



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# PEVNOSTNÍ KONTROLA A MODELOVÁNÍ LEPENÝCH SPOJŮ POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ

STRESS ANALYSIS AND MODELLING OF ADHESIVE BONDED JOINTS WITH THE USE OF FINITE ELEMENT METHOD

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Karolína Trubíniová

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Tomáš Katrňák

BRNO 2023



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Studentka: **Karolína Trubíniová**  
Studijní program: Základy strojního inženýrství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Tomáš Katrňák**  
Akademický rok: 2022/23

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 bakalářské práce:

### **Pevnostní kontrola a modelování lepených spojů pomocí metody konečných prvků**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Pro simulace poruch lepených spojů je s výhodou používána Metoda konečných prvků (MKP), která umožňuje podrobnou analýzu ztráty schopnosti přenášet aplikované zatížení a grafické vyhodnocení rozložení napjatosti či deformace v místě lepeného spoje. Práce je zaměřena zejména na vytvoření modelů lepených spojů a následnou pevnostní kontrolu pomocí MKP.

#### **Cíle bakalářské práce:**

1. Stručný úvod do problematiky lepených spojů.
2. Pevnostní kontrola lepeného spoje pomocí analytického přístupu.
3. Vytvoření modelu lepeného spoje v MKP programu.
4. Pevnostní kontrola lepeného spoje pomocí metody konečných prvků.

#### **Seznam doporučené literatury:**

NIU, Michael Chun-Yung. Airframe Structural Design – 2nd edition, Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press, 2004. ISBN 962-7128-09-0.

MEGSON, T. H. G. Aircraft Structures for Engineering Students. 4th ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. ISBN 978-0-75066-7395.

PÍŠTĚK, Antonín, Oldřich GRÉGR, Václav KAHÁNEK a Rudolf BÖHM. Pevnost a životnost letadel 1. VUT Brno, 1988, 266 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku  
2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka,  
Ph.D.

---

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.  
děkan fakulty



### Abstrakt

Táto bakalárska práca sa zaoberá analýzou lepených spojov používaných v leteckom priemysle pomocou numerického riešenia metódou konečných prvkov. Rešeršná časť je zameraná na uvedenie do problematiky lepených spojov, výhod a nevýhod ktoré prinášajú a využitie v letectve. Súčasťou tejto práce je aj pevnostná kontrola v šmyku pomocou analytického prístupu a jej popis. Praktická časť je zameraná na vytvorenie 2D a 3D modelov skúšobného vzorku jednoducho preplátovaného spoja a následná pevnostná analýza v programoch MSC.Patran a MSC.Nastran. Výstup práce tvorí lineárna analýza 2D a 3D úlohy, nelineárna analýza 3D úlohy a porovnanie výsledkov dosiahnutých týmito metódami.

### Klíčové slová

Lepené spoje, pevnostná kontrola v šmyku, MKP, spoje v letectve, jednoducho preplátovaný spoj, analýza napätí

### Abstract

This bachelor's thesis deals with the analysis of adhesive joints used in the aerospace industry by numerical solution using finite element method. The research section is focused on introduction to the topic of adhesive joints, the advantages and disadvantages they bring and their use in aerospace industry. The shear strength test using analytical approach is also part of this work. The practical part is focused on creation of 2D and 3D models of single lap joint test specimen and the subsequent strength analysis in MSC.Patran and MSC.Nastran. The output of this work consists of linear analysis of 2D and 3D problems, a non-linear analysis of 3D problem and comparison of results obtained by these methods.

### Keywords

Adhesive joints, shear strength test, FEM, joints in aerospace industry, Single lap joint (SLJ), stress analysis



### Bibliografická citácia

TRUBÍNIOVÁ, Karolína. *Pevnostní kontrola a modelování lepených spojů pomocí metody konečných prvků* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149263>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Tomáš Katrňák.



## Čestné prehlásenie

Prehlasujem, že táto práca je mojím pôvodným dielom, spracovala som ju samostatne pod vedením Ing. Tomáša Katrňáka a s použitím informačných zdrojov uvedených v zozname.

V Brne dňa 26. mája 2023

.....  
Karolína Trubíniová

# Podakovanie



## **Podakovanie**

Týmto spôsobom by som rada poďakovala mojej rodine a blízkym za ich pretrvávajúcu podporu po celú dobu štúdia.



**Obsah**

1. Úvod .....	11
2. Problematika lepených spojov .....	12
2.1. Princíp fungovania lepených spojov .....	12
2.2. Využitie v letectve.....	13
2.3. Výhody a nevýhody lepených spojov .....	14
2.4. Spôsoby zaťažovania .....	15
2.5. Prevedenia lepených spojov.....	16
2.6. Mechanizmy porušenia spoja .....	17
3. Pevnostná kontrola lepeného spoja pomocou analytického prístupu .....	18
3.1. Pevnostná kontrola.....	18
3.2. Optimálna dĺžka prekrytia .....	19
3.3. Vplyv faktorov na výpočet.....	19
3.4. Pravdepodobnosť spoja a optimálne prekrytie.....	20
3.5. Veľkosť sily pri porušení .....	21
3.6. Koncentrácia napätia v lepenom spoji .....	22
4. Úvod do metódy konečných prvkov .....	25
4.1. Princíp MKP .....	25
4.2. Výpočtový software .....	25
5. Vytvorenie modelu lepeného spoja v MKP programe.....	26
5.1. Geometria .....	26
5.2. Mesh .....	27
5.3. Okrajové podmienky.....	28
5.4. Materiál .....	28
5.5. Typ analýzy .....	29
5.6. Numerický výpočet .....	29
6. Pevnostná kontrola lepeného spoja pomocou MKP .....	30
6.1. 2D lineárna analýza.....	30
6.2. 3D lineárna analýza.....	31
6.3. 3D nelineárna analýza.....	32
7. Porovnanie kritických napätí .....	35
7.1. Porovnanie analytického výpočtu s 2D a 3D lineárnou analýzou .....	35
7.2. Porovnanie šmykových napätí z 3D lineárnej analýzy s ťahovou skúškou...38	
7.3. Porovnanie napätí vo vrstvách lepidla 3D lineárneho modelu.....	41
7.4. Porovnanie 3D lineárnej a nelineárnej úlohy.....	42

## Obsah



8. Vyhodnotenie.....	44
9. Záver .....	45
Zoznam použitej literatúry .....	46
Zoznam tabuliek .....	48
Zoznam obrázkov.....	49
Zoznam grafov .....	50



## 1. Úvod

V posledných rokoch je možné pozorovať značný nárast využívania lepených spojov spôsobený výhodami, ktoré ponúkajú oproti konvenčným riešeniam spojov. Dnes sú lepené spoje často využívané nielen v leteckom priemysle, ale aj v ostatných technických odvetviach. Jedny z mnohých výhod sú najmä znížené koncentrácie napätí a zníženie hmotnosti konštrukcie, čo je veľmi žiadaná vlastnosť v leteckom priemysle.

Táto práca je zameraná na pevnostnú analýzu lepených spojov analytickým aj numerickým prístupom.

Pred samotnou analýzou je však potrebné oboznámiť sa s problematikou lepených spojov a princípom ich fungovania. Na tento účel slúži rešeršná časť tejto práce. Rovnako tu budú definované výhody a potenciálne slabiny týchto spojov a možné spôsoby zaťažovania.

Praktická časť je zameraná na pevnostnú analýzu vzorku lepeného spoja skúškou pevnosti v šmyku. Skúška je vykonaná na skúšobnom vzorku jednoducho preplátovaného spoja. Táto skúška bude vypočítaná pomocou analytického prístupu. Následne budú vytvorené 2D a 3D modely vzorku, opísané ich okrajové podmienky a sieť konečného počtu prvkov. 2D model bude analyzovaný pomocou lineárnej analýzy. 3D model bude analyzovaný pomocou ako lineárnej, tak aj nelineárnej analýzy. Nasleduje porovnanie jednotlivých typov numerických analýz medzi sebou ako aj porovnanie analytického a numerického výstupu a porovnanie výsledkov s hodnotou z ťahovej skúšky z technického listu lepidla.

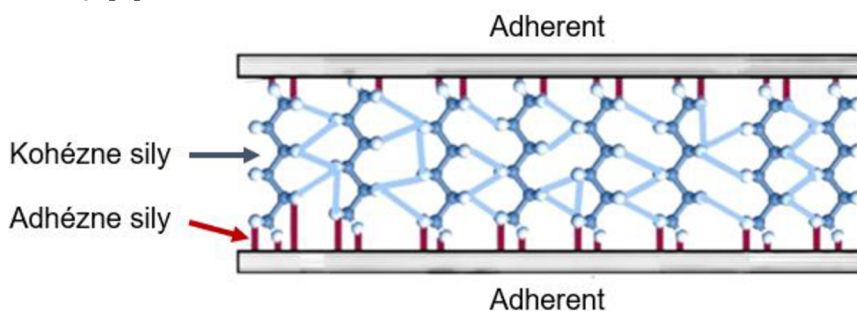


## 2. Problematika lepených spojov

Lepenie je pojem s mnohými aspektmi a rôznymi významami pre ľudí, ale vždy máme na mysli spojenie 2 a viac materiálov pomocou prídavného materiálu, ktorým nie je kov, a ktoré môže odolávať mechanickému zaťaženiu. Lepené spoje umožňujú lepenie malých prvkov ako je elektronika ale aj veľkých konštrukcií pre automobilový alebo letecký priemysel. V leteckom a kozmickom priemysle je adhézne spájanie veľmi žiaducou metódou z dôvodu používania ultral'ahkých konštrukcií, čo umožňuje výrazne znížiť výrobné a prevádzkové náklady. Okrem toho je lepenie alternatívou k široko používaným mechanickým spojom [1]. Ako sa dá očakávať, pri procese kde sú spoľahlivosť a konzistentnosť kľúčové, kvalifikácia nových lepiacich materiálov je mimoriadne prísny a zdĺhavý proces. V literatúre sa uvádza, že v prípade leteckého priemyslu by sa nové lepiace systémy mali posudzovať skôr na základe ich odolnosti a dlhodobej výkonnosti, než len na základe statických vlastností. Na simuláciu typických podmienok prostredia, ktoré takéto konštrukcie zažívajú v prevádzke, sa používa testovanie namáčaním v teplej vode po dobu až 1 000 hodín alebo testovanie pri vysokej vlhkosti a koncentrácii solí v okolí. Nasleduje cyklická prevádzka pri vysokých a nízkych teplotách. Ak sú tieto testy úspešné, lepidlo sa podrobí ďalšiemu statickému a dynamickému hodnoteniu vlastností a nakoniec samotným letovým testom. Akákoľvek zmena v zložení lepidla, zloženia adherentu, prípravy adherentu alebo iný súvisiaci proces si vyžaduje opätovné kvalifikačné skúšky [2].

### 2.1. Princíp fungovania lepených spojov

Súdržnosť lepených spojov je zaručená vďaka adhézny a kohézny silám znázorneným na obrázku 1, kde kohézia je vlastná súdržnosť lepidla a adhézia zahŕňa všetky elementárne procesy na rozhraní, ktoré spôsobujú, že dva pevné materiály držia spolu. Toto rozhranie vzniká, keď sa nekovový lepiaci materiál v kvapalnom stave (adhézny materiál) dostane do kontaktu s pevným materiálom (adherentom) a následne stuhne alebo vytvrdne. Pri tesnom kontakte medzi zmáčateľnými molekulami lepidla a povrchom pevnej látky vznikajú príťažlivé sily buď ako fyzikálne medzimolekulárne interakcie (Van der Waalove sily), chemické väzby alebo ako elektrická dvojvrstva, ktorá sa vytvára pohyblivými nábojmi, ktoré sa vzájomne rozptyľujú pri kontakte v dôsledku počiatočného rozdielu elektrochemických potenciálov medzi lepidlom a adherendom. Tieto tri typy interakcií tvoria základné adhézne procesy [3]



Obrázok 1 Adhézne a kohézne sily v lepenom spoji (upravené) [16]



## 2.2. Využitie v letectve

Lepenie konštrukcií lietadiel sa používa už viac ako 70 rokov a stále sa používa aj na súčasných lietadlách ako alternatíva nitovania. V leteckom priemysle sa využíva na konštrukčné aj nekonštrukčné aplikácie a na trhu sa rozlišujú primárne a sekundárne konštrukčné aplikácie. Rozdielom je že, zlyhanie spoja v primárnej konštrukcii bude mať za následok stratu lietadla, zatiaľ čo zlyhanie v sekundárnej konštrukcii bude mať za následok len lokálne poškodenie. Konštrukčné lepidlá sa používajú v oboch prípadoch. Tieto lepidlá, ktoré sú vo väčšine prípadov epoxidy a epoxidové hybridy, sa používajú na výrobu ľahkých voštinových panelov a na zhotovenie vysoko namáhaných spojov pre účely ako napríklad vystuženie plechov alebo lepenie rôznych laminátov. V leteckom priemysle sú ako materiál najviac využívané zliatiny hliníka, v špeciálnych prípadoch zliatiny titánu. Hlavný trend v tomto odvetví, je taktiež používanie ľahkých kompozitov kvôli úspore paliva. Napríklad 25% hmotnosti lietadla Airbus A380 (obrázok 2) a viac ako 50% hmotnosti lietadla Boeing 787 Dreamliner tvoria kompozity. Jedinou účinnou metódou spájania týchto materiálov je ich lepenie. [2]



Obrázok 2 Lepené spoje na lietadle Airbus A380 (upravené) [17]

Lepenie sa používa najmä na pripevnenie pozdžníkov k trupu a poťahom krídel, aby sa konštrukcie vystužili proti vybočeniu. Používa sa aj na výrobu tuhých ľahkých konštrukcií z kovových voštinových jadier vnútri kovových plášťov pre konštrukcie ovládacích a brzdiacich plôch a prostriedkov na zvýšenie vztlaku ako výškoviek, krídelok alebo spojlerov. Vnútorne súčasti lietadla kabíny sú tiež lepené. Tie sa často považujú za sekundárne konštrukčné aplikácie a zahŕňajú podlahové panely a stropné priestory. Tieto súčasti sú potom nielen ľahké, ale aj tuhé a pevné. [4]



Lepené opravy leteckých kompozitných konštrukcií sú využívané vďaka vysokej miere obnovy pevnosti, ktorú môžu dosiahnuť pri zachovaní vysokého pomeru pevnosti k hmotnosti. Na opravy nosných konštrukcií sú najvhodnejšie škárové a stupňovité opravy, pretože poskytujú maximálnu účinnosť pri zachovaní hladkého aerodynamického povrchu. [5]

Lepidlá vždy zohrávali významnú úlohu v leteckom a kozmickom priemysle, predovšetkým preto, že ponúkajú nízku hmotnosť, odolnosť voči únave a aerodynamicky najvhodnejší spôsob montáže. Lepenie je tiež menej náročné na prácu a náklady, keď sa používa na veľké konštrukcie, ako sú tie, ktoré sa bežne používajú pri výrobe lietadiel. V mnohých aspektoch sú letecký a lepiaci priemysel vo vzájomnom súlade. Moderné lietadlá by neboli realizovateľné bez použitia lepidiel a moderný priemysel lepidiel by pravdepodobne nepokročil bez leteckého priemyslu. Vývoj nových lepidiel a zlepšovanie lepených spojov bude zaručene pokračovať aj naďalej, kvôli neustálej potrebe znižovať hmotnosť lietadiel z dôvodu potreby nižších emisií. Potreba je aj zlepšiť odolnosť a bezpečnosť kvôli prísnejším legislatívam ale aj výrobné procesy pre zvýšenie produktivity v priemysle. [2]

### 2.3. Výhody a nevýhody lepených spojov

Hlavné dôvody úspechu lepenia v leteckom priemysle patrí skutočnosť, že lepené spoje musia mať životnosť rovnajúcu sa životnosti samotného lietadla, čiže viac ako 30 rokov, vysokú odolnosť voči dynamickému zaťaženiu a odolnosť voči extrémnym a niekedy veľmi rýchlym teplotným zmenám, od mínusových teplôt v stratosfére až po prízemné teploty v púštnom podnebí. Použitie technológie lepených spojov umožňuje aj mimoriadne ľahké konštrukcie vďaka vynikajúcemu pomeru pevnosti a hmotnosti lepidla a následnému použitiu ľahkých kovov, polymérnych kompozitov a voštinových alebo iných sendvičových štruktúr, ktoré umožňuje lepenie. Keďže lepidlá sú vytvorené z organických polymérov, majú zvyčajne nižšiu hmotnosť ako kovové spojovacie prvky alebo väčšina iných prídavných materiálov. Preto zostavy vyrobené pomocou lepidiel vážia menej ako zostavy vyrobené pomocou kovových spojovacích prvkov. [2]

