

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

NÁVRH ZAKŘIVENÍ RÁMU DVEŘNÍHO KŘÍDLA DESIGN OF DOOR FRAME CURVATURE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MARTIN MERKL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR LOŠÁK, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Martin Merkl

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Inženýrská mechanika a biomechanika (3901T041)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh zakřivení rámu dveřního křídla

v anglickém jazyce:

Design of Door Frame Curvature

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na řešení problémů spojených s lepením skleněné výplně na rám dveří vagónu. Při výrobě se na zakřivený rám dveří lepí rovné sklo. Výsledné zakřivení dveří musí odpovídat předepsaným požadavkům. Rám dveřního křídla, tedy musí být předehtý. Současně vyráběné dveře mají konstantní výsledný poloměr zakřivení. Nově vyráběné dveře mají mít kombinovaný poloměr zakřivení (rozdílný v horní a dolní části). Úkolem této diplomové práce je navrhnout zakřivení dveřního rámu takové, aby po nalepení skel mělo dveřní křídlo požadovaný tvar.

Cíle diplomové práce:

- vypracujte rešerši v oblasti MKP modelování lepených spojů
- proveďte výpočet zakřivení rámu dveřního křídla s požadovaným poloměrem a) 15m b) 10m po nalepení skla
- porovnejte data s výsledky zkoušek
- navrhnete zakřivení dveřního rámu, který bude mít po nalepení skla kombinovaný poloměr zakřivení 18 m a 6.914 m.

Seznam odborné literatury:

Přemysl Janíček. Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky Hledání souvislostí, 1. vydání
Brno, 2007.

Advanced Analysis Techniques Guide. 15317(November):724-746, 2009.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Petr Lošák, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 21.11.2014

L.S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá návrhem zakřivení rámu dveřního křídla určeného pro kolejové vozidlo. Na zakřivený rám se lepí rovné sklo, vlivem elastické deformace po nalepení skla dochází k ohnutí rámu na opačnou stranu. Samotný rám je tedy potřeba předehnout tak, aby vzniklá rezerva pokryla zpětný ohyb skla. Pomocí metody konečných prvků byla provedena analýza současně vyráběných dveří s konstantním poloměrem a ověřena vhodnost zvoleného přístupu k řešenému problému. Návrh zakřivení je poté proveden pro dveře s kombinovaným poloměrem zakřivení (rozdílným v dolní a horní části dveří). Cílem této práce bylo navrhnoutí zakřivení dveřního rámu tak, aby po nalepení skla mělo dveřní křídlo požadovaný tvar.

Summary

This diploma thesis deals with the design of door frame curvature, meant for rail vehicle. Flat glass is adhesively bonded onto the curved door frame and due to the elastic deformation the door frame bends backwards. Hence the door frame must be bend with reserve so that the elastic deformation is covered. Finite element analysis of currently manufactured door with constant curvatures has been carried out, with this analysis it has been checked that the chosen problem approach is suitable. Design of door frame curvature is then made for door frame with combined curvature (different for lower and upper part of door frame). The aim of this thesis was to design the curvature so that after glass is bonded onto it, the door frame will have the right dimensions.

Klíčová slova

lepený spoj, kolejové vozidlo, dveřní rám, MKP, analýza

Keywords

adhesive joint, rail vehicle, door frame, FEM, analysis

MERKL, M. *Návrh zakřivení rámu dveřního křídla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 68 s. Vedoucí Ing. Petr Lošák, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tuto diplomovou práci jsem vypracoval samostatně na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a uvedených použitých zdrojů.

V Brně dne

.....

Martin Merkl

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Petru Lošákovi, Ph.D. za cenné rady a čas, který mi věnoval při tvorbě této práce. Dále děkuji Ing. Tomáši Konečnému za zajímavé téma, které mi poskytl ke zpracování. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu v celé délce studia.

Obsah

1	Úvod	3
1.1	Problémová situace	3
1.2	Cíle řešení	4
2	Rešeršní studie	5
2.1	Základní pojmy	5
2.2	Typy namáhání lepených spojů	7
2.3	Typy lepených spojů	8
2.4	Mechanismy porušení lepeného spoje	8
2.5	Analytické modely	9
2.5.1	Volkersen	9
2.5.2	Goland a Reissner	11
2.6	MKP modelování lepených spojů	13
2.6.1	Mechanika kontinua	13
2.6.1.1	Objemové prvky	13
2.6.1.2	Objemovo-skořepinové prvky	14
2.6.1.3	Materiálové modely lepidel	15
2.6.1.4	Pružinové prvky	16
2.6.2	Lomová mechanika	17
2.6.2.1	Energetické kritérium	18
2.6.2.2	Faktor intenzity napětí	19
2.6.2.3	Virtual Crack Closure Technique	19
2.6.3	Mechanika poškození	20
2.6.3.1	Lokální přístup	22
2.6.3.2	Přístup kontinua	22
2.7	Problém zamykání konečných prvků	23
2.7.1	Smykové zamykání	23
2.7.1.1	Efekt přesýpacích hodin	24
2.7.2	Objemové zamykání	24
3	Popis řešené soustavy	26
3.1	Proces lepení	27
4	Výběr metody řešení	29
4.1	Použitý hardware	29
4.2	Použitý software	29
5	Varianty řešení	30
6	Tvorba výpočtového modelu R1	31
6.1	Model materiálu	31
6.2	Model geometrie	31
6.3	Kontaktní dvojice	33
6.4	Síť konečných prvků	33
6.5	Model okrajových podmínek	37

7	Tvorba výpočtového modelu R2	39
7.1	Model materiálu	39
7.2	Model geometrie	39
7.3	Kontaktní dvojice	40
7.4	Síť konečných prvků	40
7.5	Model okrajových podmínek	41
8	Tvorba výpočtového modelu V1	42
8.1	Model materiálu	42
8.2	Model geometrie	42
8.3	Kontaktní dvojice	43
8.4	Síť konečných prvků	43
8.5	Model okrajových podmínek	44
8.6	Optimalizace	45
8.6.1	Parametry optimalizace	45
8.6.2	Výsledek optimalizace	47
9	Prezentace a analýza výsledků	49
9.1	Referenční varianty	49
9.1.1	Varianta R1	49
9.1.1.1	Deformovaný tvar	49
9.1.1.2	Výsledky po jednotlivých cestách	50
9.1.2	Varianta R2	53
9.1.2.1	Deformovaný tvar	53
9.1.2.2	Výsledky po jednotlivých cestách	54
9.1.3	Analýza výsledků	56
9.2	Varianta V1	57
9.2.1	Deformovaný tvar	58
9.2.2	Výsledky po jednotlivých cestách	59
9.2.3	Analýza výsledků	61
10	Závěr	63
11	Seznam použitých zdrojů	64
12	Seznam použitých zkratk a symbolů	67

1. Úvod

Kolejová doprava patří k nejvýznamnějším transportním prostředkům. Metra, tramvaje či vlaky denně přepraví miliony cestujících po celém světě. V dnešní době je kladen důraz jak na funkci, tak i design technického výrobku. Požadavek ladných křivek namísto nevzhledně působících ostrých úhlů provází návrh výrobku již od započetí výroby. To s sebou nese i zlepšení aerodynamických vlastností objektu, tolik důležitých pro vzrůstající touhu po rychlosti. Pro požadavek spojení dvou různých materiálů, v tomto případě skla a kovu, je ideální použití lepeného spoje. Počátek této spojovací metody spadá až do prehistorického období, kdy se k opravování rozbité keramiky používala pryskyřice vytékající ze stromů. Metoda konečných prvků je často využívaným nástrojem k řešení problémů napjatosti či deformace a umožňuje provést prvotní návrh a podrobit jej zjednodušeným reálným podmínkám bez požadavku na existenci reálného prototypu. Zadání této diplomové práce pochází od společnosti IFE-CR. Tato společnost patří mezi světové lídry ve vývoji a výrobě automatických dveřních systémů pro kolejová vozidla a její výrobky lze nalézt po celém světě. Jedním z předmětů této práce je dveřní křídlo patřící do projektu Flexity.



Obr. 1.1: Flexity [30]

1.1. Problémová situace

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem dveřního rámu s nalepeným sklem. Dveřní křídlo vyrábí společnost IFE-CR se sídlem v Modřicích. Samotný rám dveří je vytvořen svařením profilů z hliníkové slitiny, předehtých na daný poloměr. Na takto ohnutý rám se poté nalepí rovné sklo, které vlivem vzniklé elastické deformace ohýbá celou konstrukci na opačnou stranu. Je proto podstatné navrhnout předehtnutí rámu dostatečně přesně tak, aby po nalepení skla finální dveřní křídlo pasovalo do kolejového vozidla, pro které bylo určeno.

K navrhnutí zakřivení rámu bude využita metoda konečných prvků skrze výpočetní program Ansys Workbench. Nejprve bude proveden výpočet na dvou dveřních křídlech s konstantním poloměrem zakřivení 15 a 10 m po nalepení skla, tyto dveřní křídla se již v současné době vyrábějí a jejich poloměry zakřivení byly určeny experimentálně. Těmito výpočty si ověřím vhodně zvolený přístup k řešení dveřního rámu s kombinovaným poloměrem zakřivení 18 m a 6,914 m (rozdílným v horní a dolní části dveří).

1.2. Cíle řešení

Na základě výše popsané problémové situace byly stanoveny tyto cíle diplomové práce:

- rešeršní studie v oblasti MKP modelování lepených spojů
- výpočet zakřivení rámu dveřního křídla s požadovaným poloměrem a.) 15m b.) 10m po nalepení skla
- porovnání výpočtů s výsledky zkoušek
- navrhnutí zakřivení dveřního rámu, který bude mít po nalepení skla kombinovaný poloměr zakřivení 18 m a 6,914 m

2. Rešeršní studie

Rešeršní část se zabývá problematikou lepených spojů. Nejprve jsou shrnuty základní pojmy a úvod do teorie lepení. Na tuto část dále navazují kapitoly popisující první analytická řešení i moderní metody umožňující modelování celého procesu selhání lepeného spoje pomocí metody konečných prvků.

2.1. Základní pojmy

- **Adheze**

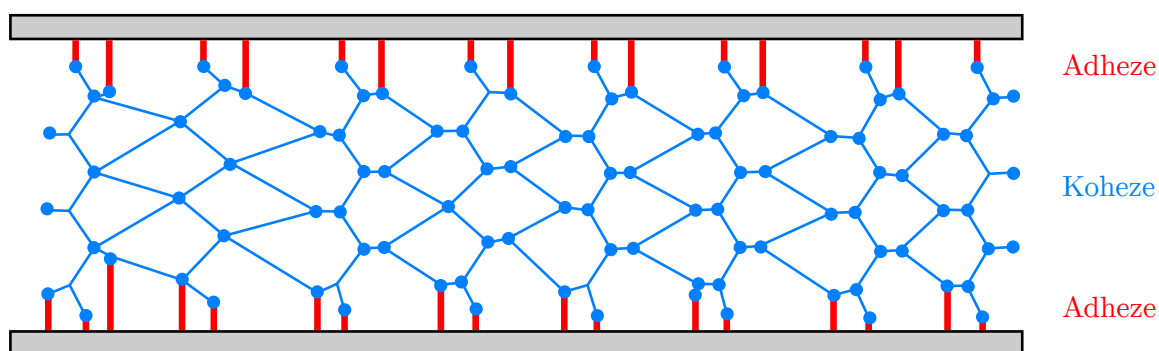
Základní princip lepeného spoje se nazývá adheze. Jedná se o jev na rozhraní dvou materiálů v těsném kontaktu, který má za následek vznik přitažlivé síly způsobené molekulární vazbou mezi těmito materiály.

- **Koheze**

Pojem koheze označuje vnitřní sílu mezi atomy či molekulami téhož materiálu. Tato síla udržuje atomy či molekuly pohromadě a podporuje soudržnost materiálu.

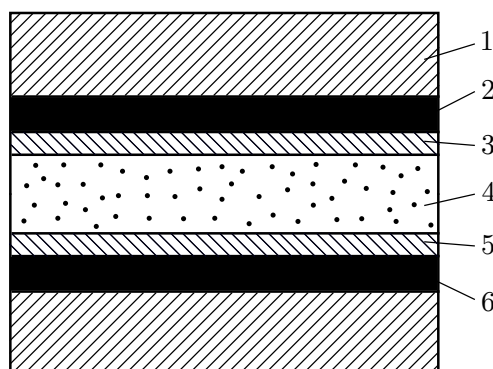
- **Adherend**

Adherendem neboli substrátem se označují vrstvy spojované lepidlem.



Obr. 2.1: Adheze a koheze [16]

Z hlediska vnitřní struktury lze každý konstrukčně pevný a dostatečně odolný lepený spoj dvou základních materiálů považovat za komplex tří hlavních vrstev a dvou mikrovrstev [15].



Obr. 2.2: Základní struktura lepeného spoje [15]

Jsou to:

1. adherend
2. adhezní zóna
3. přechodová adhezní zóna
4. kohezní zóna
5. přechodová kohezní zóna
6. adhezní zóna

Technologie lepení má oproti běžným spojovacím metodám mnoho výhod, mezi něž patří například [1][2]:

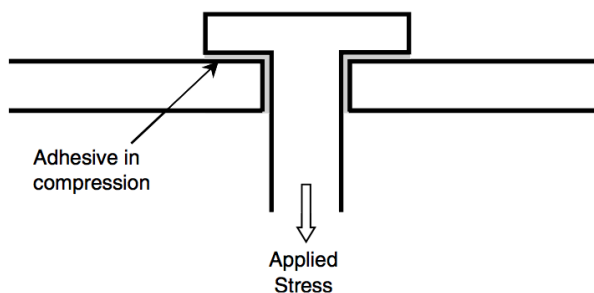
- možnost spojení různých materiálů
- relativně rychlá a levná metoda
- rozložení silových účinků na větší plochu
- malý hmotnostní přírůstek součástí
- tlumící účinek vibrací a hluku
- nedochází k narušení základního materiálu (vrtání děr apod.)
- nevznikají tepelná pnutí (svary)
- vyšší odolnost vůči únavě materiálu
- vysoká těsnost spoje

Naopak nevýhodou lepených spojů je [1][2]:

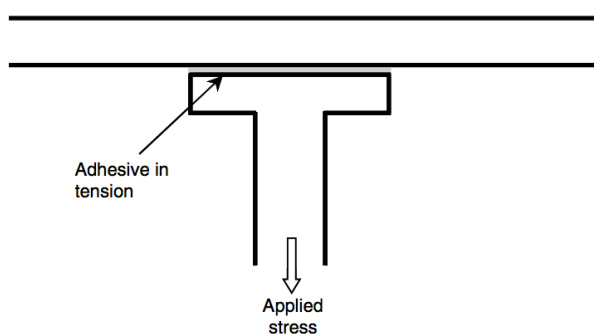
- pečlivá příprava ploch adherendů
- nízká manipulační pevnost spoje před vytvrzením
- potřeba fixovat spojované části během vytvrzování
- obtížná rozebíratelnost
- omezené provozní teploty (vliv creepu)
- zatím neověřený dlouhodobý vliv stárnutí

2.2. Typy namáhání lepených spojů

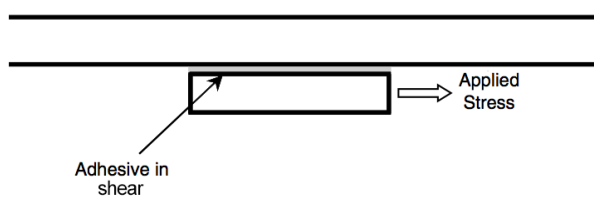
Vhodným návrhem lepeného spoje lze podpořit jeho únosnost. Typicky lze říci, že lepené spoje mají značnou únosnost při namáhání smykem, špatně však přenášejí tah, případně tzv. odlupování. Snahou tedy je konstruovat spoj tak, aby byl zatížen jen smykem. Součásti namáhané tahem se spojují jako přeplátované nebo se zkosením. Výhodné je také spojovat tenké plechy lemováním a silnější plechy pomocí spojovacích dílů s drážkami [4]. Typické způsoby namáhání lepených spojů jsou následující [8]:



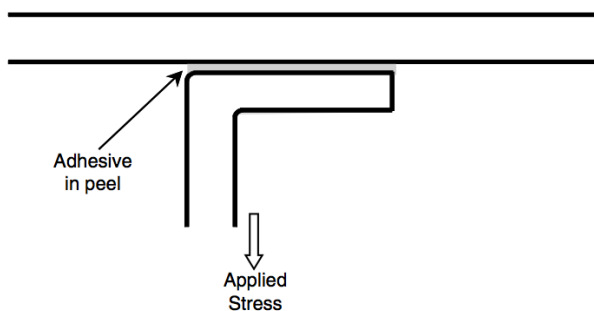
Obr. 2.3: Namáhání lepeného spoje tlakem [8]



Obr. 2.4: Namáhání lepeného spoje tahem [8]



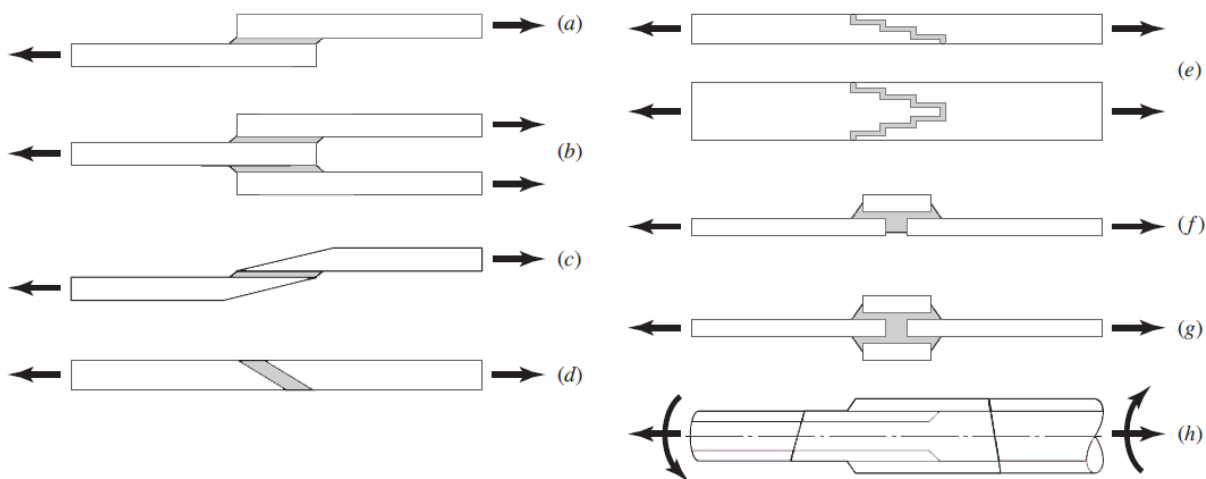
Obr. 2.5: Namáhání lepeného spoje smykem [8]



Obr. 2.6: Namáhání lepeného spoje odlupováním [8]

2.3. Typy lepených spojů

Výběr vhodného typu spoje je jedním ze základních předpokladů úspěšného spojení a výdrže spoje. Pevnost spoje silně závisí na charakteru namáhání a rozložení napětí vlivem zátěžných sil. Lepenou konstrukci je vhodné rozdělit na části co nejméně složité, přičemž je třeba klást důraz na rovnoměrné rozložení mechanického namáhání a zamezení jeho soustředění pouze v místě spoje. Plocha spoje musí být dostatečně velká a lepené materiály by měly mít v místě spoje stejné nebo podobné koeficienty teplotní roztažnosti. Pevnost spojů ve smyku zpravidla stoupá s pevností adherendů. Mezi nejběžnější patří jednoduše přeplátované spoje viz obrázek 2.7 a.) [15].



Obr. 2.7: Běžné typy lepených spojů [5]

2.4. Mechanismy porušení lepeného spoje

Existují tři základní mechanismy porušení lepených spojů [17]

- **Porušení adherendu**

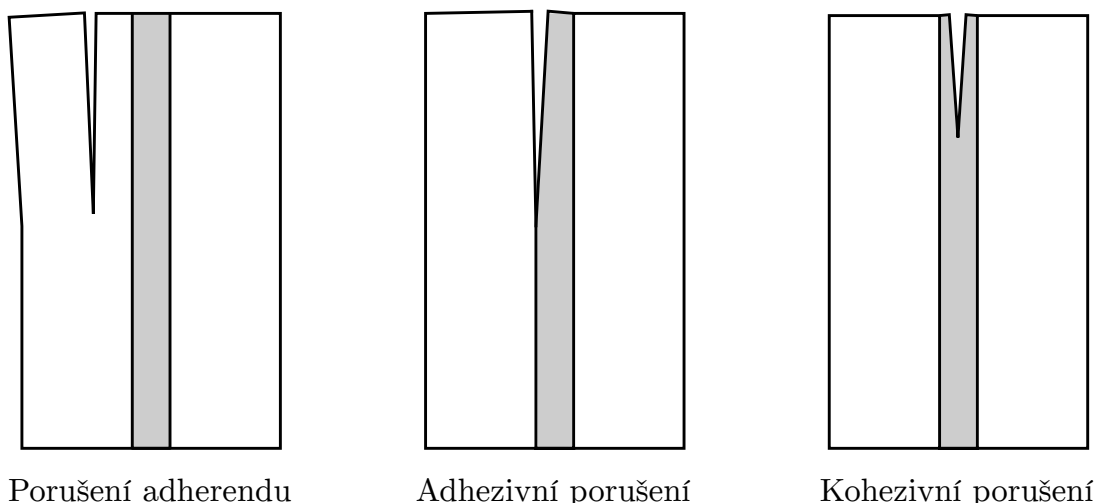
Porušení adherendu při zachování soudržnosti lepeného spoje je možné pouze pro správně navržený a zkonstruovaný spoj s relativně tenkými adherendy. Tento stav je velice žádaný, protože umožňuje plné využití materiálu adherendu.

- **Adhezivní porušení**

Adhezivní porucha je charakterizována absencí lepidla na jedné z lepených ploch. Porucha nastane na materiálovém rozhraní a je většinou způsobena nevhodnou přípravou lepených ploch či nesprávným vytvrzením lepidla.

- **Kohezivní porušení**

Kohezivní porucha má za následek lom ve vrstvě lepidla a je charakterizována přítomností lepidla na odpovídajících stranách adherendů. Tento typ poruchy většinou nastane při smykovém namáhání nebo kombinací smyku a odlupování.



Obr. 2.8: Mechanismy poškození lepeného spoje [2]

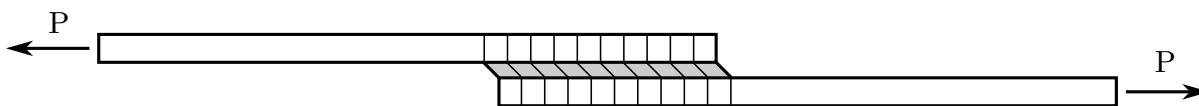
2.5. Analytické modely

Napjatostní analýza lepených spojů je náročná kvůli rozložení napětí po vrstvě lepidla. Rozdílné materiály a tím pádem i moduly pružnosti lepidla a adhezivů jsou hlavní příčinou vzniku koncentrace napětí na rozhraní spojovaných materiálů. Analytické modely umožňují rychlé výpočty pro jednoduché a známé geometrie spojů. Tyto analýzy jsou založeny na řešení soustavy diferenciálních rovnic formulovaných pro daný typ spoje a jsou vhodné k porozumění rozložení napětí či prvotnímu návrhu.

Mezi nejčastěji používané typy spojů patří jednoduše přeplátovaný spoj. Nejjednodušší analýza předpokládá, že lepidlo se deformuje pouze ve smyku a adhezivy jsou absolutně tuhé. Smykové napětí ve vrstvě lepidla je konstantní po délce přeplátování a je dáno vztahem:

$$\tau = \frac{P}{bl} \quad (2.1)$$

Tato hodnota smykového napětí může být vyložena jako průměrná hodnota smykového napětí v lepidle. Tato analýza příliš neodpovídá skutečnosti kvůli mnohým zjednodušením, ale je stále základem pro udávání smykové pevnosti lepidla v testech dle norem ASTM a ISO [8][18].

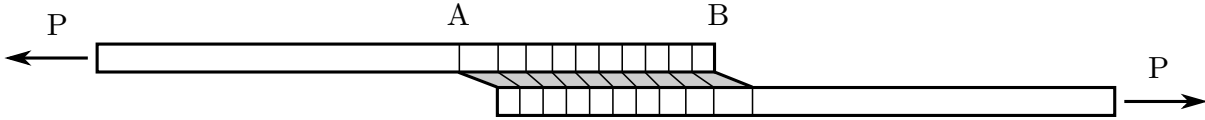


Obr. 2.9: Nejjednodušší model lepeného spoje [18]

2.5.1. Volkersen

Jako první se složitostí rozložení napětí v lepeném spoji zabýval Volkersen v roce 1938. Analýzu prováděl na jednoduše přeplátovaném spoji a předpokládal, že lepidlo se deformuje pouze ve smyku. Pro adhezivy uvažoval elastický model materiálu a deformaci pouze v tahu. Tahové napětí v dolním adhezivu je maximální v bodě A a klesá k nule v

bodě B, takže přetvoření musí klesat z bodu A do bodu B. Pokles přetvoření v adhezen-
dech po délce spoje a spojitost rozhraní lepidla a adherendu způsobí nelineární rozložení
smykového přetvoření (zkosu) ve vrstvě lepidla. Maximum smykového napětí je na koncích
spoje a mnohem nižší uprostřed. Volkersenova analýza ovšem nezahrnuje vliv ohybového
momentu, který je způsoben nesouosostí zatěžujících sil jednoduše přeplátovaného spoje.



