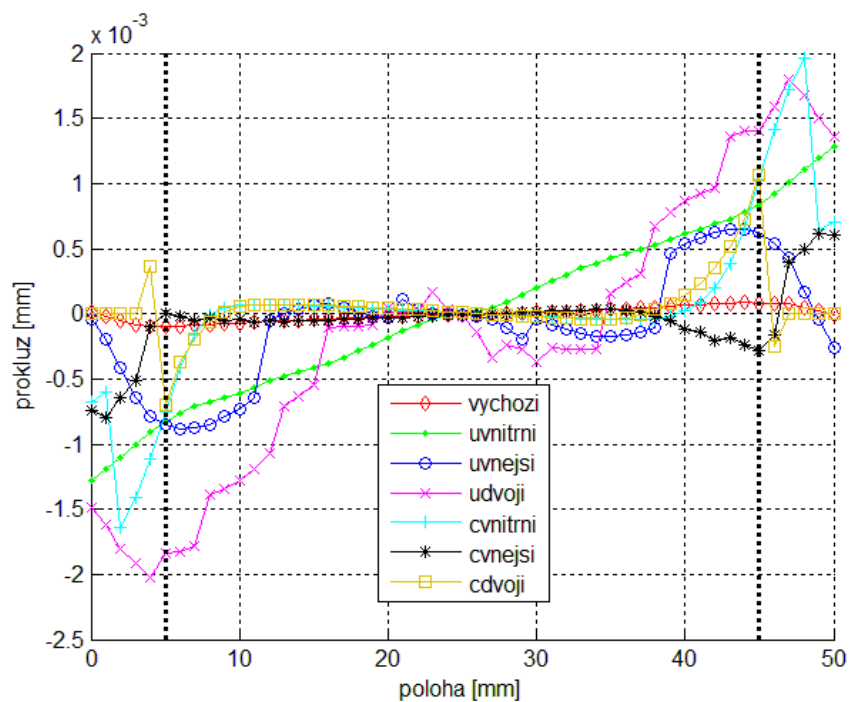
Největších hodnot osového prokluzu ve vlákne na vnitřním poloměru vložky namáhaném na tlak dosahuje geometrie vložky s úplným zkosením na obou stranách [**udvoji**]. Nejmenších hodnot naopak geometrie neupravená [**vchozi**] (obr. 3.19).



Obr. 3.19: Osový prokluz na vlákně vnitřního poloměru vložky namáhaném na tlak

Vlákně na vnějším poloměru distanční vložky namáhané na tlak

Na vnějším poloměru vložky dochází k prokluzům cca o řád menší než na poloměru vnitřním. Na obr. 3.20 stojí za povšimnutí, že u většiny geometrií dochází na okraji objímky k poklesu prokluzů. U výchozí geometrie k prokluzu téměř nedochází.



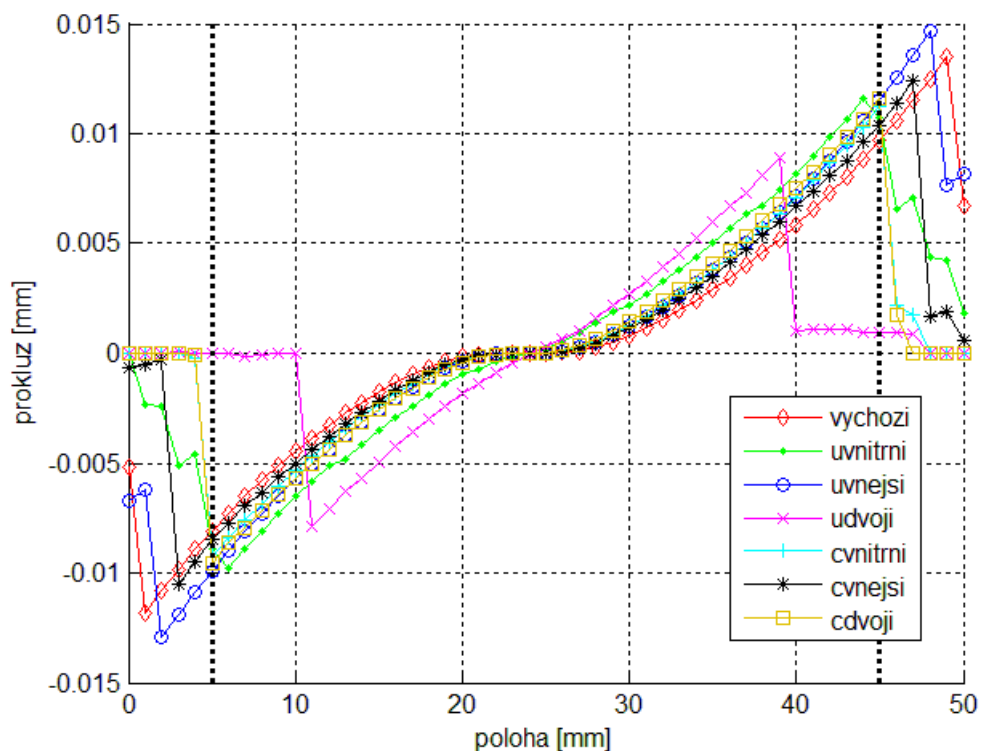
Obr. 3.20: Osový prokluz na vlákně vnějšího poloměru vložky namáhaném na tlak

3.8.2 Vlákna namáhaná na tah

Osový prokluz u vláken namáhaných na tah je stejně jako prokluz tečný ovlivněn kontaktním tlakem. Na okrajích distanční vložky klesá u tažených vláken kontaktní tlak k nule a tím pádem se zde zmenšuje relativní prokluz.

Vlákno na vnitřním poloměru distanční vložky namáhané na tah

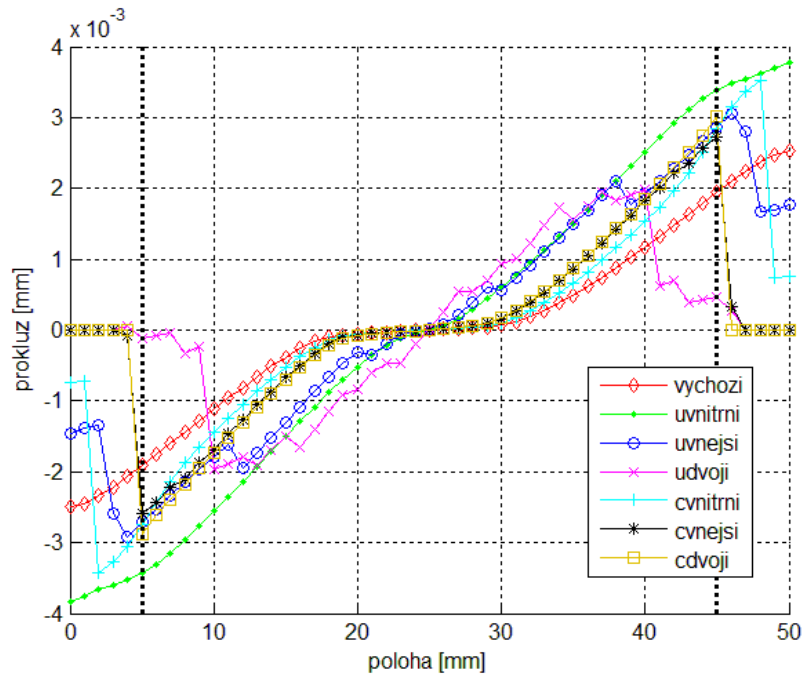
Na obr. 3.21 je vidět, že na všech geometriích dochází na okraji vložky k poklesu relativního prokluzu. Nejdříve dochází k poklesu prokluzu u geometrie [udvoji,] neboť u této geometrie dochází nejdříve k odlehnutí kontaktních ploch. Největší prokluzy se vyskytují u geometrií [uvnejsi].



Obr. 3.21: Osový prokluz na vlákně vnitřního poloměru vložky namáhaném na tah

Vlákno na vnějším poloměru distanční vložky namáhané na tah

Na obr. 3.22 je vidět osový prokluz na vlákně vnějšího poloměru distanční vložky namáhaném na tah. Nejmenších prokluzů dosahuje geometrie s úplným zkosením na obou stranách [udvoji]. Naopak největších geometrie [uvnitri].



Obr. 3.22: Osový prokluz na vlákně vnějšího poloměru vložky namáhaném na tah

3.9 Vyhodnocení chování prokluzů při změně geometrie vložky

Důležité je vyhodnotit prokluzy v místech spoje s největším napětím, neboť zde hrozí největší riziko opotřebení frettingem.

Tečný prokluz se na vnitřním poloměru vložky daří regulovat pomocí všech geometrií s částečným zkosením. Průběh tečného prokluzu je podobný jako u vložky s výchozí geometrií, avšak na okraji vložky dochází k jeho poklesu (obr. 3.15 a obr. 3.17).

Tečný prokluz na vnějším poloměru se chová obdobně. Opět u geometrií s částečným zkosením dochází k poklesu prokluzů na okraji vložky, avšak je třeba zaměřit pozornost na prokluzy vznikající v místech zkosení, kde se u spojů s částečně zkosenou vložkou vyskytují největší napětí (obr. 3.16 a obr. 3.18).