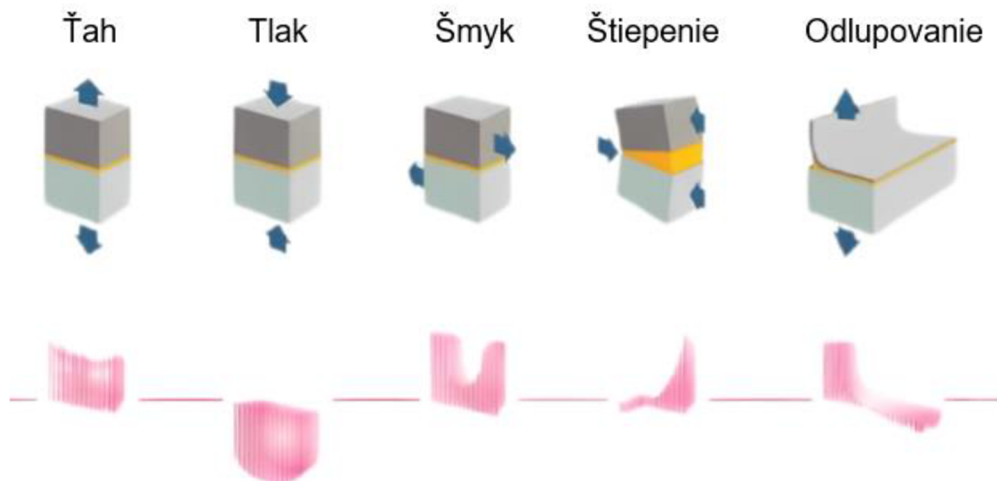
Lepenie má mnoho ďalších výhod, možnosť spájania materiálov s rôznymi vlastnosťami, možnosť spájania tenkých materiálov alebo veľkých plôch, možná kombinácia s inými metódami spájania (hybridný spoj), ochrana proti korózii, útlm vibrácií a fakt, že nedochádza k zásahom do konštrukcie spájaných prvkov. Lepiace spoje taktiež zabezpečujú vzduchotesné spojenia. Vyššia únavová životnosť spojov môže prípadne umožniť zníženie rozmerov plechu. Zvyšková pevnosť poškodenej konštrukcie, ktorá je lepená, môže byť vysoká a vo vrstvenom paneli môžu trhliny určitý čas rásť len v jednej vrstve a vo vystužených paneloch môžu trhliny rásť pomalšie cez lepenú plochu ako cez nitovanú líniu. Aerodynamická hladkosť povrchu lepenej konštrukcie je vynikajúca. [6][7]

Medzi nevýhody lepených spojov patria najmä nízka odolnosť voči zvýšenej teplote a delaminácii, potreba použitia dodatočných operácií súvisiacich s prípravou povrchu a veľmi rozsiahla kontrola procesu lepenia, obmedzené možnosti kontroly zhotoveného spoja a náchylnosť ku creepu. Teploty vytvrdzovania niektorých lepidiel môžu navyše degradovať iné komponenty. [1]



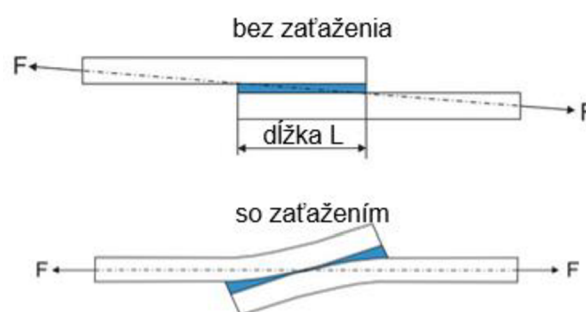
## 2.4. Spôsoby zaťažovania

Lepené spoje môžu byť vystavené 3 základným spôsobom namáhania, a to v ťahu, tlaku a šmyku [6]. Iné zdroje [8] uvádzajú medzi základné spôsoby namáhania aj ich kombinácie, ako je odlupovanie (šmyk-ohyb) alebo štiepenie. Lepidlá sú odolnejšie pri namáhaní šmykom, tlakom a ťahom. Zaťaženie štiepením a odlupovaním sú najzávažnejšie, pretože sústreďujú pôsobiacu silu do jednej línie a vytvárajú tak špičku v napätí. Priebehy napätí v jednotlivých prevedeniach sú zobrazené na obrázku 3.



Obrázok 3 Spôsoby zaťažovania lepeného spoja a príslušné priebehy napätia (upravené) [18]

Hlavnou funkciou lepených spojov je prenos zaťaženia šmykom a väčšina analýz lepených spojov je preto aj takto orientovaná. Spoj je teda potrebné navrhnuť tak, aby zaťažujúce napätia smerovali pozdĺž smeru najvyššej pevnosti lepidla a teda aby boli namáhané primárne na šmyk. V niektorých spojoch však vznikajú pridružené odlupovacie napätia z dôvodu excentrickosti dráhy šmykového zaťaženia cez spoj zobrazené na obrázku 4. Iné sú zas v skutočnosti vystavené vonkajším silám vyvolávajúcim odlupovacie zaťaženie. Keďže lepené spoje sú prirodzene slabé v odlupovaní a kompozitné lamináty sú ešte slabšie v medzilamelovom ťahu, je mimoriadne dôležité minimalizovať tieto nepriaznivé vplyvy pri návrhu a zabezpečiť, aby boli pri analýze zohľadňované najkritickejšie podmienky. Na dosiahnutie maximálnej účinnosti a istoty by sa lepené spoje mali navrhovať v súlade so zásadami opísanými v nasledujúcej kapitole.[6]

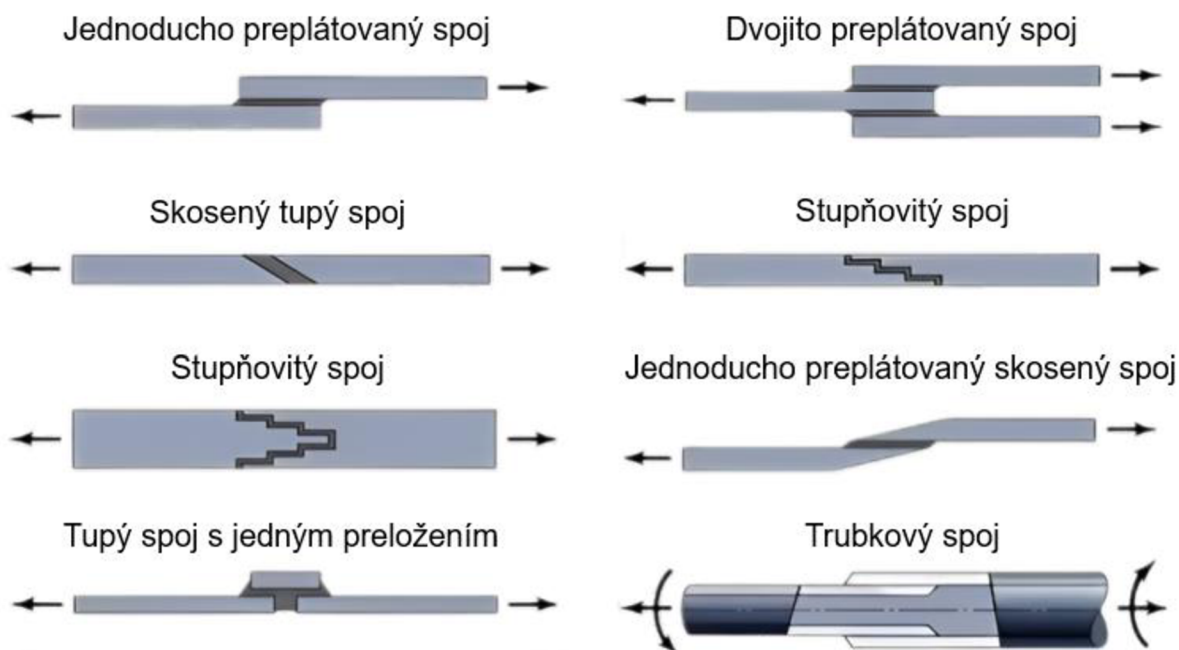


Obrázok 4 Odlupovanie z dôvodu excentrickosti zaťažovacej dráhy (upravené)[19]



## 2.5. Prevedenia lepených spojov

Základnými typmi lepidiel používaných v leteckom priemysle sú epoxidové konštrukčné fóliové lepidlá ako aj tekuté a pastové lepidlá. Vo všeobecnosti sa tieto lepidlá vytvrdzujú pri teplotách najmenej 120 °C, aby bola dosiahnutá hustota zosieťovania hmoty potrebná na dosiahnutie maximálnej pevnosti a teplotnej a chemickej odolnosti. Pevnosť v šmyku, ktorú možno dosiahnuť, je približne 20 MPa (statická) a 1 MPa (dynamická) [6]. Pri lepení pevných materiálov je nutné prispôbiť jednotlivé časti tak, aby bol dosiahnutý primeraný geometrický povrch spoja. To sa dosiahne tak, že na jeho pevnosti sa bude podieľať maximálne percento lepenej plochy. Na jeho dosiahnutie je taktiež potrebné aby boli spojované plochy čo najmenej zložitú a aby bol spoj zaťažovaný prevažne namáhaním v ťahu a v šmyku, teda v smere svojej maximálnej pevnosti. Napätie by sa malo naopak minimalizovať v smere, v ktorom je lepidlo najslabšie, a to v odlupovaní a štiepení, pretože tuhé lepidlá sú vo všeobecnosti v týchto zaťažovacích módoch najslabšie. Ak sa však takéto sily v spoji očakávajú, na zabezpečenie sa predurčí pevnosť v odlupovaní približne 4 N/mm. Pevnosť lepených spojov s jedným a dvomi preplátovaniami závisí predovšetkým od tuhosti laminátov konkrétneho lepeného spoja. Teória a skúšky navyše potvrdili, že najvyššie pevnosti sú dosahované, keď sa hrúbky oboch laminátov navzájom rovnajú [9]. Najčastejšie používané prevedenia lepených spojov sú zobrazené na obrázku 5.



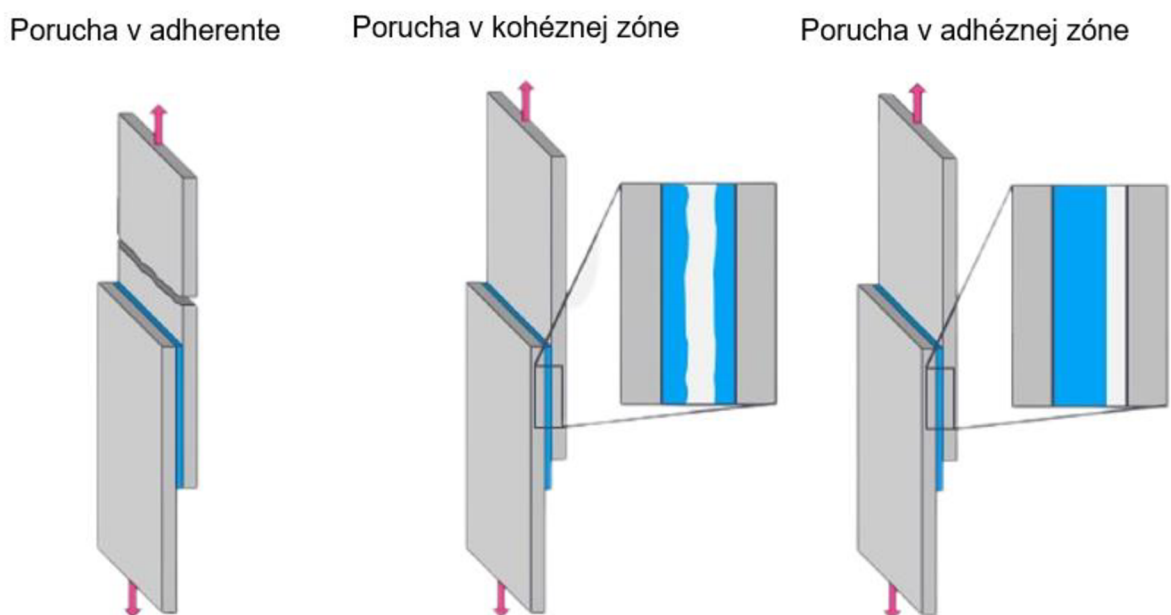
Obrázok 5 Konštrukcie lepených spojov (upravené) [20]





## 2.6. Mechanizmy porušenia spoja

Porušenie možno definovať ako neprilnavosť po vytvrdnutí, zníženú pevnosť lepidla alebo stratu prilnavosti v priebehu času. Keď sa vyskytne akýkoľvek problém, lepidlo je často jednou z prvých zložiek, ktoré sa skúmajú. Aby bola zistiteľná účinnosť a spoľahlivosť spoja musia byť známe mechanizmy jeho porušenia. Pre lepený spoj existujú 3 mikromechanizmy porušenia spoja (obrázok 6): porucha v kohéznej zóne, porucha v adhéznej zóne a trhlina v adherente [1]. Porucha v adhéznej zóne alebo delaminácia je jedným z najčastejších typov mechanizmov porušenia. Pri tejto poruche sa od seba oddeľujú dva rôznorodé materiály. K poruche môže dôjsť medzi lepidlom a ktorýmkoľvek z dvoch adherentov, ktoré spája. K poruche súdržnosti dochádza v samotnom lepidle alebo vo vnútri vrstvy náteru. Zlyhanie adherentu nesúvisí so samotným procesom lepenia, pretože ide o problém v materiáli adherentu [10].



Obrázok 6 Mechanizmy porušenia spoja (upravené) [21]

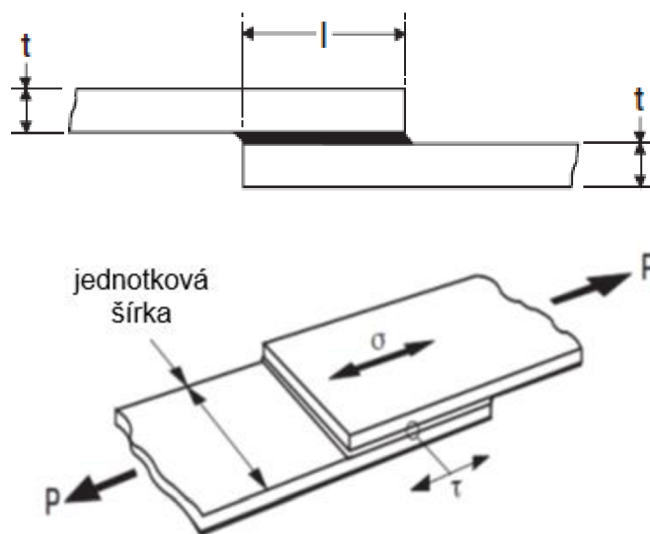


### 3. Pevnostná kontrola lepeného spoja pomocou analytického prístupu

#### 3.1. Pevnostná kontrola

Lepenie je zložitý proces, preto je veľmi ťažké predpovedať pevnosť spoja. Pevnosť lepených spojov ovplyvňujú materiálové, konštrukčné a technologické faktory. Najdôležitejšími materiálovými faktormi sú vlastnosti lepidla a lepených materiálov. Medzi konštrukčné faktory, ktoré závisia od štruktúry daného lepeného spoja, patria dĺžka presahu, jeho prípadné skosenie a hrúbka adherentov. Hlavné technologické faktory zahŕňajú spôsob prípravy povrchu adherentov, spôsob nanášania lepidla, ako aj teplotu a tlak počas procesu vytvrdzovania. Okrem toho by sa mali zohľadniť aj prevádzkové faktory, ako je charakter zaťaženia a jeho trvanie, prevádzková teplota a chemická reaktivita s okolitým prostredím. V nasledujúcich výpočtoch budú relevantné faktory zohľadňované a tým zistená optimálna dĺžka presahu pri pôsobiacom zaťažení na lepený spoj. [7]

Pre výpočet bude používané prevedenie jednoduché preplátovanie, ktoré je zobrazené na obrázku 7.