Obr. 2.10: Volkersenova analýza lepeného spoje [18]

Výsledkem jeho analýzy je vztah pro rozložení smykového napětí po délce přeplátování:

$$\tau(x) = \frac{P\omega \cosh(\omega x)}{2bl \sinh\left(\frac{\omega}{2}\right)} + \frac{\psi - 1}{\psi + 1} \frac{\omega \sinh(\omega x)}{2 \cosh\left(\frac{\omega}{2}\right)} \quad (2.2)$$

kde:

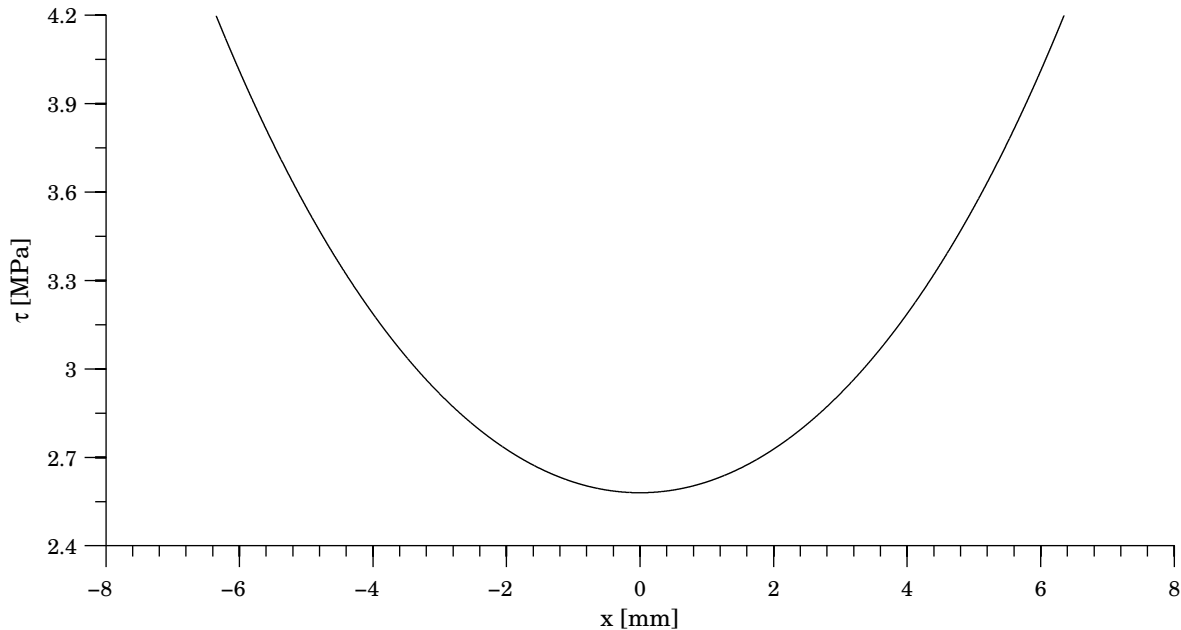
$$\omega^2 = (1 + \psi) \phi \quad (2.3)$$

$$\psi = \frac{t_t}{t_b} \quad (2.4)$$

$$\phi = \frac{G_a l^2}{E t_t t_a} \quad (2.5)$$

$$x \in \left(-\frac{l}{2}, \frac{l}{2}\right)$$

$$-\frac{l}{2} \leq x \leq \frac{l}{2}$$

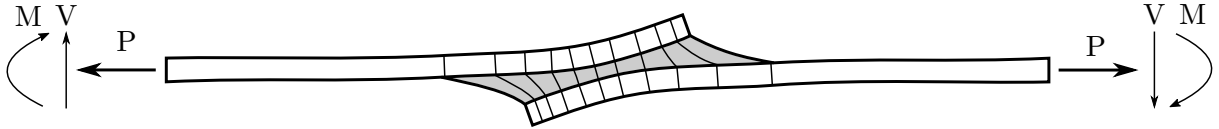


Graf 2.1: Rozložení smykového napětí po délce přeplátování dle Volkersena

Hlavním nedostatkem Volkersenova řešení je to, že zanedbává odlupovací napětí, které vzniká v důsledku zatížení nesouosými silami. Tento jev by měl být brán v potaz, protože lepený spoj je na tento typ namáhání velice náchylný [8][18].

2.5.2. Goland a Reissner

Zatížení jednoduše přeplátovaného spoje nesouosými silami má za následek vznik ohybového momentu a příčné síly působících na koncích spoje. Kvůli tomuto ohybovému momentu dochází k rotaci spoje, která mění směr zatížení tak, aby zatěžující síly byly v linii.



Obr. 2.11: Vliv nesouososti zatěžujících sil dle Golanda a Reissnera [18]

První, kdo uvažovali tyto jevy, byli Goland a Reissner v roce 1944. Ve svých analýzách zavedli faktor ohybového momentu k a faktor příčné síly k' , které dávají do souvislosti zátěžnou sílu na jednotku šířky \bar{P} s ohybovým momentem M a příčnou silou V na koncích přeplátování dle následujících vztahů:

$$M = k \frac{\bar{P}t}{2} \quad (2.6)$$

$$V = k' \frac{\bar{P}t}{c} \quad (2.7)$$

Pokud nedochází k natočení spoje, např. při malé velikosti zatížení, hodnoty k a k' budou přibližně rovny 1. Při zvyšování velikosti zatížení dochází k rotaci spoje a snižování hodnot k a k' a tím i zmenšení ohybového momentu a příčné síly. Velikost faktoru ohybového momentu je dána vztahem:

$$k = \frac{\cosh(u_2c)}{\cosh(u_2c) + 2\sqrt{2} \sinh(u_2c)} \quad (2.8)$$

kde:

$$u_2 = \sqrt{\frac{3(1-\mu^2)}{2}} \frac{1}{t} \sqrt{\frac{\bar{P}}{tE}} \quad (2.9)$$

Pro velikost faktoru příčné síly platí vztah:

$$k' = \frac{kc}{t} \sqrt{3(1-\mu^2) \frac{\bar{P}}{tE}} \quad (2.10)$$

Rozložení smykového napětí dle Golanda a Reissnera je dáno vztahem:

$$\tau(x) = -\frac{\bar{P}}{8c} \left[\frac{\beta c}{t} (1+3k) \frac{\cosh\left(\frac{\beta x}{t}\right)}{\sinh\left(\frac{\beta c}{t}\right)} + 3(1-k) \right] \quad (2.11)$$

kde:

$$\beta^2 = 8 \frac{G_a}{E} \frac{t}{t_a} \quad (2.12)$$

Výsledkem ohybu lepeného spoje je příčné normálové napětí skrze tloušťku vrstvy lepidla. Toto napětí se nazývá odlupovací a pro jeho rozložení po délce přeplátování platí vztah [8][18]:

$$\sigma(x) = \frac{\bar{P}}{\Delta c^2} \left[\left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cosh(\lambda) \cos(\lambda) \right) \cosh\left(\frac{\lambda x}{c}\right) \cos\left(\frac{\lambda x}{c}\right) + \left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sinh(\lambda) \sin(\lambda) \right) \right] \quad (2.13)$$

kde:

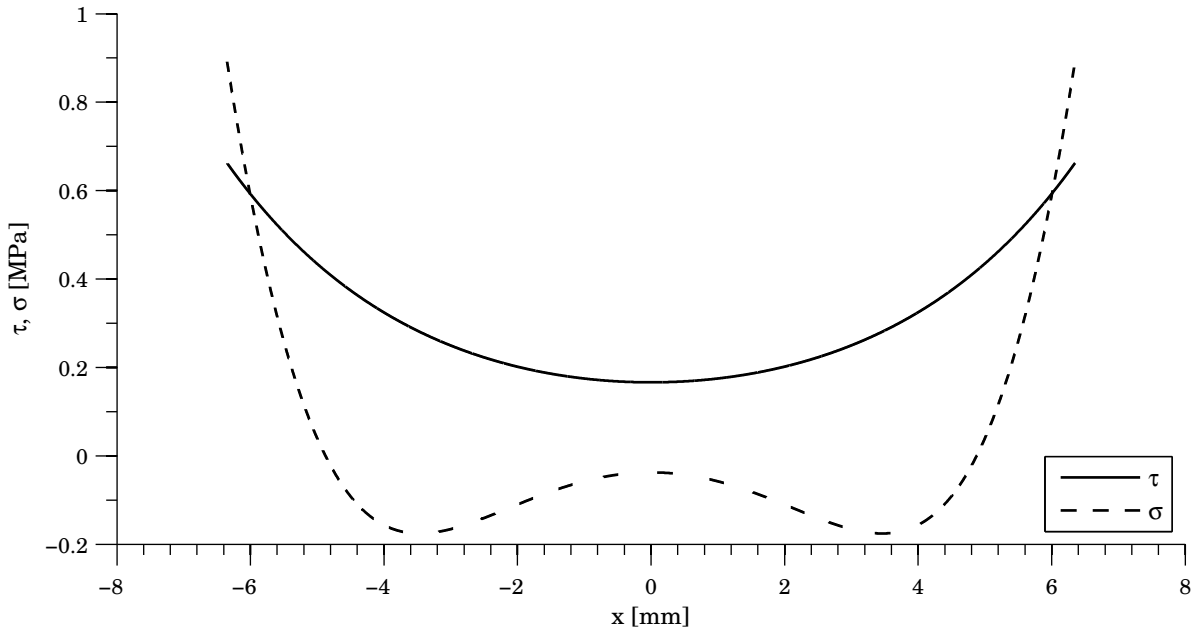
$$\lambda = \frac{\gamma c}{t} \quad (2.14)$$

$$\gamma^4 = 6 \frac{E_a}{E} \frac{t}{t_a} \quad (2.15)$$

$$R_1 = \cosh(\lambda) \sin(\lambda) + \sinh(\lambda) \cos(\lambda) \quad (2.16)$$

$$R_2 = \sinh(\lambda) \cos(\lambda) - \cosh(\lambda) \sin(\lambda) \quad (2.17)$$

$$\Delta = \frac{1}{2} (\sin(2\lambda) + \sinh(2\lambda)) \quad (2.18)$$



Graf 2.2: Rozložení smykového a odlupovacího napětí po délce přeplátování dle Golanda a Reissnera

V porovnání s Volkersenovou analýzou dává analýza Golanda a Reissnera vyšší smykové napětí na koncích přeplátování. To je způsobeno tím, že odlupovací napětí způsobuje dodatečné smykové napětí navíc. Problémem rozložení napětí v lepeném spoji se zabývala spousta dalších vědců, jako například Hart-Smith, kteří uvažovali plastickou deformaci lepidla, či Adams, který kromě plasticity lepidla bral v potaz i plasticitu adherendů.

2.6. MKP modelování lepených spojů

Vzhledem ke komplexnosti řešených problémů často není analytické řešení možné. V takovém případě lze využít metody konečných prvků. Pomocí této metody lze teoreticky modelovat jakýkoliv problém, kdy limitem je pouze dostupný hardware a schopnost výpočtáře. Tato metoda nabízí pro modelování lepených spojů několik přístupů lišících se použitým kritériem porušení [9]:

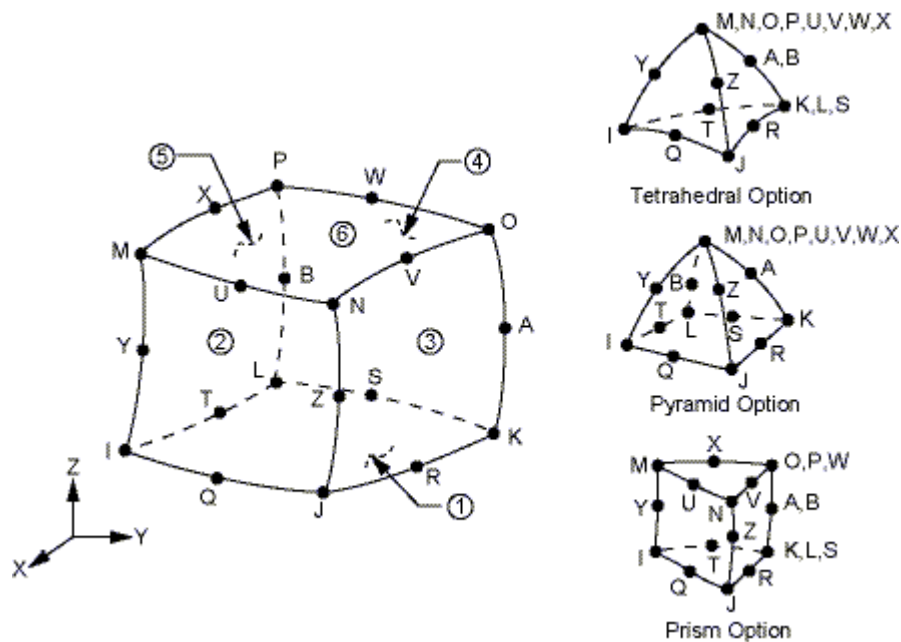
- Pružnost a pevnost
- Lomová mechanika
- Mechanika poškození

2.6.1. Mechanika kontinua

Přístup pružnosti a pevnosti typicky předpokládá, že když složky napětí, přetvoření nebo jejich redukované hodnoty (např. redukované napětí dle HMM) dosáhnou přípustné velikosti, závisující na vlastnostech materiálu, dojde k selhání. Při použití tohoto přístupu se modeluje celá vrstva lepidla. A podle úrovně zjednodušení, například při využití rovinné napjatosti, lze lepidlo modelovat pomocí dvojrozměrných prvků. Nejobecnějším typem prvku, který lze použít, je trojrozměrný objemový prvek. Pomocí prvku se modeluje geometrie lepené vrstvy a vhodným materiálovým modelem se přiřadí lepidlu jeho materiálové charakteristiky získané např. tahovou zkouškou dle norem.

2.6.1.1. Objemové prvky

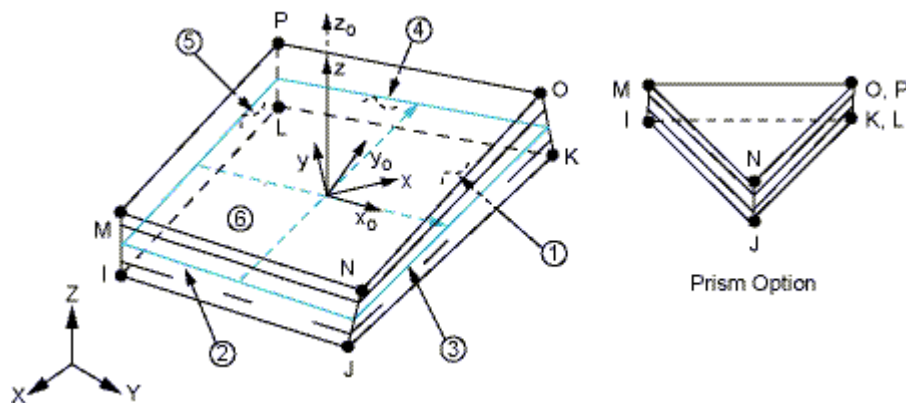
Modelovat přímo geometrii lepeného spoje se jeví jako zřejmá volba, pokud nás zajímá rozložení napětí ve spoji. V obecném případě se bude jednat o modelování objemovými prvky. Tloušťka vrstvy lepidla je obecně mnohem menší než ostatní rozměry a z důvodů popsaných v kapitole 2.7 by pro adekvátní přesnost výpočtu deformace a napjatosti bylo zapotřebí velké množství těchto prvků, čímž by samozřejmě vzrostla náročnost a doba výpočtu. Obecně lze říci, že největší překážkou při modelování objemovými prvky jsou právě rozměry vrstvy lepidla vzhledem k ostatním rozměrům konstrukce.



Obr. 2.12: Kvadratický objemový prvek SOLID186 se svými degenerovanými variantami [19]

2.6.1.2. Objemovo-skořepinové prvky

Zvláštním případem spadajícím do skupiny objemových prvků je objemovo-skořepinový prvek SOLSH190. Tento trojrozměrný osmi-uzlový prvek je vhodný pro tenké až relativně silnostěnné konstrukce a reprezentuje geometrii stejně jako obyčejný objemový prvek, přičemž má ale formulaci vycházející ze skořepinových prvků a vhodně tedy reprezentuje chování skrze tloušťku i za použití pouze jediného prvku po tloušťce. Nevýhodou tohoto prvku je, že ho lze použít pouze na geometrii tvořenou tenkostěnnými prvky, na které lze aplikovat metodu tažení sítě skrze tloušťku. Tento požadavek je zaveden právě kvůli formulaci založené na skořepinových prvcích, kdy je osa z prvku orientována ve směru tloušťky tenkostěnné geometrie viz obrázek 2.13. Pokud by tento požadavek nebyl dodržen, nelze předpokládat správné chování prvku. Prvek SOLSH190 je v prostředí Ansys Workbench dostupný pod volbou thin sweep při nastavování metody sítě. Pro složitější geometrie je vhodné zvolit volbu manual thin a určit zdrojové plochy tažení manuálně. Správná orientace prvku je pak zabezpečena síťovacím algoritmem programu.



Obr. 2.13: Osmi-uzlový objemovo-skořepinový prvek SOLSH190 [19]

2.6.1.3. Materiálové modely lepidel

Lepidla obecně vykazují viskoelastické chování s velkou teplotní závislostí. Dle zvolené rozlišovací úrovně a dostupných materiálových charakteristik lze zvolit některý z následujících materiálových modelů.

Lineárně elastický model

Pro tuhá lepidla nepodléhající napětím větším než mez kluzu, lze použít lineárně elastický model materiálu. Vztah mezi napětím a přetvořením takového modelu materiálu popisuje Hookův zákon. Pro jednoosou tahovou napjatost je definován takto:

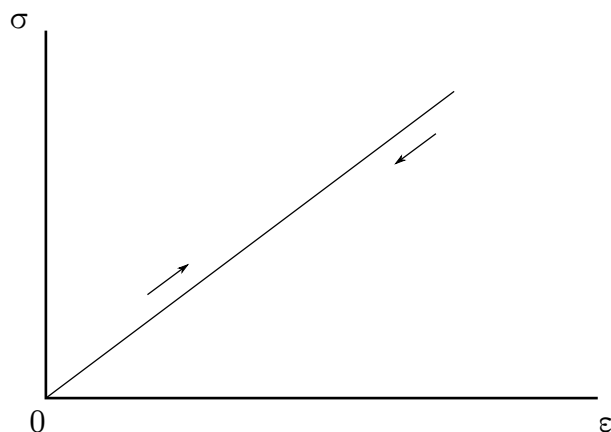
$$\sigma = E\varepsilon \quad (2.19)$$

Pro smykovou napjatost má Hookův zákon tvar:

$$\tau = G\gamma \quad (2.20)$$

Pro tento model materiálu jsou zapotřebí 2 nezávislé konstanty. Youngův modul pružnosti dává do souvislosti s modulem pružnosti ve smyku Poissonův poměr dle vztahu [34]:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (2.21)$$



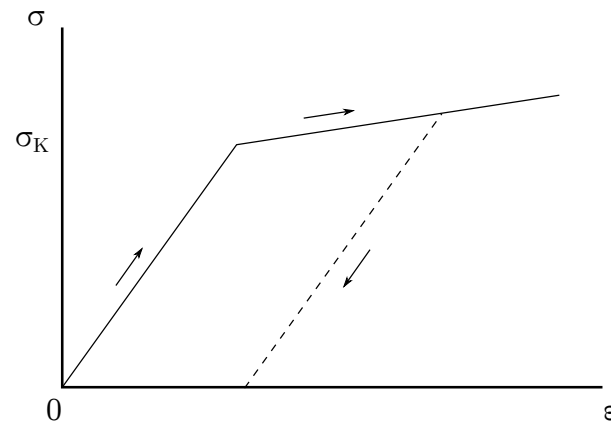
Graf 2.3: Lineárně elastický model materiálu

Elasticko plastický model

Tento model je rozšířením lineárně elastického modelu pro zatěžování za mezí kluzu. V Ansysu existují tyto druhy zpevnění:

- izotropní
- kinematické

Přičemž nejjednodušší aproximace tahového diagramu je bilineární a jeho rozšířením je multilineární model [34].



Graf 2.4: Elasticko plastický model materiálu s lineárním zpevněním

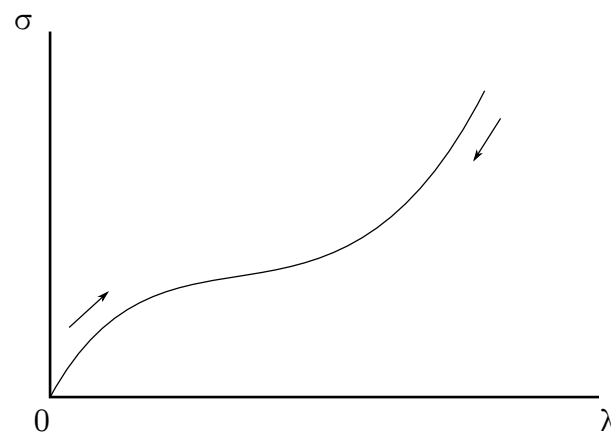
Hyperelastický model

Materiál nazýváme hyperelastickým, pokud existuje elastická potenciální funkce W (měrná deformační energie), která je skalární funkcí některého z tenzorů přetvoření, resp. deformace a jejíž derivace podle některé složky přetvoření pak určuje odpovídající složku napětí. To lze vyjádřit např. následovně:

$$S_{ij} = \frac{\delta W}{\delta E_{ij}} \quad (2.22)$$

Hyperelastické materiály dosahují při zatížení velkých přetvoření. Typickým příkladem je například guma. Pro hyperelastické materiály se místo přetvoření používá poměrné protažení λ definované takto [34]:

$$\lambda = \frac{L + u}{L} = 1 + \varepsilon \quad (2.23)$$



Graf 2.5: Hyperelastický model materiálu

2.6.1.4. Pružinové prvky

Při simulaci lepeného spoje pružinovými prvky se používají tři nezávislé pružiny. Jedna pro tah/tlak a dvě pro smyk. Mechanické vlastnosti lepidla jsou reprezentovány tuhostí

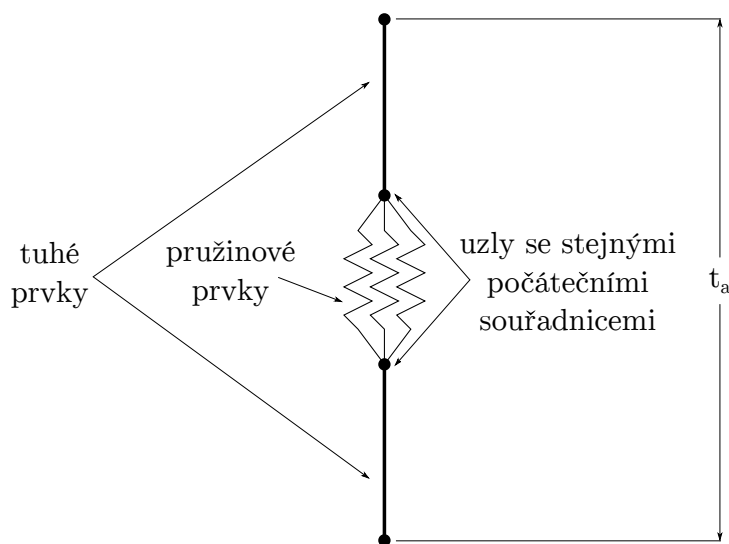
pružin. Tato metoda využívá mezeru po vrstvě lepidla, uprostřed které je vytvořena dostatečně jemná síť. Pro každý uzel této sítě je vytvořen uzel se stejnými počátečními souřadnicemi. Mezi tyto uzly jsou umístěny pružinové prvky působící v x , y a z -ovém směru, kde osy x a y jsou rovnoběžné s rovinou překlátování a pružiny v těchto směrech reprezentují smyk a osa z je určena pravidlem pravé ruky a pružina v tomto směru reprezentuje odlupování. Pro spojení uzlů uprostřed lepené vrstvy s horním a dolním adherendem se používají tuhé prvky. Kritérium porušení může být například maximální síla na pružinu, přičemž delaminaci lze modelovat pomocí příkazu EKILL (zničení prvků). Z následujících vztahů jsou určeny odpovídající tuhosti pružin:

Tuhost pružiny pro smyk:

$$k_{smyk} = G \frac{A_{el}}{t_a} \quad (2.24)$$

Tuhost pružiny pro tah/tlak:

$$k_{tah/tlak} = E \frac{A_{el}}{t_a} \quad (2.25)$$



Obr. 2.14: Modelování lepidla pomocí pružinového prvku [12]

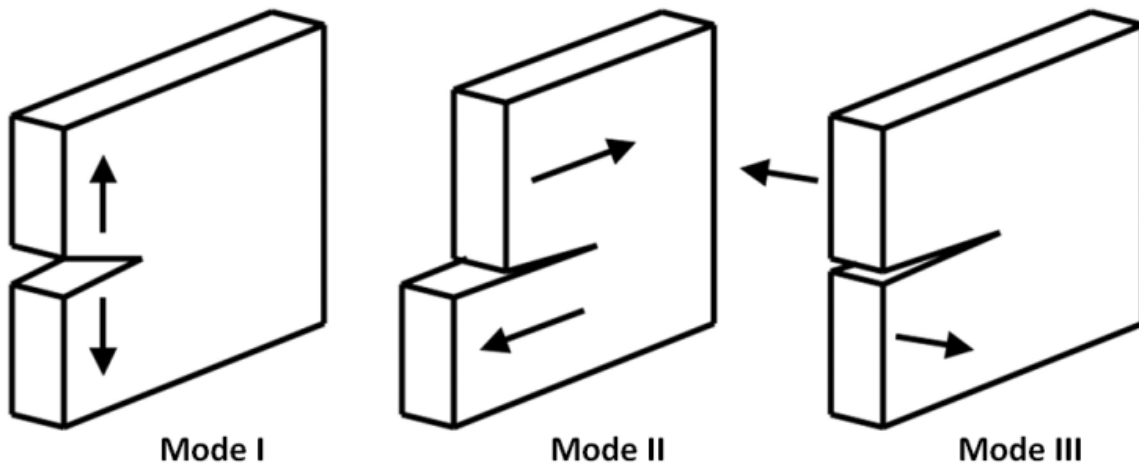
Při správném použití tohoto přístupu, je relativně dobře reprezentována celková tuhost konstrukce. Je však potřeba, aby se jednotlivé uzly sítě adherendů nacházely přesně nad a pod odpovídajícími uzly uprostřed vrstvy lepidla a nedocházelo tak ke zkresleným výsledkům. Pro modelování pružin je v prostředí Ansysu vhodný prvek COMBIN14 nebo maticový prvek MATRIX27 (tento prvek definuje matici tuhosti mezi dvěma uzly, takže stačí jeden narozdíl od prvku COMBIN14). Adherendy při tomto přístupu mohou být modelovány skořepinovými či objemovými prvky [9][11][12].