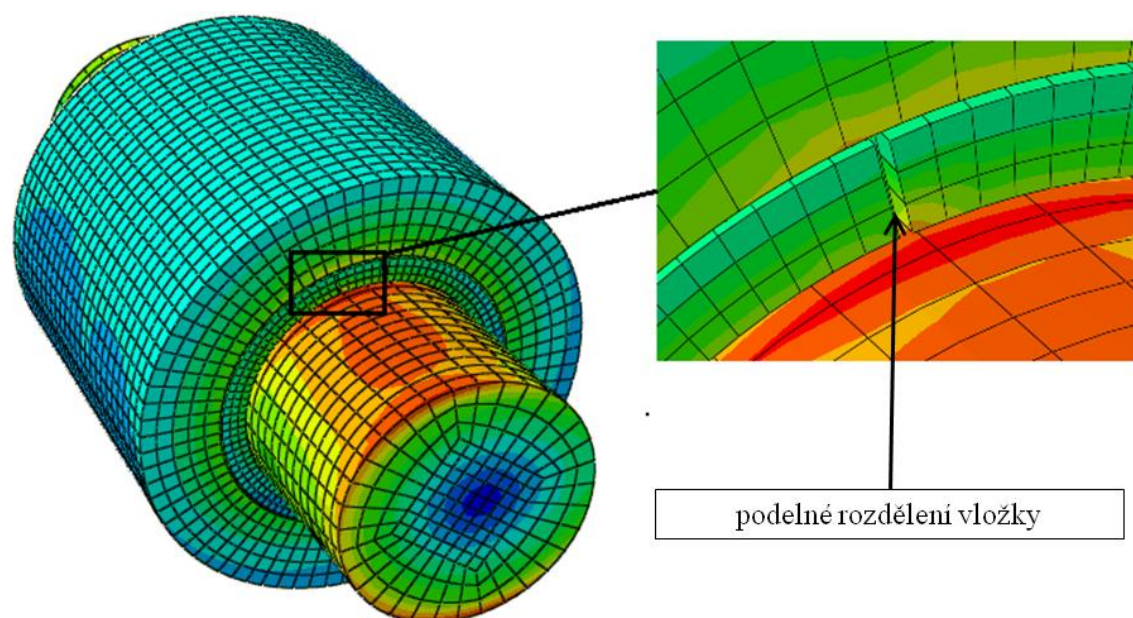
Osový prokluz na vnitřním poloměru vložky pomocí změn geometrie regulovat nelze. Nejmenší prokluzy v místech maximálních napětí vnikají u výchozí geometrie (obr. 3.19 a obr. 3.21).

Osový prokluz na vnějším poloměru vložky vychází nejlépe pro geometrie s úplným vnějším zkosením [**uvnejsi**, **udvoji**] (obr. 3.20 a obr. 3.22).

4 MKP analýza násobně nalisovaného spoje s dělenou vložkou

Dalším bodem mé diplomové práce je stanovení napjatosti a prokluzů spoje s dělenou vložkou. Aplikace dělené vložky na nalisovaný spoj má výhodu v jejím snadnějším nalisování. Cílem této diplomové práce je zjistit, jaký vliv má rozdělení vložky na průběh napětí a posuvů.

Problematikou dělené vložky se již ve své bakalářské práci zabýval Dominik Mochar [5]. Konkrétně zkoumal napětí v násobně nalisované nádobě při zatížení vnitřním tlakem. Zjistil, že čím menší mezeru v dělené vložce zavedeme, tím menší špičky napětí se v okolí mezery budou vyskytovat, jak již bylo uvedeno v kapitole 1.8. Na obr. 4.1 je mnou zkoumaný násobně nalisovaný spoj s dělenou vložkou. Mezeru jsem umístil do roviny ohybového momentu. Konkrétně do vlákna namáhaného ohybovým momentem tlakem, neboť zde vznikají nejvyšší napětí. Geometrie distanční vložky je výchozí, tedy bez žádného zkosení. Velikost mezery je zvolena na 0.5° , což odpovídá tloušťce přibližně 0.15 [mm].



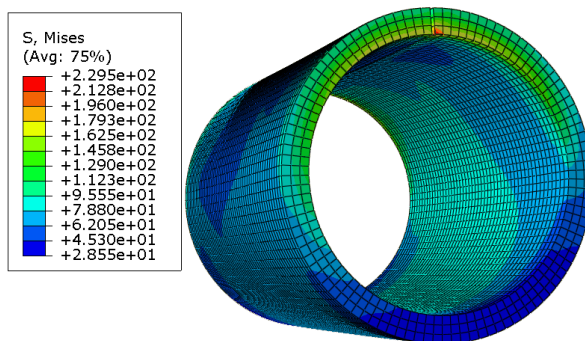
Obr. 4.1: Násobně nalisovaný spoj s dělenou vložkou

4.1 Rozdíl v napjatosti výchozí geometrie s dělenou a nedělenou vložkou

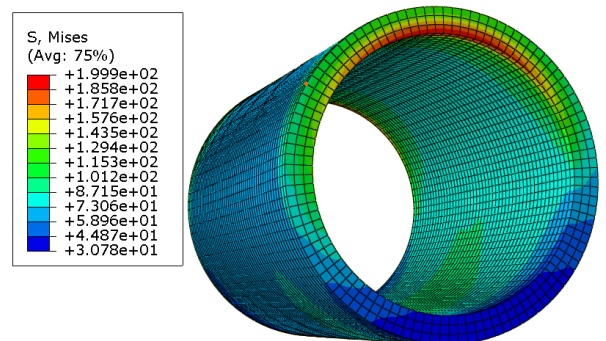
V této kapitole se zabývám porovnáním redukovaných napětí ve spoji s dělenou vložkou a ve spoji s vložkou nedělenou. V levém sloupci budu vždy zobrazovat obrázky součástí spoje s dělenou vložkou. V pravé části pak k porovnání součástí spoje s vložkou nedělenou.

4.1.1 Napjatost vložky

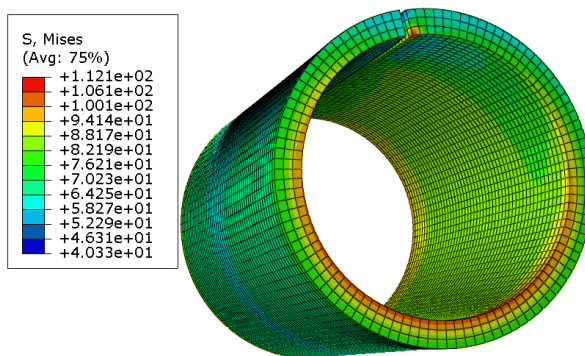
Jak je vidět v legendě na obr. 4.2 redukované napětí na dělené vložce dosahuje vyššího maxima, než na vložce nedělené (obr. 4.3). Maximum se vyskytuje na okraji vložky, v místě mezery, na straně blíže vetknutí. Zde je přenášen kroučící moment, který je do spoje zaveden jako vnější zatížení. Jedná se o velmi lokální maximum, které vzniká vlivem “zaseknutí” tohoto rohu do hřídele při přenosu kroučícího momentu. Na obr. 4.4 je ukázáno, že hlavní lokální nárůst napětí v kritickém místě nastal již při samotném krutu.



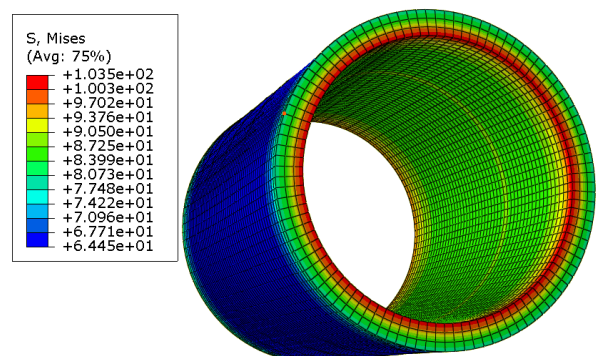
Obr. 4.2: Redukované napětí na dělené vložce při kombinovaném zatížení



Obr. 4.3: Redukované napětí na nedělené vložce při kombinovaném zatížení



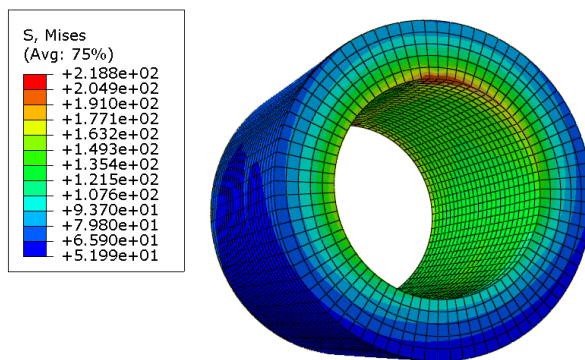
Obr. 4.4: Redukované napětí na dělené vložce po zatížení krutem



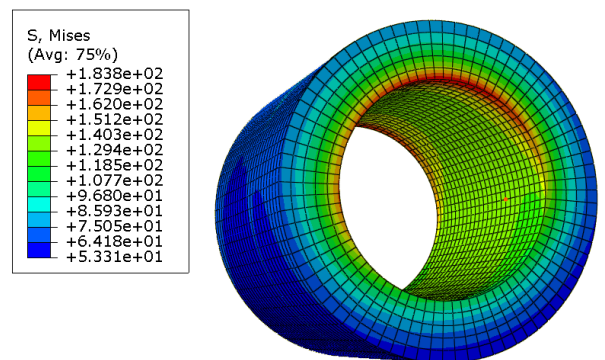
Obr. 4.5: Redukované napětí na nedělené vložce po zatížení krutem

4.1.2 Napjatost náboje

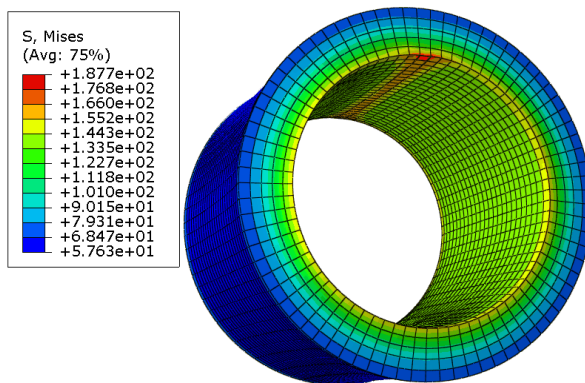
Na náboji vznikají rozdíly napětí podstatně vyšší. Na obr. 4.6 je vidět, že ve spoji s dělenou vložkou vznikají na náboji napěťové špičky o 16% vyšší než ve spoji s vložkou nedělenou (obr. 4.7). Tyto napěťové špičky mají znovu velmi lokální charakter. Rozdíly napětí na náboji vznikají již při samotném nalisování, jak je zobrazeno na obr. 4.8 v porovnání s obr. 4.9.