Obrázok 7 Jednoduché preplátovaný spoj (upravené)[22]

$$\text{Zaťaženie lepidla pri poruche: } P_l = S \cdot \tau = b \cdot l \cdot \tau \quad (1)$$

$$\text{Zaťaženie adherentu pri poruche: } P_a = S \cdot \sigma = b \cdot t \cdot \sigma \quad (2)$$

Kde: $\tau$ - priemerné šmykové napätie v spoji	[MPa]
$\sigma$ - priemerná pevnosť adherentu v ťahu	[MPa]
$b$ - šírka adherentu	[mm]
$l$ - dĺžka presahu spoja	[mm]
$t$ - hrúbka adherentu	[mm]
$P_{l,a}$ - sila na jednotku dĺžky spoja	[N/mm]



### 3.2. Optimálna dĺžka prekrytia

Je predpokladané využitie maximálneho potenciálu lepidla a preto musí strih v lepidle nastať v ten istý okamžik ako lom v kovovom pláte. Z tohto dôvodu sa zaťaženie pôsobiace na lepený spoj a adherent rovnajú. Tým sa zabezpečí, že nedôjde k žiadnej plastickej deformácii adherentov.

$$P_l = P_a$$
$$b \cdot l \cdot \tau = b \cdot t \cdot \sigma$$

Po nahradení šírky  $b$  jednotkovou dĺžkou  $= 1$ , je sila na jednotku šírky:

$$1 \cdot l \cdot \tau = 1 \cdot t \cdot \sigma$$
$$l \cdot \tau = t \cdot \sigma$$

Optimálna dĺžka prekrytia:  $l = \frac{t \cdot \sigma}{\tau}$  (3)

### 3.3. Vplyv faktorov na výpočet

Pre dosiahnutie požadovanej bezpečnosti sa berú do úvahy aj už spomínané faktory, ktoré budú nepriaznivo ovplyvňovať výpočet, napríklad geometria spoja, materiál adherentov alebo predpokladaná dynamika zaťažovania spoja počas letu. Tieto faktory väčšinou navýšia bezpečnosť na 1,5, teda o 50%. Preto návrhové napätie, ktorým môže byť zaťažovaný spoj, sa vypočíta ako podiel zmluvnej medze klzu materiálu a súčiniteľa pre zohľadnenie nepriaznivých faktorov.

$$\sigma = \frac{Rp_{0,2}}{f}$$

$$\sigma = \frac{Rp_{0,2}}{1,5}$$

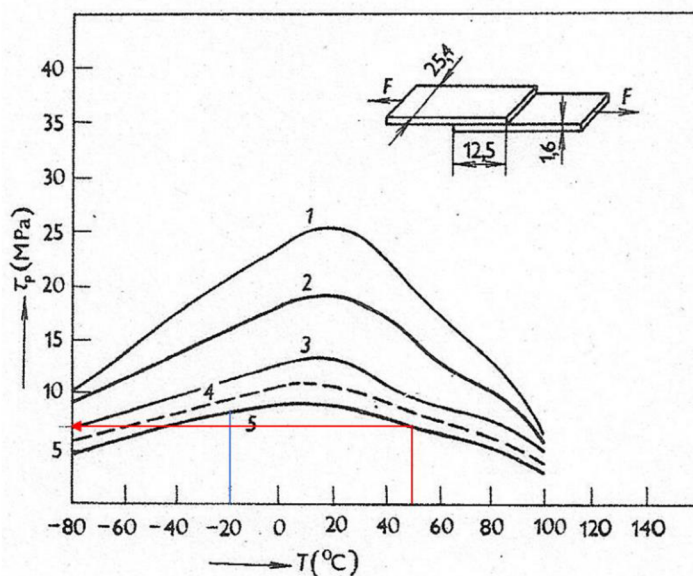
Kde:  $f$  - súčiniteľ pre zohľadnenie nepriaznivých faktorov  
 $\sigma$  - maximálne bezpečné návrhové napätie [MPa], za ktoré je dosadené  $Rp_{0,2}$ , čo je zmluvná medza klzu, aby bola zaistená rezerva pred prechodom do plastickej oblasti a teda aby nedošlo k plastickej deformácii

Ako  $Rp_{0,2}$  je braná hodnota medze klzu kovového materiálu Alclad 2024-T3 a to  $Rp_{0,2} = 336$  MPa [11].



### 3.4. Pravdepodobnosť spoja a optimálne prekrytie

Pevnosť v šmyku je často oveľa nižšia v závislosti od použitého lepidla a prevádzkovej teploty. To znamená, že pevnosť lepidla musí mať aj určitý bezpečnostný faktor v dôsledku degradácie vplyvom teploty a vlhkosti a pravdepodobnosti poškodenia. Na ďalšej strane je obrázok 8 s diagramom pre lepidlo ChS Epoxy 1210 + P1; adherent Alclad 2024-T4, morenie; vytvrdzovanie 0.05 MPa/RT/3x24h, na ktorom bude opísané ako by sa odčítali hodnoty, keď je k dispozícii diagram pre lepidlo s krivkami zodpovedajúcimi rôznym hodnotám pravdepodobnosti poškodenia spoja.



Obrázok 8 Diagram šmykového napätia pri danej teplote a spoľahlivosti spoja [1]

Kde:  $\tau$  - maximálne šmykové napätie v spoji (os y) [MPa]  
 $T$  - teplota okolitého prostredia (os x) [°C]

Krivky v diagrame znázorňujú:

- 1 – Pravdepodobnosť poškodenia 95 %,
- 2 – Pravdepodobnosť poškodenia 50 %,
- 3 – Pravdepodobnosť poškodenia 5 %,
- 4 – Pravdepodobnosť poškodenia 0.01 %,
- 5 – 2/3 z hodnoty 3, pravdepodobnosť poškodenia je  $\ll 0.01$  %)

Maximálne napätie v šmyku je vysoké ale kvôli zvýšeniu bezpečnosti je nutné pri návrhu použiť krivku 5, teda pravdepodobnosť poškodenia je menej ako 0,01% a uvažované teplotné rozpätie pre okolité prostredie je pri subsonických lietadlách medzi teplotami -20°C až 50°C. Takže bezpečná hodnota napätia v šmyku je pri odčítaní nižšia z dvoch hodnôt a to 7 MPa.

Výrobca lepidla Loctite EA3430, ktoré bude používané pre modelovanie však v technickom liste[12] uvádza graf len pre nízkouhlíkatú ocel, ktorý nemôže byť uvažovaný vzhľadom k rozličnosti vlastností v závislosti na použítom materiáli.



V technickom liste [12] je však uvedená tabuľka s hodnotami pevnosti v šmyku pre teplotu 22°C pre viacero materiálov. Keďže modelovaný materiál je hliníková zliatina, budú používané hodnoty pre hliník. Pre ten sú uvedené dve hodnoty rozdelené podľa povrchovej úpravy. Použitá bude hodnota pevnosti v šmyku 14 MPa pre brúsený hliník, pretože pri modelovaní bude uvažovaná povrchová úprava tryskaním abrazívom, ktorá je invazívnejšia ako otrieanie povrchu isopropylalkoholom, čo je druhý variant pre hliník uvedený v tabuľke.

Pre navrhnutú hrúbku adherentu a maximum napätia lepidla v šmyku je možné navrhnúť optimálnu dĺžku prekrytia za podmienky súčasného porušenia lepidla a adherentu.

Potom optimálna dĺžka prekrytia je:

$$l = \frac{t \cdot \sigma}{\tau} = \frac{t \cdot \frac{Rp_{0,2}}{1,5}}{\tau} = \frac{2 \cdot \frac{336}{1,5}}{14} = 32 \text{ mm}$$

Modelovaná a počítaná bude však dĺžka prekrytia 12,5 mm podľa ČSN EN 1465 (66 8510)[13], do ktorej mi bol umožnený náhľad vedúcim bakalárskej práce, pre stanovenie pevnosti v šmyku pri ťahovom namáhaní preplátovaných lepených zostáv. Táto hodnota je unifikovaná a neberie ohľad na odlišný vplyv rôznych lepidiel na spoj. Pomocou upraveného vzťahu (3) môže byť následne vyjadrené napätie v adherente, pri použitej dĺžke prekrytia 12,5 mm.

$$\sigma = \frac{\tau \cdot l}{t} = \frac{14 \cdot 12,5}{2} = 87,5 \text{ MPa}$$

$$RF = \frac{Rp_{0,2}}{\sigma} = \frac{336}{87,5} = 3,84$$

Súčiniteľ rezervy RF pre napätie v adherentoch je 3,84; čo znamená, že aplikované napätie je 3,84-krát nižšie než zmluvná medza klzu materiálu.

### 3.5. Veľkosť sily pri porušení

Ako prvé je potrebné zistiť, či dôjde k poruche tým, že súčiniteľ rezervy RF pevnosti v šmyku z technického listu lepidla Loctite EA 3430 ku šmykovému napätiu pri použití upraveného vzťahu (3) bude menší ako 1. Pomocou upraveného vzťahu (3) môže byť vyjadrené šmykové napätie v spoji  $\tau_1$ , pri použitej dĺžke prekrytia 12,5 mm.

$$\tau_1 = \frac{t \cdot \sigma}{l} = \frac{t \cdot \frac{Rp_{0,2}}{1,5}}{l} = \frac{2 \cdot \frac{336}{1,5}}{12,5} = 35,84 \text{ MPa}$$

Potom sa súčiniteľ rezervy rovná:

$$RF = \frac{\tau}{\tau_1} = \frac{14}{35,84} = 0,39$$



Keďže je súčiniteľ rezervy menší ako 1, znamená to, že ak by sme spoj zaťažili na medzu klzu materiálu adherentov, tak by došlo k poruche spoja. Ďalej bude preto vypočítaná veľkosť sily zaťažujúcej adherenty, pri ktorej dôjde k poruche. Tá je spočítaná z upraveného vzťahu (1).

$$F_{max} = S \cdot \tau = b \cdot l \cdot \tau = 25 \cdot 12,5 \cdot 14 = 4375 \text{ N}$$

V modeli bude ako zaťažujúca uvažovaná sila  $F_{max}$ .

### 3.6. Koncentrácia napätia v lepenom spoji

Základom pre túto kapitolu je jednoduchý skúšobný model, ktorý predstavuje problém prenosu napätia cez vrstvu lepidla zaťaženú primárne na strih. Predpokladá sa, že v reálnej konštrukcii existujú aj sekundárne napätia, ako je napríklad ťah. Tie budú v reálnych podmienkach zohľadňované, pretože ovplyvňujú zaťaženie pri poruche a tiež platnosť skúšok pre získanie prípustných napätí. Tento model je zjednodušený a tak sa zaoberá len šmykovými napätiami za predpokladu, že sekundárne napätia nebudú ovplyvňovať ich pôsobenie. Model je znázornený na obrázku 9. Použitá konštrukcia sa nazýva zdvojená vrstva alebo zdvojený plášť, pretože pozostáva z nekonečne dlhej vrstvy zdvojenej druhou veľmi dlhou vrstvou, ktorá je k nej pripevnená lepidlom.[14]

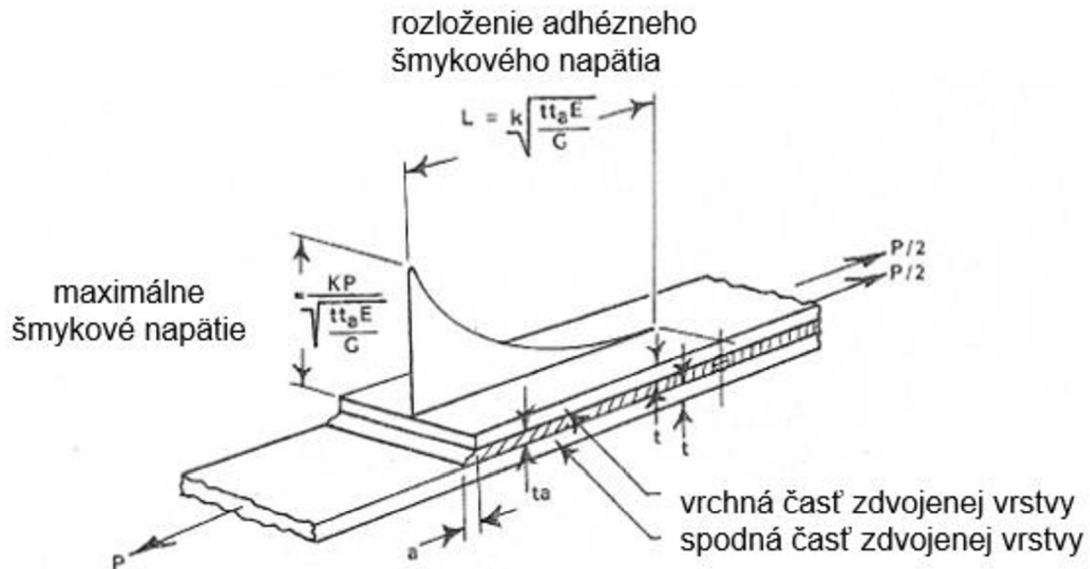
Keď sa spodná vrstva zaťaží ťahovým napätím, lepidlo prenáša toto napätie do vrchnej vrstvy a núti ju k deformácii. Tá pretrváva až kým sa nevyrovná s deformáciou spodnej vrstvy plášťa. V tomto okamžiku už nie je potrebné ďalej zaťažovať vrchnú vrstvu, a tak šmyková sila v lepidle vyrovná klesne nulu. Je tiež vidieť, že šmyková sila v lepidle je maximálna na začiatku tejto zdvojenej vrstvy, teda tvorí v nej špičku napätia. Toto rozloženie napätí a deformácií je typické pre lepený spoj a je závislé na tuhosti lepidla a adherentov.[14]

Ak sa všetky parametre považujú za lineárne, to znamená konštantnú hrúbku kovu, konštantnú hrúbku vrstvy lepidla, hodnoty modulov rovnaké v celom rozsahu zaťaženia atď., vzťah pre maximálne adhézne šmykové napätie v lepidle a vzdialenosť potrebnú na to, aby adhézne napätie zaniklo na nulu, možno vyjadriť v tvare znázornenom na obrázku 9. [14]

Tieto dve hodnoty sa odvíjajú od tuhosti lepidla. Ak sa zníži modul pružnosti v šmyku  $G$ , zníži sa maximálne adhézne šmykové napätie a to bez zmeny celkového zaťaženia konštrukcie, pretože sa rozloží na dlhšiu časť preplátovania. Lepidlo ako spojovací prvok teda vykazuje veľmi jedinečné správanie. Jeho špičkové napätie v spoji sa mení so zmenami jeho tuhosti, napríklad teplotou alebo hrúbkou vrstvy lepidla, pričom sa nemení celkové zaťaženie konštrukcie. [15]



Na základe vzorcov na obrázku 9 možno konštatovať, že s rastúcou hrúbkou kovových adherentov rastie aj šmykové napätie v lepidle. To je z dôvodu, že hrubší plášť dokáže prenieť väčšie zaťaženie. To znamená, že správny návrh spoja zahŕňa obmedzenie hrúbok ako spodnej tak aj vrchnej vrstvy. Ak sa pri navrhovaní spoja trvá na hrubých adherentoch, tie musia mať upravené čelá a to buď ich postupným odstupňovaním alebo skosením ako je zobrazené na obrázku 5 Jednoduchou preplátovaným skoseným spoj. [15]



Obrázok 9 Rozloženie adhézneho šmykového napätia vo zdvojenej vrstve (upravené) [14]

Kde: P - zaťaženie na jednotku šírky spoja	[N/mm]
t- hrúbka adherentu	[mm]
t <sub>a</sub> - hrúbka vrstvy lepidla	[mm]
E- modul pružnosti v ťahu adherentov	[MPa]
G- modul pružnosti v šmyku lepidla	[MPa]
L- dĺžka pôsobenia napätia	[mm]
$\tau_{max}$ - špička šmykového napätia v spoji	[MPa]

Zo vzťahov je tiež vidieť, že napätie v lepidle sa zvyšuje so znižujúcou sa hrúbkou vrstvy lepidla. To je potenciálne nebezpečné, pretože vytlačenie lepidla na okraji zdvojenej vrstvy lokálne znižuje hrúbku vrstvy lepidla priamo v kritickej oblasti. Prítomnosť nosiča v lepidle môže byť výhodná, pretože zabraňuje vzniku tenkých línií lepidla. [14]



Neznáme  $L$  a  $\tau_{max}$  sa dajú numericky určiť podľa empiricky získaných vzťahov z (1)

$$\tau_{max} = \frac{K \cdot P}{\sqrt{\frac{t \cdot t_a \cdot E}{G}}}$$

$$L = \sqrt[k]{\frac{t \cdot t_a \cdot E}{G}}$$

Pre rovnakú hrúbku hornej a spodnej vrstvy plášt'a platí, že  $K = 0,71$  a  $k = 2,82$  a veľkosti veličín pre mnou uvažovaný model sú nasledovné:

Horná a spodná vrstva - Alclad 2024-T3,  $E = 70750$  MPa,  $t = 2$  mm.

Zaťaženie na jednotku hrúbky spoja  $P = 175$  N/mm

Modul pružnosti v šmyku  $G$  bol vyjadrený pomocou vzťahu:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \mu)} = \frac{3210}{2 \cdot (1 + 0,3)} = 1234,6 \text{ MPa}$$

Poissonovo číslo lepidla bolo po konzultácii s vedúcim bakalárskej práce zvolené ako  $\mu=0,3$ . Lepidlo - Loctite EA 3430,  $G=1234,6$  MPa,  $t_a = 0,1$  mm.

$$\tau_{max} = \frac{0,71 \cdot 175}{\sqrt{\frac{2 \cdot 0,1 \cdot 70750}{1234,6}}} = 36,7 \text{ MPa}$$

$$L = \sqrt[2,82]{\frac{2 \cdot 0,1 \cdot 70750}{1234,6}} = 2,37 \text{ mm}$$



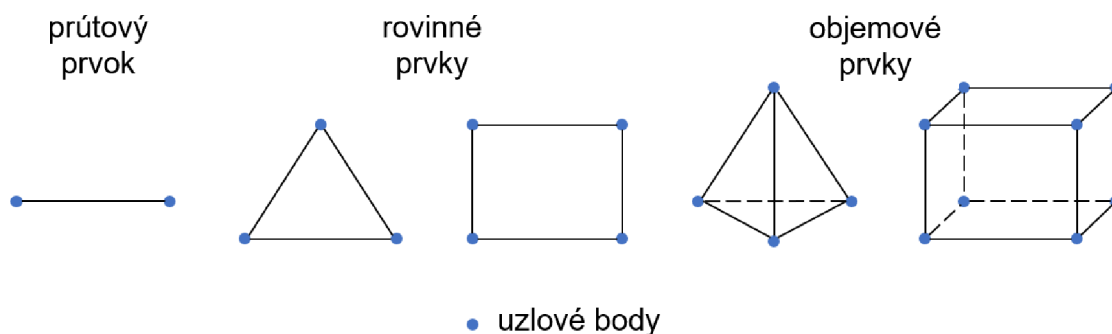


## 4. Úvod do metódy konečných prvkov

Použitie analytických metód na riešenie problémov lepených spojov sa stáva zložitým alebo až nemožným s rastúcou zložitosťou spojov. Preto je potrebné použiť numerické metódy, ako napríklad metódu konečných prvkov (ďalej MKP), na správne predpovedanie správania lepených spojov.