2.6.2. Lomová mechanika

Jelikož lepené spoje ve většině případů selžou z důvodu iniciace a šíření trhliny, je přístupu lomové mechaniky v této oblasti věnována poměrně velká pozornost. Hlavním cílem lomové mechaniky je analýza zátěžných podmínek, při kterých dochází k šíření trhliny a jejímu dalšímu růstu. Příkladně zdrojem prvotní trhliny mohou být například vzduchové bubliny, praskliny, částice prachu, aditiva, nehomogenity v lepidle atd. Lomová mechanika

je užitečná například pro stanovení houževnatosti lepidla, určení mechanismu porušení a odhadnutí provozní životnosti konstrukce s trhlinou. Lomová mechanika rozlišuje tři módy zatěžování viz obrázek 2.15 [10].

- mód I - normálový tahový
- mód II - rovinný smykový
- mód III - antirovinný smykový



Obr. 2.15: Zatěžovací módy trhliny [26]

2.6.2.1. Energetické kritérium

Energetické kritérium vychází z Griffithovy teorie, která říká, že lom nastane pokud dojde k uvolnění dostatečného množství energie šířením trhliny na pokrytí energie spojené s růstem nových povrchů. Uvolněná energie pochází z potenciální energie nahromaděné zatížením konstrukce a může být teoreticky spočtena pro jakýkoli vzorek. Veličina popisující rychlost uvolňování energie je označována jako hnací síla trhliny G a je definována jako derivace potenciální energie podle lomové plochy.

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} \quad (2.26)$$

Potenciální energie elastického materiálu je v tomto případě definována jako rozdíl mezi vnitřní energií a prací vnějších sil:

$$\Pi = U - F \quad (2.27)$$

Hnací síla trhliny může být stanovena jako rozhodující parametr pro růst trhliny. Materiálový parametr určující mezní stav je kritická hodnota G_c , nazývaná lomová houževnatost materiálu. Při aplikaci LELM v numerických metodách je rychlost uvolňování energie typicky vyjádřena napětím σ a posuvy uzlů v kořeni trhliny δ , vedoucí ke vztahu:

$$G_c = \int^{\delta_c} \sigma(\delta) d\delta \quad (2.28)$$

Pro lineárně elastický model materiálu platí:

$$\sigma = E \frac{\delta}{l} \quad (2.29)$$

kde l je charakteristická délka závisující na geometrii problému a velikosti sítě. V případě lomu kolísá hodnota σ ze své maximální hodnoty σ_{max} definované jako funkce lomové houževnatosti G_c k nule. Aby se trhlinka mohla šířit, musí být hodnota hnací síly trhliny vyšší nebo rovna lomové houževnatosti. Tato podmínka je známa jako Griffithovo kritérium:

Kritérium	Chování trhliny
$G < G_c$	trhlinka se nešíří
$G = G_c$	trhlinka se šíří stabilně
$G > G_c$	trhlinka se šíří nestabilně

Tab. 2.1: Chování trhliny v závislosti na velikosti hnací síly trhliny

V prvním případě se trhlinka nemůže šířit, protože chybí potřebná energie pro její růst. Ve druhém případě systém neuvolňuje ani nespotebovává energii, takže trhlinka se šíří stabilně. V posledním případě je do systému vkládáno více energie než trhlinka potřebuje k růstu. To vede k nestabilnímu šíření, kdy se trhlinka šíří rychlostí zvuku v daném materiálu [10][22][23].

2.6.2.2. Faktor intenzity napětí

Druhý přístup vychází z práce Irwina, který zjistil, že pole napětí kolem ostré trhliny při použití lineárně elastického modelu materiálu může být jednoznačně určeno parametrem, který nazval faktor intenzity napětí K a stanovil, že lom nastane pokud tento parametr dosáhne své kritické hodnoty K_c . K je tedy parametr popisující napětí, zatímco K_c , často nazývaný jako lomová houževnatost, je materiálovou charakteristikou. Porovnáním hodnoty součinitele intenzity napětí s lomovou houževnatostí můžeme určit další chování trhliny:

Kritérium	Chování trhliny
$K < K_c$	trhlinka se nešíří
$K = K_c$	trhlinka se šíří stabilně
$K > K_c$	trhlinka se šíří nestabilně

Tab. 2.2: Chování trhliny v závislosti na velikosti faktoru intenzity napětí

Tento přístup funguje velice dobře pro vzorky, které byly použity pro zjištění kritické hodnoty faktoru intenzity napětí, ale aplikace na složitější geometrie je značně komplikovaná [10][23].

2.6.2.3. Virtual Crack Closure Technique

Pro využití lomové mechaniky v metodě konečných prvků existuje několik metod, které zahrnují jak výpočet lomové houževnatosti, tak i určení faktoru intenzity napětí. Vzhle-

dem k nedostatkům přístupu faktoru intenzity napětí, popsaného v kapitole 2.6.2.2, se tato práce bude dále zabývat pouze energetickým přístupem.

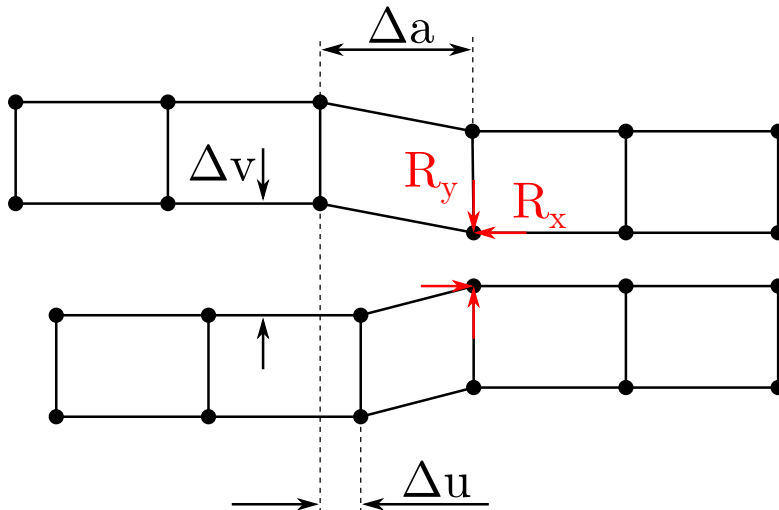
V Ansysu je pro určení hnací síly trhliny zavedena metoda Virtual Crack Closure Technique (VCCT). Tato metoda je založena na předpokladu, že energie uvolněná šířením trhliny na krátkou vzdálenost je rovna energii potřebné k uzavření trhliny o stejnou vzdálenost. V MKP je tento princip zaveden tak, že se provedou dvě analýzy na stejné počáteční geometrii. V té musí být namodelována trhlina a samozřejmě zatížení, při kterém chceme vypočítat rychlost uvolňování energie. Například pro 2D úlohu je po provedení analýzy získán výsledek jako na obrázku 2.16. Z tohoto výsledku jsou odečteny a uloženy posuvy u a v mezi plochami trhliny a reakce R_x a R_y v kořeni trhliny. Hnací síla trhliny je pak odhadnuta jako:

$$G_I = \frac{1}{2\Delta a} R_y \Delta v \quad G_{II} = \frac{1}{2\Delta a} R_x \Delta u \quad (2.30)$$

V rovnici 2.30 je Δa rovno prodloužení trhliny. Po výpočtu rychlosti uvolňování energie jsou separované uzly spojeny vazbou MPC a růst trhliny je simulován v závislosti na použitém kritériu. Nejjednodušší lineární má tvar:

$$f = \frac{G_I}{G_I^C} + \frac{G_{II}}{G_{II}^C} \quad (2.31)$$

Příčemž trhlina se šíří pokud je $f \geq 1$. Nevýhodou této metody je potřeba znalosti geometrie trhliny, její velikost a polohy v konstrukci. Z toho důvodu je poměrně nevhodná pro velké konstrukce. Tato metoda tak nabízí pouze predikce ohledně šíření trhliny a ne jejího vzniku [19][23][24].



Obr. 2.16: Princip VCCT na jednoduché 2D úloze [24]

2.6.3. Mechanika poškození

Poškození lepené konstrukce během zatěžování může být pozorováno ve formě mikrotrhlin na konečném objemu nebo na rozhraní lepidla a adherendu. Při takovém poškození dochází ke snížení přenosu zatížení. Mechanika poškození umožňuje simulaci poškození a lomu krok po kroku až do úplného selhání konstrukce. Jedná se o inovativní metodu, pro

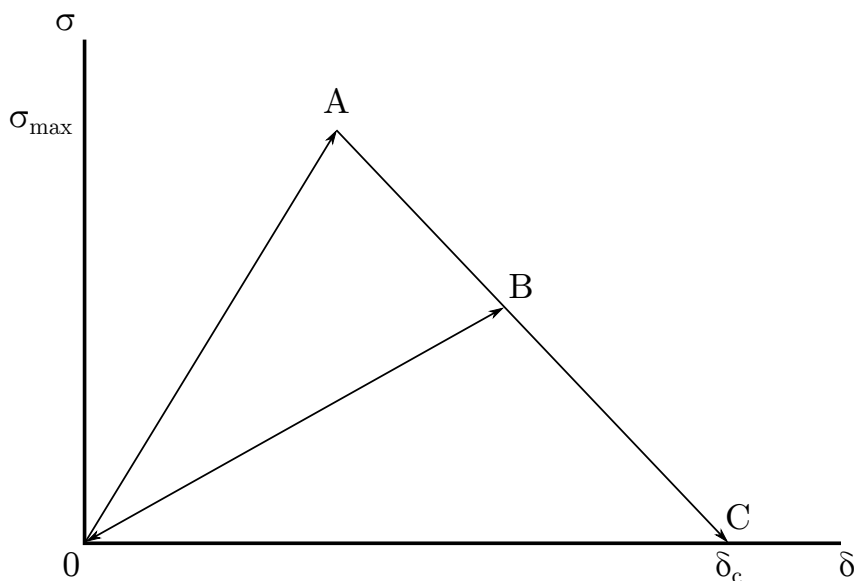
kteřou jsou stále vyvíjeny přesnější metody modelování, spolehlivější a jednodušší metody pro určení potřebných parametrů a v neposlední řadě také snaha o zvýšení robustnosti a eliminaci problémů s konvergencí. Ve výpočetních programech založených na metodě konečných prvků je tato metoda implementována jako model kohezivní zóny (CZM) a je speciálním případem spadajícím do skupiny kontaktních prvků. Model kohezivní zóny umožňuje modelovat delaminaci rozhraní a progresivní vývoj porušení pro dva spojené materiály. Porušení je v tomto přístupu modelováno postupnou degradací elasticity materiálu mezi lepenými povrchy. Chování materiálu mezi rozhraními je popsáno napětím (normálovým a tečným) a separací, tedy posuvy vzniklými oddělením jednotlivých rozhraní (normálová mezera a tečné skluzu). Simulace rozlepování pomocí kohezivní zóny umožňuje tři módy separace.

- mód I - normálová separace
- mód II - tečná separace
- kombinovaný mód - kombinace normálové a tečné separace

Přístup modelování postupného vývoje poškození umožňuje zachytit kompletní odezvu celého spoje až do konečného poškození v jedné analýze. Tato metoda může být rozdělena do dvou přístupů:

- lokální přístup
- přístup kontinua

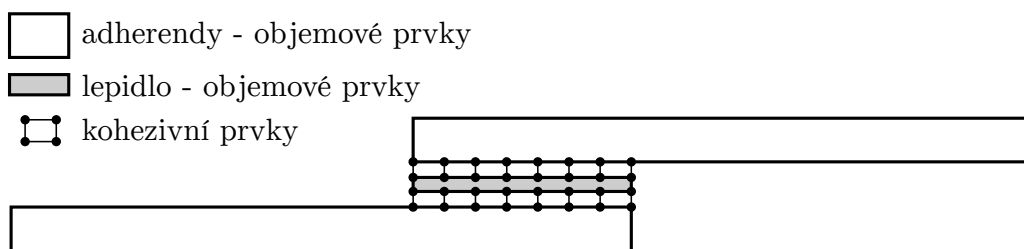
V obou případech je třeba formulovat vztah pro křivku napětí-separace, který se nazývá kohezivní zákon a je předepsán mezi spárovanými uzly kohezivních prvků. Obrázek 2.6 popisuje normálovou separaci (mód I). Po lineárně pružném zatěžování mezi body 0A následuje lineární změkčení AC. Maximálního normálového napětí σ_{max} je dosaženo v bodě A. V tomto bodě také začíná proces odlepování, který je dokončen v bodě C, kdy normálové napětí dosáhne nuly při kritickém posuvu δ_c . Jakákoli další separace rozhraní nastává bez normálového napětí. Plocha pod křivkou 0AC je rovna lomové houževnatosti a odpovídá energii uvolněné při rozlepování. Směrnice přímky 0A určuje separaci při maximálním normálovém napětí a tak popisuje pokles normálového napětí v závislosti na separaci, čímž určuje zda se jedná o křehký nebo tvárný lom. Poté, co došlo k iniciaci rozlepování, je tento proces považován za kumulativní a jakékoli další odlehčování či následné zatížení probíhá lineárně po přímce 0B. Materiálové parametry popisující tento model jsou: lomová houževnatost G_c stanovená jako plocha pod křivkou napětí-separace, maximální napětí σ_{max} a tvar křivky přenos-separace, který může být například bilineární nebo exponenciální [13][18][21][22][25].



Graf 2.6: Bilineární kohezivní zákon [19]

2.6.3.1. Lokální přístup

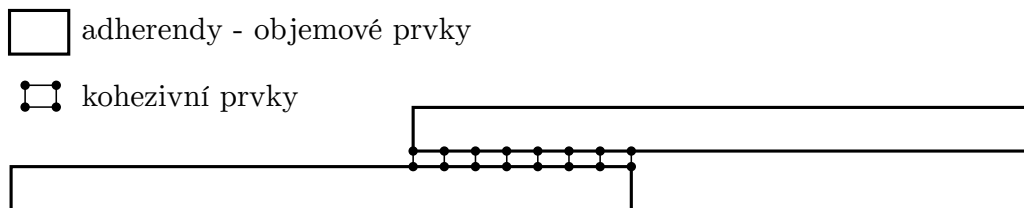
Tento přístup je používán pro simulaci adhezivního porušení. Vrstva lepidla a adherendy jsou modelovány objemovými prvky, zatímco kohezivní prvky jsou použity k propojení překrývajících se uzlů prvků, které reprezentují odlišné materiály v lepeném spoji pro simulování rozhraní o nulové tloušťce [21][25].



Obr. 2.17: Lokální přístup k simulování adhezivního porušení [21]

2.6.3.2. Přístup kontinua

Při použití přístupu kontinua je simulováno kohezivní porušení ve vrstvě lepidla. Adherendy jsou modelovány objemovými prvky a vrstva lepidla je nahrazena kohezivními prvky, které reprezentují chování lepeného spoje. Spojení lepidla a adherendů je realizováno pomocí kontaktu typu BONDED [21][25].



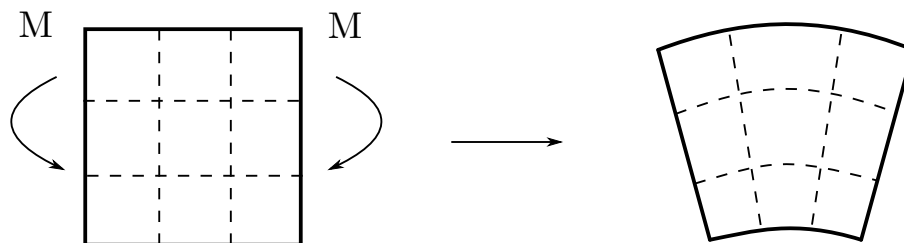
Obr. 2.18: Přístup kontinua k simulaci kohezivního porušení [21]

2.7. Problém zamykání konečných prvků

V následující části je popsán jev, který souvisí s problémem řešeným v této práci. Jedná se o jev, kdy objemové prvky nejsou schopny adekvátně popsat deformaci a vykazují příliš tuhé chování, takže se zamykají.

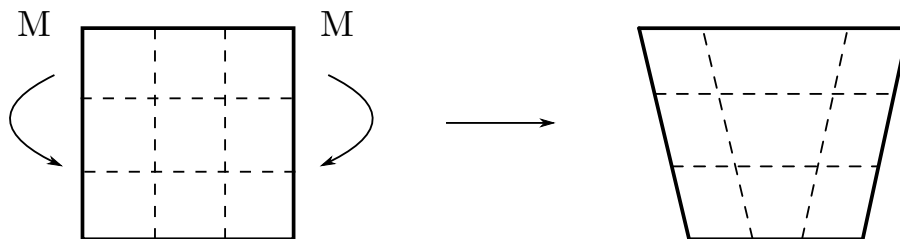
2.7.1. Smykové zamykání

Smykové zamykání se projevuje příliš velkou tuhostí prvku při deformaci v ohybu a při modální analýze. Tento numerický problém postihuje zejména lineární objemové prvky při použití plné integrace¹ a projevuje se neschopností prvku popsat nulové smykové přetvoření při zatížení čistým ohybem. V ideálním případě by se měl prvek zatížený ohybem deformovat zakřiveně jako na obrázku 2.19. Při zatížení ohybovým momentem by se měly původně horizontální čáry ohnout a vertikální čáry by měly zůstat rovné, přičemž úhel mezi nimi by měl zůstat 90° .



Obr. 2.19: Ideální změna tvaru prvku při ohybovém zatížení [28]

K popsání ideální změny tvaru by prvek měl mít schopnost deformovat se zakřivením. Lineární plně integrovaný objemový prvek však tuto schopnost postrádá a při zatížení ohybovým momentem se deformuje jako na obrázku 2.20.



Obr. 2.20: Deformace plně integrovaného lineárního prvku při zatížení ohybem [28]

Pro představu čárkované čáry procházejí integračními body. Je zřejmé, že horní hrana prvku se prodloužila a je tedy namáhána tahem, zatímco spodní hrana se zkrátila a je namáhána tlakem. Za předpokladu malých deformací se délka vertikálních čar nezměnila, takže napětí v tomto směru je nulové. Došlo ale ke změně úhlu mezi horizontálními a vertikálními čarami, to znamená, že v integračních bodech je nenulové smykové napětí. To není správně, protože při zatížení tenkostěnné geometrie čistým ohybem by mělo být smykové napětí nulové. Toto falešné napětí vzniká, protože prvek není schopen deformovat se zakřiveně. To také znamená, že energie napjatosti prvku vyvolává místo ohybové deformace smykovou. Tento jev je důvodem, proč lineární plně integrovaný objemový prvek

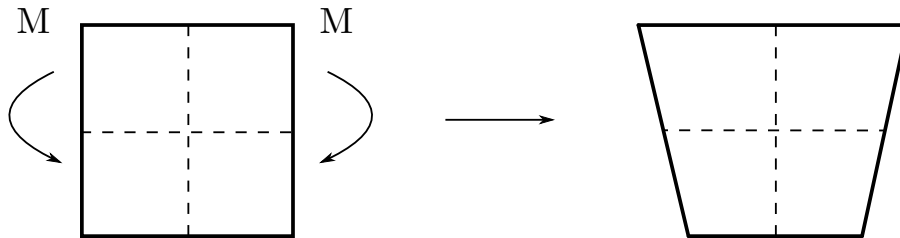
¹Plná integrace se vztahuje k počtu Gaussových bodů, ve kterých je provedena Gaussova numerická integrace matice tuhosti prvku.

vykazuje příliš tuhé chování v ohybu, tzv. se zamkne. Výsledkem je nesprávná deformace, napětí a vlastní frekvence v důsledku zamykání prvku.

Pro plně integrovaný kvadratický objemový prvek většinou nepředstavuje smykové zamykání problém, protože tento prvek je schopen se deformovat zakřiveně. Problém může nastat pouze při značně deformovaném tvaru prvku nebo pokud má ohybové napětí velký gradient [28][31].

2.7.1.1. Efekt přesýpacích hodin

Pro potlačení problému smykového zamykání a zvýšení výpočetní efektivity byla zavedena redukovaná integrace. Například lineární osmiuzlový objemový prvek má při použití redukované integrace jeden integrační bod, zatímco plně integrovaná verze jich má osm. Při použití redukované integrace je navíc prvek více tolerantní vůči svému deformovanému tvaru, což je pro MKP modelování velice přínosné. Nicméně volba redukované integrace lineárních prvků trpí vlastními numerickými problémy, kdy je naopak od zamykání až příliš flexibilní. Na obrázku 2.21 lze vidět, jak se deformuje prvek postižený efektem přesýpacích hodin při zatížení ohybovým momentem.



Obr. 2.21: Deformace lineárního prvku s redukovanou integrací při zatížení ohybem [28]

Čárkované čáry procházející jediným integračním bodem a úhel mezi nimi se nezmění. To znamená, že normálová a smyková napětí v integračním bodě jsou nulová a deformací tedy nevzniká energie napjatosti. Taková odezva není reálná a může nastat při použití příliš hrubé sítě. Výsledky zkruslené tímto jevem jsou nerelevantní a ukazují, že model se chová příliš pružně. V MKP jsou proto defaultně zavedeny vnitřní metody pro kontrolu tohoto jevu, které přidávají umělou tuhost k jeho potlačení, přičemž platí, že s jemnější sítí je přesnější výsledek.

Kvadratický prvek s redukovanou integrací může také trpět tímto jevem, to ale nastává velmi zřídka a tento problém úplně vymizí při použití alespoň dvou prvků po tloušťce [28]

2.7.2. Objemové zamykání

Objemové zamykání vzniká při použití materiálů, jejichž Poissonovo číslo se blíží hodnotě 0,5, což odpovídá nestlačitelným materiálům jako je například guma či ocel v plastickém stavu. Deformace může být rozložena do deviátorové a objemové složky, deviátorová popisuje změnu tvaru, zatímco objemová změnu objemu. Objemová složka je funkcí objemového modulu pružnosti a objemového přetvoření. Vztah pro objemový modul pružnosti vypadá následovně:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (2.32)$$

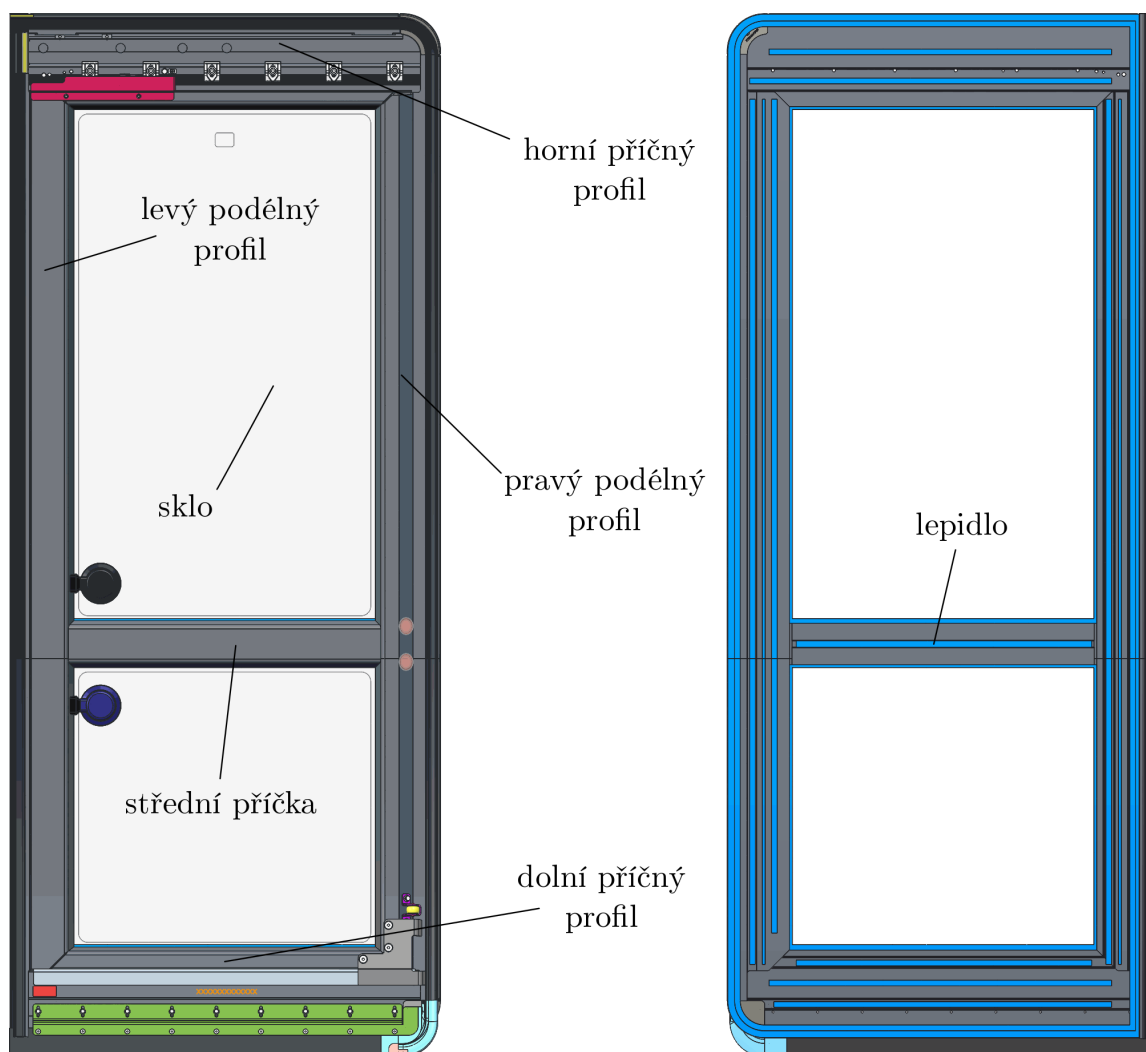
Z tohoto vztahu vyplývá, že s Poissonovým číslem blížícím se 0,5 se objemový modul blíží nekonečnu a objemová změna by tedy měla být za jakýchkoli podmínek nulová nebo výrazně menší než deviátorová. Objemové prvky nejsou schopny zajistit nulovou změnu objemu v každém integračním bodě, což má za následek příliš tuhou odezvu při změně tvaru, čímž dochází k objemovému zamknutí prvku.