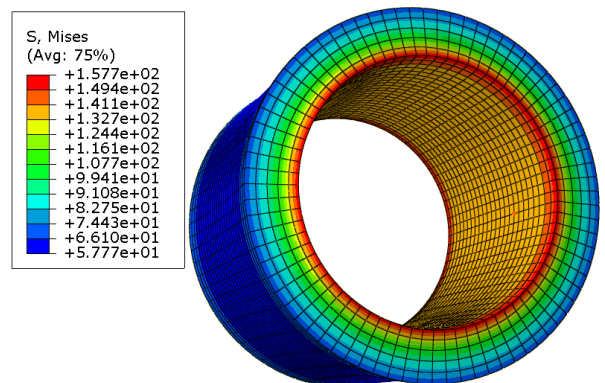
Obr. 4.6: Redukované napětí na náboji při kombinovaném namáhání (dělená vložka)



Obr. 4.7: Redukované napětí na náboji při kombinovaném namáhání (nedělená vložka)



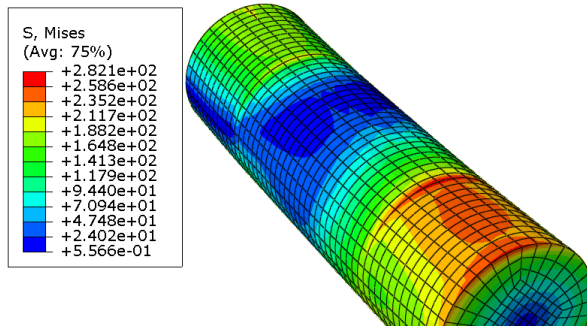
Obr. 4.8: Redukované napětí na náboji po nalisování (dělená vložka)



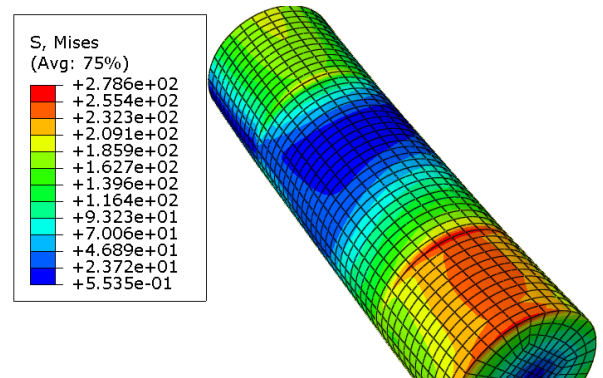
Obr. 4.9: Redukované napětí na náboji po nalisování (nedělená vložka)

4.1.3 Napjatost hřídele

Rozdíl v napjatosti hřídele je mezi oběma geometriemi zanedbatelný. Maxima napětí na hřídeli se v případě spojů s dělenou vložkou a nedělenou vložkou liší jen o 1,25%. Jak lze porovnat na obr. 4.10 a obr. 4.11.



Obr. 4.10: Redukované napětí na hřídeli při kombinovaném namáhání (dělená vložka)



Obr. 4.11: Redukované napětí na hřídeli při kombinovaném namáhání (nedělená vložka)

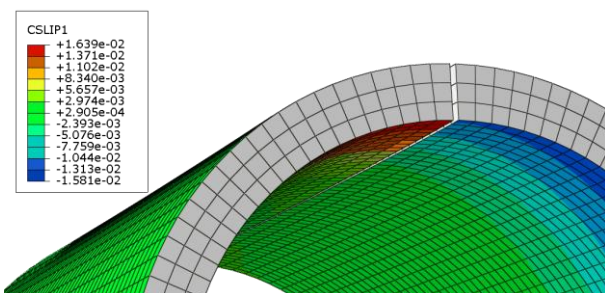
4.2 Rozdíl v prokluzech výchozí geometrie s dělenou a nedělenou vložkou

Stejně jako v předešlé kapitole 4.1 i zde budu porovnávat spoj s dělenou vložkou se spojením s vložkou nedělenou. Tentokrát se však zaměřím na tečný a osový prokluz.

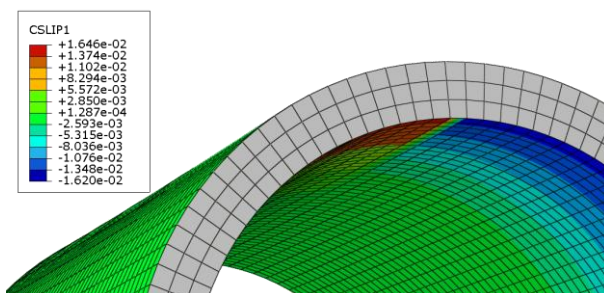
4.2.1 Tečný prokluz

Na obr. 4.12 a obr. 4.13 je vidět, že tečné prokluzy na vnitřním poloměru vložky jsou pro spoj s dělnou a spoj s nedělenou vložkou téměř totožné. Rozdíl činí 2,5%.

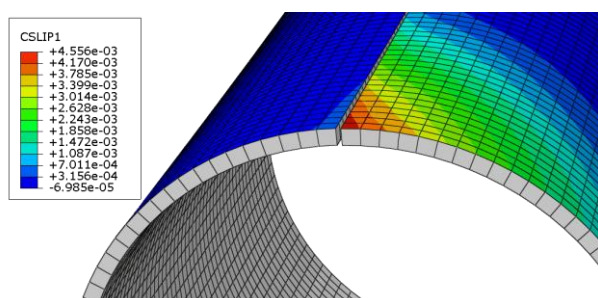
Na vnějším poloměru je rozdíl v tečném prokluzu znatelnější. Na obr. 4.14 je vidět, že u dělené vložky dochází v určitém místě (červená barva) k nárůstu tečného prokluzu vložky vůči objímce. Tento prokluz dosahuje hodnoty $4,556e-3$ [rad]. Na nedělené vložce k tečným prokluzům mezi vložkou a objímkou nedochází (obr. 4.15). Prokluzy řádově $10e-5$ je třeba zanedbat, neboť se nejedná o relativní posuv kontaktních ploch, ale o ELASTIC SLIP, viz kapitola 3.6.



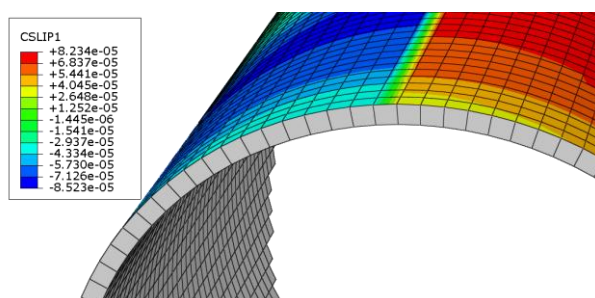
Obr. 4.12: Tečný prokluz na vnitřním poloměru dělené vložky



Obr. 4.13: Tečný prokluz na vnitřním poloměru nedělené vložky



Obr. 4.14: Tečný prokluz na vnějším poloměru dělené vložky

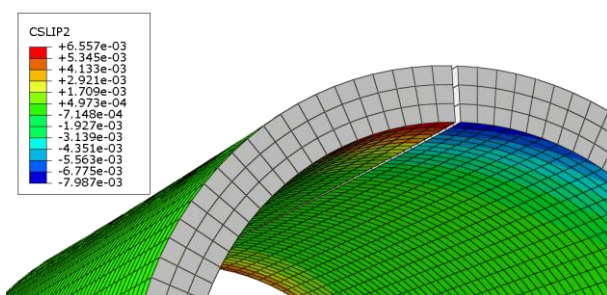


Obr. 4.15: Tečný prokluz na vnějším poloměru nedělené vložky

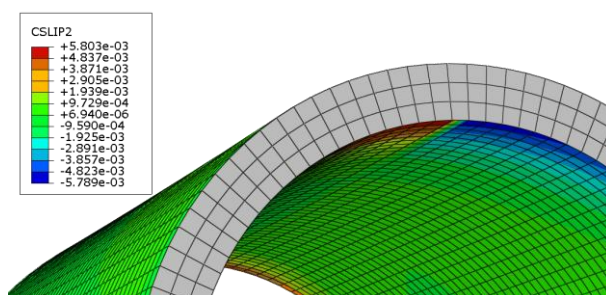
4.2.2 Osový prokluz

Osový prokluz na vnitřním poloměru je v tlakovém vlákně větší u vložky s mezerou. Prokluz je zde místy až o 38% větší (obr. 4.16) než u vložky bez mezery (obr. 4.17). Místo je znázorněno tmavě modrou barvou.

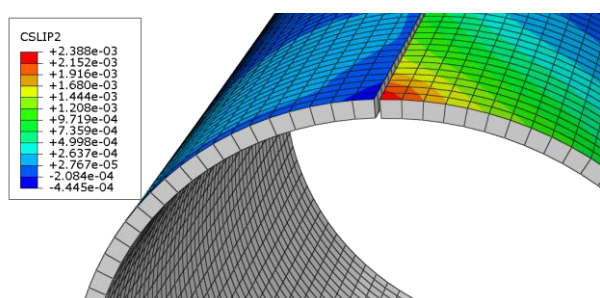
Na vnějším poloměru je osový prokluz u spoje s nedělenou vložkou nulový (obr. 4.17), stejně jak tomu bylo u tečného prokluzu (obr. 4.15). U spoje s vložkou dělenou však k prokluzu dochází. Maximální hodnota je $2,388e-3$ [mm] viz obr. 4.16, znázorněno červenou barvou.