### 4.1. Princíp MKP

Metóda konečných prvkov je numerická metóda vhodná na riešenie problémov ako napríklad štruktúrne analýzy, prenos tepla, prúdenie tekutín a iné. V prípade modelov pozostávajúcich z komplikovanej geometrie, zaťaženia a vlastností materiálov nie je možné získať analytické riešenia odozvy. Tie si vyžadujú riešenie diferenciálnych rovníc, ktoré sa vzhľadom na komplikovanosť modelu nedajú získať. Preto sa musíme spoliehať na numerické metódy, ako je napríklad metóda konečných prvkov, ktoré dokážu aproximovať riešenie týchto rovníc. Výsledkom riešenia problému metódou konečných prvkov je sústava algebraických rovníc. Numerické metódy poskytujú približné hodnoty neznámych v diskretnom počte bodov. Preto sa tento proces modelovania telesa jeho rozdelením na sústavu menších telies (konečných prvkov) prepojených v bodoch spoločných pre dva alebo viac prvkov (uzlové body) nazýva diskretizácia. Príklad týchto konečných prvkov je zobrazený na obrázku 10. Riešenie konštrukčných problémov sa zvyčajne týka určenia posunov v každom uzle a napätí v každom prvku tvoriacom konštrukciu, ktorá je vystavená pôsobeniu zaťaženia.



Obrázok 10 Typy konečných prvkov

Keďže ide o aproximáciu riešenia závislej na vhodnej voľbe diskretizácie, budú tieto výsledky porovnávané s výsledkami analytického prístupu vyčíslených v predošlej kapitole.

### 4.2. Výpočtový software

Pre výpočet vo svojej práci používam software MSC.Patran a MSC.Nastran, ktorých licencie by bolo umožnené používať na Leteckom ústave VUT v Brne.

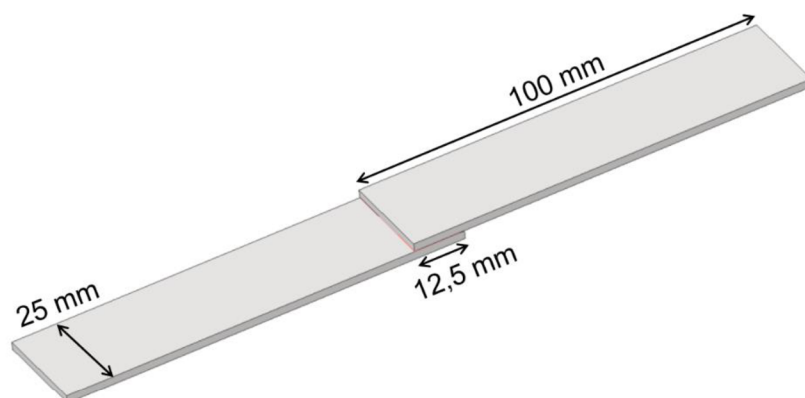


## 5. Vytvorenie modelu lepeného spoja v MKP programe

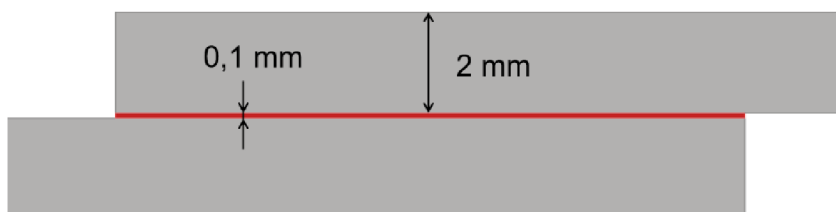
Pre zistenie rozloženia napätí a deformácií v spoji boli vytvorené 2D a 3D výpočtové modely v programe MSC.Patran a lineárne napäťovo deformačné analýzy boli následne numericky vypočítané v programe MSC.Nastran. Pre 3D model bola následne vypočítaná aj nelineárna úloha.

### 5.1. Geometria

Model bol vytvorený podľa článku poskytnutého vedúcim bakalárskej práce [11]. Rozmery vzorku sú zobrazené na obrázkoch 11 a 12.



Obrázok 11 Rozmery modelu

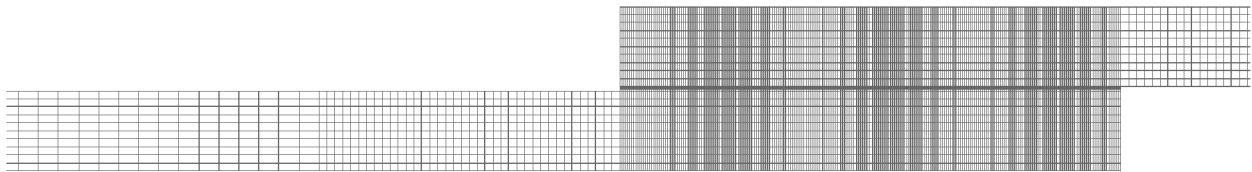


Obrázok 12 Hrúbky adherentu a lepidla detail

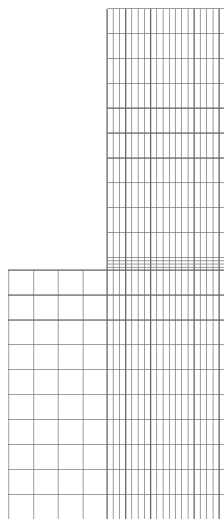


## 5.2. Mesh

Zvolená „mesh“ alebo sieť (obrázok 14) bola rovnaká pre 2D analýzu a z bočného pohľadu pre 3D analýzu, keďže 3D model bol vytvorený z predošlého 2D modelu pomocou funkcie „extrude“ a následne „mirror“ alebo vysunutie a zrkadlenie s hrúbkou elementov 0,5 mm s 25 elementami symetricky na obidve strany od plošnej 2D geometrie. Pre 2D model boli použité elementy „QUAD“ a pre 3D model boli zvolené elementy „HEX“. V oboch prípadoch boli skontrolované pomery strán vytvorených elementov a ich vhodnosť pre výpočet. Hustota siete bola najväčšia v oblasti preplátovania (obrázok 13), keďže ide o oblasť hlavného záujmu tejto analýzy a predpokladá sa tu najväčšia koncentrácia napätia. Dĺžka adherentov 7,5 mm od preplátovania na každú stranu mala o niečo menej hustejšiu sieť, aby bol plynulejší prechod do oblasti koncov adherentov kde boli v porovnaní so zvyškom modelu použité väčšie elementy, a nedošlo tak ku singularitám. Počty elementov a uzlov pre modely sú zobrazené v tabuľke 1. Veľkosti elementov pre adherent a lepidlo sú zobrazené v tabuľke 2.



Obrázok 14 Sieť modelu



Obrázok 13 Detail siete v oblasti preplátovania

Tabuľka 1 Počet elementov a uzlov

	elementy	uzly
<b>2D</b>	9960	10631
<b>3D</b>	498000	542181

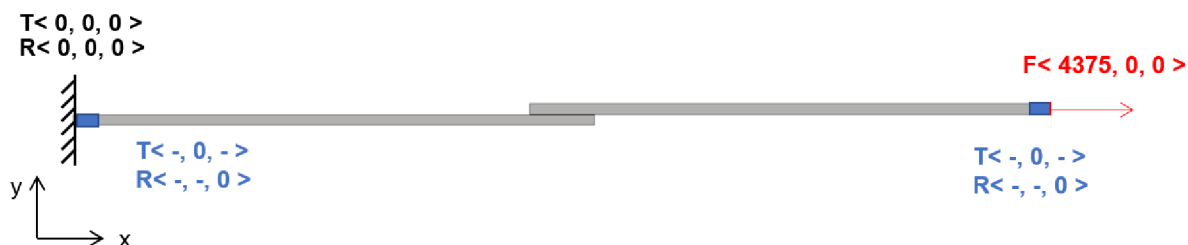


Tabuľka 2 Vlastnosti elementov

	šírka $b_e$ [mm]	výška $h_e$ [mm]	počet elementov na výšku
	<b>preplátovanie</b>		
adherent	0,05	0,2	10
lepidlo	0,05	0,025	4
	<b>prechodná oblasť</b>		
adherent	0,2	0,2	10
	<b>zvýšok adherentov</b>		
adherent	0,5	0,2	10

### 5.3. Okrajové podmienky

Okrajové podmienky zahŕňajú uloženie a zaťaženie modelu a boli navrhnuté podľa skúšky pevnosti v smyku podľa ČSN EN 1465 (66 8510) [13]. Všetky okrajové podmienky boli predpísané k uzlom siete MKP, keďže ide o väzbu typu „nodal“. Okrajové podmienky a zaťaženia sú znázornené na obrázku 15. Skúška spočíva v namáhaní lepeného spoja na smyk statickým ťahom pozdĺž horizontálnej osi, ktorý bol nahradený silou  $F$  o veľkosti 4375 N a ako miesto pôsobenia boli zvolené všetky uzly, ktoré tvoria pravú stranu vrchného adherentu. Skúšobná vzorka je pri reálnej skúške upnutá v čelustiach, tie boli v tomto prípade nahradené väzbou, ktorá obmedzuje transláciu v osi  $y$  a rotáciu zamedzuje okolo osi  $z$ . Ako miesto pôsobenia bolo zvolených 5 mm na voľných koncoch adherentov. Následne bol celému modelu zamedzený pohyb v osi  $z$  pre zachovanie rovinnosti úlohy. Ako posledná bola vzorka votknutá, keďže je pri numerických riešeniach dôležité aby bol model uložený nepohyblivo. Tým bola zamedzená translácia vo všetkých smeroch a taktiež aj rotácia. Ako miesto pôsobenia boli zvolené všetky uzly na ľavej strane spodného adherentu.



Obrázok 15 Aplikácia okrajových podmienok a zaťaženia

### 5.4. Materiál

Ďalším krokom bolo priradenie materiálových charakteristík jednotlivým prvkom. Adherentom bol priradený materiál Alclad 2024-T3 (hliníková zliatina) podľa [11], vlastnosti sú vypísané v Tabuľke 3. Lepidlu boli priradené charakteristiky epoxidového lepidla Loctite EA3430 [12], Poissonovo číslo  $\mu=0,3$  a Youngov modul  $E=3210$  MPa.

Tabuľka 3 Mechanické vlastnosti zliatiny hliníka Alclad 2024-T3

Poissonovo číslo $\mu$	Youngov modul $E$ [GPa]	Medza pevnosti v ťahu $R_m$ [MPa]	Zmluvná medza klzu $R_{p0,2}$ [MPa]
0,33	70,75	478	336



## 5.5. Typ analýzy

Ako prvá bola vykonaná lineárna analýza, ktorá bola zvolená pre jej rýchly výpočet a približné výsledky, ktoré sa obecné od skutočných veľmi nelíšia. Pre tento prípad bol vybraný riešič „SOL 101“. Pre najreálnejší výpočet úlohy je však zvolená ako druhá aj nelineárna analýza a pre tú je vybraný riešič „SOL 106“.

Po konzultácii s vedúcim bakalárskej práce bola zvolená geometrická nelinearita namiesto materiálovej. To znamená, že lepidlu nebudú predpísané nelineárne vlastnosti materiálu.

Nelineárna analýza prebieha tak, že je model zat'azovaný postupne s určeným počtom krokov, kým nedosiahne celkového zat'azenia. Dá sa tak lepšie sledovať ako model odpovedá na jednotlivé hodnoty zat'azenia. Zvolený počet krokov je 5, čo znamená, že zat'azenie bude pridávané po 20%.

## 5.6. Numerický výpočet

Do výpočtového programu MSC.Nastran sú potom naimportované údaje pomocou súboru bdf., ktorý bol vytvorený programom MSC.Patran. Z výpočtového programu je následne spätne naimportovaný súbor h5. Tento súbor je spracovaný programom MSC.Patran, kde môže byť vykonaná výsledná analýza.



## 6. Pevnostná kontrola lepeného spoja pomocou MKP

Pre všetky modely je uvažované a vykresľované napätie pomocou funkcie (prístupu) Max Shear.

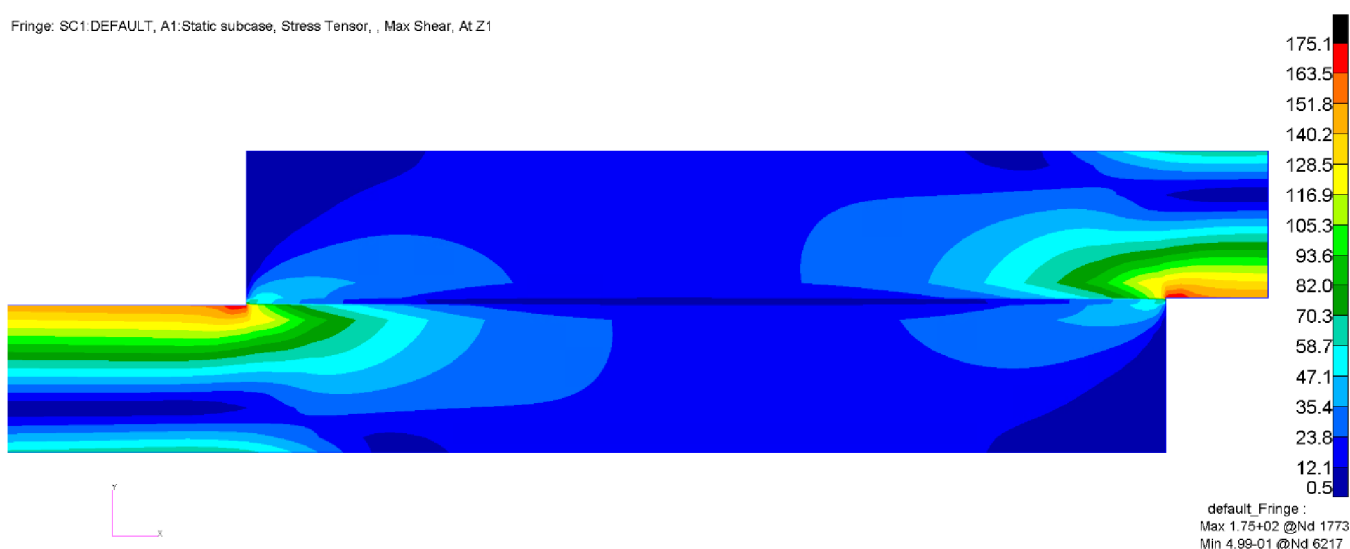
### 6.1. 2D lineárna analýza



Obrázok 16 Priebeh šmykového napätia na reálne zdeformovanej 2D vzorke

Ako je možné vidieť na obrázku 17, k najväčšej koncentrácii šmykových napätí na 2D vzorke dochádza presne na hrane lepeného spoja s hodnotou 175,1 MPa. Tá je zapríčinená odlupovaním spomenutým v podkapitole 2.4., ktoré vzniká z dôvodu excentrickosti zaťažovacej dráhy. Obrázok 16 zobrazuje symetrickosť samotného zaťaženia adherentov pred lepeným spojom.