K potlačení tohoto jevu lze opět využít možnosti redukované integrace, výběrové redukované integrace, která řeší odděleně objemovou a deviátorovou část deformace zvlášť či smíšené u-P formulace, která řeší objemové přetvoření jako další stupeň volnosti [32][33].

3. Popis řešené soustavy

Cílem diplomové práce je navrhnout předešnutí pro dveřní křídlo patřící do projektu Flexity. Referenční dveřní křídla z projektů Urbos a Citadis jsou principiálně podobná a proto zde z důvodu přehlednosti nebudou rozebrána.

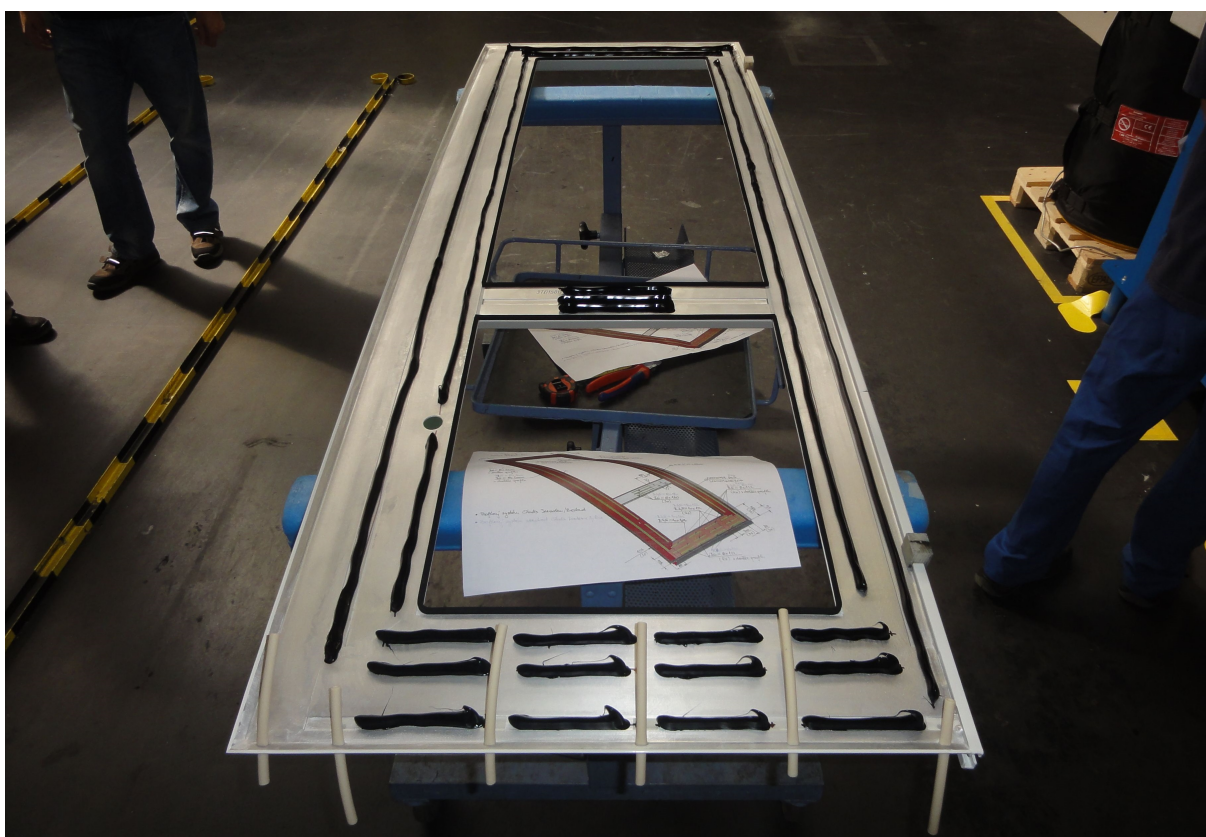
Proces výroby tohoto křídla lze rozdělit do několika etap. Základ tvoří svařený rám ze dvou příčných a dvou podélných profilů. Podélné profily jsou před svařením ohnuty na ohýbačce na požadovaný rádius. Po svaření rámu dochází k jeho kontrole a případné korekci dostupnými mechanickými metodami. Dále je šroubovými spoji připojena střední příčka a tím je vytvořen základní dveřní rám. Na tento rám se nanese lepicí housenky a dojde k nalepení rovného skla. Po vytvrzení lepidla jsou na dveřní křídlo přidělané těsnění, lišty pro upevnění do dopravního prostředku a pohonné jednotky a po zkontrolování rozměrů lze považovat výrobu za ukončenou. Finální dveřní křídlo s popisem jednotlivých částí lze vidět na obrázku 3.1.



Obr. 3.1: Finální dveřní křídlo s kombinovaným rádiusem

3.1. Proces lepení

Skutečný proces lepení probíhá tak, že se rám předehtnutý na daný poloměr položí na podpěrné stojany a pomocí dávkovací pistole se nanese lepící housenky o dané délce a výšce. Poté je na rám přiloženo rovné sklo a dojde k přitlačení jeho krajů tak, aby sklo kopírovalo tvar dveřního rámu. Po ohnutí skla se celá konstrukce stáhne svorkami zabezpečujícími soudržnost dveřního křídla do té doby, než lepidlo vytvrdí tak, aby samo udrželo konstrukci pohromadě. Celý proces lepení probíhá v prostoru se zvýšenou vzdušnou vlhkostí, protože ta je právě vytvrzovacím mechanismem použitého lepidla Sikaflex 265. Po 2 hodinách lepidlo vytvrdí dostatečně na to, aby samo udrželo dveřní křídlo pohromadě, a tak mohou být sundány svorky. V tomto stavu dojde k nanesení tmelu (ze stejného materiálu jako lepidlo) po obvodu skla za účelem utěsnění. Lepidlo je plně vytvrzené zhruba po 1 týdnu, nicméně finální montáž a kontrola tvaru dveří probíhá v několika hodinách od nalepení skla.

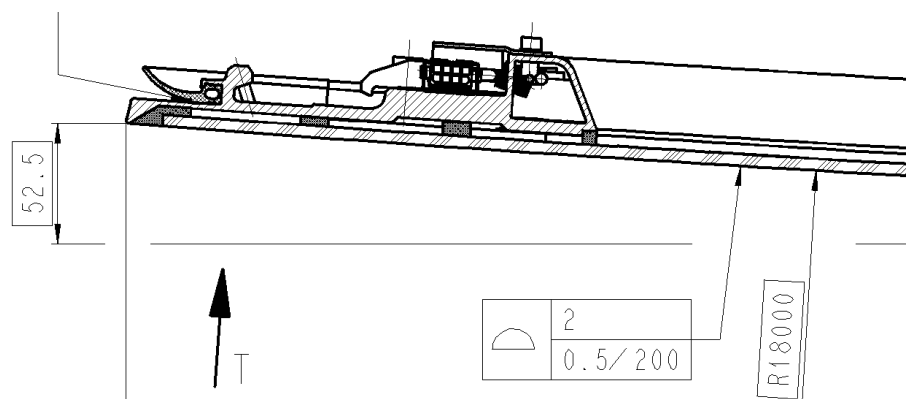


Obr. 3.2: Dveřní rám s nanesenými lepícími housenkami



Obr. 3.3: Dveřní křídlo stáhnuté svorkami

Dveřní křídlo je tvarově tolerováno. Pro samotný rám je tolerance přísnější než pro kompletované dveřní křídlo. Správnost rozměrů je kontrolována šablonou a spároměrkou. Měření probíhá tak, že se dveře postaví na stůl a zapřou o svislou desku tak, aby se nepohnuly a na stůl se k nim přiloží šablona. Pomocí spároměrky se změří odchylka od šablony nahoře, uprostřed a dole. Takto se proměří přední a po otočení i zadní strana dveří. Například tolerance uvedená na výkrese, kterou lze vidět na obrázku 3.4, udává toleranci tvaru 2 mm, takže po přiložení šablony nesmí jít prostrčit spároměrka větší než 2 mm.



Obr. 3.4: Příklad tolerance dveřního křídla [29]

4. Výběr metody řešení

Pro řešení problému vymezeného v kapitole 1.1 bylo vzhledem k charakteru dané úlohy zvoleno výpočtové modelování metodou konečných prvků v programu Ansys.

4.1. Použitý hardware

K řešení problému jsem využíval osobní notebook s těmito parametry:

- procesor: Intel® Core™ i5-430M 2,26 GHz
- grafická karta: ATI Mobility Radeon™ HD 5650
- paměť: 4 GB RAM

Dále osobní stolní počítač s parametry:

- procesor: Intel® Core™ i5-3350P 3,1 GHz
- grafická karta: AMD Radeon™ HD 7850
- paměť: 8 GB RAM

4.2. Použitý software

Z charakteru řešené úlohy vyplynulo použití následujících programů:

- operační systém: Windows 7 Ultimate, Service Pack 1, 64 bitová verze
- software pro tvorbu geometrického modelu: PTC Creo 2.0
- software pro konečnoprvkovou analýzu: Ansys Workbench 15.0
- software pro matematické operace a tvorbu grafů: Matlab R2012b
- software pro sepsání této práce: Texmaker, MiKTeX

5. Varianty řešení

Od společnosti IFE-CR byly dodány tři varianty dveřních ráků. Jedná se o dveře s rozdílným finálním poloměrem zakřivení. Pro ověření správného přístupu k řešení problému byly dodány dvě varianty již vyráběných dveří s konstantními poloměry, pro obě tyto varianty jsem obdržel i modely s předehnutým rákem. Jednotlivé varianty jsou následující:

- R1
 - projekt Urbos
 - referenční model s finálním rádiusem 15 m
 - poloměr předehnutí 13,95 m
 - svarové spoje v modelu nahrazeny pevnou vazbou
 - spojení na úrovni sítě a pomocí kontaktů

- R2
 - projekt Citadis
 - referenční model s finálním rádiusem 10 m
 - poloměr předehnutí 8,877 m
 - svarové spoje v modelu nahrazeny pevnou vazbou
 - spojení na úrovni sítě a pomocí kontaktů

- V1
 - projekt Flexity
 - model s kombinovaným finálním rádiusem 6,914 m a 18 m
 - poloměr předehnutí neznámý
 - svarové spoje v modelu nahrazeny pevnou vazbou
 - spojení na úrovni sítě a pomocí kontaktů

6. Tvorba výpočtového modelu R1

6.1. Model materiálu

Vzhledem k charakteru úlohy, kdy se jedná o vratnou elastickou deformaci, byly uvažovány modely všech materiálů jako homogenní, lineárně pružné a izotropní. Podélné profily jsou vyráběny z hliníkové slitiny EN AW 6060 T64. Příčné profily jsou z hliníkové slitiny EN AW 6060 T66, která má v lineární oblasti vlastnosti shodné s předchozí. Použité sklo je bezpečnostní tvrzené sklo, jehož chemickou podstatu tvoří křemík. Jako spojovací materiál je použito jednosložkové polyuretanové lepidlo Sikaflex-265.

Následující hodnoty pocházejí z materiálové dokumentace poskytnuté společností IFE-CR, případně z materiálových listů výrobců:

Materiálové vlastnosti hliníkové slitiny:

- $E = 69500 \text{ MPa}$
- $\mu = 0,33$
- $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$

Materiálové vlastnosti skla:

- $E = 70000 \text{ MPa}$
- $\mu = 0,2$
- $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$

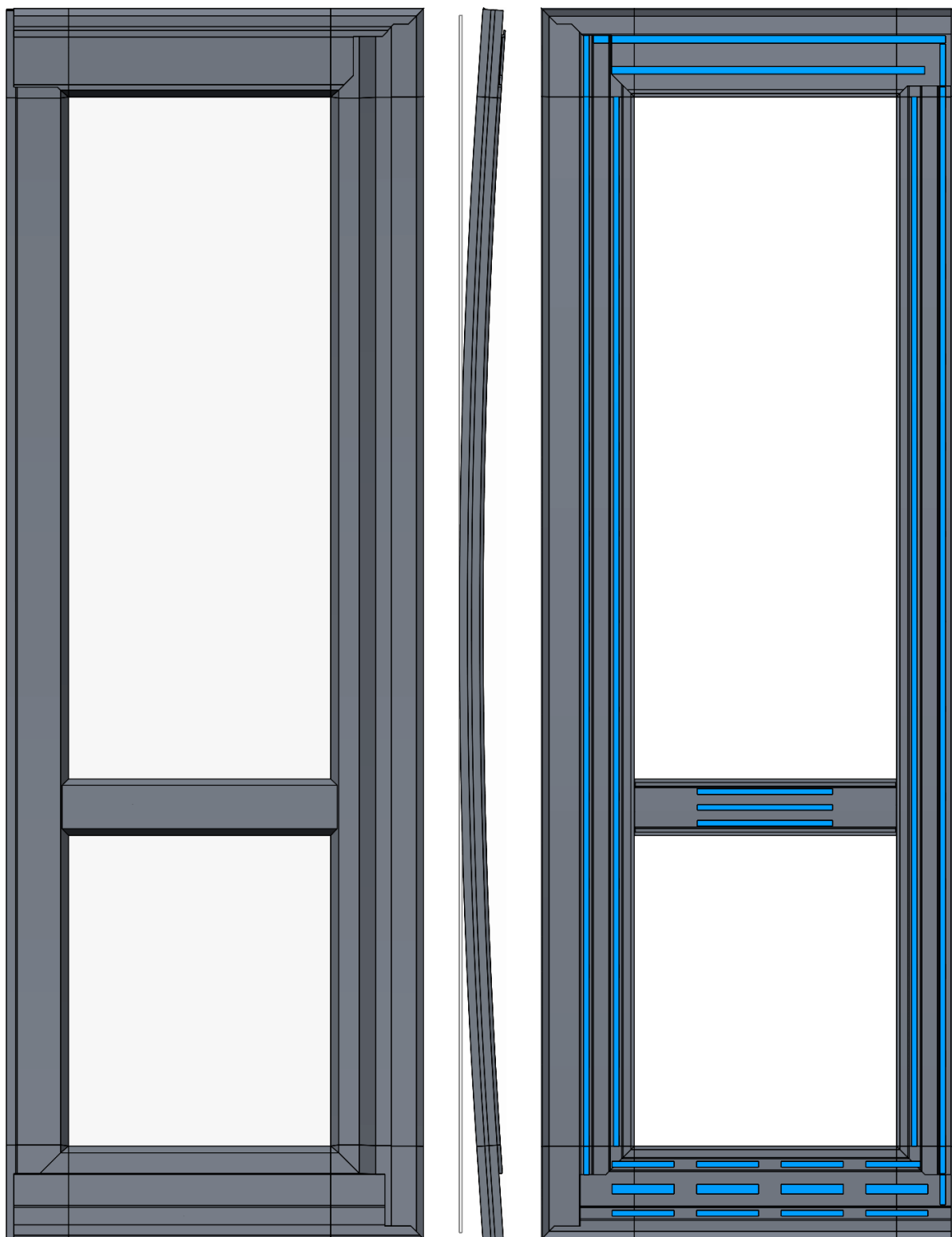
Materiálové vlastnosti lepidla:

- $G = 0,7 \text{ MPa}$
- $\mu = 0,42$
- $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$

6.2. Model geometrie

Geometrický model byl dodán společností IFE-CR ve formátu Creo 2. Tento model byl určen pro výrobu a obsahoval velké množství radiusů, děr pro šrouby či sražených hran pro svary, nepodstatných z hlediska zvolené rozlišovací úrovně. Jednotlivé díly rámu na sebe také nenavazovaly příliš přesně. Vzhledem k množství úprav, které by bylo potřeba provést, jsem se rozhodl vytvořit model dveřního rámu zcela od počátku tak, aby byl vhodný pro MKP analýzu. Při uvážení potřeby přesného dosedání ploch a nejjednodušším způsobu spojení jednotlivých částí rámu v rozích dveří jsem podélné části rámu rozdělil na ohnuté s rádiusem a rovné v horní a dolní části viz obrázek 6.2. Tím bylo docíleno přesné návaznosti ploch, přičemž byla zachována možnost použití tažené sítě pro analýzu pomocí MKP. Dále byly svarové a šroubové spoje nahrazeny pevnou vazbou. Dveřní rám byl dodán i včetně ohlého skla, jehož geometrie byla narovnána z ohnutého tvaru

pomocí funkce programu Creo 2. Rovné sklo pak bylo umístěno tečně k modelu lepidlových housenek. Pro následující export geometrického modelu byl také vytvořen nový souřadný systém, který byl dále používán pro nastavení okrajových podmínek v Ansysu. Výsledný geometrický model byl exportován ve formátu STEP do modeláře Ansysu a jeho finální podobu lze vidět na obrázku 6.1.



Obr. 6.1: Geometrický model varianty R1



Obr. 6.2: Rozdělení příčného profilu na šedou část s rádiusem a rovnou modrou

6.3. Kontaktní dvojice

Po načtení geometrického modelu do prostředí Ansysu bylo potřeba z důvodu následujícího procesu tvorby sítě rozdělit model na jednotlivé části. Samostatné části tvořily:

- rám
- střední příčka
- lepidla
- sklo

Spojení jednotlivých profilů rámu je docíleno návazností konečnoprvkové sítě. Aby byla zabezpečena soudržnost jednotlivých částí mezi sebou, je třeba nastavit kontaktní dvojice. Ty byly nastaveny mezi částmi:

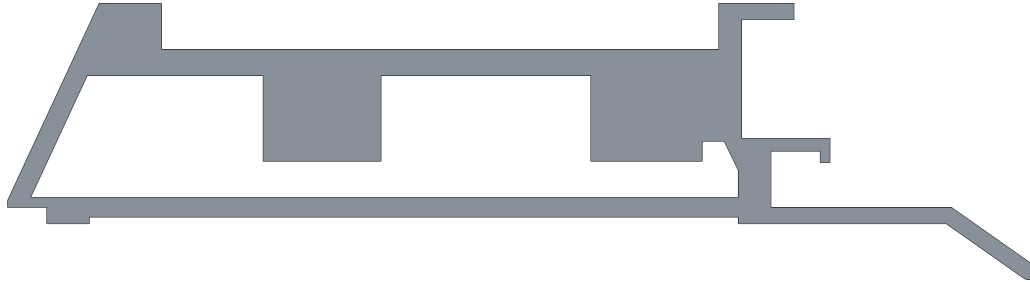
- rám - střední příčka
- rám - lepidla
- střední příčka - lepidla
- sklo - lepidla

Vzhledem k množství kontaktů, zejména mezi lepidly a rámem, byla využita možnost automatického generování kontaktních dvojic, ty pak byly ručně zkontrolovány, případně upraveny tak, aby odpovídaly skutečnosti. U kontaktních dvojic bylo dbáno na to, aby pro těleso typu TARGET bylo vybráno to, které je tužší a vázanější v prostoru. Při tvorbě sítě jsem pak velikost prvku v oblasti kontaktů nastavoval stejnou mezi jednotlivými tělesy, pro která byl kontakt definován. Typ kontaktu byl nastaven jako BONDED, tento typ kontaktu nevnáší do řešení nelinearity, neboť pouze zajišťuje pevné spojení mezi kontaktními dvojicemi. Algoritmus řešení byl pro většinu kontaktů nastaven jako MPC, toto nastavení předepíše rovnost posuvů mezi dvěma uzly, takže je velice efektivní, protože při něm nedochází k penetraci ani oddalování kontaktních ploch. Pro kontakty mezi lepidly a sklem byl nastaven algoritmus řešení Augmented Lagrange s detekcí typu Nodal-projected Normal from Contact, toto nastavení by mělo být přesnější pro zjištění povrchů, které jsou skutečně v kontaktu. Výpočtový model pak celkem obsahoval 46 lineárních kontaktů.

6.4. Síť konečných prvků

Analyzovaná soustava je tvořena z velké většiny tenkostěnnými profily, takže při použití objemových prvků by mohlo hrozit jejich zamykání popsané v kapitole 2.7. Řešením by bylo použít takovou síť, aby byla každá tloušťka popsána například třemi lineárními prvky. Při použití takové sítě by počet prvků narostl velice rychle a výpočtová náročnost by byla

mimo kapacitu dostupného hardwarového vybavení. Z toho důvodu bylo třeba nalézt vhodné řešení tohoto problému, které by splňovalo požadavky jak na přesnost, tak i únosný počet prvků a dobu výpočtu na dostupném hardwaru. Očividnou volbou bylo použití skořepinových prvků, vhodných pro reprezentování tenkostěnných konstrukcí. Problém při použití těchto prvků však představovalo obtížné napojení příčných a podélných profilů v rozích dveřního rámu a dále potřeba upravit geometrický model tak, aby bylo možné vytvořit střednicové plochy, nehledě na to, že některé části profilů rámu obsahovaly prvky, které tenkostěnné zdaleka nebyly viz obrázek 6.3.

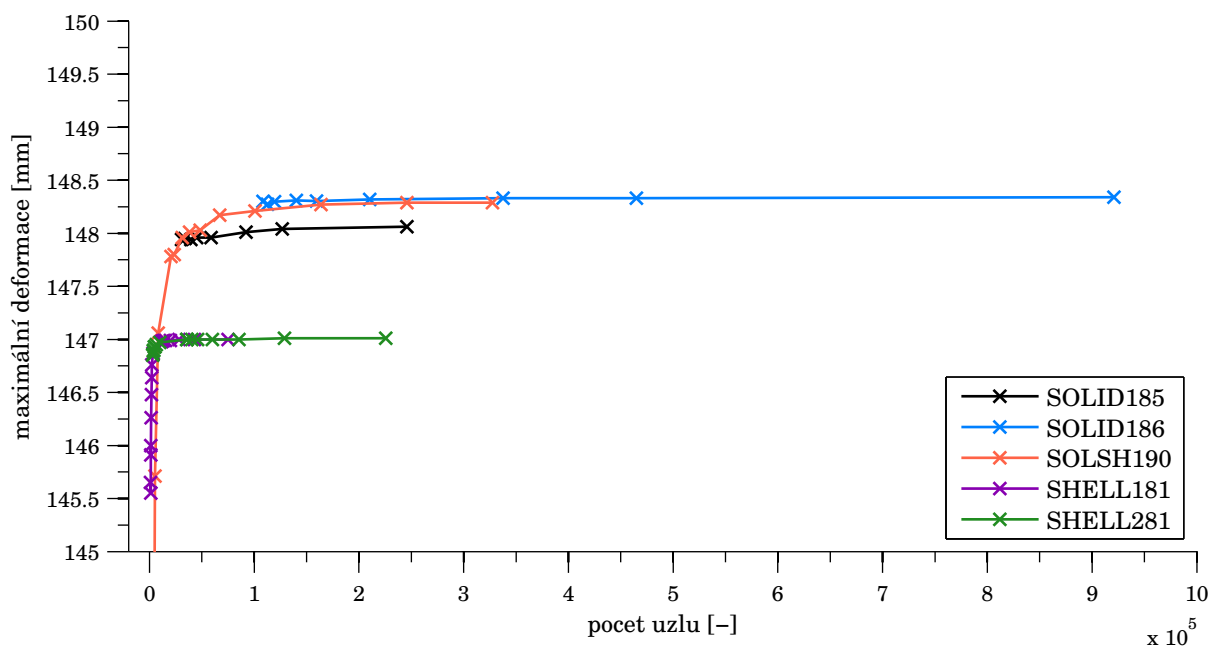


Obr. 6.3: Tlustostěnné prvky horního příčného profilu

Z toho důvodu byla provedena jednoduchá analýza, která měla za účel stanovit dostatečnou velikost objemového prvku na to, aby byla adekvátně popsána deformace rámu při ohybovém namáhání. Byla sledována citlivost výsledné maximální deformace na velikosti a typu použitého prvku. Pro tuto úlohu byl zvolen levý příčný profil, na který byla postupně aplikována síť z těchto prvků:

- SOLID185 - lineární objemové prvky
- SOLID186 - kvadratické objemové prvky
- SOLSH190 - lineární objemovo-skořepinové prvky
- SHELL181 - lineární skořepinové prvky
- SHELL281 - kvadratické skořepinové prvky

Pro každý prvek bylo provedeno několik analýz, přičemž pro objemové prvky byl proveden výpočet pro 1-3 prvky po tloušťce a bylo dbáno na to, aby poměr stran prvku byl co nejblíže 1. Sledována byla maximální deformace po cestě definované na hraně profilu. Okrajové podmínky představovala vetknutí na koncích a tlak na horní plochu profilu.



Graf 6.1: Maximální deformace levého rámu v závislosti na počtu uzlů

Za referenční hodnotu jsem považoval výsledek pro kvadratické objemové prvky. Z grafu 6.1 lze vidět, že lineární objemové prvky dávají téměř totožný výsledek jako kvadratické při mnohem menším počtu uzlů. Lineární a kvadratické skořepinové prvky dávají téměř totožný výsledek, který se lehce liší od objemových prvků, tento rozdíl je způsoben odlišnými prvky. Prvek SOLSH190 vychází jako kompromis s přesností objemových a rychlostí skořepinových prvků, je však postihnout složitější přípravou geometrie z důvodu tažení sítě po tloušťce.