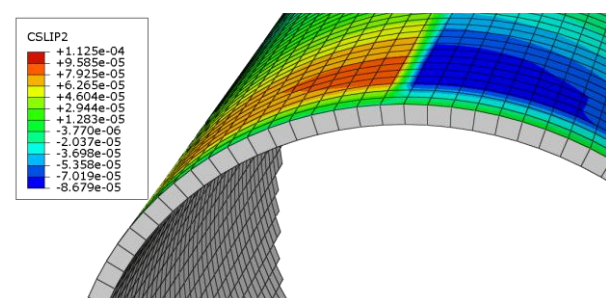
Obr. 4.16: Osový prokluz na vnitřním poloměru dělené vložky



Obr. 4.17: Osový prokluz na vnitřním poloměru nedělené vložky



Obr. 4.18: Osový prokluz na vnějším poloměru dělené vložky



Obr. 4.19: Osový prokluz na vnějším poloměru nedělené vložky

4.3 Vyhodnocení chování násobně nalisovaného spoje s dělenou vložkou

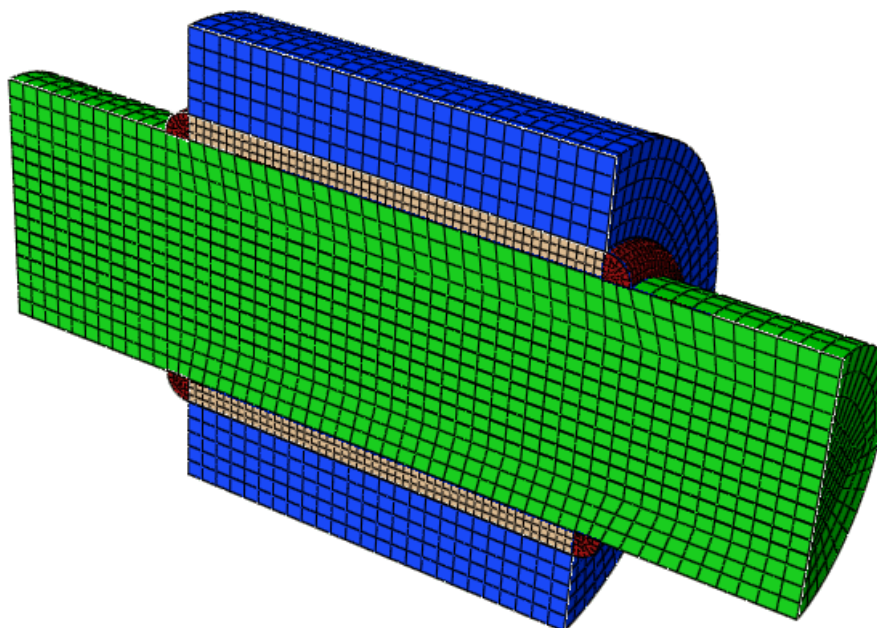
Průběhy napětí u dělené vložky jsou podobné jako u vložky nedělené, avšak u spoje s dělenou vložkou je třeba dávat pozor na několik míst, kde byly zaznamenány lokální špičky napětí.

Tyto špičky napětí vznikají na okraji náboje v místě mezery již při samotném nalisování. Další lokální špička napětí vzniká na okraji distanční vložky blíže k vetknutí, kam je odváděn kroutící moment. Tato špička vzniká při zatížení krutem, vlivem „zaseknutí“ ostrého rohu v mezeře.

Na spoji s dělenou vložkou vznikají lokální posuvy na vnějším poloměru vložky, které na spoji s vložkou nedělenou nebyly a to jak u prokluzu tečného, tak i u prokluzu osového. Na vnitřním poloměru je navíc u dělené vložky větší osový prokluz, než tomu bylo u vložky nedělené.

5 MKP analýza násobně nalisovaného spoje s ukotvenou vložkou

Další mnou zkoumanou úpravou geometrie je konstrukce s ukotvenou vložkou. Konkrétně jsem vložku ukotvil koutovým svarem k hřídeli, jak je názorně vidět na obr. 5.1. Ukotvení (svaření) proběhne až po vzájemném nalisování součástí násobně nalisovaného spoje. Koutové svary jsem v programu ABAQUS vytvořil jako nové instance, se stejnými materiálovými vlastnostmi jako mají ostatní součásti spoje. Svaření jsem v modelu nadefinoval pomocí TIE vazby mezi čelní plochou svaru a čelní plochou vložky a dále mezi vnitřní plochou svaru a s ní kontaktní plochou hřídele. TIE vazba nedovoluje žádný relativní pohyb mezi vzájemně spojenými plochami, což přesně popisuje realitu svaru. Program ABAQUS však neumožňuje zavedení této vazby v průběhu výpočtu, tedy nedovoluje zavedení vazby, až po nalisování. Tento problém jsem vyřešil pomocí funkce MODEL CHANGE, která dovoluje v jednotlivých krocích prvky aktivovat či deaktivovat. Tedy konkrétně v mém případě deaktivovat prvky svaru v prvním kroku nalisování.



Obr. 5.1: Model násobně nalisovaného spoje s ukotvenou vložkou

5.1 Rozdíl v napjatosti výchozí geometrie s neukotvenou a ukotvenou vložkou

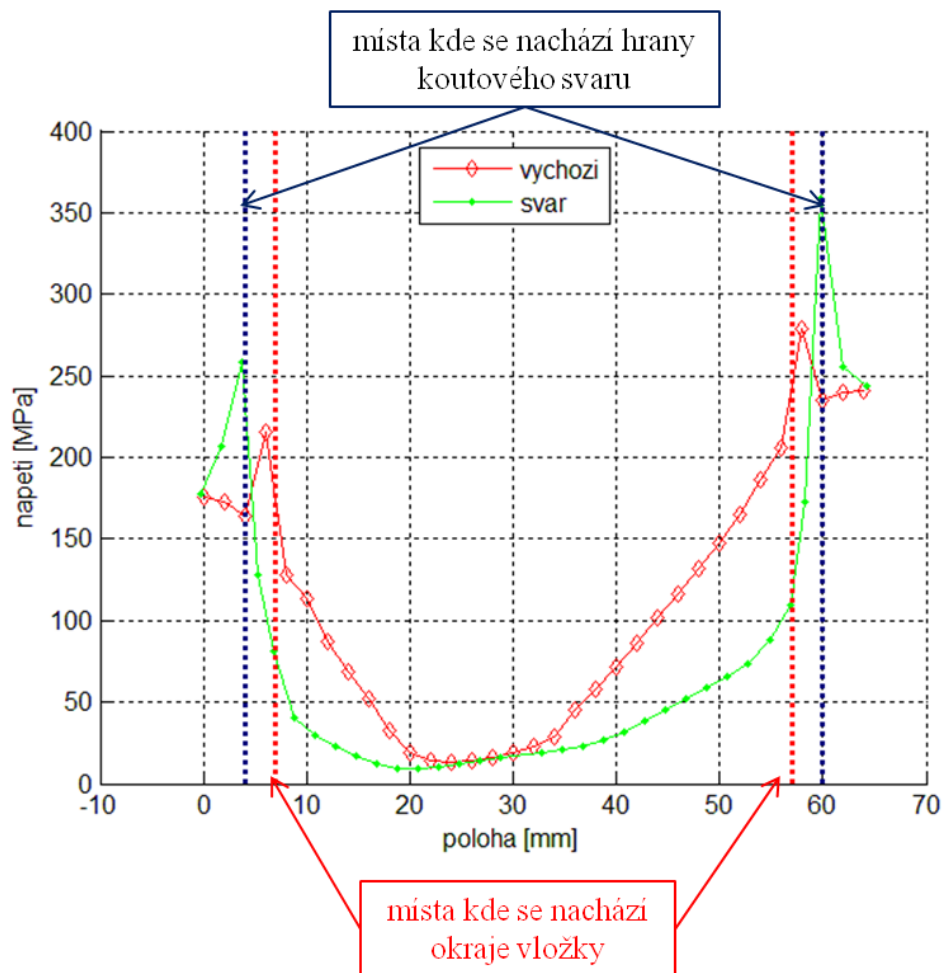
V této kapitole zkoumám, jak se změní průběh redukovaného napětí ve vláknech u svařeného spoje oproti výchozí geometrii bez svaření.

5.1.1 Vlákna namáhaná na tlak

Nejdříve se zaměřím na průběh redukovaných napětí v mnou zkoumaných vláknech namáhaných na tah.

Vlákno na vnějším poloměru hřídele namáhané na tlak

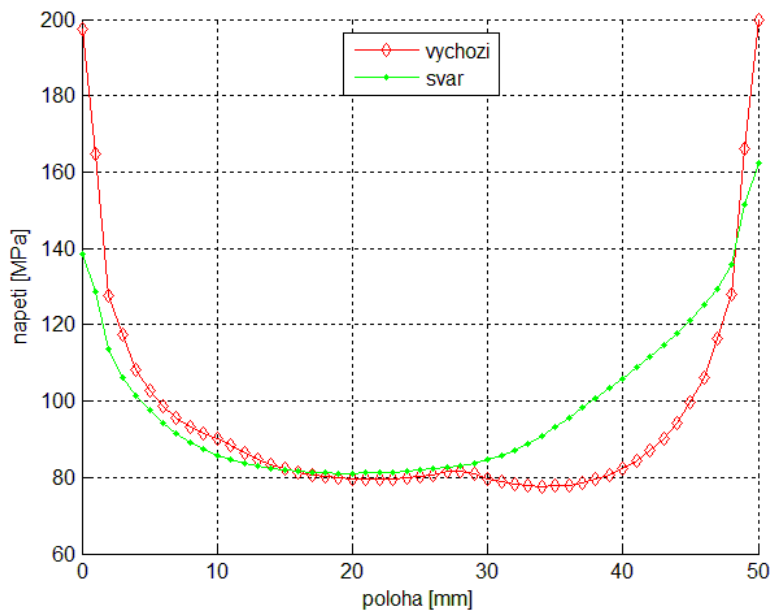
Jak si můžeme povšimnout na obr. 5.2, průměrné hodnoty redukovaného napětí na hřídeli jsou ve spoji s ukotvenou vložkou menší, avšak vznikají zde větší lokální špičky. Tyto špičky jsou velmi lokálního charakteru a oproti výchozí geometrii se posunuly dále od středu spoje. Konkrétně vznikají v místě dotyku s okrajem svaru (modrá tečkovaná čára).