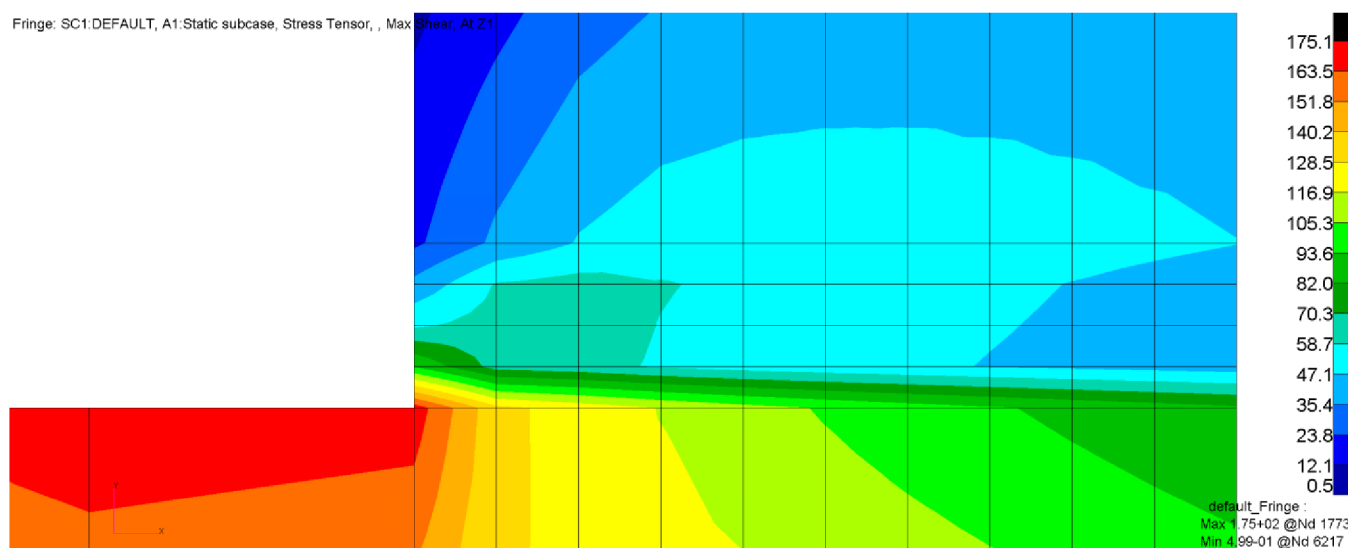
Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Static subcase, Stress Tensor, , Max Shear, At Z1



Obrázok 17 Priebeh šmykového napätia na 2D vzorke detail 1 (pohľad z boku)

Na obrázku 18 je zobrazený detail na čelo spoja, kde je vidieť postupné znižovanie napätia s približovaním sa do stredu spoja po jeho ako dĺžke, tak aj hrúbke. Minimum modelu je v strede lepeného spoja s hodnotou 0,499 MPa.

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Static subcase, Stress Tensor, , Max Shear, At Z1



Obrázok 18 Priebeh šmykového napätia na 2D vzorke detail 2 (pohľad z boku)



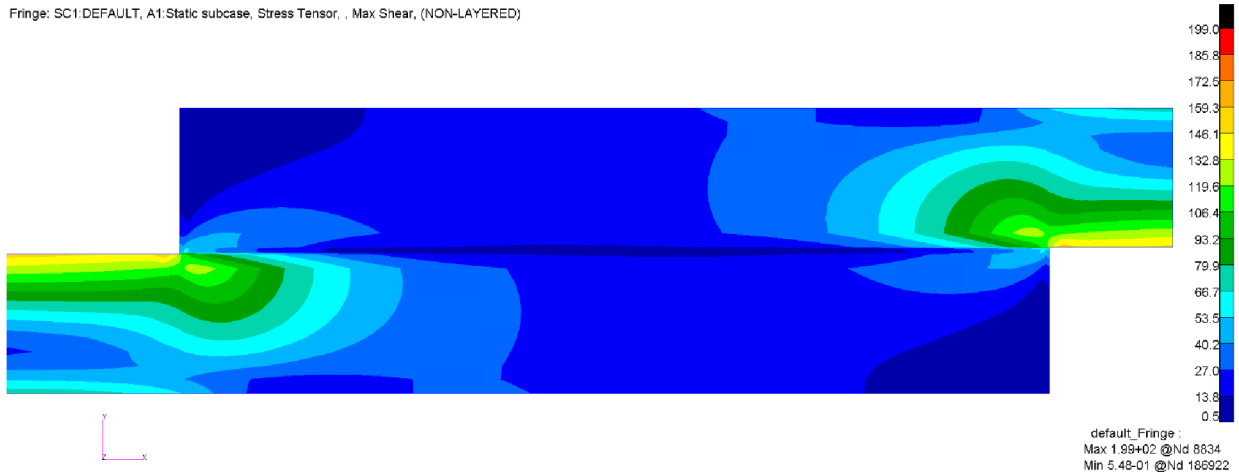
## 6.2. 3D lineárna analýza



Obrázok 19 Priebeh šmykového napätia na reálne zdeformovanej 3D lineárnej vzorke

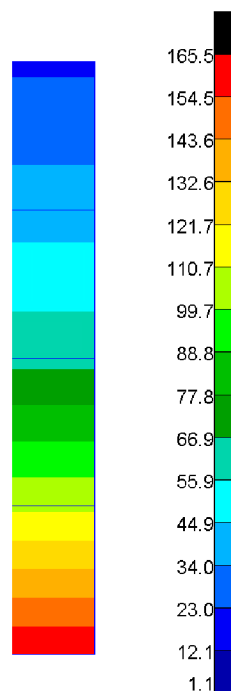
Z priebehu napätia (obrázky 19 a 20) je možné vidieť podobnosť s 2D analýzou v samotnom priebehu napätia. Najväčšie koncentrácie sú pred spojom v oblasti odlupovania, ale už je pozorovateľný posun špičky napätia ďalej od čela lepeného spoja než bol na 2D vzorke. Maximum modelu je 199 MPa. Stred lepidla je takmer nezaťažený oproti zbytku lepeného spoja s hodnotou 0,548 MPa, čo je aj globálne minimum modelu.

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Static subcase, Stress Tensor, , Max Shear, (NON-LAYERED)



Obrázok 20 Priebeh šmykového napätia na 3D lineárnej vzorke detail 1 (pohľad z boku)

Posun špičky napätia je viditeľný aj na obrázku 21. Samotné lepidlo má opäť maximum na hrane kde dochádza k najväčšiemu odlupovaniu od adherentu s hodnotou 165,5 MPa. Toto maximum však nie je viditeľné pohľadom z boku, pretože koncentrácia napätia nesiahá po celej šírke spoja.



Obrázok 21 Priebeh šmykového napätia na lepidle 3D lineárnej vzorky detail čela

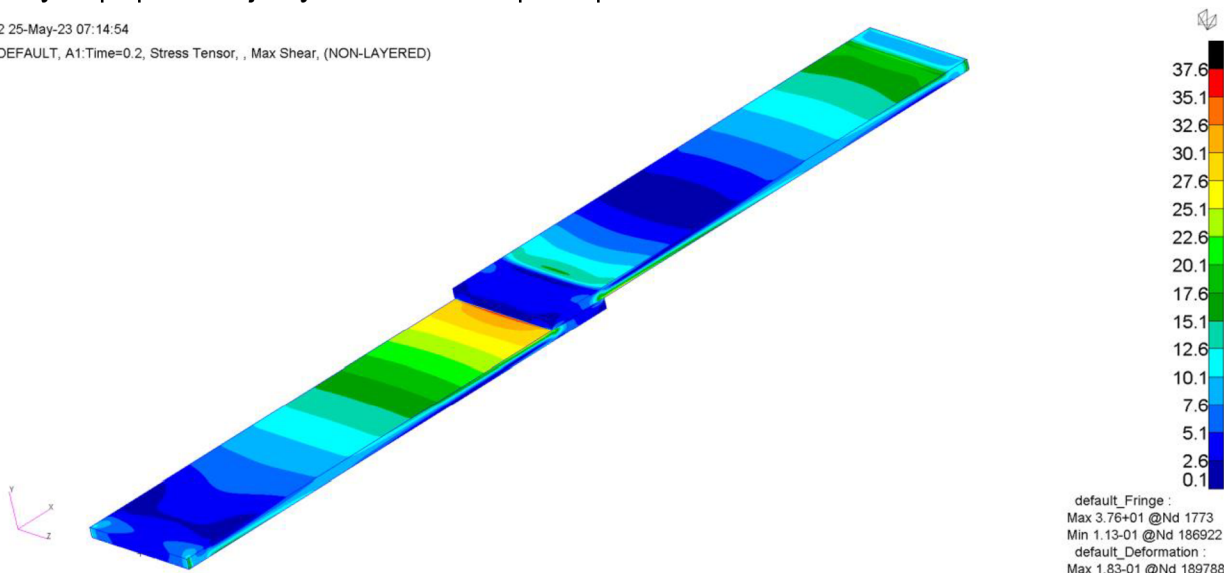


### 6.3. 3D nelineárna analýza

Ako bolo spomenuté v podkapitole 5.5 nelineárny model bol zaťažovaný v 5 krokoch a teda sila, ktorá naň pôsobila sa zvyšovala po 20%. Tento postup má za následok spresnenie výpočtu. Nasleduje sekcia, ktorá je venovaná spomenutým krokom a vo všetkých prípadoch je vykresľované napätie podľa MAX SHEAR.

Patran 2022.2 25-May-23 07:14:54

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.2, Stress Tensor, , Max Shear, (NON-LAYERED)

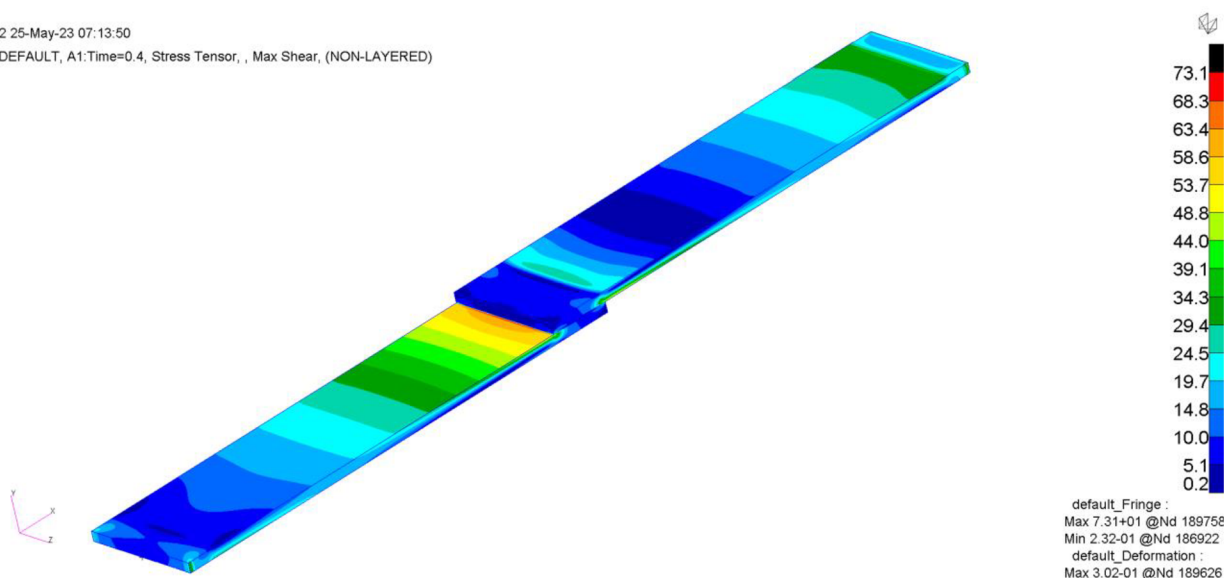


Obrázok 22 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke 20% zaťaženia

Začína sa na 20% zaťaženia, čo predstavuje hodnotu 875 N. Na obrázku 22 je znázornený priebeh napätia kedy maximum je 37,6 MPa a nachádza sa v blízkosti hrany pred lepeným spojom na povrchu spodného adherentu. Minimum je 0,113 MPa a nachádza sa v strede lepidla a taktiež na častiach adherentov, ktoré je možno vidieť na obrázku 22 znázornené najtmavšou modrou farbou.

Patran 2022.2 25-May-23 07:13:50

Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.4, Stress Tensor, , Max Shear, (NON-LAYERED)



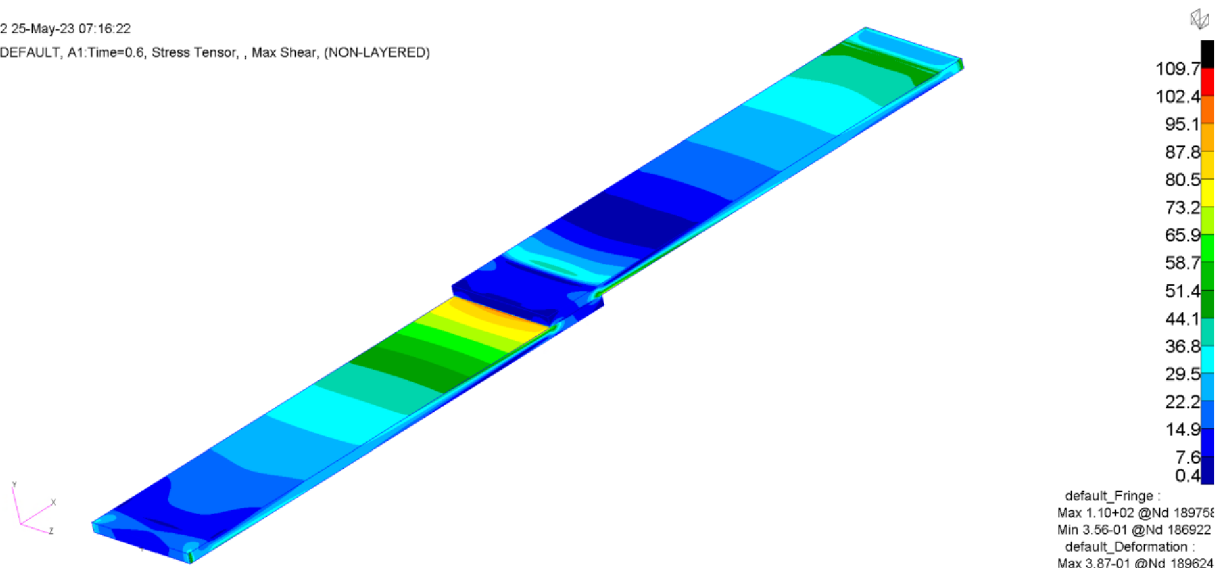
Obrázok 23 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke 40% zaťaženia

Nasleduje 40% zaťaženia, čo predstavuje hodnotu 1750 N. Na obrázku 23 je znázornený priebeh napätia kedy maximum je 73,1 MPa a nachádza sa v blízkosti hrany pred lepeným spojom na povrchu spodného adherentu. Minimum je 0,232 MPa a nachádza sa v strede lepidla a taktiež na častiach adherentov, ktoré je možno vidieť na obrázku 23 znázornené najtmavšou modrou farbou.





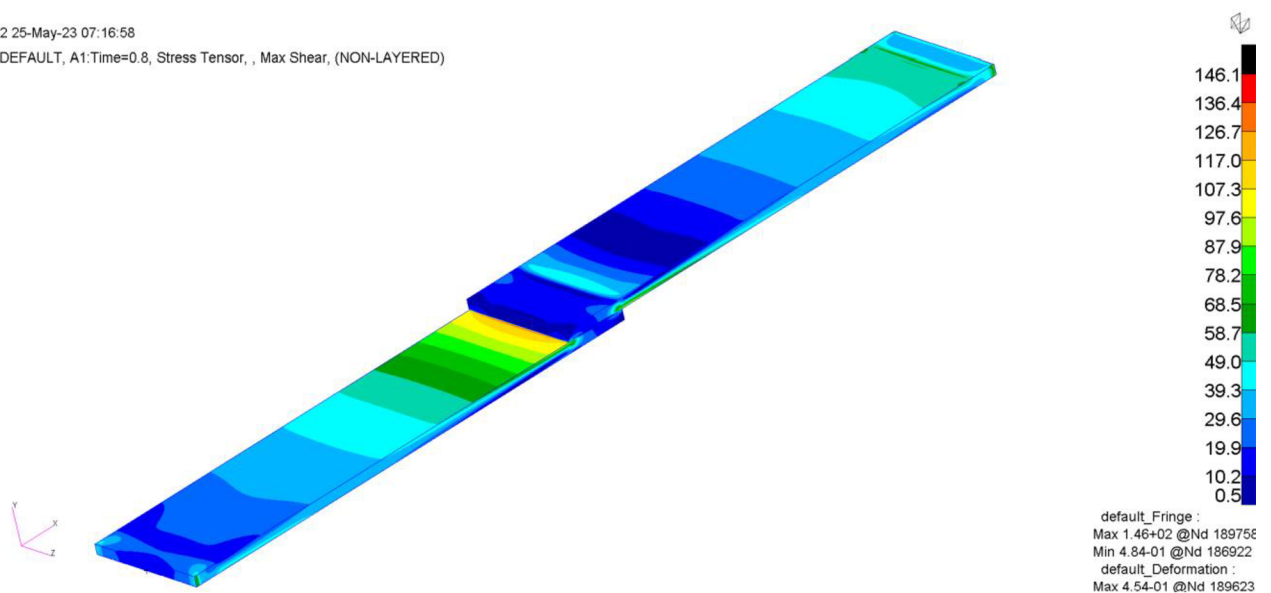
Patran 2022.2 25-May-23 07:16:22  
Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.6, Stress Tensor, , Max Shear, (NON-LAYERED)



Obrázok 24 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke 60% zaťaženia

Ďalej 60% zaťaženia, čo predstavuje hodnotu 2625 N. Na obrázku 24 je znázornený priebeh napätia kedy maximum je 109,7 MPa a nachádza sa v blízkosti hrany pred lepeným spojom na povrchu spodného adherentu. Minimum je 0,356 MPa a nachádza sa v strede lepidla a taktiež na častiach adherentov, ktoré je možno vidieť na obrázku 24 znázornené najtmavšou modrou farbou.