Z výsledků této jednoduché úlohy plyne několik závěrů:

- použití více jak 1 prvku po tloušťce nemá významný vliv na velikost deformace
- maximální deformace při použití lineárních objemových prvků je téměř shodná s deformací při použití kvadratických objemových prvků
- prvek SOLSH190 je vhodný pro objemovou reprezentaci tenkostěnné geometrie

Při tvorbě sítě byly použity tyto prvky:

- SOLID185 - tažená síť na příčných a podélných profilech
- SOLID187 - volná síť na rozích rámu
- SOLSH190 - tažená síť skrze tloušťku na sklu a lepidlech

Velikost prvků byla nastavena následovně:

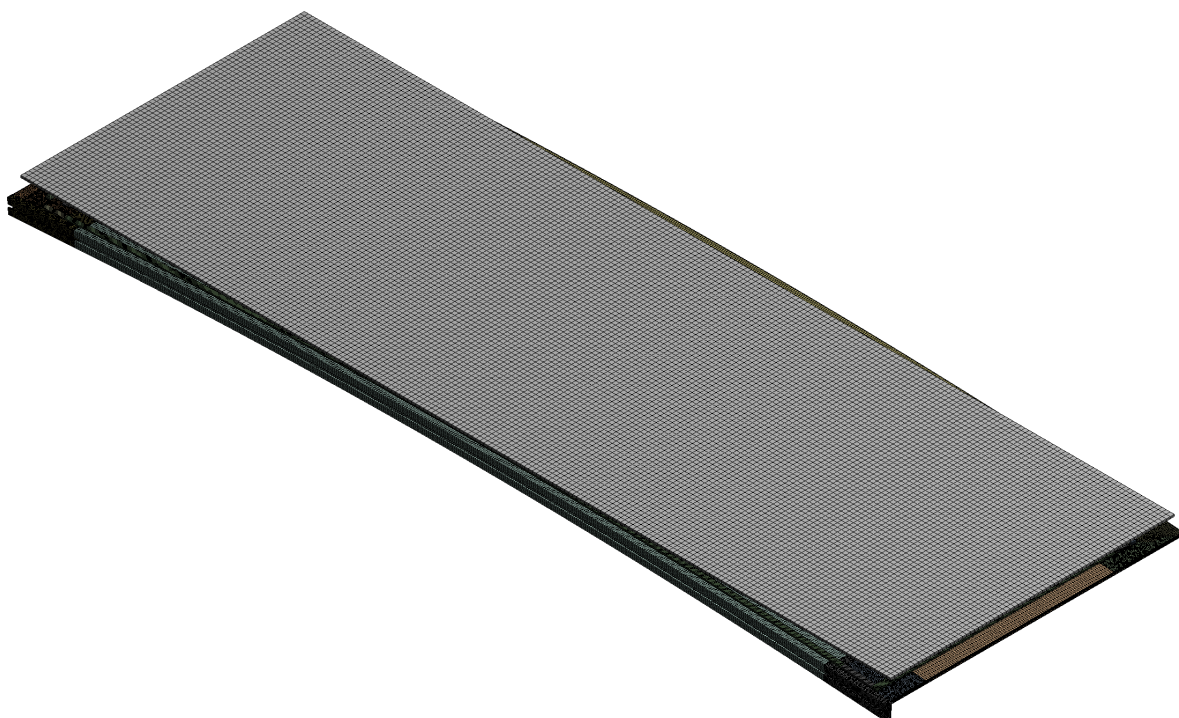
- podélné profily - 3 mm se 400 prvky po délce profilu
- příčné profily - 3 mm se 100 prvky po délce profilu
- střední příčka - 3 mm se 100 prvky po délce profilu
- rohy rámu - 3 mm

- sklo - 10 mm se 2 prvky po tloušťce
- lepidla - 2,5 mm se 2 prvky po tloušťce

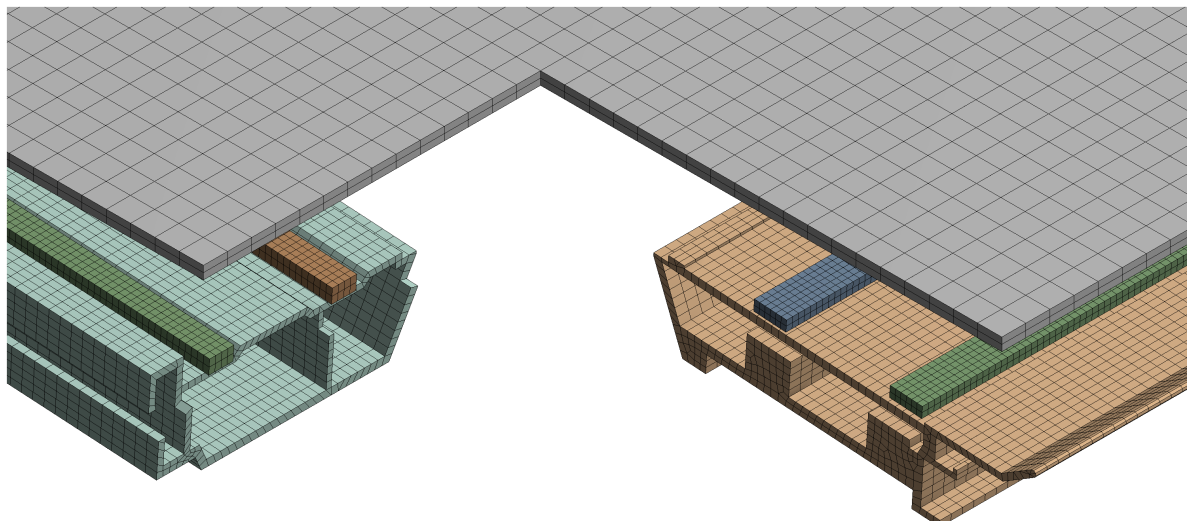
A celkem síť obsahovala:

- 430000 prvků
- 756000 uzlů

Vzhledem k problémům popsaným v kapitole 2.7 byla použita redukovaná integrace s kontrolou efektu přesýpacích hodin. Při použití objemových prvků je tato volba v Ansysu Workbench zapnuta automaticky.



Obr. 6.4: Konečnoprvková síť použitá pro variantu R1

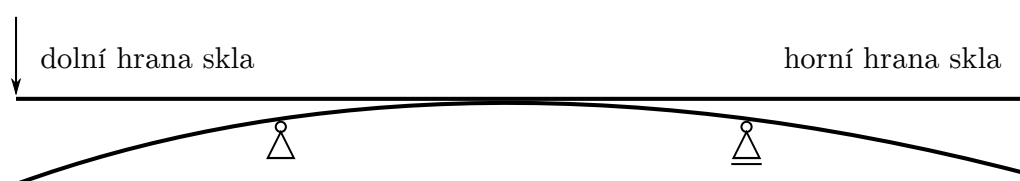


Obr. 6.5: Detail konečnoprvkové sítě varianty R1

6.5. Model okrajových podmínek

Jak už bylo popsáno v kapitole 6.2, sklo bylo modelováno jako rovné a pomocí geometrických vazeb v Creu bylo umístěno doprostřed rámu s tečným kontaktem na lepidlo. V Ansysu pak byly mezi sklem a lepidlem vytvořeny kontaktní prvky v oblasti počátečního kontaktu. Okrajové podmínky pro rám představovaly rotační a posuvnou vazbu umístěnou v uzlech sítě rámu, přičemž vzdálenost mezi těmito podporami odpovídala rozpětí podpor, na které je rám umístěn při skutečném lepícím procesu. Takto zvolené okrajové podmínky zamezují pohybu dveřního rámu jako celku a zároveň vhodně reprezentují okrajové podmínky reálné soustavy. Ohnutí skla na požadovaný poloměr bylo docíleno aplikováním posuvů na jeho koncových hranách, tak jak je schematicky naznačeno na obrázku 6.6. Posuvy měly takovou velikost, aby na konci zátěžného kroku došlo ke kontaktu s odpovídajícími lepidly na koncích rámu. V druhém zátěžném kroku byly tyto posuvy odstraněny, čímž došlo k odlehčení skla a jeho vratné deformaci tak jako ve skutečnosti. Takto zvolené okrajové podmínky způsobily ohyb skla a deformaci rámu odpovídající skutečnosti.

LS 1:



LS 2:



Obr. 6.6: Schematické znázornění okrajových podmínek

Zátěžný krok	Dolní hrana skla [mm]	Horní hrana skla [mm]
LS 1	-41	-41
LS 2	-	-

Tab. 6.1: Okrajové podmínky pro sklo v jednotlivých zátěžných krocích

Vzhledem k tomu, že proces lepení probíhá při horizontální pozici dveřního rámu, ovlivňuje deformaci skla i rámu gravitační zrychlení. Zejména sklo se viditelně deformovalo vlivem vlastní tíhy při skutečném procesu lepení. Výsledné dveřní křídlo je však ve své finální pozici v kolejovém vozidle i při kontrole rozměrů v takové poloze, že účinky gravitace by měly být minimální. Z toho důvodu nebylo gravitační zrychlení ve výpočtovém modelu uvažováno.

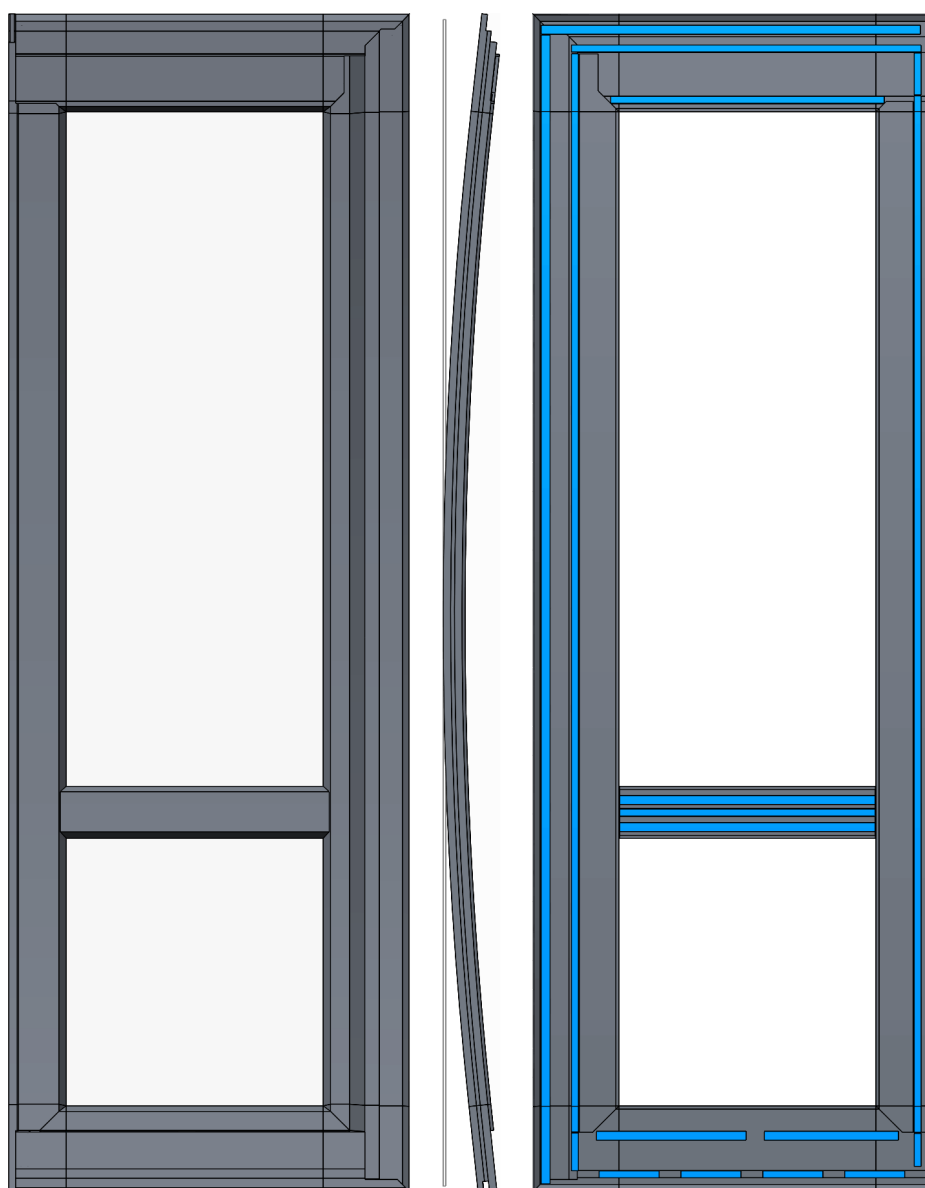
7. Tvorba výpočtového modelu R2

7.1. Model materiálu

Dveřní křídlo referenční varianty R2 je tvořeno stejnými materiály jako varianta R1 a jsou tedy použity stejné modely materiálu uvedené v kapitole 6.1.

7.2. Model geometrie

Geometrie varianty R2 se liší celkovými rozměry a tvarem některých profilů. Tvorba geometrického modelu byla principiálně shodná s variantou R1 popsanou v kapitole 6.2 a z důvodu přehlednosti zde není uvedena. Finální geometrický model této varianty lze vidět na obrázku 7.1



Obr. 7.1: Geometrický model varianty R2

7.3. Kontaktní dvojice

Tvorba kontaktních dvojic byla obdobná jako u varianty R1 viz kapitola 6.3, a proto zde není blíže rozebrána. Výpočtový model varianty R2 obsahoval celkem 50 lineárních kontaktů.

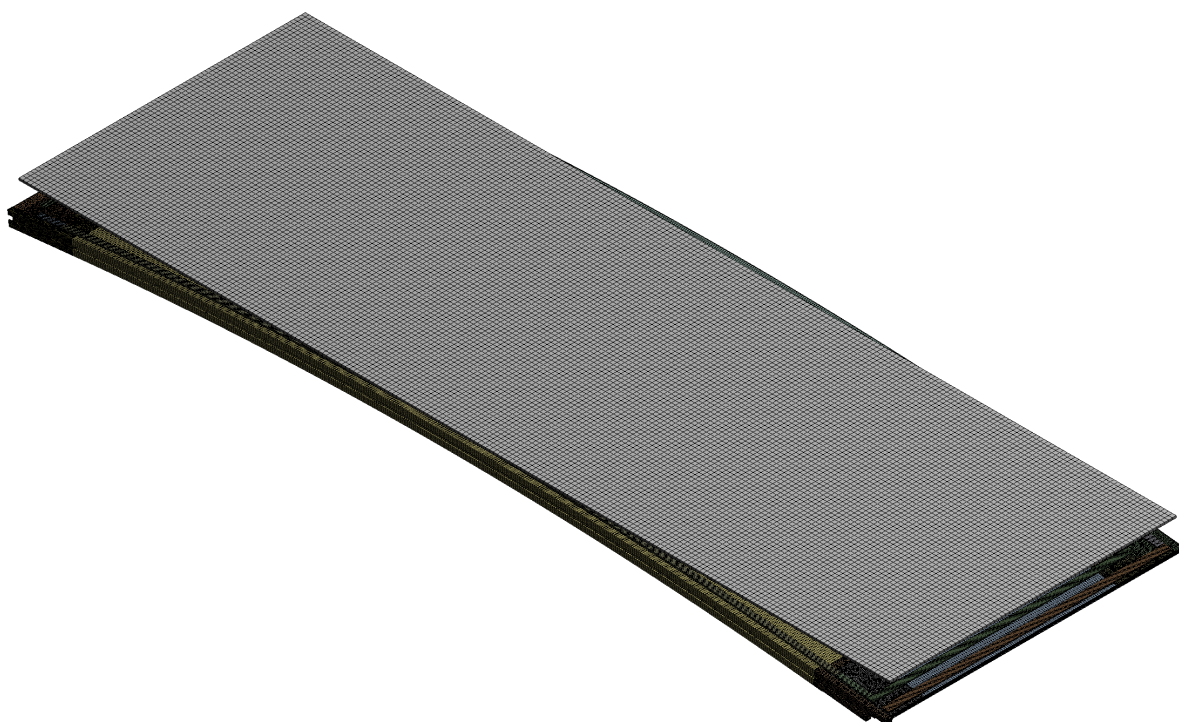
7.4. Síť konečných prvků

Postup tvorby konečnoprvkové sítě varianty R2 byl v principu stejný jako u varianty R1 viz kapitola 6.4 a z důvodu přehlednosti zde uvedu pouze statistiky sítě: Velikost prvků byla nastavena následovně:

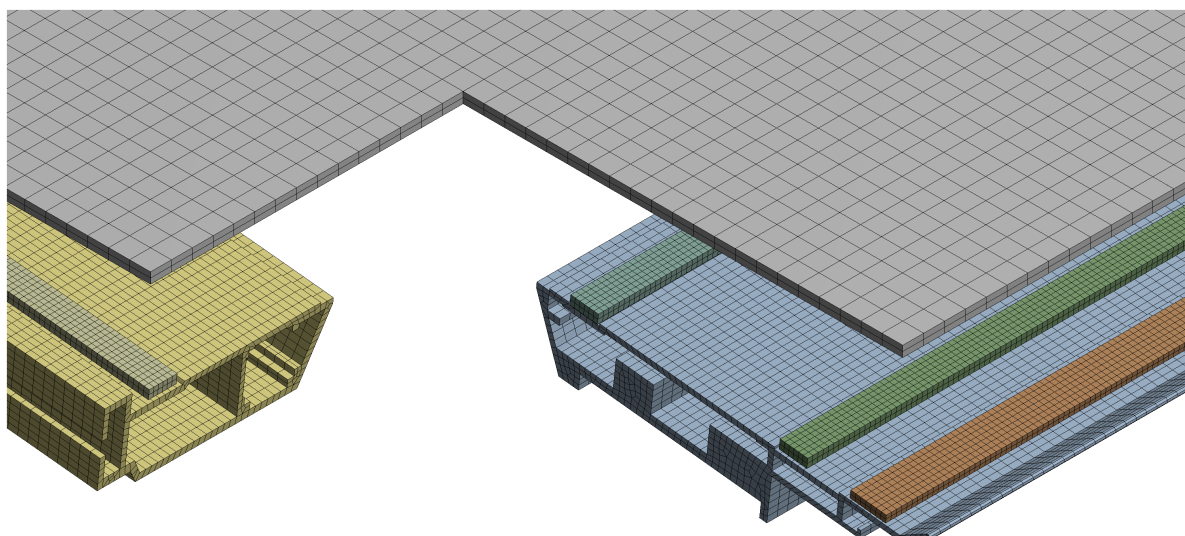
- podélné profily - 3 mm se 400 prvky po délce profilu
- příčné profily - 3 mm se 100 prvky po délce profilu
- střední příčka - 3 mm se 100 prvky po délce profilu
- rohy rámu - 3 mm
- sklo - 10 mm se 2 prvky po tloušťce
- lepidla - 2,5 mm se 2 prvky po tloušťce

A celkem síť obsahovala:

- 491000 prvků
- 849000 uzlů



Obr. 7.2: Konečnoprvková síť použitá pro variantu R2

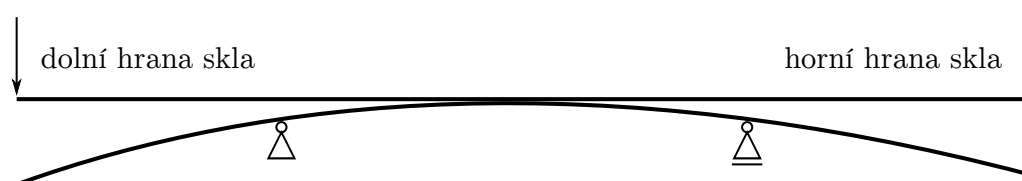


Obr. 7.3: Detail konečnoprvkové sítě varianty R2

7.5. Model okrajových podmínek

Okrajové podmínky pro rám jsou shodné jako u varianty R1 viz kapitola 6.5. Okrajové podmínky pro sklo lze vidět v tabulce 7.1 a schématicky naznačené na obrázku 7.4.

LS 1:



LS 2:



Obr. 7.4: Schematické znázornění okrajových podmínek

Zátěžný krok	Dolní hrana skla [mm]	Horní hrana skla [mm]
–		
Loadstep 1	–65	–73
Loadstep 2	–	–

Tab. 7.1: Okrajové podmínky pro sklo v jednotlivých zátěžných krocích

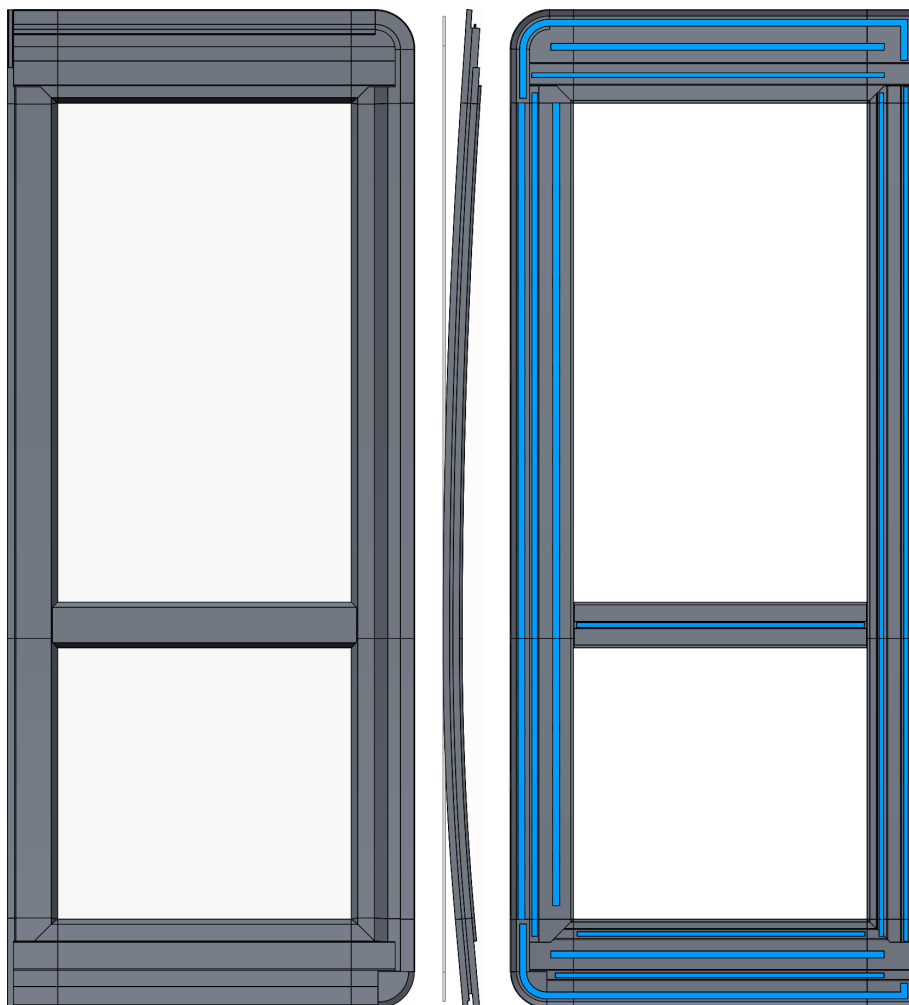
8. Tvorba výpočtového modelu V1

8.1. Model materiálu

Dveřní křídlo varianty V1 je tvořeno stejnými materiály jako referenční varianty a jsou tedy použity stejné modely materiálu uvedené v kapitole 6.1.

8.2. Model geometrie

Geometrický model dveřního rámu, pro který jsem navrhoval nový poloměr zakřivení, byl tvořen parametricky tak, aby byl vhodný pro pozdější optimalizační analýzu v Ansysu. To znamená, že geometrické prvky a jejich poloha se musely správně automaticky upravit po změně definovaných parametrů, kterými byly poloměry v horní a dolní části dveřního rámu. Pro proces optimalizace bylo nutné nastavit propojení programových prostředí Ansys a Creo. Geometrický model v tomto případě nebyl exportován ve formátu STEP, ale ponechán ve formátu Creo. Parametry rádiusů pak byly přeneseny do Ansysu, kde byly definovány jako vstupní parametry optimalizace. Finální geometrický model této varianty lze vidět na obrázku 8.1.



Obr. 8.1: Geometrický model varianty V1

8.3. Kontaktní dvojice

Tvorba kontaktních dvojic byla obdobná jako u referenčních variant viz kapitola ??, a proto zde není blíže rozebrána. Výpočtový model varianty V1 obsahoval celkem 50 lineárních kontaktů.