Obr. 5.2: Redukované napětí na vnějším vlákně hřídele namáhaném na tlak

Vlákno na vnitřním poloměru distanční vložky namáhané na tlak

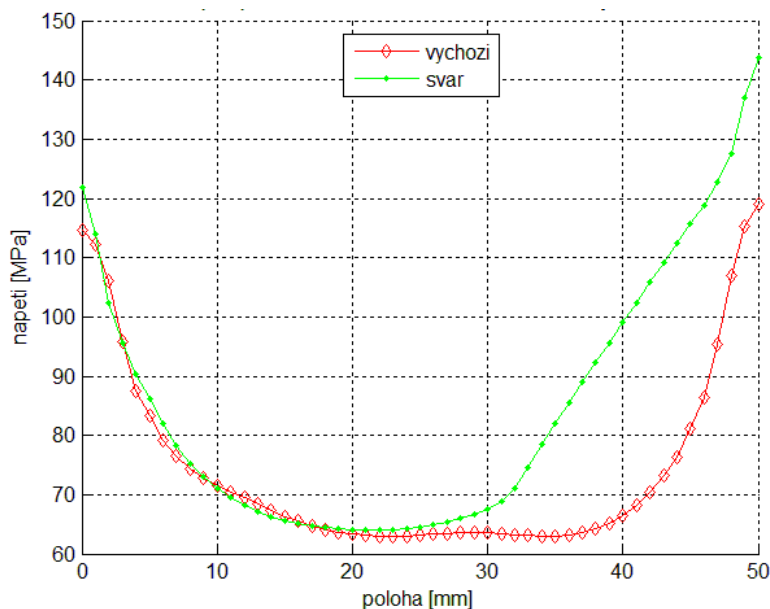
Redukované napětí na vnitřním poloměru vložky dosahuje u spoje s ukotvenou vložkou menších hodnot než u vložky výchozí. Je to způsobené tím, že zde nevznikají lokální špičky na okrajích vložky (obr. 5.3).



Obr. 5.3: Redukované napětí na vnitřním vlákně distanční vložky namáhaném na tlak

Vlákno na vnějším poloměru distanční vložky namáhané na tlak

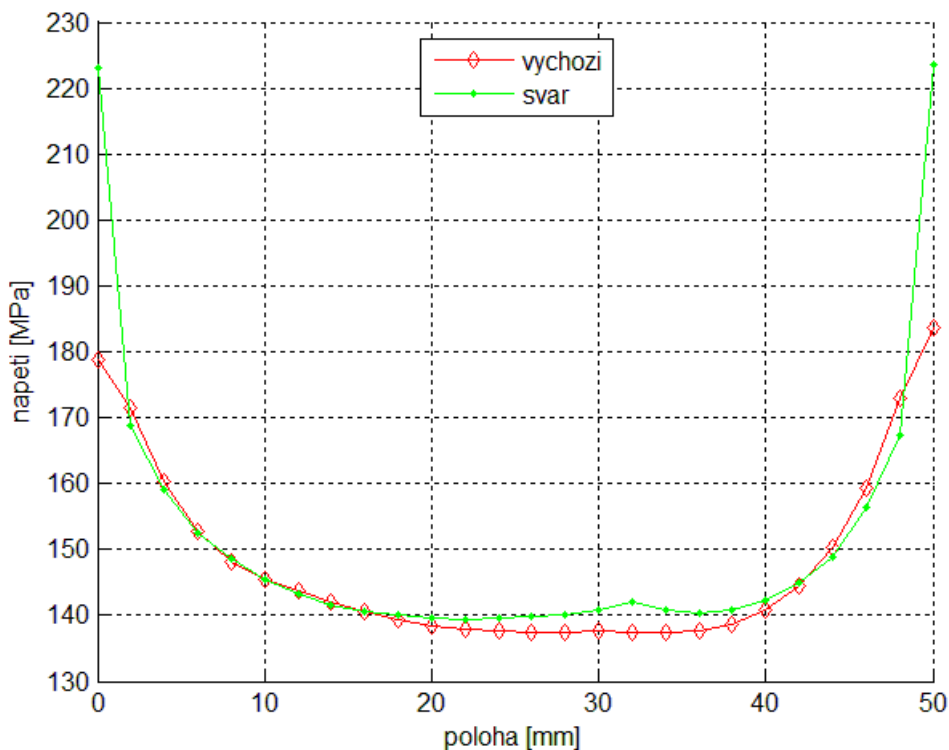
Na obr. 5.4 je vidět, že redukované napětí na vnějším poloměru distanční vložky je vyšší u geometrie se svarem. Toto napětí je vyšší na straně směrem k vetknutí, tedy ve směru odvodu kroutícího momentu. Tento rozdíl napětí vznikl již při samotném zatížení krutem.



Obr. 5.4: Redukované napětí na vnějším vlákně distanční vložky namáhaném na tlak

Vlákno na vnitřním poloměru náboje namáhané na tlak

Průběh redukovaného napětí na vnitřním poloměru náboje namáhaném na tlak je u obou geometrií takřka shodný (obr. 5.5). Pouze u svařené geometrie vznikají výrazné lokální špičky na okrajích náboje. Tyto lokální špičky jsou způsobené deformací součástí při ohybu. Tyto deformace mají pravděpodobně za následek bodový kontakt svaru a vnitřní hrany náboje. Jedná se o velmi lokální špičky.

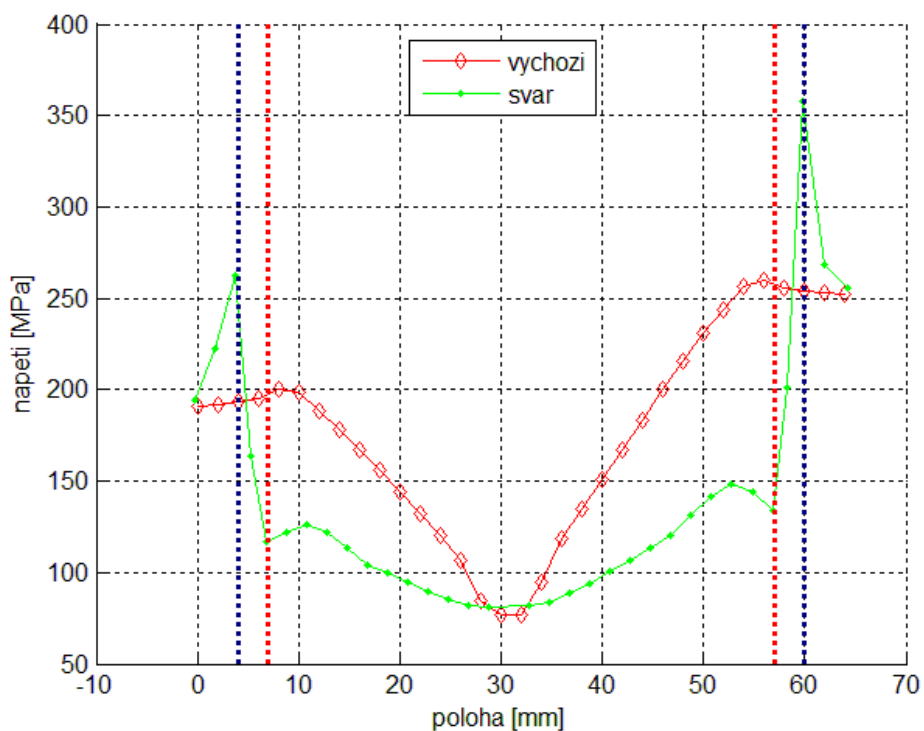


Obr. 5.5: Redukované napětí na vnitřním vlákně náboje namáhaném na tlak

5.1.2 Vlákna namáhaná na tah

Vlákno na vnějším poloměru hřídele namáhané na tah

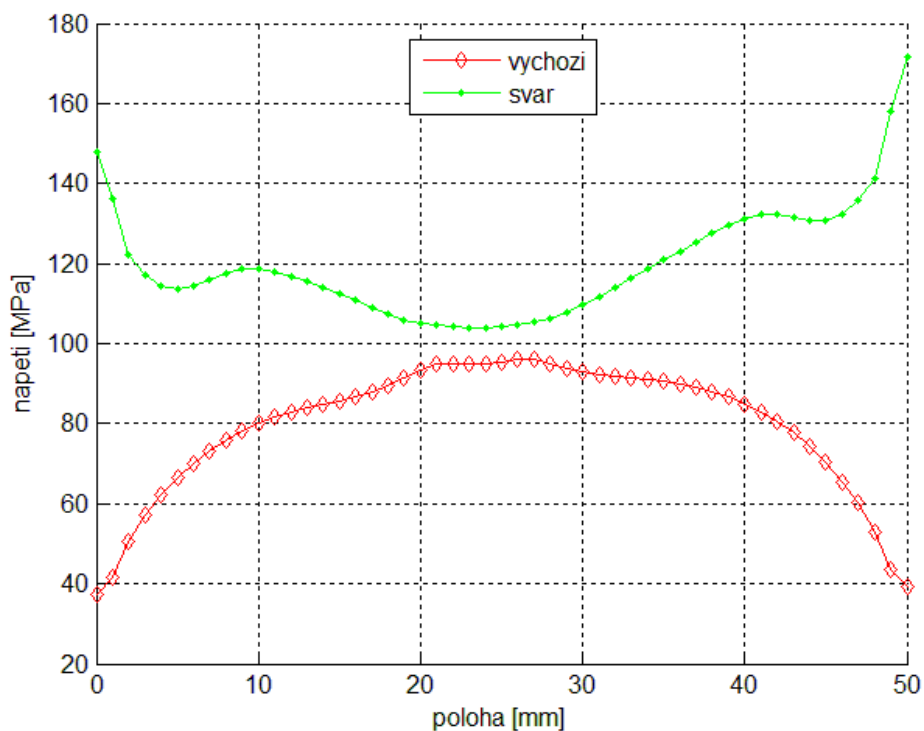
U vlákna na hřídeli namáhaného tahem dochází k podobnému jevu jako u vlákna namáhaného tlakem. Průměrné hodnoty redukovaného napětí jsou u ukotvené geometrie menší, avšak vznikají zde lokální špičky napětí v místě spojení se svarem, viz obr. 5.6.