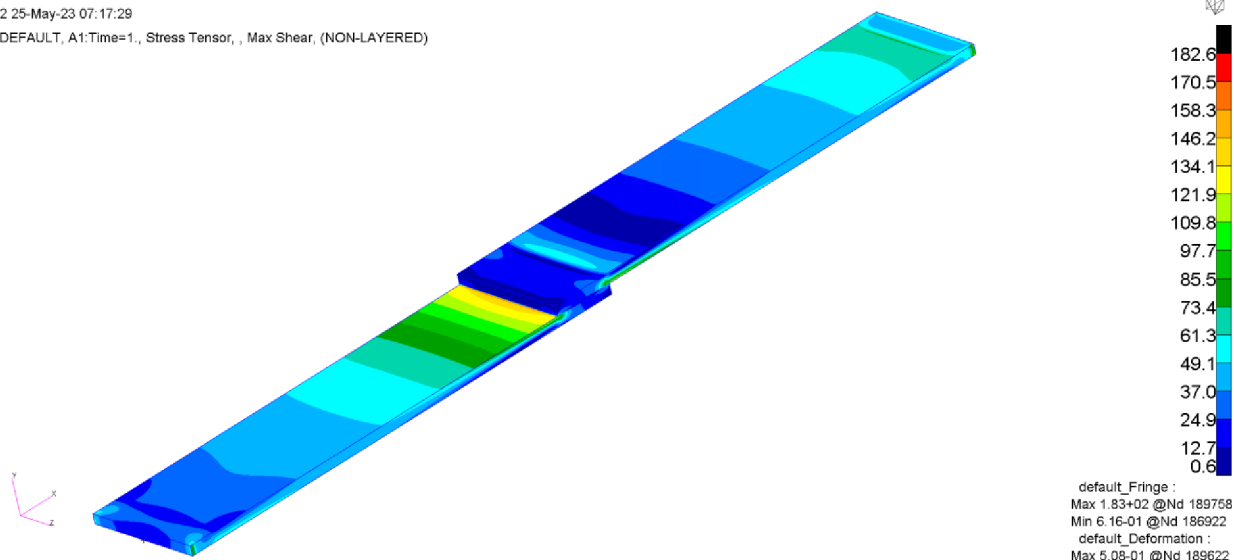
Patran 2022.2 25-May-23 07:16:58  
Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=0.8, Stress Tensor, , Max Shear, (NON-LAYERED)



Obrázok 25 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke 80% zaťaženia

Ďalej 80% zaťaženia, čo predstavuje hodnotu 3500 N. Na obrázku 25 je znázornený priebeh napätia kedy maximum je 146,1 MPa a nachádza sa v blízkosti hrany pred lepeným spojom na povrchu spodného adherentu. Minimum je 0,484 MPa a nachádza sa v strede lepidla a taktiež na častiach adherentov, ktoré je možno vidieť na obrázku 25 znázornené najtmavšou modrou farbou

Patran 2022.2 25-May-23 07:17:29  
Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Time=1., Stress Tensor, , Max Shear, (NON-LAYERED)



Obrázok 26 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke 100% zaťaženia

A posledných 100% zaťaženia, čo predstavuje finálnu hodnotu 4375 N. Na obrázku 26 je znázornený priebeh napätia kedy maximum je 182,6 MPa a nachádza sa v blízkosti hrany pred lepeným spojom na povrchu spodného adherentu. Minimum je 0,616 MPa a nachádza sa v strede lepidla a taktiež na častiach adherentov, ktoré je možno vidieť na obrázku 26 znázornené najtmavšou modrou farbou



## 7. Porovnanie kritických napätí

### 7.1. Porovnanie analytického výpočtu s 2D a 3D lineárnou analýzou

V analytickom výpočte boli spočítané 2 veličiny, ktoré charakterizujú lepený spoj a to maximálne šmykové napätie v spoji  $\tau_{\max}=36,7$  MPa a dĺžka  $L=2,37$  mm, na ktorej šmykové napätie pôsobí. Tieto hodnoty boli taktiež odčítané z priebehov šmykových napätí v MKP modeloch navrhnutých v MSC.Patran a numericky vypočítaných v MSC.Nastran. V tejto kapitole budú porovnávané len hodnoty z lineárnych MKP analýz.

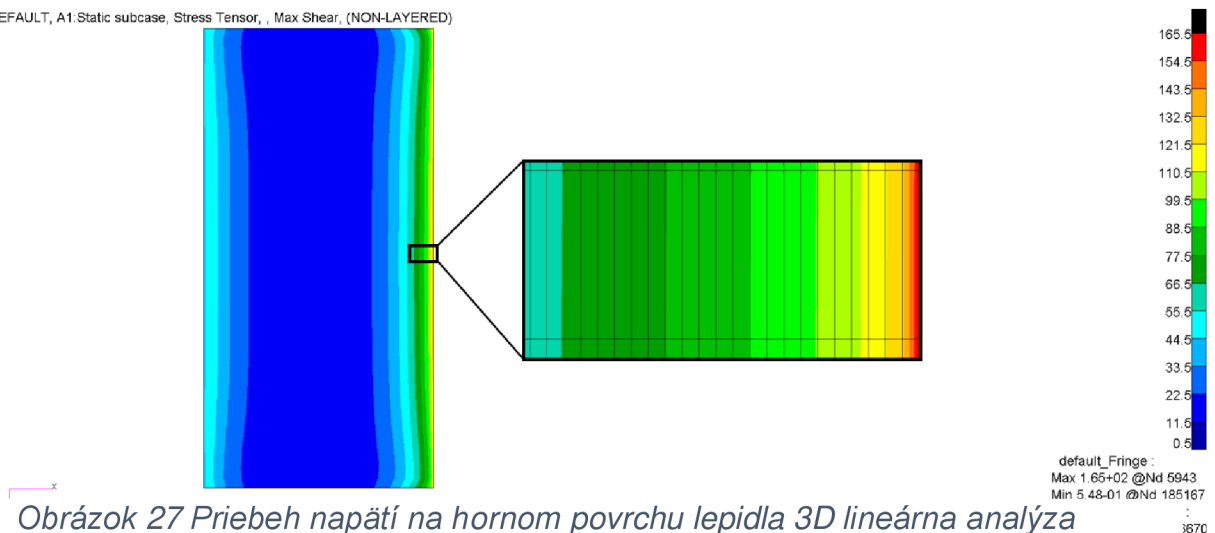
Ako je možné vidieť v kapitole 6 hodnoty šmykového napätia sa na čele lepeného spoja líšia nielen po jeho výške ale aj šírke a to od hodnôt blízkym maximu až po hodnoty blízke 0 MPa. Z tohto dôvodu nie je porovnávanie hodnôt odčítaných z modelov MKP s jednou analyticky vypočítanou hodnotou jednoznačné.

Analyticky vypočítané maximum je hodnota, ktorá sa len približuje skutočnému maximu pôsobiacemu len vo veľmi malých oblastiach. Analyticky spočítané maximálne napätia sú spravidla nominálne hodnoty, ktoré sa vyskytujú v kritickej oblasti pre násobené zvyšujúcimi súčiniteľmi pre zaistenie bezpečnosti a teda to nie sú absolútne maximá, ktoré sa v spoji môžu v realite vyskytnúť. Z tohto dôvodu nemôžu byť brané ako smerodajné pri navrhovaní lepeného spoja. Analyticky vypočítané hodnoty sa preto používajú len ako orientačné.

MKP model je však tiež len zjednodušením reality. V skutočnosti sa pred lepeným spojom, na hrane kde sa v našich prípadoch vyskytuje koncentrácia napätia nachádza zbytok vytlačeného lepidla, ktorý vzniká pri samotnom procese lepenia. Tento zbytok lepidla tvorí rádius, ktorý zjemňuje prechod hrúbky spoja z jedného adherentu na dva, a tak znižuje napätie vďaka nižšiemu súčiniteľu vrubu. MKP je metóda vhodná na detailné pozorovanie koncentrácií v jednotlivých oblastiach modelu.

Kvôli vyššie uvedeným dôvodom bude analyticky vypočítaná maximálna hodnota šmykového napätia porovnávaná s priebehmi napätí po dĺžke spoja odčítaných z 2D aj 3D MKP analýzy. Hodnoty boli odčítavané v dvoch rezoch preplátovania. Prvý z rezov je na hornom povrchu lepidla (obrázok 27) a druhý je v strednej rovine lepidla (obrázok 28). Napätie bolo aproximované pre každých 0,5 mm z 10 elementov, keďže je spoj diskretizovaný na každých 0,05 mm.

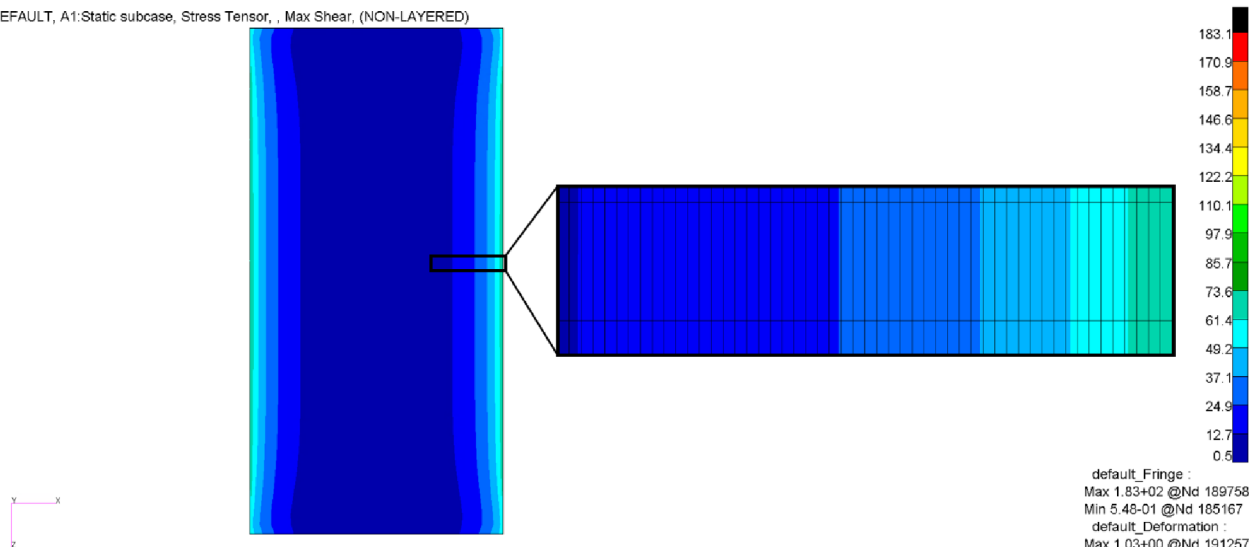
Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Static subcase, Stress Tensor, , Max Shear, (NON-LAYERED)



Obrázok 27 Priebeh napätí na hornom povrchu lepidla 3D lineárna analýza



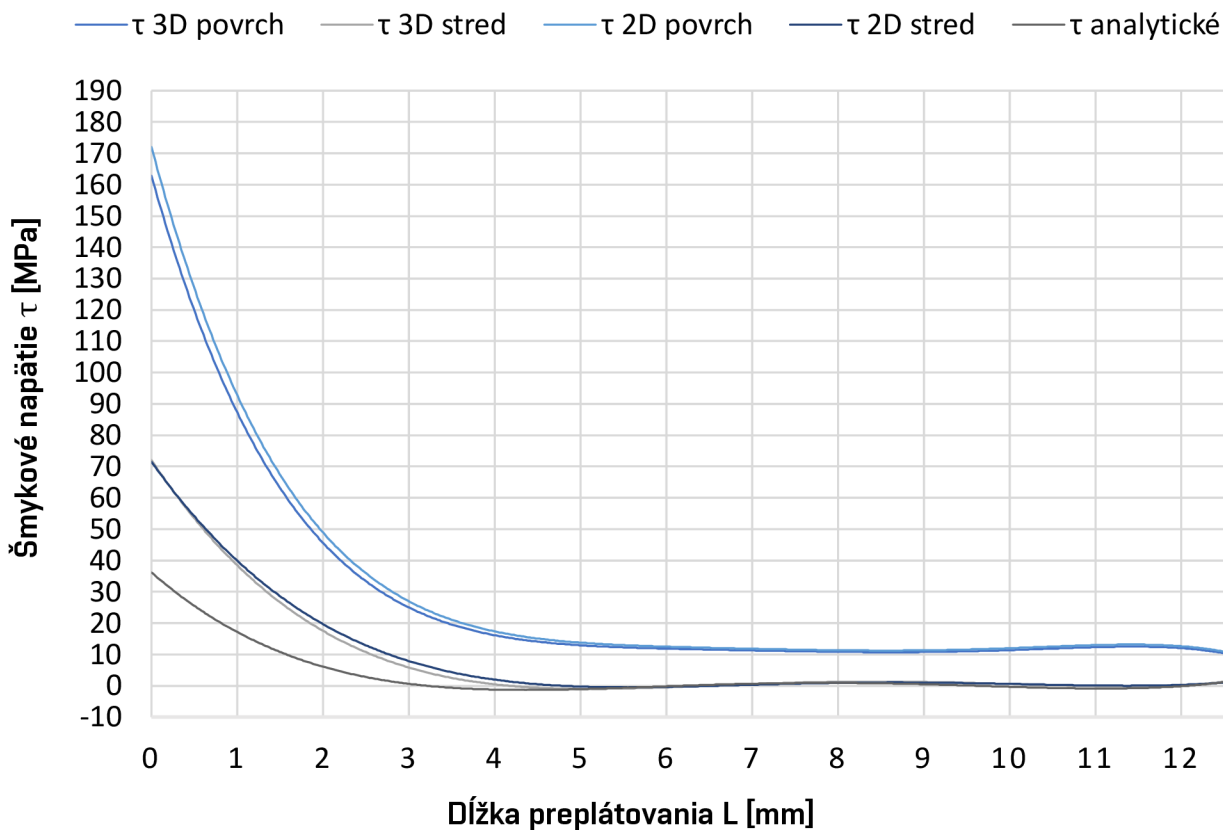
Fringe: SC1:DEFAULT, A1:Static subcase, Stress Tensor, , Max Shear, (NON-LAYERED)



Obrázok 28 Priebeh napätí v reze stredom lepidla 3D lineárna analýza

Pri 3D MKP analýzach majú koncentrácie šmykových napätí dobrú kvalitu rozloženia po šírke spoja. To znamená, že sa nevyskytujú len ako lokálne špičky ale pôsobia skoro jednotne po celej šírke. Avšak vyskytujú sa len v jednom elemente na dĺžku spoja, a to ani nereprezentujú majoritnú hodnotu v tomto elemente. Po dĺžke spoja by sa preto dalo zlepšiť rozloženie napätí zjemením „meshu“ a tak by bolo dosiahnuté reprezentatívnejšie prerozdelenie napätí.

## POROVNANIE PRIEBEHOV ŠMYKOVÝCH NAPÄTÍ



Graf 1 Porovnanie priebehov šmykových napätí 1



Tabuľka 4 Hodnoty napätia 1

L [mm]	$\tau$ analytické [MPa]	$\tau$ 3D povrch [MPa]	$\tau$ 3D stred [MPa]	$\tau$ 2D povrch [MPa]	$\tau$ 2D stred [MPa]
0	36.7	165.5	67.5	175.1	70.3
0.5		121.5	61.4	128.55	58.7
1		77.5	37.05	81.95	35.45
1.5		60	24.9	64.5	25
2		50	18.8	52.9	23.75
2.5	0	39	12.7	41.25	17.95
3	0	28	0.5	35.45	6.3
3.5	0	22.5	0.5	17.95	0.5
4	0	11.5	0.5	15	0.5
4.5	0	11.5	0.5	12.1	0.5
5	0	11.5	0.5	12.1	0.5
5.5	0	11.5	0.5	12.1	0.5
6	0	11.5	0.5	12.1	0.5
6.5	0	11.5	0.5	12.1	0.5
7	0	11.5	0.5	12.1	0.5
7.5	0	11.5	0.5	12.1	0.5
8	0	11.5	0.5	12.1	0.5
8.5	0	11.5	0.5	12.1	0.5
9	0	11.5	0.5	12.1	0.5
9.5	0	11.5	0.5	12.1	0.5
10	0	11.5	0.5	12.1	0.5
10.5	0	11.5	0.5	12.1	0.5
11	0	11.5	0.5	12.1	0.5
11.5	0	11.5	0.5	12.1	0.5
12	0	11.5	0.5	12.1	0.5
12.5	0	11.5	0.5	12.1	0.5



Porovnanie šmykových napätí bude opísané na grafe 1, kde krivky „ $\tau$  2D povrch“ a „ $\tau$  3D povrch“ zobrazujú približný priebeh napätia na hornom povrchu lepidla v 2D a 3D modeli po dĺžke preplátovania. Krivky „ $\tau$  2D stred“ a „ $\tau$  3D stred“ zobrazujú približný priebeh napätia v strednom reze lepidla v 2D a 3D modeli po dĺžke preplátovania. A krivka „ $\tau$  analytické“ zobrazuje približný priebeh napätia, ktorý bol odvodený z maximálnej analyticky vypočítanej hodnoty šmykového napätia a dĺžky, za ktorú klesne na 0 MPa. Uvažovaná bude len polka preplátovania, keďže v reze lepidla v strednej rovine je priebeh symetrický a pre vrchnú časť lepidla bude uvažovaná kritickejšia strana ohľadom na špičky v napätí. Všetky hodnoty, z ktorých boli krivky vykresľované, sú vypísané v tabuľke 4. Samotné krivky sú trendové spojnice vynesných hodnôt, vytvorené ako polynómy štvrtého stupňa.