8.4. Síť konečných prvků

Tvorba konečnoprvkové sítě je principiálně shodná s variantami R1 a R2 viz kapitola 6.4. Model použitý pro optimalizaci obsahoval:

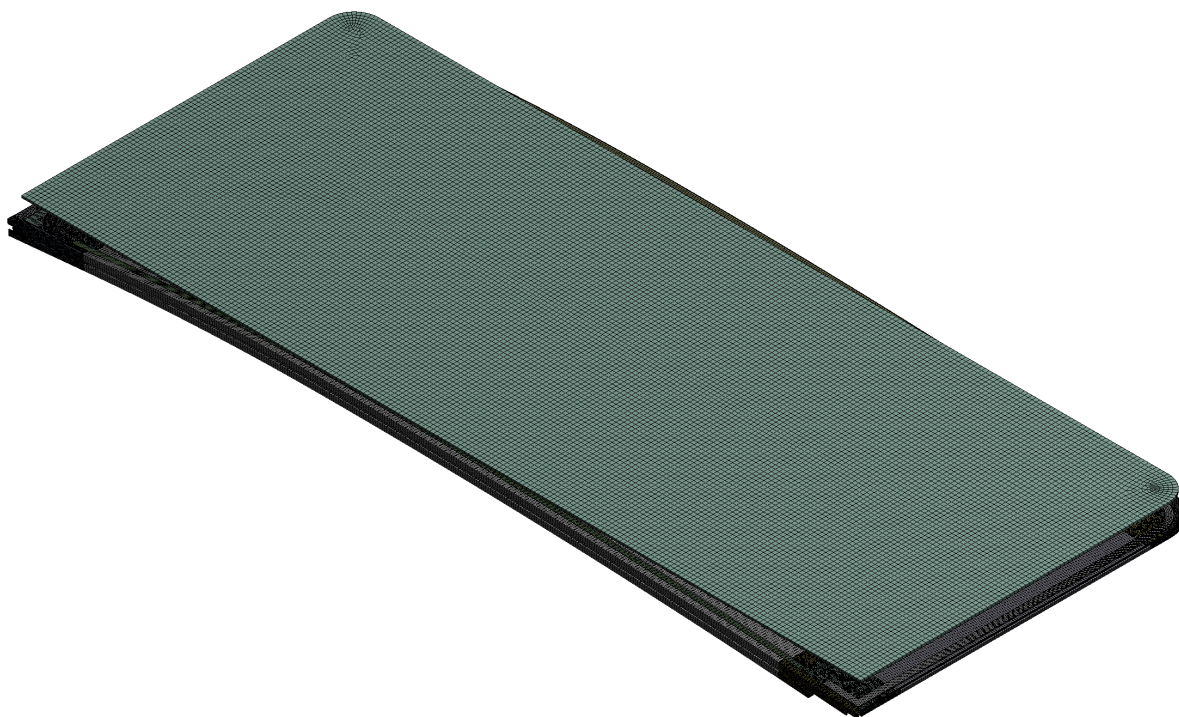
- 150000 prvků
- 200000 uzlů

Hrubší síť byla použita především na skle a příčných profilech. Výsledek optimalizace byl poté ověřen na obdobné síti jaká byla použita pro referenční varianty. Velikost prvků této sítě byla nastavena následovně:

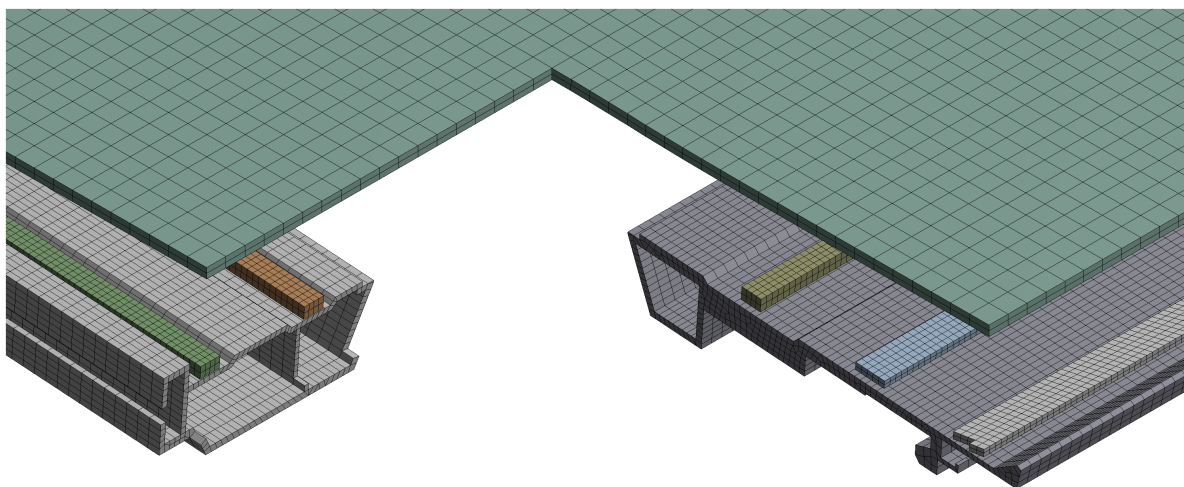
- podélné profily - 3 mm se 300 prvky po délce profilu
- příčné profily - 3 mm se 120 prvky po délce profilu
- střední příčka - 3 mm se 120 prvky po délce profilu
- rohy rámu - 3 mm
- sklo - 10 mm se 2 prvky po tloušťce
- lepidla - 3 mm se 2 prvky po tloušťce

A tato síť obsahovala:

- 451000 prvků
- 772000 uzlů



Obr. 8.2: Finální konečnoprvková síť použitá pro variantu V1

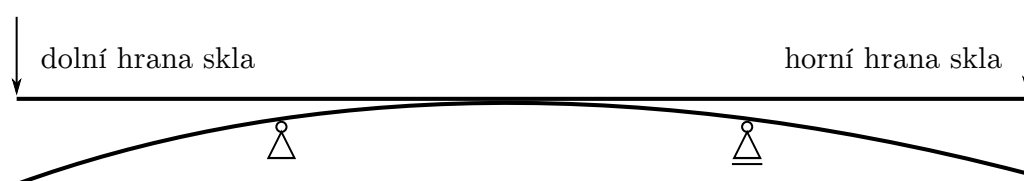


Obr. 8.3: Detail finální konečnoprvkové sítě varianty V1

8.5. Model okrajových podmínek

Okrajové podmínky pro rám byly shodné jako u referenčních variant. Okrajové podmínky pro sklo byly pro každou konfiguraci rádiusů jiné a byly proto nastaveny jako vstupní parametry optimalizace.

LS 1:



LS 2:



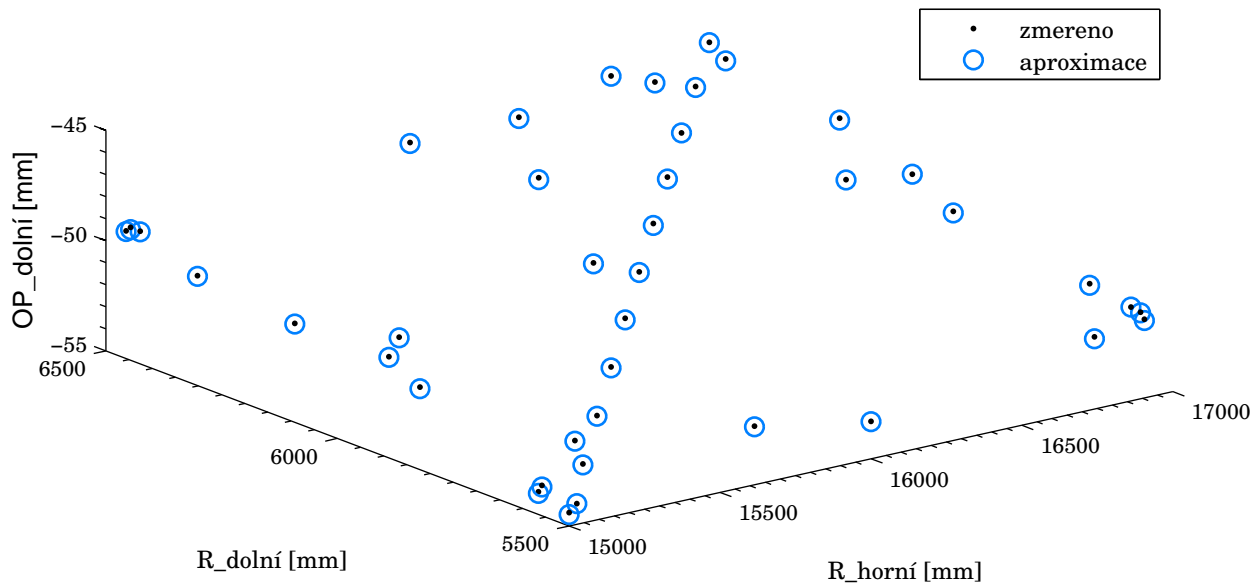
Obr. 8.4: Schematické znázornění okrajových podmínek

8.6. Optimalizace

Pro návrh nového poloměru předehtutí jsem zvolil optimalizační přístup. Principem optimalizace je nalezení takových vstupních parametrů, aby výstupní parametry nabývaly svých extrémních, případně uživatelem definovaných hodnot.

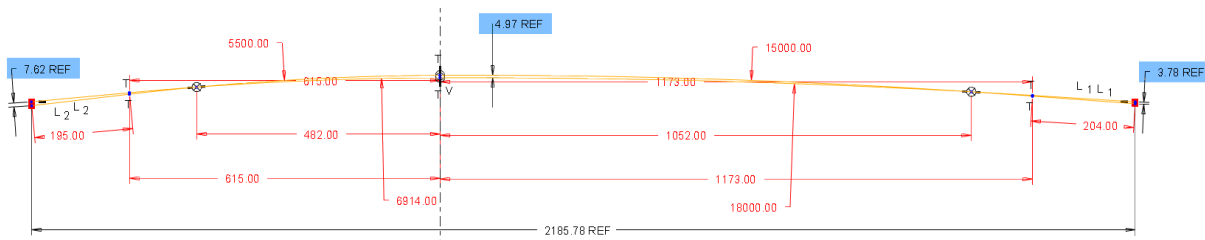
8.6.1. Parametry optimalizace

Vstupními parametry optimalizace jsou poloměry v horní a dolní části dveřního rámu. Jak už bylo řečeno, pro každou konfiguraci rámu bylo nutné nastavit odlišné okrajové podmínky pro sklo, protože vzdálenost, o kterou je nutno sklo přitisknout k lepidlům, se při každé změně jednoho z rádiusů mění. To v tomto případě představovalo problém, protože okrajové podmínky bylo nutné definovat jako další vstupní parametry, přičemž jsou ale zároveň závislé na poloměru předehtutí. Tento problém jsem vyřešil pomocí Matlabu, kdy jsem si změnil okrajové podmínky pro 40 různých kombinací rádiusů a získanou množinu bodů proložil plochou, rovnice této plochy pak představovala vstupní parametr pro okrajové podmínky. V grafu 8.1 lze vidět aproximované hodnoty změřených okrajových podmínek, odchylka od přesné hodnoty byla v řádu desetin procenta.



Graf 8.1: Aproximace okrajových podmínek na dolní straně skla

Dále bylo třeba definovat výstupní parametry. Zvolil jsem obdobný přístup jako u referenčních variant viz kapitola 9. Pomocí skic z programu Creo byly zjištěny posuvy, o které by se měla každá konfigurace rámu deformovat po nalepení skla, tak aby výsledné rádiusy byly právě 18000 a 6914 mm. Jednalo se o posuvy dole, v místě změny poloměru a nahoře na rámu, tyto posuvy pak byly dalšími vstupními parametry a opět byly aproximovány pomocí Matlabu, příklad takové skicy lze vidět na obrázku 8.5. Tyto posuvy pak byly porovnávány se skutečnou deformací v odpovídajících bodech po provedení výpočtu a skrze procentuální rozdíl zavedeny jako výstupní parametry.



Obr. 8.5: Skica deformace dveřního rámu varianty V1 pro zjištění posuvů

Dalším krokem bylo vygenerování návrhových bodů, v modulu Design of Experiments byla nastavena volba Optimal Space-Filling Design (OSF). Tato metoda vytvoří množinu návrhových bodů, která optimálně pokrývá celý prostor definovaný mezemi vstupních parametrů. Vychází z metody Latin Hypercube Sampling (LHS), která má speciální algoritmus pro potlačení generování návrhových bodů o stejných hodnotách, čímž se vyhne zbytečným dvojitým výpočtům. Oproti metodě LHS má OSF pravidelnější pokrytí prostoru. Počet vzorků jsem nastavil manuálně na 50, aby bylo zajištěno dostatečné množství dat pro pozdější proložení odezvovou plochou. Ta byla vytvořena metodou Screening po proběhnutí všech výpočtů [19].

Typ	Parametr	Meze	Význam
Vstupní nezávislé	R_dolní	6,8 – 5 m	poloměr v dolní části dveřního rámu
	R_horní	17,5 – 15 m	poloměr v horní části dveřního rámu
Vstupní závislé	OP_dolní	–	posuv aplikovaný na dolní hranu skla
	OP_horní	–	posuv aplikovaný na horní hranu skla
	ref_dole	–	posuv dole změřený ze skici
	ref_spoj	–	posuv uprostřed změřený ze skici
	ref_nahoře	–	posuv nahoře změřený ze skici
	def_dole	–	vypočtená deformace dole
Výstupní	def_uprostřed	–	vypočtená deformace uprostřed
	def_nahoře	–	vypočtená deformace nahoře
	%dole	–	% rozdíl deformace dole od skicy
	%uprostřed	–	% rozdíl deformace uprostřed od skicy
	%nahore	–	% rozdíl deformace nahoře od skicy

Tab. 8.1: Přehled vstupních a výstupních parametrů

8.6.2. Výsledek optimalizace

Na odezvové ploše byla provedena optimalizace o 10000 vzorcích s takovými parametry, aby procentuální odchylka definovaných výstupních parametrů byla minimální. Výstupem optimalizace je několik kandidátů, které Ansys hodnotí hvězdami podle toho, jak odpovídají uživatelem definovaným požadavkům viz obrázek 8.6.

	Candidate Point 1	Candidate Point 2	Candidate Point 3
P7 - R_horní (mm)	16013	15797	15579
P8 - R_dolní (mm)	6434	6449,8	6466,5
P18 - %dole (m)	★★★ 0,55359	★★★ 0,27115	★★★ 1,1836
P26 - %uprostřed (m)	★★ 28,125	★★★ 21,199	★★★ 14,689
P27 - %nahore (m)	★★★ 0,49836	★★★ 8,3162	★★★ 15,093

Obr. 8.6: Výsledek optimalizace

Z navrhovaných kandidátů byl vybrán kandidát 1 s hodnotami:

- poloměr předehnutí v dolní části dveří: 6,434 m
- poloměr předehnutí v horní části dveří: 16,013 m

Pro tyto hodnoty rádiusů pak byly zjištěny přesné okrajové podmínky a hodnoty vertikálních deformací pro kontrolu změny rádiusu a byl proveden kontrolní výpočet na obdobné síti, jaká byla použita pro referenční varianty viz kapitola 8.4.

Zátěžný krok	Dolní hrana skla [mm]	Horní hrana skla [mm]
–		
Loadstep 1	–57,9	–48,4
Loadstep 2	–	–

Tab. 8.2: Okrajové podmínky pro sklo v jednotlivých zátěžných krocích

9. Presentace a analýza výsledků

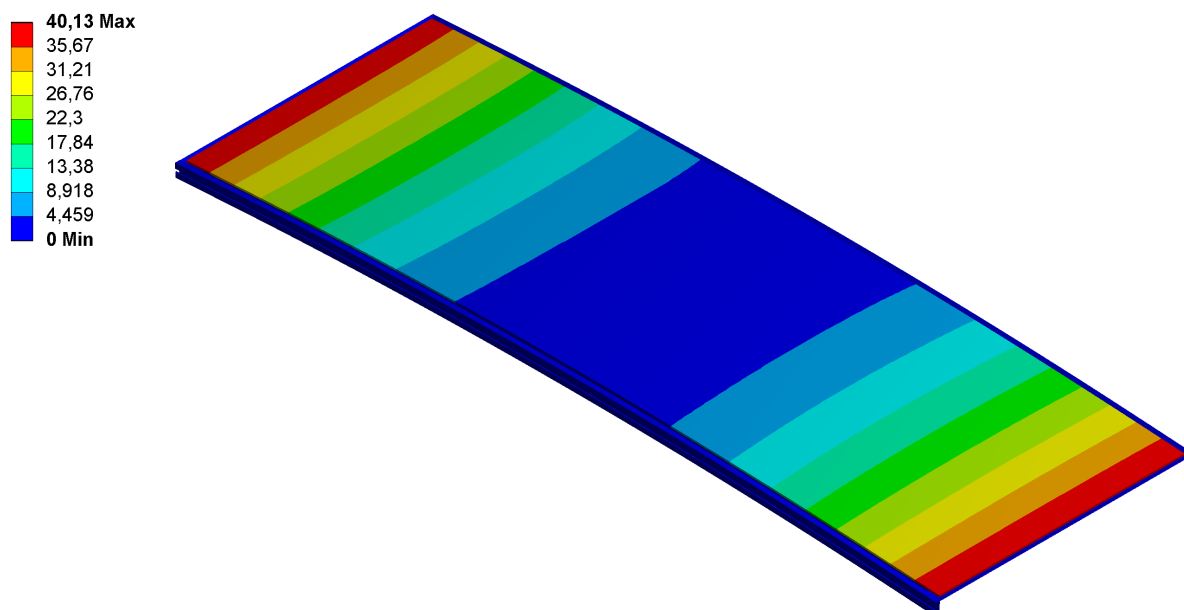
Jelikož rám se deformuje kolem definovaných vazeb, ve kterých jsou nulové posuvy ve vertikálním směru, vycházel jsem při analýze výsledků z předpokladu, že rám by se měl deformovat tak, aby po nalepení skla odpovídala vertikální deformace rozdílu mezi předehnutým a finálním poloměrem. K tomu jsem využíval skic z programu Creo, z těch byly zjištěny hodnoty vertikálních deformací dole, uprostřed a nahoře na rámu, což odpovídá i místům, kde se rámy proměřují ve skutečnosti. S těmito hodnotami pak byly porovnávány výsledky získané z Ansysu, které lze vidět v následujících částech. Ve výpočtovém modelu bylo dále vytvořeno několik cest, po kterých byla vykreslena deformace ve vertikálním směru.

9.1. Referenční varianty

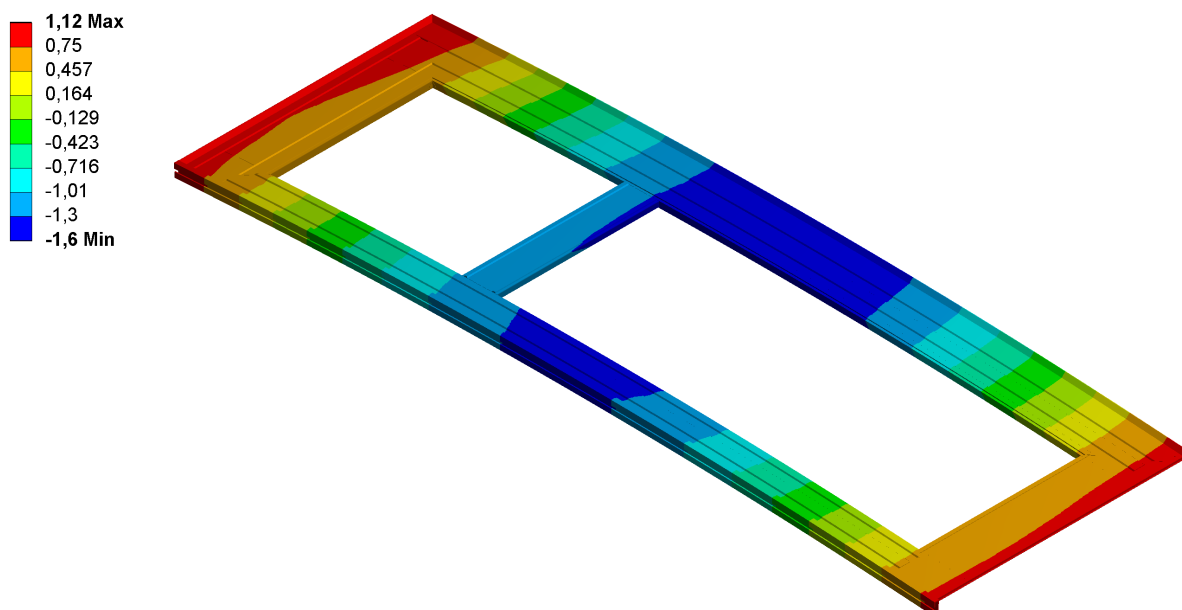
9.1.1. Varianta R1

9.1.1.1. Deformovaný tvar

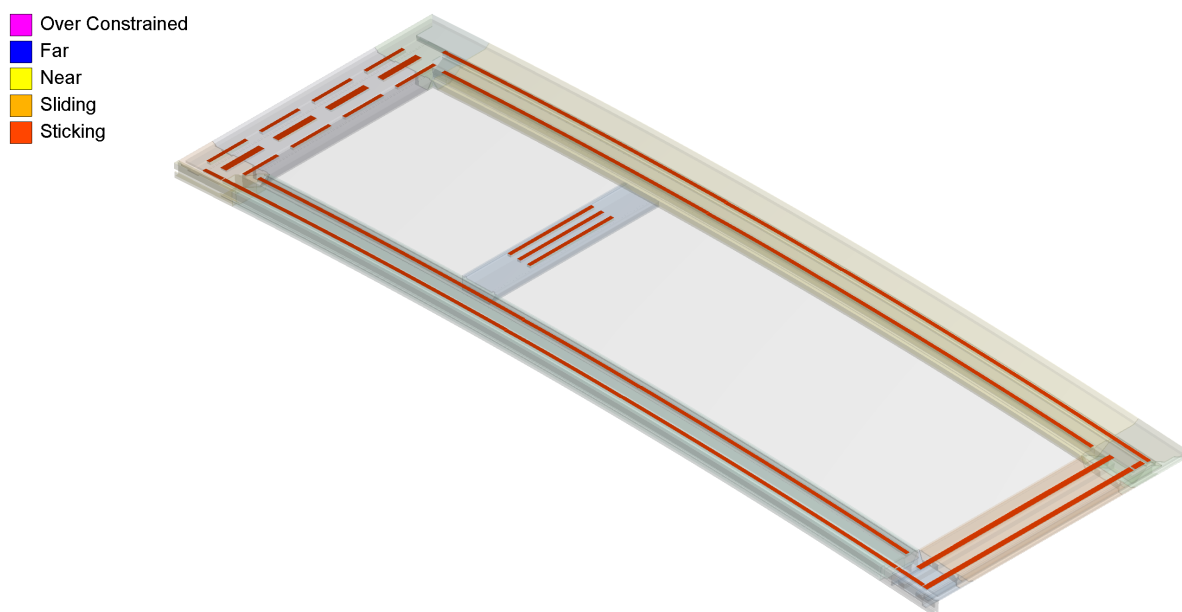
Pomocí deformovaného tvaru byl ověřen výpočet vzhledem k daným okrajovým podmínkám. V prvním zátěžném kroku došlo k přitisknutí skla k lepidlům na konci rámu a po odlehčení došlo k deformaci rámu dle předpokladu. Na obrázku 9.1 lze vidět celkovou deformaci rámu se sklem na konci druhého zátěžného kroku.



Obr. 9.1: Deformovaný tvar varianty R1, legenda v [mm]



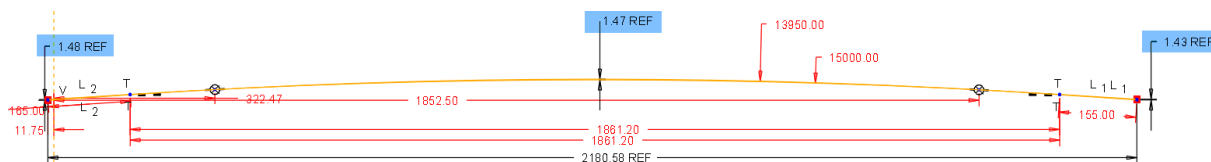
Obr. 9.2: Vertikální deformace dveřního rámu varianty R1, legenda v [mm]



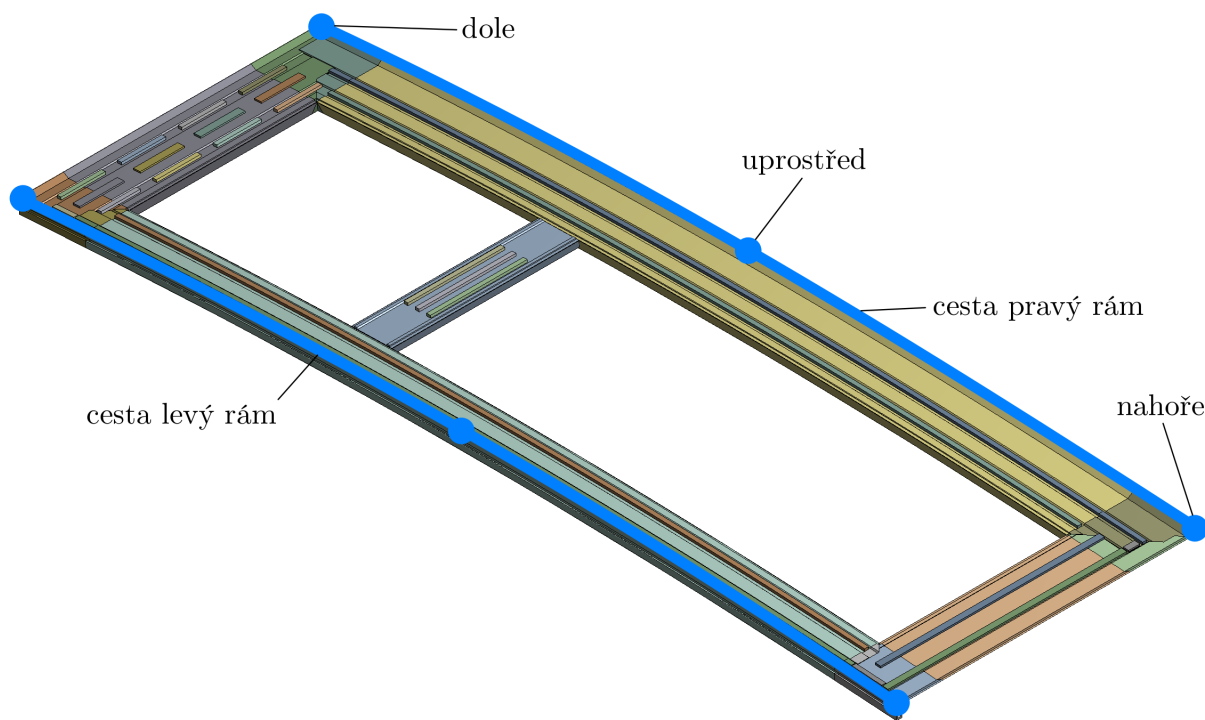
Obr. 9.3: Stav kontaktů lepidel a skla po deformaci

9.1.1.2. Výsledky po jednotlivých cestách

Na obrázku 9.4 lze vidět skicu pro variantu R1, ze které jsem vycházel při kontrole rozměrů deformovaného rámu. Lze vidět hodnoty vertikální deformace uprostřed a na koncích rámu.