Obr. 5.6: Redukované napětí na vnějším vlákně hřídele namáhaném na tah

Vlákně na vnitřním poloměru distanční vložky namáhané na tah

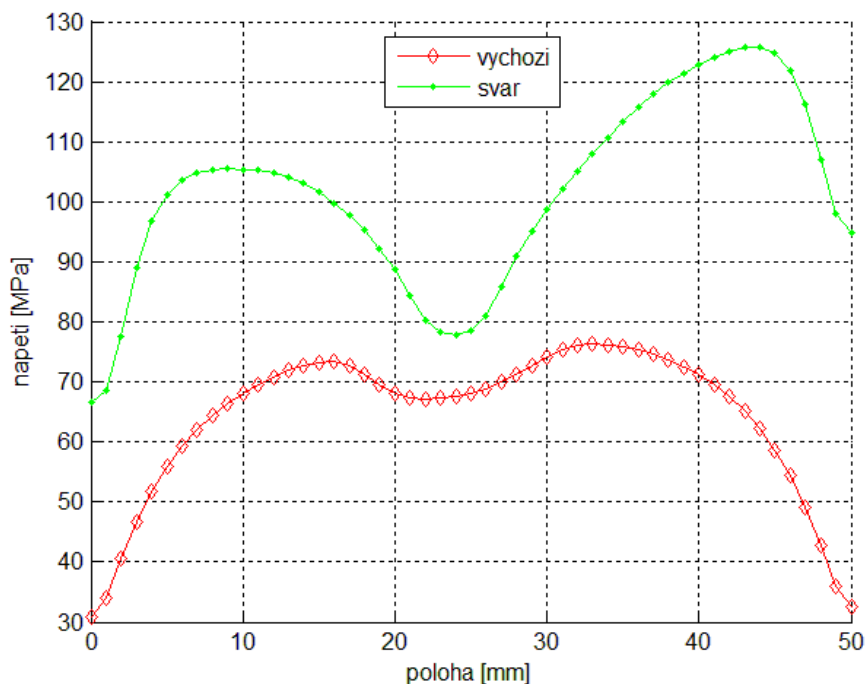
Na vnitřním poloměru distanční vložky u geometrie se svarem nedochází k odlehčení spoje na okrajích, jak je tomu u geometrie výchozí (obr. 5.7).



Obr. 5.7: Redukované napětí na vnitřním vlákně distanční vložky namáhaném na tah

Vlákno na vnějším poloměru distanční vložky namáhané na tah

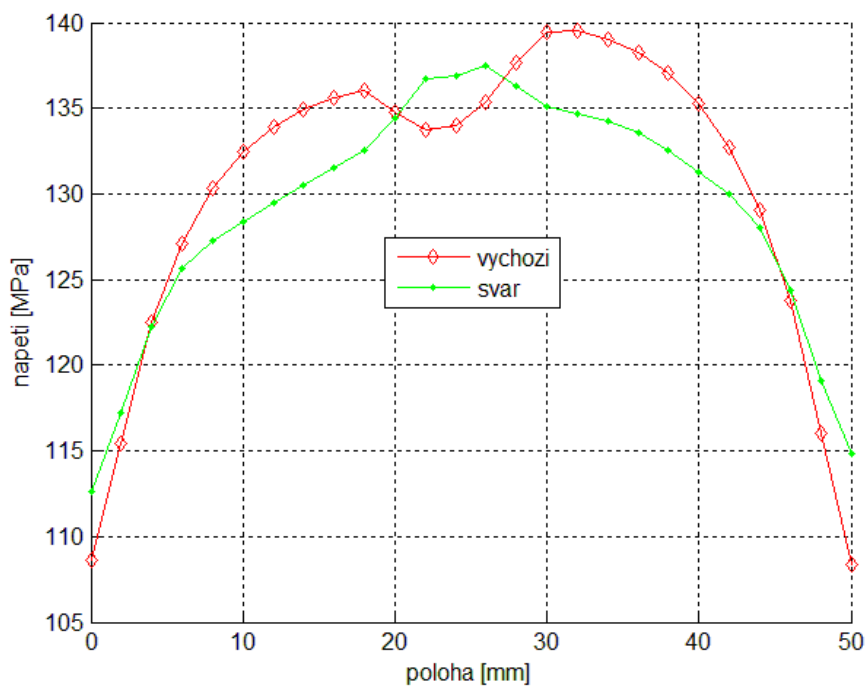
Na obr. 5.8 je patrné, že napětí ve vlákne na vnějším poloměru distanční vložky namáhaném na tah je větší u geometrie se svarem.



Obr. 5.8: Redukované napětí na vnějším vlákně distanční vložky namáhaném na tah

Vlákno na vnitřním poloměru náboje namáhané na tah

Redukované napětí na tahovém vlákně náboje je u obou geometrií velmi podobné (obr. 5.9).



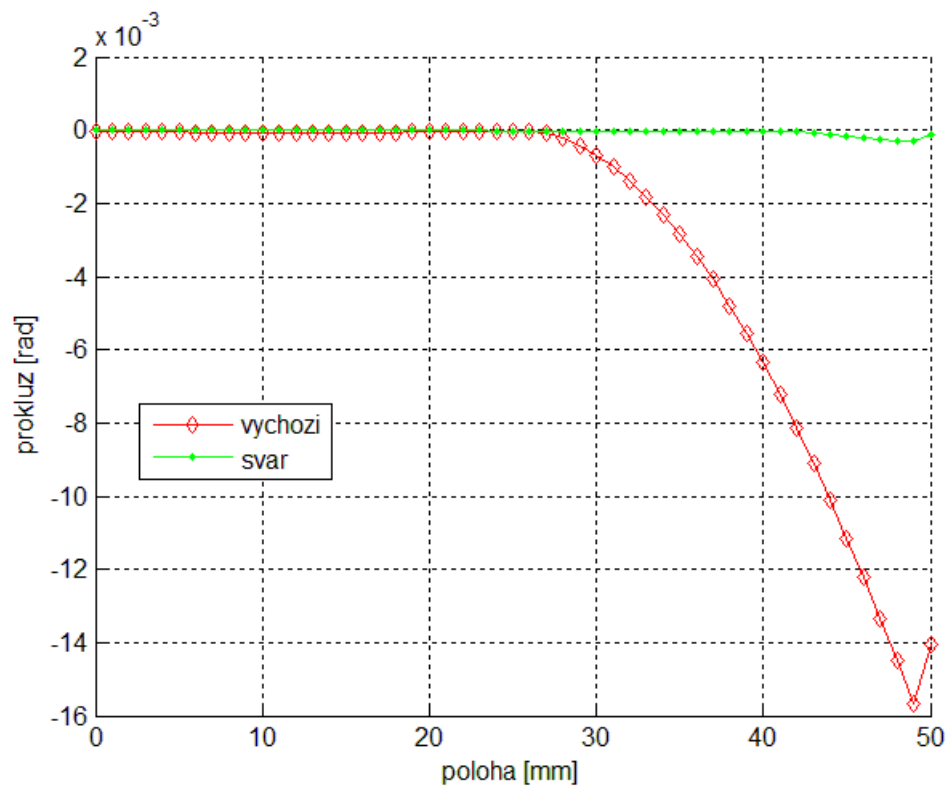
Obr. 5.9: Redukované napětí na vnitřním vlákně náboje namáhaném na tah

5.2 Rozdíl v prokluzech výchozí geometrie s neukotvenou a ukotvenou vložkou

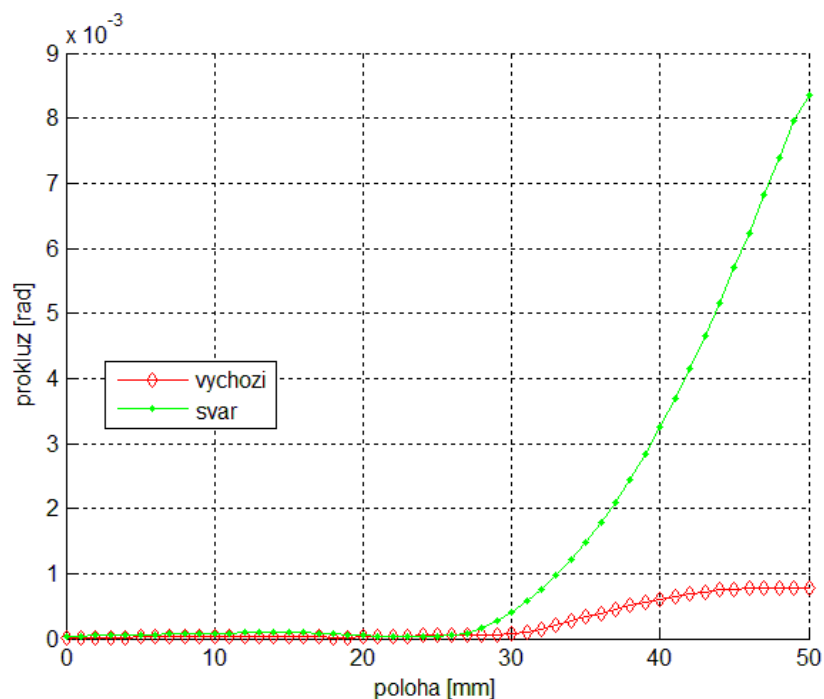
Hlavním důvodem analýzy geometrie s ukotvenou vložkou je zjištění, jak díky této změně geometrie dokážeme regulovat prokluzy ve spoji. V následujících kapitolách jsou znázorněny výstupy pouze u vláken namáhaných na tah, neboť u výchozí geometrie vložky zde dochází k větším prokluzům.

5.2.1 Tečný prokluz

Tečný prokluz se při ukotvení vložky přesunul dle očekávání z vnitřního poloměru vložky (obr. 5.10) na poloměr vnější (obr. 5.11). Za zmínku určitě stojí, že prokluz na vnějším poloměru vložky u svařené geometrie je cca o 45% menší než prokluz na vnitřním poloměru vložky u geometrie výchozí.