Krivka zobrazujúca priebeh analytického napätia má najnižšiu maximálnu hodnotu spomedzi všetkých. To je zapríčinené už vyššie spomenutými aproximáciami, na ktorých je analytický výpočet založený. Naopak krivky s najväčšími špičkami v napätí sú „ $\tau$  2D povrch“ (175,1 MPa) a „ $\tau$  3D povrch“ (165,5 MPa). Tu boli najvyššie napätia očakávané, keďže hodnoty pre tieto krivky boli odčítavané z horného povrchu lepidla, kde dochádza k ich koncentráciám. Priebehy kriviek „ $\tau$  2D stred“ a „ $\tau$  3D stred“ sa približujú ku analytickej krivke. To potvrdzuje predpoklad, že analytický prístup nezohľadňuje koncentrácie v napätí, tak isto ako aj rez strednou rovinou lepidla. 3D lineárna MKP analýza je objektívne presnejšia ako 2D analýza. A keďže má hodnoty napätia nižšie než 2D analýza, sa dá predpokladať, že 3D nelineárna úloha, ktorá má najvyššiu presnosť výpočtu zo všetkých spomínaných bude ešte viac znižovať špičky napätia.

Dĺžka, pri ktorej napätie zanikne na 0 MPa je charakteristika vypočítateľná len pri analytickom prístupe, pretože v realite napätie v spoji nikdy neklesne na 0 MPa. Preto bude odčítavaná a porovnávaná vzdialenosť z tabuľky 3, kedy sa konkrétne napätia ustália na ich minimálnej hodnote. Pomocou analytického prístupu bola vypočítaná vzdialenosť 2,37 mm. Tá je porovnateľná s hodnotami „ $\tau$  2D stred“ a „ $\tau$  3D stred“, ktoré klesnú na ich minimálnu hodnotu 0,5 MPa po 3 mm ( $\tau$  3D stred) a po 3,5 mm ( $\tau$  2D stred) Vzdialenosť, po ktorej sa „ $\tau$  2D povrch“ ustáli na minimálnej hodnote 12,1 MPa je 4,5 mm. A vzdialenosť, po ktorej sa „ $\tau$  3D povrch“ ustáli na minimálnej hodnote 11,5 MPa sú 4 mm. Z toho vyplýva, že tak ako aj pri napätíach sa analyticky vypočítanej hodnote najviac blížila vzdialenosti pre hodnoty odčítané z rezu strednou rovinou lepidla. Podobnosť s napätiami pretrváva aj vďaka faktu, že nižšie hodnoty minimálneho napätia, na ktorom sa ustália patria 3D lineárnemu modelu. Z toho sa dá predpokladať, že sa 3D nelineárna úloha ustáli na nižších hodnotách a na kratšom intervale ako 3D lineárna úloha.

## 7.2. Porovnanie šmykových napätí z 3D lineárnej analýzy s ťahovou skúškou

V prípade maximálneho napätia v šmyku z technického listu lepidla, určeného na základe ťahových skúšok, ktoré je najnižšie z uvedených predpokladáme priemer nie len napätia na čele spoja ale po celej dĺžke prekrytia. Toto napätie bude porovnávané s priemernou hodnotou  $\tau$  pre 3D lineárnu analýzu po celej dĺžke preplátovania. Priebeh po dĺžke preplátovania bude uvažovaný v dvoch rovinách. Tak ako aj v predošlej podkapitole to bude na hornom povrchu lepidla a v strednom reze lepidla.

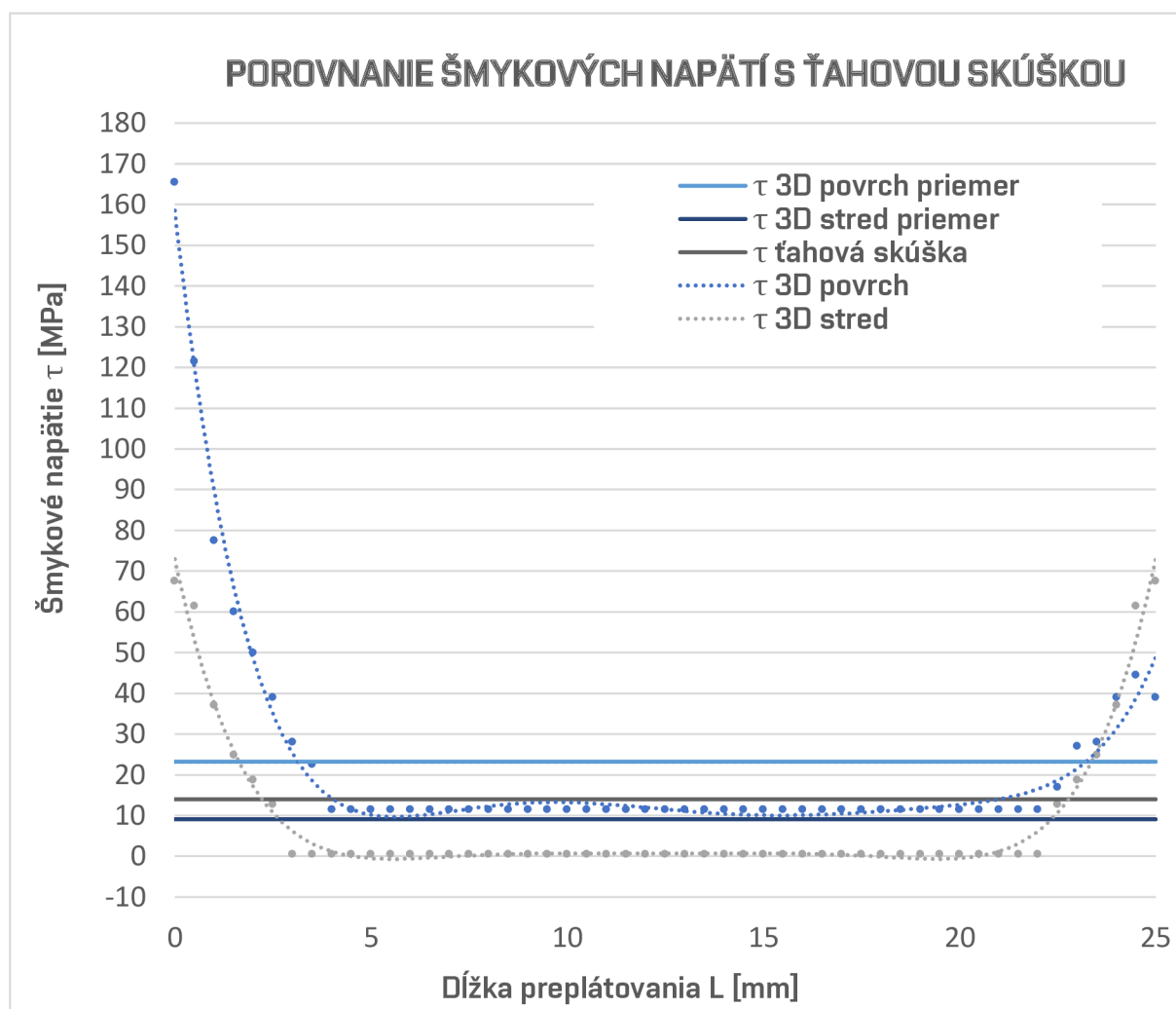


Tabuľka 5 Priebeh napätí po celej dĺžke preplátovania

L [mm]	$\tau$ 3D povrch [MPa]	$\tau$ 3D stred [MPa]	L [mm]	$\tau$ 3D povrch [MPa]	$\tau$ 3D stred [MPa]
0	165.5	67.5	13	11.5	0.5
0.5	121.5	61.4	13.5	11.5	0.5
1	77.5	37.05	14	11.5	0.5
1.5	60	24.9	14.5	11.5	0.5
2	50	18.8	15	11.5	0.5
2.5	39	12.7	15.5	11.5	0.5
3	28	0.5	16	11.5	0.5
3.5	22.5	0.5	16.5	11.5	0.5
4	11.5	0.5	17	11.5	0.5
4.5	11.5	0.5	17.5	11.5	0.5
5	11.5	0.5	18	11.5	0.5
5.5	11.5	0.5	18.5	11.5	0.5
6	11.5	0.5	19	11.5	0.5
6.5	11.5	0.5	19.5	11.5	0.5
7	11.5	0.5	20	11.5	0.5
7.5	11.5	0.5	20.5	11.5	0.5
8	11.5	0.5	21	11.5	0.5
8.5	11.5	0.5	21.5	11.5	0.5
9	11.5	0.5	22	11.5	0.5
9.5	11.5	0.5	22.5	17	12.7
10	11.5	0.5	23	27	18.8
10.5	11.5	0.5	23.5	28	24.9
11	11.5	0.5	24	39	37.05
11.5	11.5	0.5	24.5	44.5	61.4
12	11.5	0.5	25	39	67.5
12.5	11.5	0.5			

Tabuľka 6 Priemerné hodnoty napätia + ťahová skúška

priemer $\tau$ 3D povrch [MPa]	priemer $\tau$ 3D stred [MPa]	$\tau$ ťahová skúška [MPa]
23.216	9.102	14



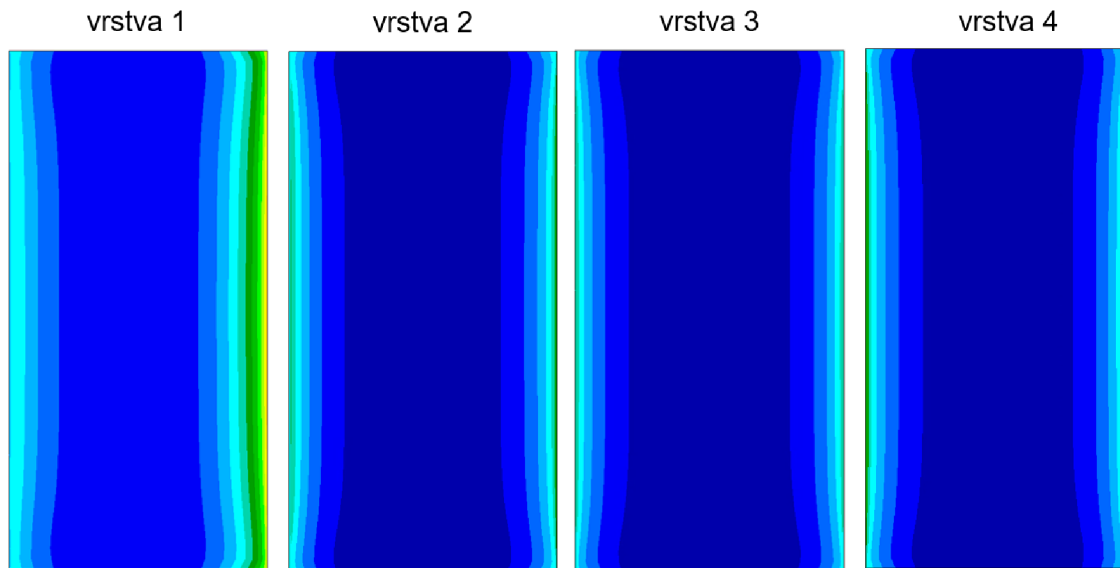
Graf 2 Porovnanie šmykových napätí s ťahovou skúškou

Na grafe 2 sú zobrazené hodnoty priebehov napätia po celej dĺžke preplátovania „ $\tau$  3D povrch“ a „ $\tau$  3D stred“ z tabuľky 5. Vykreslené boli aj ich priemerné hodnoty ako priamky „ $\tau$  3D povrch priemer“ a „ $\tau$  3D stred priemer“, ktorých hodnoty sú zaznamenané v tabuľke 6. Tieto priemerné napätia budú porovnávané s hodnotou 14 MPa získanou z technického listu lepidla [12]. Priamka „ $\tau$  3D stred priemer“ má nižšiu hodnotu napätia (9,102 MPa) ako  $\tau$  z ťahovej skúšky, čo je očakávateľné vzhľadom na to, že tento priebeh neuvažuje špičky napätia, ktoré sa v reálnych spojoch vyskytujú. Pri priamke „ $\tau$  3D povrch priemer“ platí opak, kedy napätie má vyššiu hodnotu (23,216 MPa) ako 14 MPa, čo je taktiež očakávateľné, pretože model uvažuje už vyššie spomínaný kritickejší vrub, ktorý spôsobuje vysoké špičky napätia na čele spoja. Tieto odchýlky priemerných hodnôt od napätia odmeraného pri ťahovej skúške sú spôsobené nedokonalosťou zaťažovaného modelu. Zlepšiť presnosť numerického výpočtu by sa okrem uvažovania nelineárnej analýzy mohla aj upravením samotnej geometrie modelu, tým že by sa namodeloval rádius vytlačeného lepidla pred čelom spoja. Taktiež by pomohla aj zlepšená diskretizácia modelu ako už bolo spomenuté aj v predošlej kapitole.



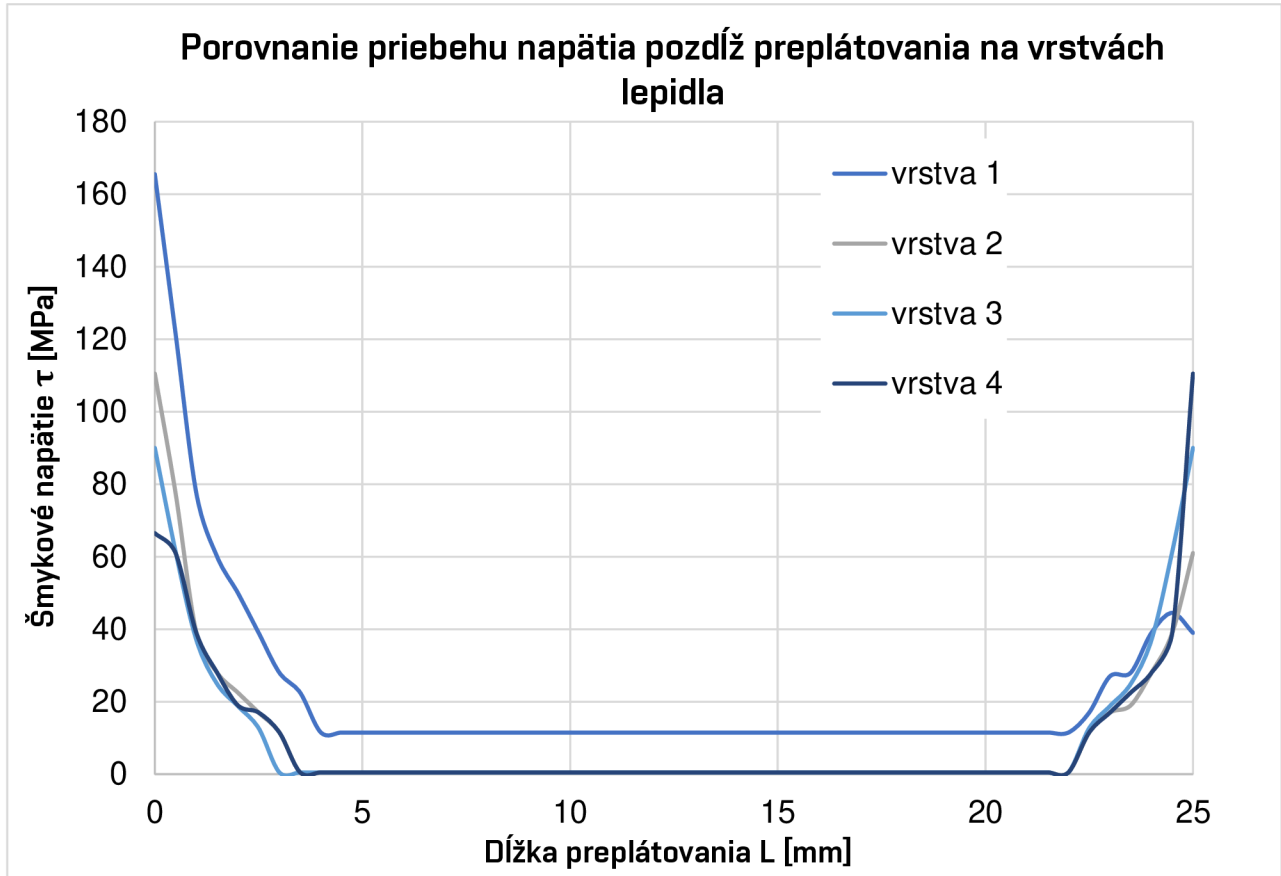


### 7.3. Porovnanie napätí vo vrstvách lepidla 3D lineárneho modelu



Obrázok 29 Vrstvy lepidla - pohľad zhora

Na obrázku 29 sú zobrazené jednotlivé vrstvy lepidla. Vrstva 1 je najvrchnejšia časť lepidla, ktorú tvoria všetky elementy s priradenou materiálovou charakteristikou lepidla a dotýkajúce sa vrchného adherentu. Každá z vrstiev má hrúbku 1 elementu, teda 0,025 mm. Už z prvotného pohľadu na obrázok 29 je možné povedať, že priebehy šmykového napätia sa na vrstvách 2,3 a 4 budú líšiť len minimálne.