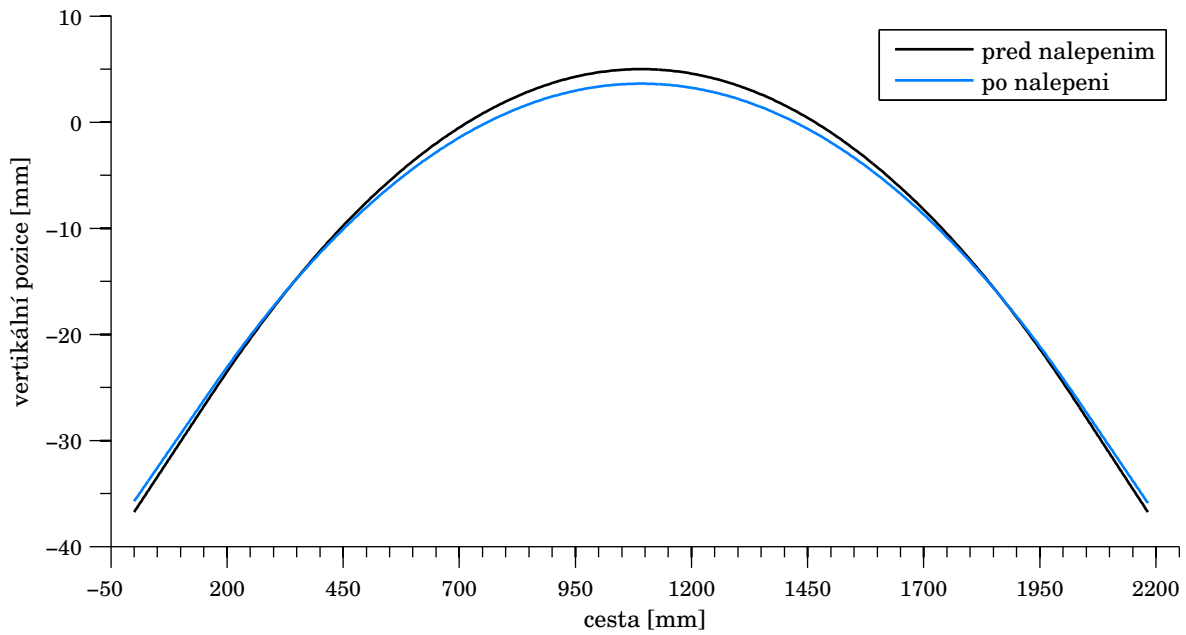


Obr. 9.4: Skica deformace dveřního rámu z poloměru 13,95 na 15 m



Obr. 9.5: Cesty a body definované na variantě R1

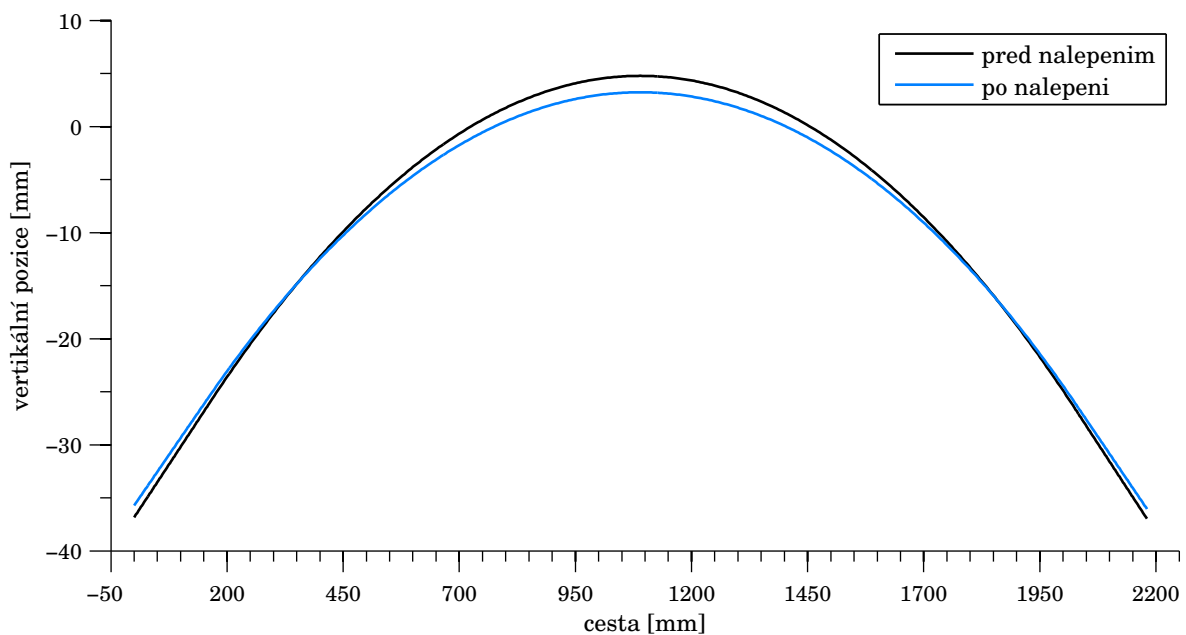
Pro porovnání s teoretickými hodnotami byla vertikální deformace získaná výpočtem vykreslena na cestách, které lze vidět na obrázku 9.5. V grafu 9.1 lze vidět rozdíl mezi souřadnicemi uzlů ve vertikálním směru na cestě před a po nalepení skla.



Graf 9.1: Vertikální pozice uzlů levého rámu před a po nalepení skla

Bod na rámu	Skica [mm]	Ansysis [mm]	Rozdíl [%]
–			
Dole	1,48	1,01	32
Uprostřed	1,47	1,37	7
Nahoře	1,43	0,85	41

Tab. 9.1: Vertikální pozice uzlů levého rámu po nalepení skla



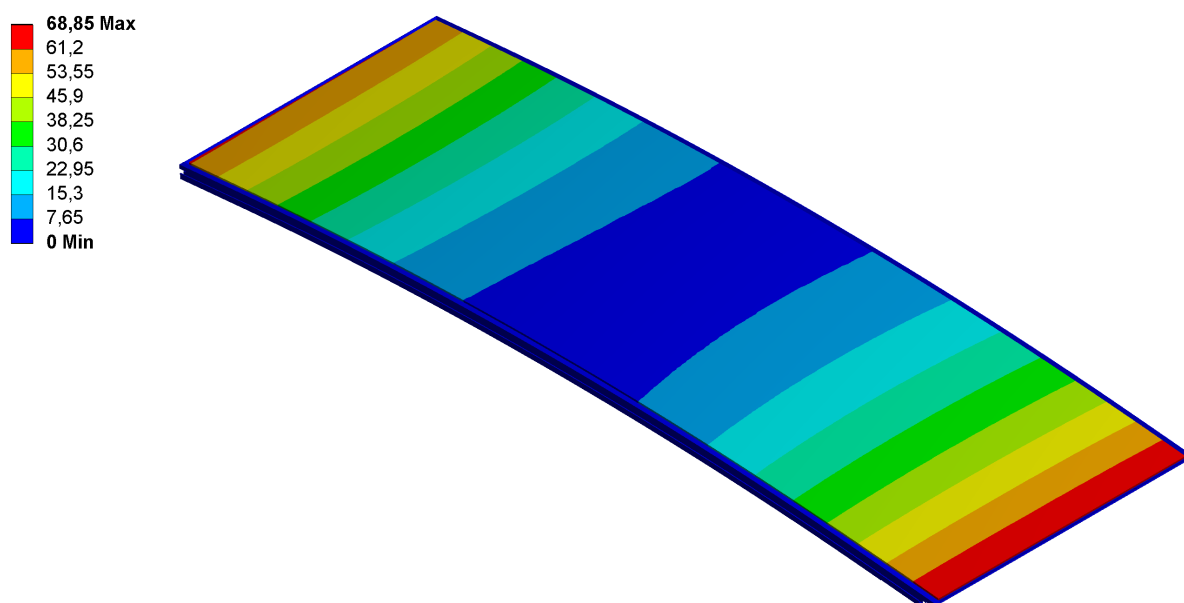
Graf 9.2: Vertikální pozice uzlů pravého rámu před a po nalepení skla

Bod na rámu	Skica [mm]	Ansysis [mm]	Rozdíl [%]
–			
Dole	1,48	1,12	24
Uprostřed	1,47	1,55	5
Nahoře	1,43	0,93	35

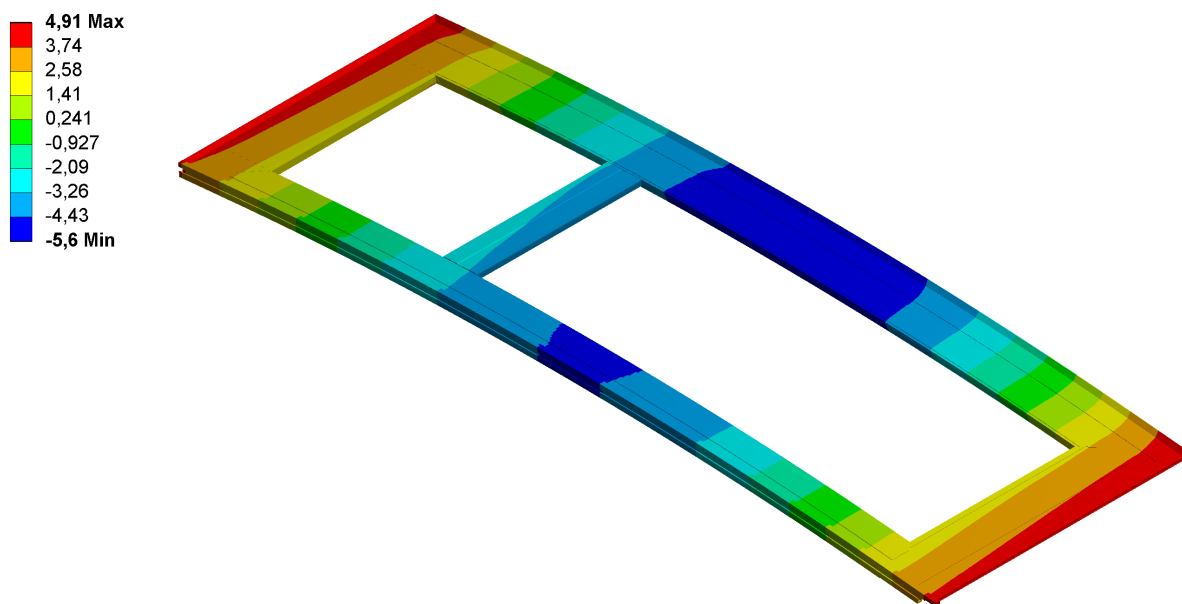
Tab. 9.2: Vertikální pozice uzlů pravého rámu po nalepení skla

9.1.2. Varianta R2

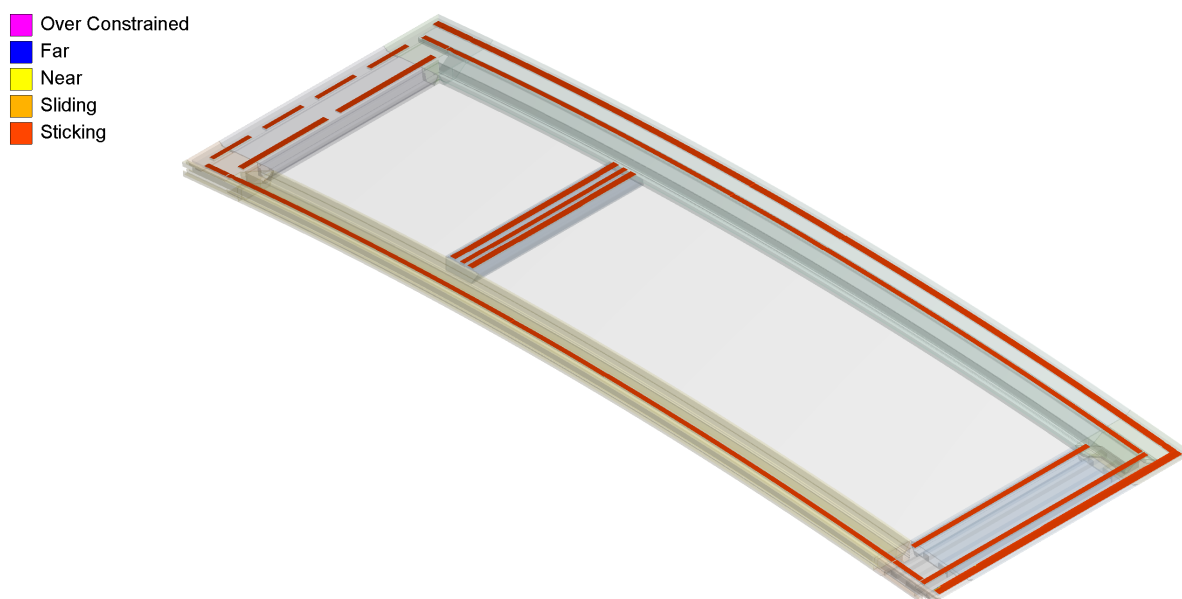
9.1.2.1. Deformovaný tvar



Obr. 9.6: Deformovaný tvar varianty R2, legenda v [mm]



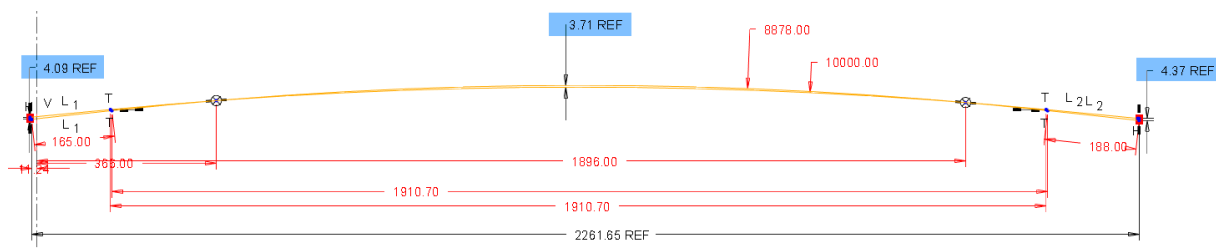
Obr. 9.7: Vertikální deformace dveřního rámu varianty R2, legenda v [mm]



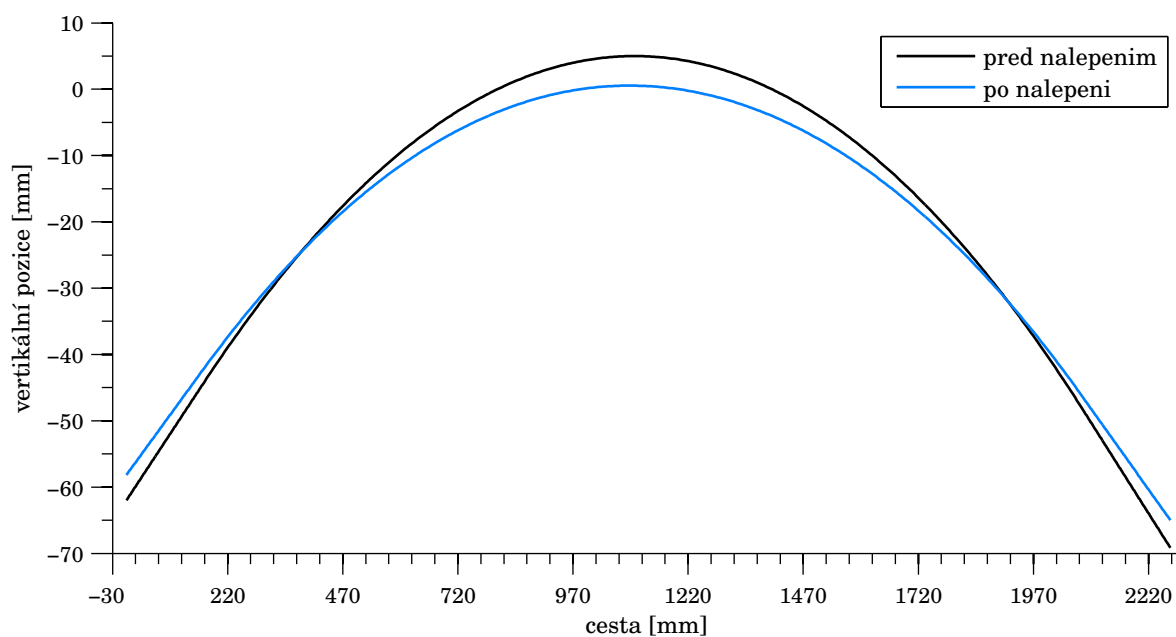
Obr. 9.8: Stav kontaktů lepidel a skla po deformaci

9.1.2.2. Výsledky po jednotlivých cestách

Cesty a body definované pro variantu R2 byly shodné s variantou R1 viz obrázek 9.5.



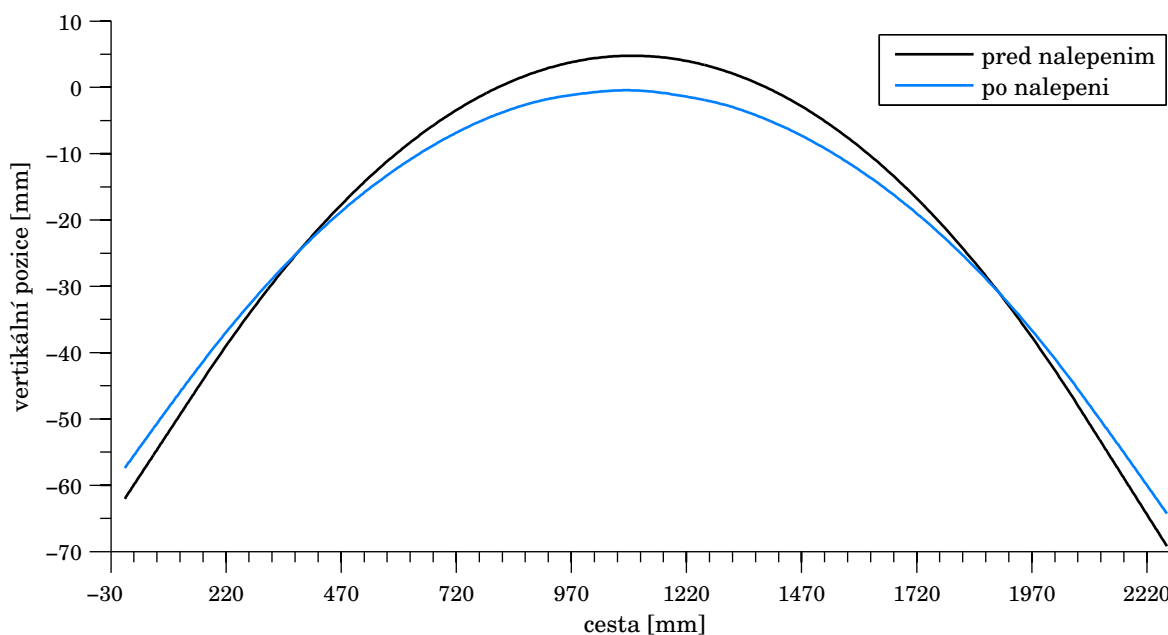
Obr. 9.9: Skica deformace dveřního rámu z poloměru 8,877 na 10 m



Graf 9.3: Vertikální pozice uzlů levého rámu před a po nalepení skla

Bod na rámu	Skica [mm]	Ansysis [mm]	Rozdíl [%]
Dole	4,09	4,17	2
Uprostřed	3,71	4,50	21
Nahoře	4,37	3,83	12

Tab. 9.3: Vertikální pozice uzlů levého rámu po nalepení skla



Graf 9.4: Vertikální pozice uzlů pravého rámu před a po nalepení skla

Bod na rámu	Skica [mm]	Ansysis [mm]	Rozdíl [%]
–			
Dole	4,09	4,62	13
Uprostřed	3,71	5,39	45
Nahoře	4,37	4,89	12

Tab. 9.4: Vertikální pozice uzlů pravého rámu po nalepení skla

9.1.3. Analýza výsledků

Výsledná deformace rámu byla porovnávána několika přístupy. Byla pozorována celková deformace viz obrázky 9.1 a 9.6 a vertikální deformace samotného rámu viz obrázky 9.2 a 9.7, tyto výsledky sloužily především k ověření předpokládaného deformovaného tvaru a průběhu deformace při zvolených okrajových podmínkách. Rámy se podle mojí představy deformují kolem definovaných vazeb a extrémní deformace se nacházejí uprostřed a na koncích rámu.

Dále byl kontrolován stav kontaktů v průběhu výpočtu. Z obrázků 9.3 a 9.8 lze vidět stav kontaktů pro variantu R1 respektive R2 na konci druhého zátěžného kroku. Po deformaci skla v prvním zátěžném kroku došlo k jejich aktivaci a tím simulování adheze mezi sklem a lepidly, po odlehčení skla se rám deformoval vlivem elastické deformace skla na finální poloměr tak jako ve skutečnosti.

Změna poloměru dveřního křídla byla pozorována skrze vertikální deformaci rámu ve třech bodech na levém a pravém podélném profilu. Je třeba poznamenat, že poměrně velké chyby 41% a 45% jsou odchylky od teoretických hodnot finálního rádiusu 15 m respektive 10 m. Jak už bylo popsáno v kapitole 3.1, správnost rozměrů je kontrolována šablonou a spároměrkou a na reálné soustavě je požadavkem, aby se tvar rámu nacházel

uvnitř tolerance, která je pro variantu R1 definována jako tolerance tvaru s hodnotou 2 mm a pro variantu R2 4 mm. Pokud tedy křivost rámu splňuje podmínky tolerance, lze považovat dveřní křídlo za vyhovující. Při uvažování tolerancí lze oba referenční výpočty považovat za vyhovující.

Rozdílné výsledky deformací na levém a pravém příčném profilu jsou způsobeny zejména tím, že kromě ohybové deformace dochází i ke kroucení rámu.

Dále je třeba poznamenat, že výsledek mohl být ovlivněn geometrií lepidel, která je ve skutečnosti značně odlišná a při každém lepení jiná než jak byla namodelována pro účely analýzy. Také rozměry a pozice jednotlivých lepících housenek jsou při každém lepení lehce odlišné. Materiálové charakteristiky lepidla jsou zjištěny pro vytvrzený stav, kdežto v okamžiku po nalepení skla jsou jistě značně odlišné. Dále byl zanedbán vliv creepu, který by se zjišťoval velice obtížně a bylo by takřka nereálné ho zahrnout do optimalizační analýzy pro nový rádius. Podélné profily dveřního rámu také prošly během procesu ohýbání nevratnou plastickou deformací, která mohla způsobit odlišné chování materiálu od uvažovaného lineárně elastického modelu, případně vnést do procesu nežádoucí zbytková napětí, která nebyla uvažována.

Z analýzy výsledků referenčních variant lze vyvodit závěr, že použitý přístup k řešení problému je správný a je tedy vhodný i pro návrh poloměru předehtutí rámu s finálním kombinovaným rádiusem.

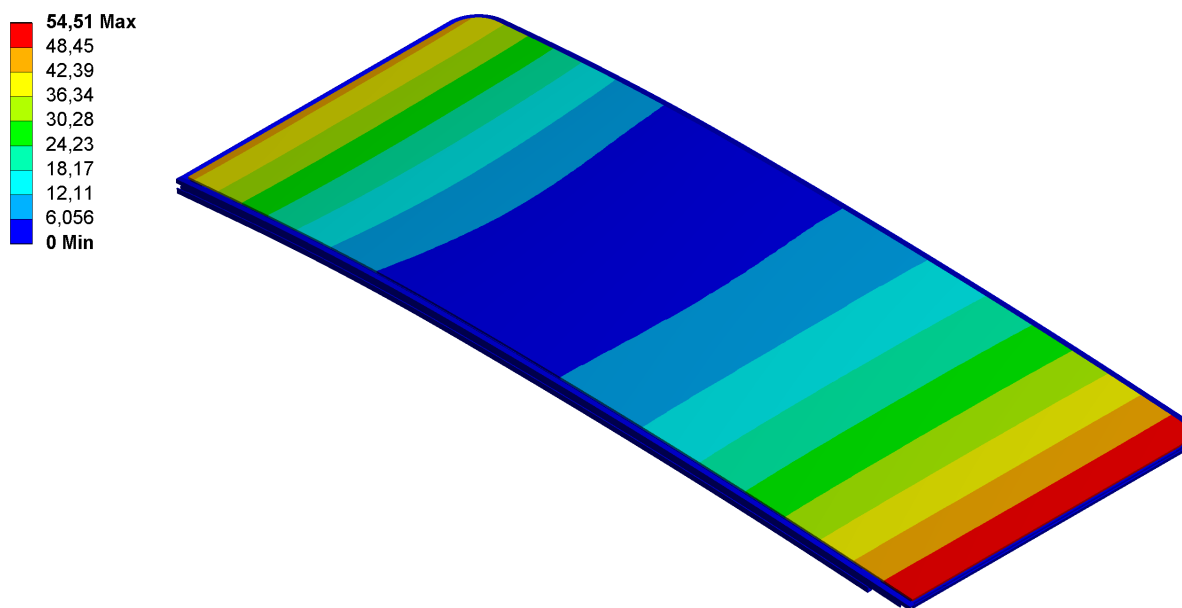
9.2. Varianta V1

Vybraným výsledným kandidátem optimalizace byl dveřní rám s hodnotami:

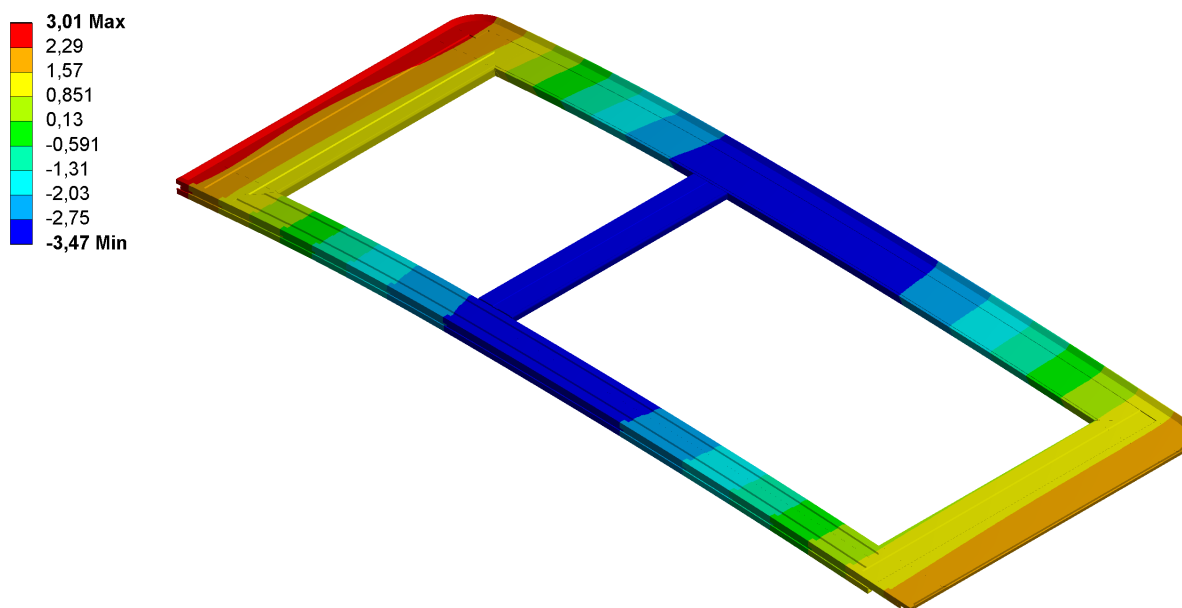
- poloměr předehtutí v horní části dveří: 16,013 m
- poloměr předehtutí v dolní části dveří: 6,434 m

V následujících částech jsou popsány kontrolní výsledky pro tyto rádiusy.