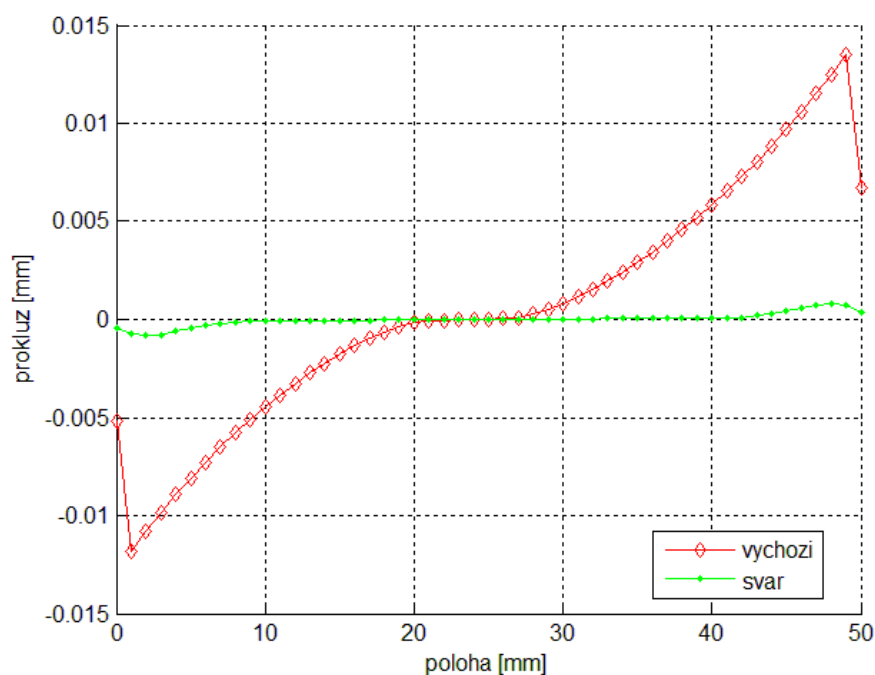
Obr. 5.10: Tečný prokluz na vnitřním vlákně distanční vložky namáhaném na tah



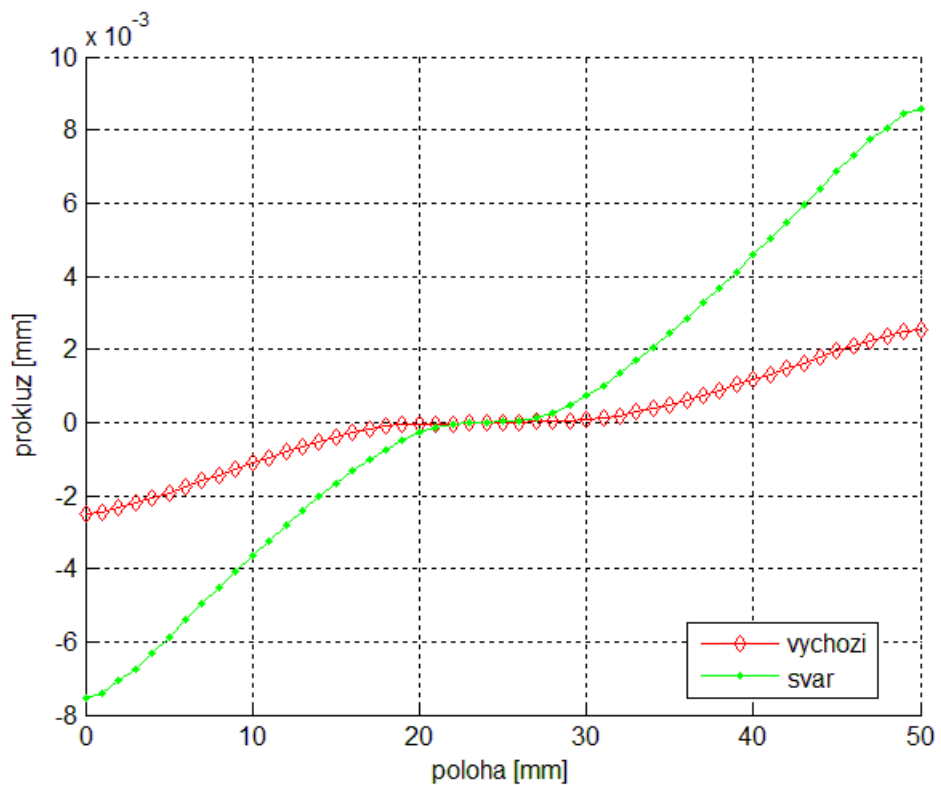
Obr. 5.11: Tečný prokluz na vnějším vlákne distanční vložky namáhaném na tah

5.2.2 Osový prokluz

U osového prokluzu dochází ke stejnému jevu jako u prokluzu tečného. Prokluz na vnitřním poloměru vložky se díky svaru téměř vynuloval (obr. 5.12), avšak přesunul se na vnější poloměr vložky, kde dosahuje větších hodnot, než byl u geometrie výchozí (obr. 5.13).



Obr. 5.12: Osový prokluz na vnitřním vlákne distanční vložky namáhaném na tah



Obr. 5.13: Osový prokluz na vnějším vlákně distanční vložky namáhaném na tah

5.3 Vyhodnocení chování násobně nalisovaného spoje s ukotvenou vložkou

Díky ukotvené vložce dostaneme jiné rozložení napětí, než tomu bylo u vložky neukotvené. Celkové napětí na hřídeli je menší, neboť soustava má větší modul průřezu v ohybu. Lokální špičky napětí na hřídeli se posunuly dále od středu spoje, tedy do místa svaru (obr. 5.2 a obr. 5.6). Na vnitřním poloměru distanční vložky dochází k odlehčení spoje a napětí jsou zde u ukotvené vložky menší (Obr. 5.3 a Obr. 5.7). Na vnějším poloměru vložky dochází k nárůstu napětí na okraji blíže vetknutí, neboť zde je přenášen kroutící moment (obr. 5.4 a obr. 5.8). U geometrie se svarem dochází na náboji ke vzniku velmi lokálních špiček na jeho okraji, které u výchozí geometrie s neukotvenou vložkou nebyly (obr. 5.5).

U prokluzů dochází k očekávanému jevu, tedy k jejich vymizení na vnitřním poloměru ukotvené vložky. Prokluzy se přesunuly na vnější poloměr vložky, kde však nedosahují tak velkých hodnot jako na vnitřním poloměru u vložky neukotvené.

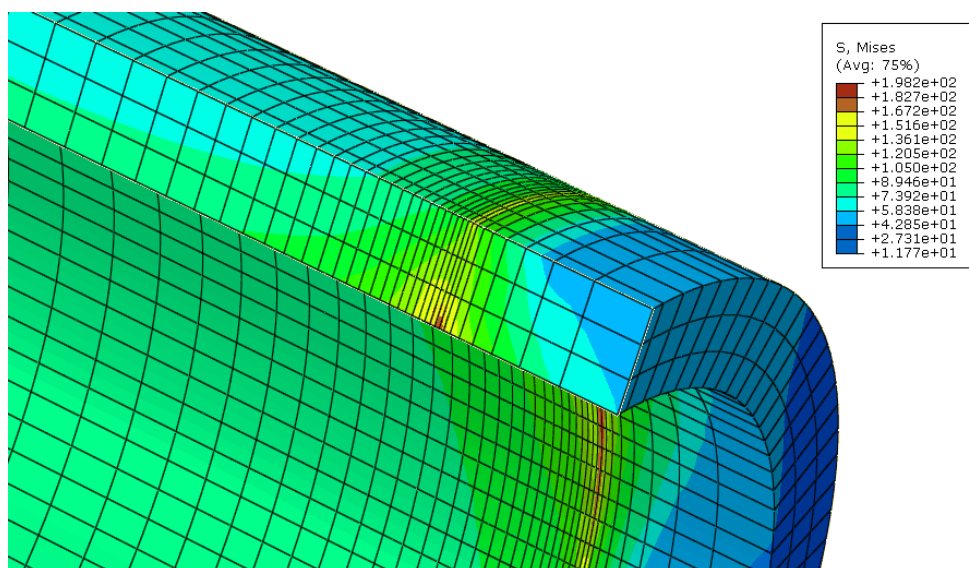
6 Chování modelu při zjemnění sítě

Z analýzy v kapitole 3.4 vyplynulo, že ve spoji vzniká celá řada velmi lokálních špiček redukovaného napětí. Tyto špičky vznikají vlivem kontaktu ostrých hran spoje. V této kapitole analyzuji odezvu těchto špiček na zjemnění sítě modelu.

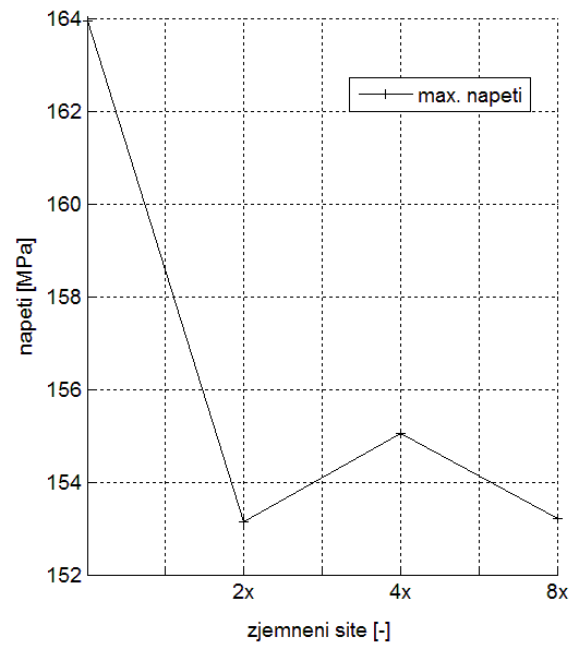
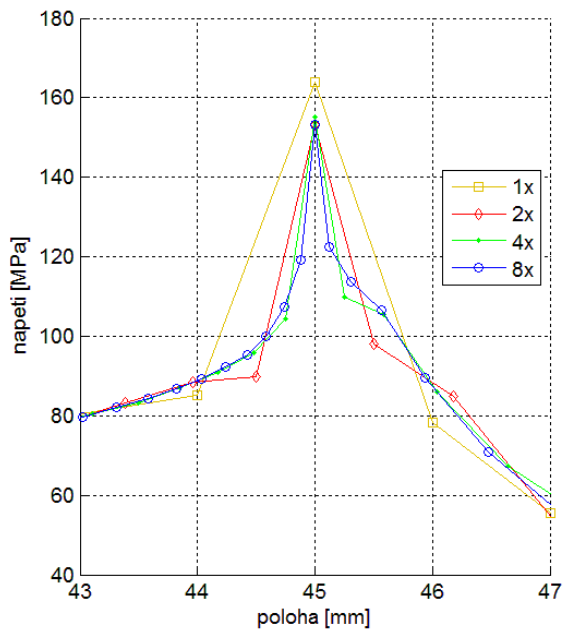
Provedl jsem zjemnění sítě na modelu s vložkou částečně zkosenou na obou poloměrech [cdvoji]. U tohoto modelu vznikají výrazné napětěvé špičky na distanční vložce, viz obr. 3.7 a obr. 3.8. Síť jsem zjemnil na všech dílech spoje, v místech kde se napětěvé špičky nacházejí. Oproti síti modelu, která byla analyzována v kapitole 3.4, je síť zjemněna dvojnásobně, čtyřnásobně a osminásobně. Na obr. 6.1 je vidět osminásobné zjemnění sítě na distanční vložce v místě maximálního napětí.