9.2.1. Deformovaný tvar

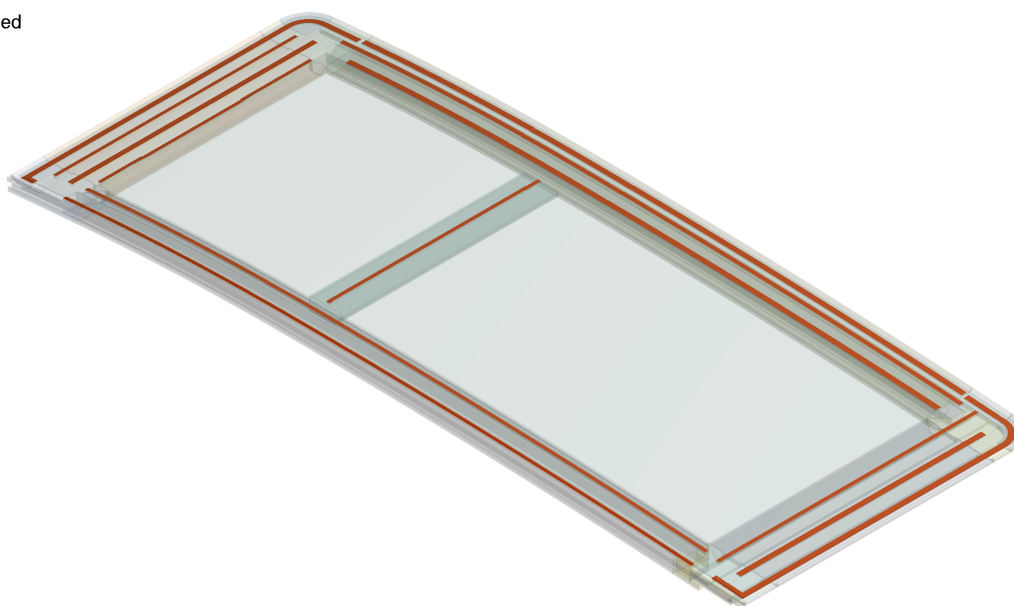


Obr. 9.10: Deformovaný tvar varianty V1, legenda v [mm]



Obr. 9.11: Vertikální deformace dveřního rámu varianty V1, legenda v [mm]

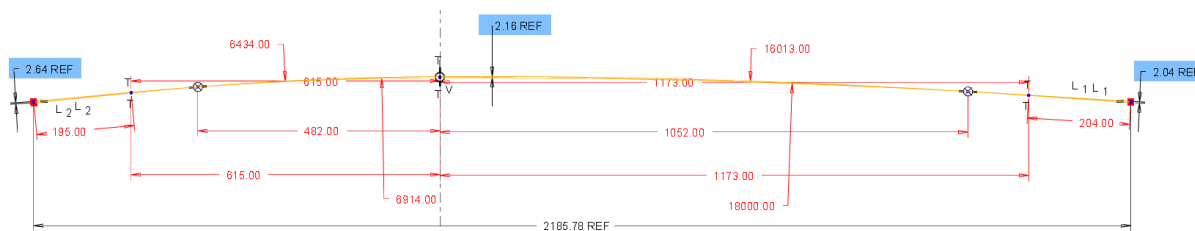
- Over Constrained
- Far
- Near
- Sliding
- Sticking



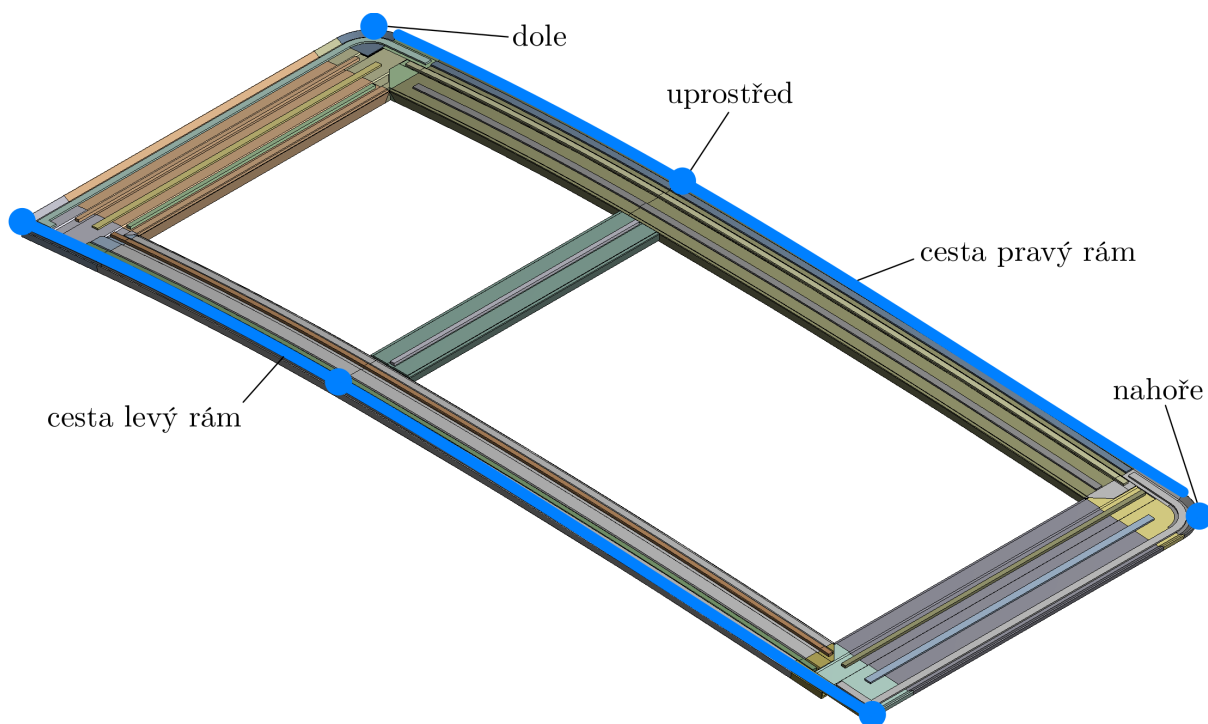
Obr. 9.12: Stav kontaktů lepidel a skla po deformaci

9.2.2. Výsledky po jednotlivých cestách

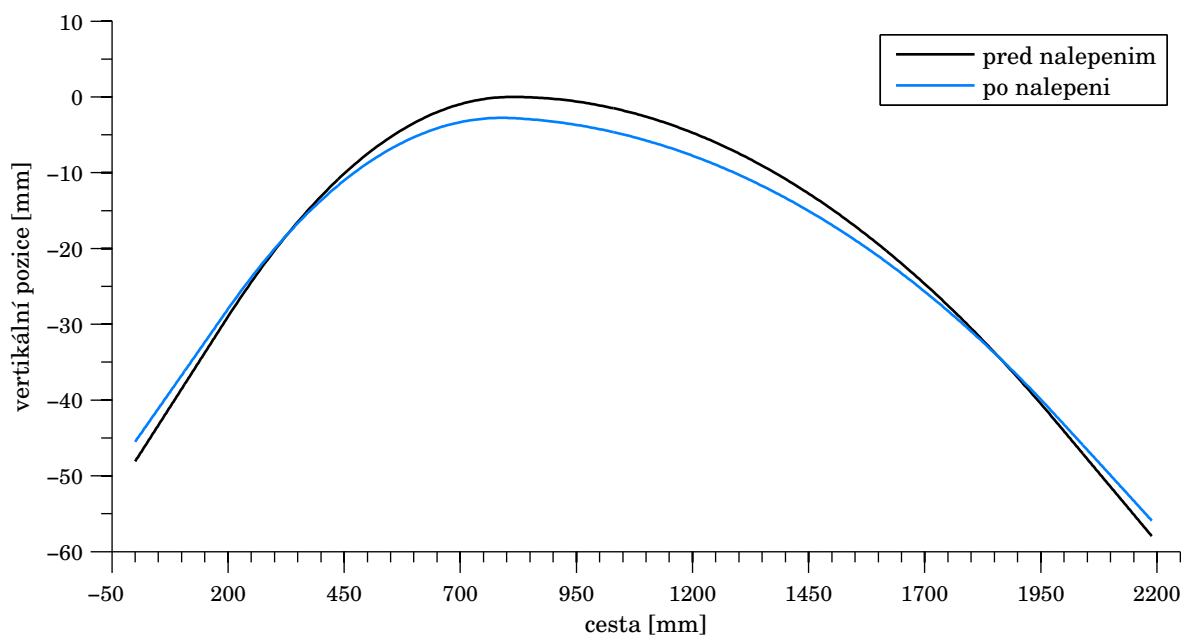
Deformace rámu byla porovnáována obdobným přístupem jako referenční varianty. Na obrázku 9.13 lze vidět skicu použitou pro kontrolu rozměrů deformovaného rámu. Cesty, na kterých byla vykreslena deformace, lze vidět na obrázku 9.14, cesta na pravém rámu není kompletní kvůli zaoblením v rozích rámu.



Obr. 9.13: Skica deformace dveřního rámu z poloměrů 16,013 a 6,434 na 18 a 6,914 m



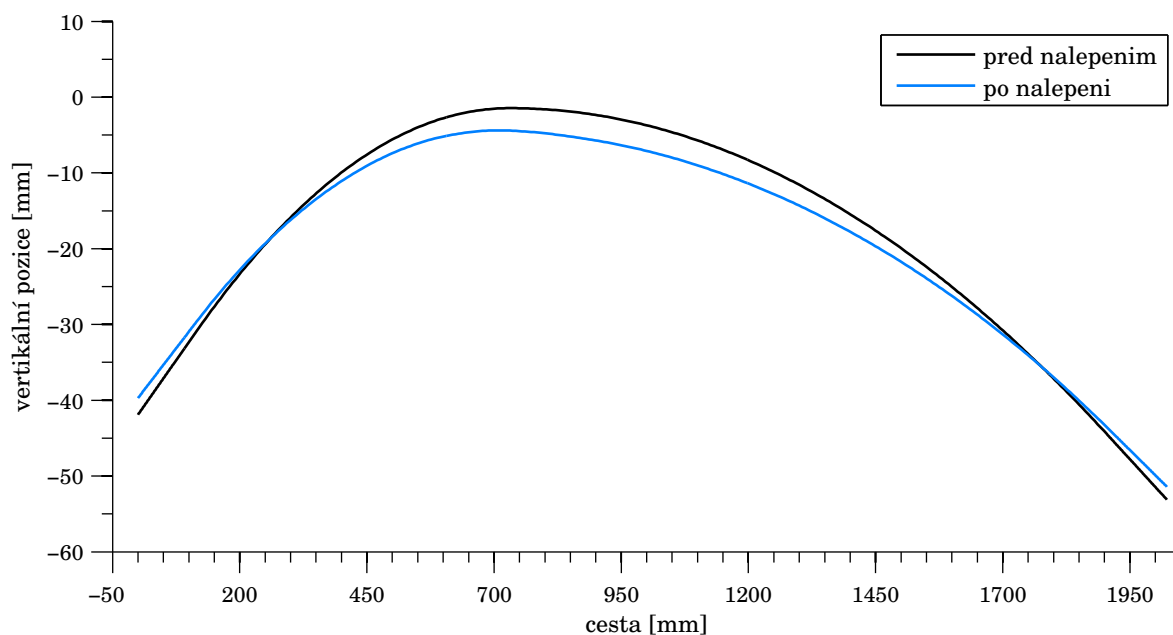
Obr. 9.14: Cesty a body definované na variantě V1



Graf 9.5: Vertikální pozice uzlů levého rámu před a po nalepení skla

Bod na rámu	Skica [mm]	Ansysis [mm]	Rozdíl [%]
–			
Dole	2,64	2,60	2
Uprostřed	2,16	2,79	29
Nahoře	2,04	2,04	0

Tab. 9.5: Vertikální pozice uzlů levého rámu po nalepení skla



Graf 9.6: Vertikální pozice uzlů pravého rámu před a po nalepení skla

Bod na rámu	Skica [mm]	Ansysis [mm]	Rozdíl [%]
–			
Dole	2,64	2,99	13
Uprostřed	2,16	2,96	37
Nahoře	2,04	2,08	2

Tab. 9.6: Vertikální pozice uzlů pravého rámu po nalepení skla

9.2.3. Analýza výsledků

Jak lze vidět na obrázku 9.10 a 9.11, k maximální deformaci opět došlo na koncích a uprostřed rámu, přičemž se rám deformuje kolem definovaných vazeb.

Na obrázku 9.12 lze vidět stav kontaktů na konci druhého zátěžného kroku. Všechny kontakty jsou funkční a simulují tak adhezi mezi lepidly a sklem.

Jak lze vidět v tabulce 9.5 a 9.6, kontrolní výpočet pro dané poloměry předehnutí potvrdil výsledek optimalizace. Maximální odchylky 29% a 37% při uvažování tolerancí

vyhovují finálním poloměrům 6,914 a 18 m. Rozdíl mezi hodnotami deformace na levém a pravém profilu je opět způsoben kroucením dveřního rámu.

10. Závěr

Byla provedena rešeršní studie týkající se problematiky oblasti modelování lepených spojů pomocí MKP. Závěry a poznatky získané touto studií byly dále využity při řešení cílů této diplomové práce.

Z dat dodaných společnostmi IFE-CR byly vytvořeny geometrické modely, které byly poté použity pro MKP analýzu. Výsledek MKP analýzy nalepení a odpružení skla pro referenční varianty R1 a R2 odpovídá v mezích tolerancí realitě a tyto modely tak posloužily jako verifikace zvoleného přístupu k řešenému problému.

Pro variantu V1 s kombinovaným rádiusem byl vytvořen parametrický geometrický model, na němž bylo provedeno 50 výpočtů pro různé návrhové body. Z výsledků pro tyto body byla vytvořena odezвовá plocha, na které byla provedena optimalizační úloha o 10000 vzorcích s cílem minimální odchylky od finálního radiusu 6,914 a 18m. Výsledkem optimalizace je pak dvojice poloměrů:

- 6,434 m v horní části dveří
- 16,013 m v dolní části dveří

Ty byly zpětně použity pro předehnutí rámu, jehož deformace po nalepení skla byla úspěšně porovnána s teoretickými posuvy. Výsledek numerické simulace bude v brzké době ověřen pomocí experimentu.

Na základě výše uvedených skutečností lze tedy konstatovat, že cíle práce vytyčené v kapitole 1.2 byly splněny v plném rozsahu.

11. Seznam použitých zdrojů

- [1] *Návrh a analýza kompozitních konstrukcí: Kap. 8.2 Lepené spoje* [online]. FS ČVUT Praha: Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky, 2007 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: http://www.kompozity.info/seminar/8_2%20lepené_spoje.pdf
- [2] *SubsTech: Substances & Technologies* [online]. 2014 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=adhesives>
- [3] *Adhesives.org* [online]. 2008 [cit. 2015-04-18]. Dostupné z: <http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/science-of-adhesion/adhesion-cohesion>
- [4] *Konstruování strojů: Svarové, lepené a nýtové spoje* [online]. FSI VUT Brno: Ústav konstruování, 2013 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska7.pdf>
- [5] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [6] RODRÍGUEZ, René Q., William P. PAIVA, Paulo SOLLERO, Eder L. ALBUQUERQUE, Marcelo B. RODRIGUES. Analytical and Numerical Tools for Bonded Joint Analysis. *Mecánica Computacional*. 2010, vol. 29, s. 7557-7569.
- [7] SPAGGIARI, Andrea. *Efficient Modelling of Complex Adhesively Bonded Structures by Standard Finite Element Techniques*. Modena, 2009. Disertační práce. University of Modena e Reggio Emilia, High Mechanics and Automotive Design and Technology.
- [8] DA COSTA, Marcelo Bruno Serrao Fontes Parente. *Development of a Web Application for the Design of Adhesive Joints*. Porto, 2013. Diplomová práce. Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia.
- [9] ZHU, Yuqiao a Keith KEDWARD. *Methods of Analysis and Failure Predictions for Adhesively Bonded Joints of Uniform and Variable Bondline Thickness* [online]. Washington: Office of Aviation Research, 2005 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.tc.faa.gov/its/worldpac/techrpt/ar05-12.pdf>
- [10] PACKHAM, D. *Handbook of Adhesion*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: John Wiley, 2005, 638 s. ISBN 04-718-0874-1.
- [11] BURCHARDT, Bernd R. a Peter W. MERZ. *Handbook of adhesives and sealants*. 1st ed. Boston, Mass.: Elsevier, 2006, s. 355-480. ISBN 00804470822.
- [12] TAHMASEBI, Farhad Ph.D. *Finite Element Modeling of an Adhesive in a Bonded Joint* [online]. NASA Goddard Space Flight Center, 1999 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://femci.gsfc.nasa.gov/adhesive/index.html>
- [13] BANEJA, M D a L F M DA SILVA. Adhesively bonded joints in composite materials: an overview. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* [online]. 2009-1-1, vol. 223, issue 1, s. 1-18 [cit. 2015-02-25]. DOI: 10.1243/14644207JMDA219. Dostupné z: <http://pil.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/14644207JMDA219>

- [14] KULÍŠEK, Viktor. *Kompozitní konstrukce: výpočty metodou konečných prvků* [online]. Praha, 2010 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/tomas.mares/mkm/Kompozity_mkp_2014.pdf
- [15] *Lepidla.cz* [online]. 2013 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.lepidla.cz/>
- [16] *AdhesiveandGlue.com* [online]. 2012-2015 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: <http://www.adhesiveandglue.com/adhesive-definition.html>
- [17] DAVIS, M.J. a D.A. BOND. *The Importance of Failure Mode Identification in Adhesive Bonded Aircraft Structures and Repairs* [online]. Melbourne [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://www.adhesionassociates.com/papers/46%20Importance%20of%20Failure%20Mode%20Identification%20ICCM%2012%20Paris.pdf>
- [18] DA SILVA, Lucas F. M., Ricardo F. T. LIMA, Rui M. S. TEIXEIRA a A. PUGA. *Closed-form Solutions for Adhesively Bonded Joints* [online]. [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: http://paginas.fe.up.pt/~em03108/Report1_Closed_form_models.pdf
- [19] ANSYS Workbench, Release 15, Product Help
- [20] MOTTERSHEAD, J. *Modern practice in stress and vibration analysis: proceedings of the conference held at the University of Liverpool, 3-5 April 1989*. 1st ed. New York: Pergamon Press, 1989, 341 p. ISBN 00-803-7522-7.
- [21] DA SILVA, Lucas F. M. a Raul D. S. G. CAMPILHO. *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. [online]. [cit. 2015-02-25]. DOI: 10.1007/978-3-642-23608-2_1. Dostupné z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-23608-2_1
- [22] FORS, Fredrik. *Analysis of Metal to Composite Adhesive Joints in Space Applications*. Linköping, 2010. Diplomová práce. Linköping University, Institute of Technology.
- [23] CHRISTENSEN, Esben Toke, Jonas Heidemann SJØLUND a Jens Ammitzbøll GLUD. *Formulation of Cohesive Finite Element for Analysing Strength of Wrinkles in Glass-Epoxy Laminates*. Aalborg, 2013. Diplomová práce. Aalborg University.
- [24] *Virtual Crack Closure Technique (VCCT) in ANSYS* [online]. 2011 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: https://caesai.com/sites/default/files/vcct_in_ansys.pdf
- [25] *ANSYS Cohesive Zone Modeling* [online]. 2011 [cit. 2015-02-25]. Dostupné z: https://caesai.com/sites/default/files/CAE_Fatigue_and_Fracture_Seminar_-_CZM_For_Web.pdf
- [26] GIROLAMO, Donato. *Progressive Damage Analysis of Bonded Composite Joints*. Delft, 2012. Diplomová práce. Delft University of Technology, Department of Aerospace Engineering.
- [27] LARSSON, Oskar. *Shear Capacity in Adhesive Glass-Joints*. Lund, 2008. 106 s. Diplomová práce. Lund University, Division of Structural Mechanics.
- [28] QIULI SUN, Eric. *Shear Locking and Hourglassing in MSC Nastran, ABAQUS, and ANSYS*. In: [online]. [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: http://web.mscsoftware.com/events/vpd2006/na/presentations/tech_papers/27.pdf

- [29] *Interní dokumentace*. IFE-CR a.s.
- [30] *Bombardier* [online]. [cit. 2015-04-10]. Dostupné z: http://us.bombardier.com/us/press_release_03102011.htm
- [31] *Abaqus 6.12 Online Documentation* [online]. 2012 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: http://www.maths.cam.ac.uk/computing/software/abaqus_docs/docs/v6.12/books/hhp/default.htm
- [32] ALVES DE SOUSA, R.J., R.M. NATAL JORGE, R.A. FONTES VALENTE a J.M.A. CÉSAR DE SÁ. A new volumetric and shear locking-free 3D enhanced strain element. *Engineering Computations* [online]. 2003, vol. 20, issue 7, s. 896-925 [cit. 2015-04-05]. DOI: 10.1108/02644400310502036. Dostupné z: <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/02644400310502036>
- [33] *Dealing With Incompressibility* [online]. 2015 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <https://caesai.com/blog/dealing-incompressibility>
- [34] PETRUŠKA, Jindřich a Jiří BURŠA. *Nelineární úlohy mechaniky v MKP* [online]. [cit. 2015-04-15]. Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/cz/studium/studijni-materialy.html>

12. Seznam použitých zkratek a symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
τ	[MPa]	smykové napětí
P	[N]	zátěžná síla
b	[mm]	šířka přeplátování
l	[mm]	délka přeplátování
t_t	[mm]	tloušťka horního substrátu
t_b	[mm]	tloušťka dolního substrátu
t_a	[mm]	tloušťka vrstvy lepidla
G_a	[MPa]	modul pružnosti ve smyku lepidla
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti substrátů
\bar{P}	[N·mm ⁻¹]	zátěžná síla na jednotku šířky
c	[mm]	polovina délky přeplátování
M	[Nm]	ohybový moment
V	[N]	příčná síla
k	[–]	faktor ohybového momentu
k'	[–]	faktor příčné síly
t	[mm]	tloušťka adherendů
μ	[–]	Poissonův poměr substrátů
σ	[MPa]	odlupovací napětí
λ	[–]	poměrné protažení
L	[m]	původní délka vzorku
u	[m]	prodloužení vzorku
k_{smyk}	[Nm]	tuhost pružiny ve smyku
$k_{tah/tlak}$	[Nm]	tuhost pružiny v tahu/tlaku
A_{el}	[m ²]	plocha prvku
G	[MN·m ⁻¹]	hnací síla trhliny
Π	[J]	potenciální energie
A	[m ²]	lomová plocha
U	[J]	vnitřní energie
F	[J]	práce vnějších sil
G_c	[KJ·m ⁻²]	lomová houževnatost
K	[MPa·m ^{0,5}]	faktor intenzity napětí
K_c	[MPa·m ^{0,5}]	lomová houževnatost
Δa	[mm]	prodloužení trhliny
Δu	[mm]	posuv ve směru x
Δv	[mm]	posuv ve směru y

Symbol	Jednotka	Význam
R_x	[N]	reakce ve směru x
R_y	[N]	reakce ve směru y
f	[–]	kritérium pro šíření trhliny
K	[MPa]	objemový modul pružnosti
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota

Zkratka	Význam
MKP	Metoda konečných prvků
VCCT	Virtual Crack Closure Technique
STEP	Standard for Exchange of Product Model Data
LHS	Latin Hypercube Sampling
OSF	Optimal Space-Filling Design