Závislost průběhu napětěvé špičky, která se vyskytuje na vnějším poloměru vložky [cdvoji], na jemnost sítě, je vidět na obr. 6.2. Po dvojnásobném zjemnění sítě dochází k poklesu napětěvé špičky. Po dalším zjemňování je již velikost napětěvé špičky téměř neměnná. Průběh napětí na celém tomto vláknu vložky s nezjemněnou sítí je znázorněn na obr. 3.8.

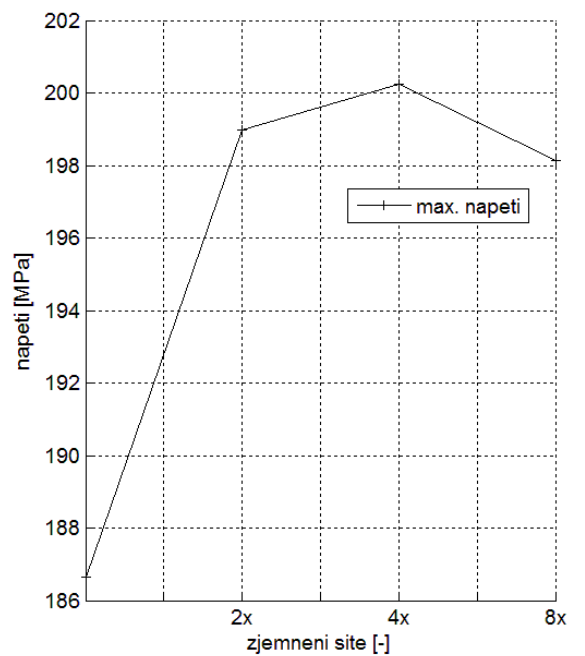
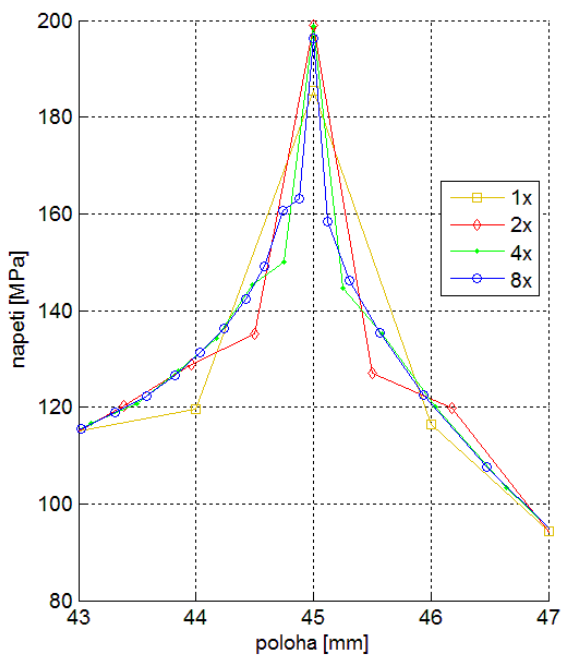
Průběh napětěvé špičky na vnitřním poloměru vložky [cdvoji] je zobrazen na obr. 6.3. Při dvojnásobném zjemnění sítě dochází u lokální špičky k jejímu nárůstu. Další zjemňování opět již příliš změn nepřináší. Průběh napětí na celém tomto vláknu vložky s nezjemněnou sítí je znázorněn na obr. 3.9.



Obr. 6.1: Osminásobně zjemněná síť na distanční vložce [cdvoji] v místě lokálních špiček napětí



Obr. 6.2: Závislost průběhu napěťové špičky vnějšího vlákna vložky [cdvoji] na hustotě sítě



Obr. 6.3: Závislost průběhu napěťové špičky vnitřního vlákna vložky [cdvoji] na hustotě sítě

7 Závěr

Vytvořil jsem elastické MKP modely násobně nalisovaných spojů s různou úpravou geometrie distanční vložky a se stejnou geometrií dílů ostatních. Tyto násobně nalisované spoje jsem zatížil shodnou hodnotou ohybového a kroučícího momentu, abych u nich mohl provést srovnání průběhů napětí a průběhů přesahů.

Nejprve jsem zvolil sedm různých druhů geometrie distanční vložky vedoucích k různým průběhům přesahů při nalisování. Jako optimální varianta pro regulaci napětí ve spoji se jeví geometrie vložky s částečným zkosením na vnějším poloměru. Tato geometrie jako jediná snižuje napěťové špičky na všech dílech spoje. Napěťové špičky jsou posunuty blíže středu spoje, k hranám zkosení a dosahují menších hodnot než u spoje s neupravenou vložkou. Maximální redukované napětí na hřídeli je sníženo o 6%, na vložce o 30% a na náboji o 14%. Pomocí geometrie s částečným vnějším zkosením je možné redukovat i tečný prokluz mezi vložkou a hřídelí. Dochází zde ke snížení tečného prokluzu v místě maximálního napětí o 28% oproti geometrii výchozí. Osový prokluz mezi vložkou a hřídelí v místě maximálního napětí je u geometrie s částečným zkosením téměř shodný jako u geometrie výchozí. Prokluzy mezi vložkou a nábojem pomocí geometrie s částečným vnějším zkosením redukovat nedokážeme.

Dále jsem provedl analýzu spoje s podélně dělenou distanční vložkou. Průběhy napětí jsou podobné jako u spoje s vložkou nedělenou, avšak v určitých místech vznikají lokální špičky napětí, které u spoje s nedělenou vložkou nevznikají. Jedna lokální špička napětí vzniká na okraji vložky, v místě mezery, na straně blíže k vetknutí. Tato špička napětí vzniká při zatížení spoje kroučícím momentem. Další lokální špičky napětí vznikají na okrajích náboje, v místě mezery, již při samotném nalisování. Všechny tyto špičky jsou velmi lokálního charakteru. Vznikají v důsledku kontaktu ostrých hran spoje. Otázkou zůstává, zda by u reálného modelu nedošlo k lokální plastizaci materiálu, v jejímž důsledku by špičky vymizely. Na spoji s dělenou vložkou navíc vznikají lokální posuvy, které u spoje s nedělenou vložkou nevznikají.

Poslední úpravou násobně nalisovaného spoje bylo ukotvení distanční vložky k hřídeli. Ukotvení jsem realizoval svařením vložky k hřídeli za pomoci koutového svaru. Díky této úpravě dokážeme vynulovat prokluzu mezi hřídeli a distanční vložkou na úkor zvětšení prokluzů mezi vložkou a nábojem. Dochází i ke změně průběhů napětí. Na okrajích náboje a na hřídeli v místě kontaktu s hranou svaru vznikají lokální špičky napětí. Na vnitřním poloměru distanční vložky došlo k snížení napět'ových špiček. Naopak na vnějším poloměru distanční vložky došlo k jejich navýšení.

Z výpočtů uvedených v kapitole 6 vyplývá, že velikost lokálních napět'ových špiček může záviset i na jemnosti sítě, avšak v mé analýze jsem u všech porovnávaných spojů použil hustotu sítě shodnou a tedy výsledky lze porovnávat.

Další variantou úpravy nalisovaného spoje by mohlo být ukotvení distanční vložky k náboji. Upřesnění výpočtů by mohlo přinést použití modelu s plastickými vlastnostmi, neboť lze předpokládat, že by v místech lokálních napět'ových špiček přesahujících mez kluzu došlo k lokální plastizaci materiálu, v jejímž důsledku by se špičky zredukovaly.

Bibliografie

- [1] Černý, Jiří. *Analýza vlivu nalisované objímky s proměnným přesahem na napjatost nalisovaného spoje při namáhání ohybem : bakalářská práce*. Praha : ČVUT, 2013.
- [2] Vitek, Karel. *Tlakový válec*. CZ 304721 B6 Úřad průmyslového vlastnictví ČR v Praze, 2014.
- [3] Navrátil, Libor. *Analýza stavu napjatosti nalisovaného spoje namáhaného kombinací ohybu a krutu : bakalářská práce*. Praha : ČVUT, 2014.
- [4] Perníček, Jan. *Analýza mechanických vlastností spoje s ohledem na přenos kroutícího momentu : bakalářská práce*. Praha : ČVUT , 2012.
- [5] Mochar, Dominik. *Analýza stavu napjatosti násobně nalisovaného spoje : bakalářská práce*. Praha : ČVUT, 2014.
- [6] Michalec, Jiří, a další. *Pružnost a Pevnost II*. Praha : ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02375-3.
- [7] Smělík, Jan. *Analýza vlivu nalisovaných kroužků s proměnným přesahem na napjatost : bakalářská práce*. Praha : ČVUT, 2013.