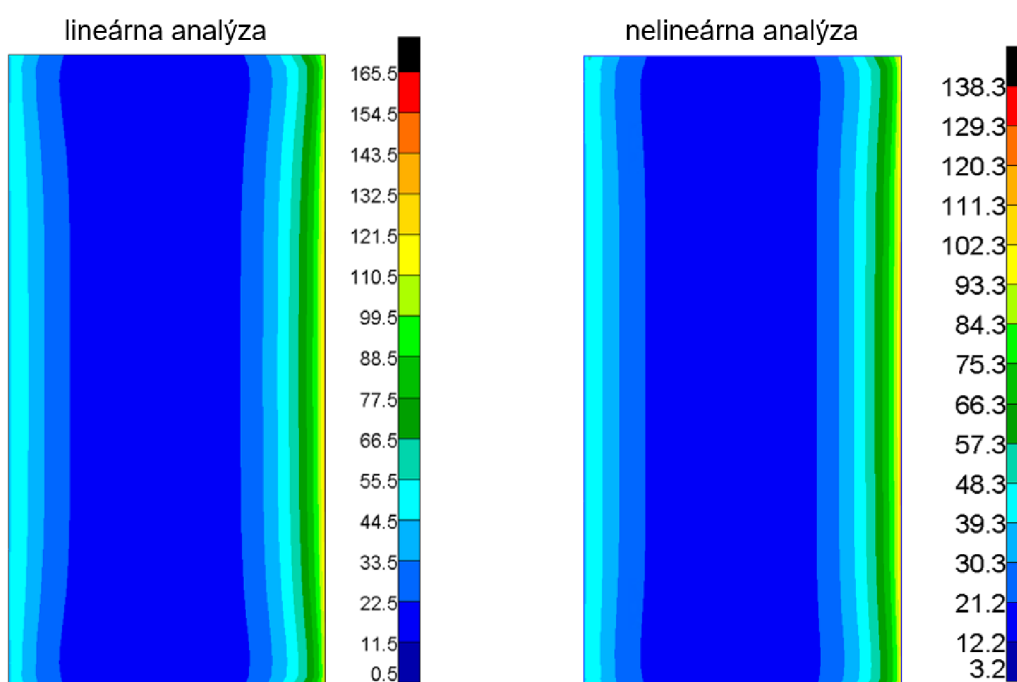


Graf 3 Porovnanie priebehu napätia pozdĺž preplátovania na vrstvách lepidla



Z grafu 3 sa dá odčítať, že jediný z priebehov, ktorý sa výraznejšie líši od ostatných je priebeh na vrchnej vrstve lepidla pri pohľade zhora. Tu je možné odčítať aj najväčšiu koncentráciu (165,5 MPa) spomedzi všetkých rezov lepidlom. Ako už bolo spomenuté v podkapitole 7.1 v strednej vrstve lepidla má priebeh napätí symetrickú povahu a teda na oboch koncoch spoja má rovnaké špičky (90 MPa), ktoré sú však skoro polovičné oproti najvyššej hodnote vo vrstve 1. Priebehy napätí vo vrstvách 2 a 4 sa od strednej vrstvy 3 líšia odchýlkami o veľkosti približne 30 MPa na čelách spoja. Na grafe 3 je taktiež vidieť, že priebeh na vrstvách 2 a 4 sú navzájom symetrické podľa rezu strednou rovinou YZ, teda pozdĺž šírky spoja, čo je dané symetrickým charakterom úlohy a modelu. To znamená, že pri pohľade na lepidlo zo spodu budú mať jednotlivé vrstvy rovnaký priebeh napätí a aj v rovnakom poradí.

#### 7.4. Porovnanie 3D lineárnej a nelineárnej úlohy



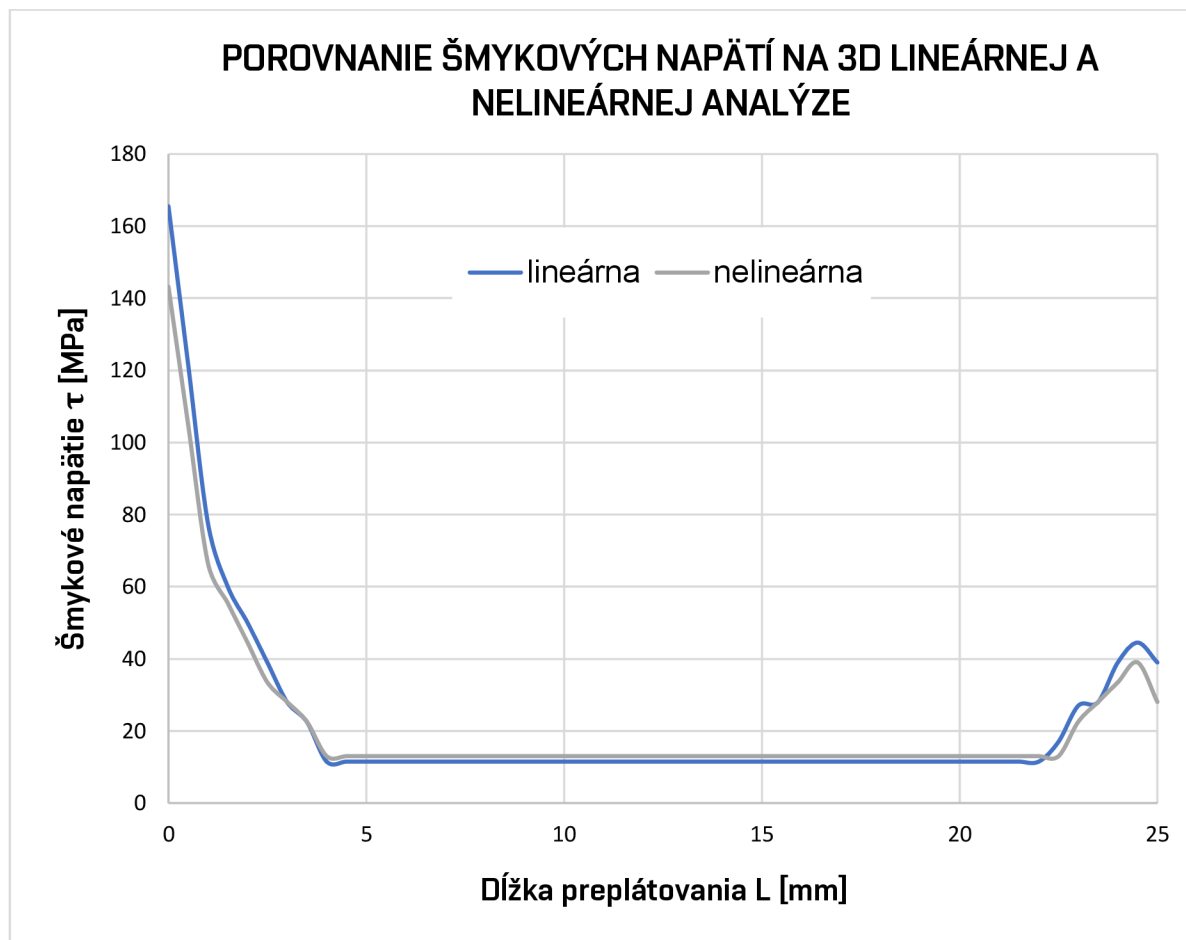
Obrázok 30 pohľad na lepidlo zhora lineárna a nelineárna úloha

Rozdiel medzi lineárnou a nelineárnou analýzou je zrejмый už z obrázku 30. Priebehy pozdĺž lepeného spoja sú si veľmi blízke, avšak hodnoty, ktoré dosahujú sú rôzne. Taktiež je zrejмая lepšia kvalita rozloženia napätia po šírke spoja, čo je žiadúci efekt nelineárnej úlohy, ktorý vzniká vďaka postupnému zaťažovaniu modelu. Nelineárna úloha dosahuje nižších napätí v špičkách (138,3 MPa), práve kvôli lepšiemu rozloženiu napätia. To znamená, že minimálne hodnoty budú vyššie pri nelineárnej analýze.



Obrázok 31 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke

Aj pri porovnaní obrázku 31 s obrázkom 19 je vidieť zlepšené prerozdelenie napätí po celom vzorku. Adherenty majú taktiež lepšiu kvalitu rozloženia napätia



*Graf 4 Porovnanie šmykového napätia v 3D lineárnej a nelineárnej úlohe*

Graf 4 potvrdzuje lepšie prerozdelenie napätia v nelineárnej úlohe, aj keď špička napätia klesla len o necelých 30 MPa. Zaťažovanie v nelineárnej úlohe bolo rozdelené len do piatich krokov, čo naznačuje ešte väčšie potenciálne zlepšenie pri analýze s vyšším počtom krokov.

Z grafu 4 je taktiež vidieť, že svoju minimálnu hodnotu dosiahli obidva modely v približne rovnakej oblasti spoja (4 mm).



## 8. Vyhodnotenie

Tabuľka 7 Zhrnutie maximálnych a minimálnych hodnôt šmykových napätí z MKP

	globálne maximum [MPa]	globálne minimum [MPa]	lokálne maximum [MPa]	lokálne minimum [MPa]
<b>2D</b>	175,1	0,499	175,1	0,499
<b>3D lineárna</b>	199	0,548	165,5	0,548
<b>3D nelineárna</b>	182,6	0,616	138,3	0,616

V tabuľke 7 je spísané zhrnutie všetkých extrémov lokálnych šmykových napätí pôsobiacich v lepidle a extrémov globálnych šmykových napätí pôsobiacich v celom spoji.

Porovnania v kapitole 7 ukazujú, že 2D lineárna analýza má najväčšie koncentrácie napätia v lepidle a z troch numericky počítaných modelov má najhoršie prerozdelenie napätia spojom. Ak by sme tieto hodnoty brali ako smerodajné pri návrhu spoja, bol by síce bezpečný ale predimenzovaný. Môže však slúžiť ako orientačná hodnota pre ďalšie výpočty.

Nasledovala 3D lineárna analýza, ktorá už síce vykazuje zlepšenie v rozložení napätia v spoji ale špičky v šmykovom napätí nie sú signifikantne nižšie oproti 2D spoju.

Ako posledná bola spočítaná 3D nelineárna analýza, ktorá mala z daných troch modelov najlepšie výsledky, čo sa týka znižovania špičiek v napätí a ich lepšieho prerozdelenia vrámci modelu.

Žiadna z kritických hodnôt šmykového napätia sa však nepohybovala dostatočne blízko analyticky spočítanému kritickému napätiu (36,7 MPa).

Keď neboli uvažované kritické špičky v napätí pôsobiacom v preplátovaní, ale boli brané do úvahy priemerné hodnoty napätia po celom spoji, hodnoty sa priblížili maximálnemu šmykovému napätiu danému výrobcom lepidla v technickom liste (14 MPa). Rozdiel bol však stále pomerne veľký.

Z tejto pevnostnej kontroly plynie, že ak bude vzorka zaťažená kritickou silou 4375 N z analytického výpočtu naozaj dôjde k jej porušeniu, ale kritické napätia sú niekoľkonásobne vyššie ako je hodnota spočítaná analyticky a priemerná hodnota napätia zistená pri ťahovej skúške výrobcom lepidla.

Je však viditeľný trend, kde s postupným upravovaním modelu a analýzy klesá kritická hodnota na čele spoja. Dá sa predpokladať, že so zvyšovaním krokov pri nelineárnej analýze sa kritické hodnoty priblížia tej spočítanej analytickým prístupom a priemerné tej danej výrobcom.



## 9. Záver

Cieľom tejto práce bolo vytvoriť modely vzorku lepeného spoja a následne na nich vykonať pevnostnú analýzu pomocou analytického a numerického prístupu. Rovnako mala byť vykonaná rešerš o úvode do problematiky lepených spojov.

V rešeršnej časti práce je vysvetlený princíp fungovania lepených spojov, ich využitie v leteckom priemysle, výhody a nevýhody. Táto časť taktiež pojednáva o spôsoboch zaťažovania a mechanizmoch porušenia, ktoré je potrebné pred praktickou časťou definovať.

Praktická časť je zameraná na vykonanie samotnej analytickej a numerickej analýzy. Pri analytickom prístupe bol popísaný výpočet a boli zdôvodnené voľby vstupných hodnôt. Následne boli vytvorené 2D a 3D modely vzorky jednoducho preplátovaného spoja. Na týchto vzorkách bol vykonaný numerický výpočet formou metódy konečných prvkov v programoch MSC.Patran a MSC.Nastran. Lineárnou analýzou bol spočítaný ako 2D, tak 3D model. Nelineárnou analýzou bol spočítaný 3D model.

V práci sú podrobne popísané jednotlivé kroky výpočtu a vstupných parametrov, ako je určenie okrajových podmienok a určenie zaťažovacej sily. Následne boli porovnané výstupy jednotlivých metód riešenia, a to ako numerických, analytických, tak hodnota získaná ťahovou skúškou.

2D lineárny model mal najvyššie koncentrácie v napätí a najhoršie rozloženie napätia po spoji. Nedostatky 2D analýzy boli zmiernené 3D lineárnym modelom vzorky, nie však dostatočne. Preto bol vytvorený 3D nelineárny model, ktorý z porovnania numerických analýz vyšiel najlepšie. Mal najnižšie kritické napätia a najlepšie rozloženie napätia po spoji. Stále sa však nepribližoval analyticky spočítanej špičke v napätí a priemernej hodnote z technického listu lepidla.

Predpokladá sa, že so zvyšovaním krokov nelineárnej analýzy a približovaním geometrie MKP modelu skutočnej vzorky sa tieto hodnoty približia.



### Zoznam použitej literatúry

- [1] PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980. Redakce báňské a strojírenské literatury.
- [2] PETRIE, Edward M. Adhesives for the assembly of aircraft structures and components. Decades of performance improvement, with the new applications of the horizon. *Metal Finishing* [online]. 2008, 106(2), 26–31 [vid. 2023-03-12]. ISSN 00260576. Dostupné z: doi:10.1016/S0026-0576(08)80035-9
- [3] POSSART, Wulff. Adhesion : current research and applications [online]. 2005, 575 [vid. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.wiley.com/en-us/Adhesion%3A+Current+Research+and+Applications-p-9783527607105>
- [4] HIGGINS, A. Adhesive bonding of aircraft structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives* [online]. 2000, 20(5), 367–376 [vid. 2023-03-12]. ISSN 01437496. Dostupné z: doi:10.1016/S0143-7496(00)00006-3
- [5] ORSATELLI, Jean Baptiste, Eric PAROISSIEN, Frédéric LACHAUD a Sébastien SCHWARTZ. Bonded flush repairs for aerospace composite structures: A review on modelling strategies and application to repairs optimization, reliability and durability. *Composite Structures* [online]. 2023, 304 [vid. 2023-03-26]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPSTRUCT.2022.116338
- [6] NIU, Michael Chun-Yung. *Airframe structural design*. 2nd ed. Hong Kong: Hong Kong Conmilit Press Ltd., 2004. ISBN 962-7128-09-0.
- [7] ZAWADA-MICHAŁOWSKA, Magdalena a Józef KUCZMASZEWSKI. Quality of Samples in Adhesive Joint Testing. *Advances in Science and Technology Research Journal* [online]. 2020, 14(3), 182–191 [vid. 2023-03-26]. ISSN 2080-4075. Dostupné z: doi:10.12913/22998624/123112
- [8] *Huntsman to provide advice for adhesive bonding applications - Composites in Manufacturing* [online]. [vid. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.composites.media/huntsman-to-provide-advice-for-adhesive-bonding-applications/>
- [9] OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. B.m.: SNTL - Státní nakladatelství technické literatury, 1975.
- [10] *Cohesive vs. adhesive failure in adhesive bonding* [online]. [vid. 2023-02-19]. Dostupné z: <https://www.biolinscientific.com/blog/cohesive-vs.-adhesive-failure-in-adhesive-bonding>
- [11] ZIELECKI, Władysław, Katarzyna BURNAT, Andrzej KUBIT a Tomáš KATRŇÁK. Effect of Holes in Overlap on the Load Capacity of the Single-Lap Adhesive Joints Made of EN AW-2024-T3 Aluminium Alloy. *Advances in Materials Science* [online]. 2021, 21(4), 112–121 [vid. 2023-04-28]. Dostupné z: doi:10.2478/ADMS-2021-0029
- [12] HENKEL SPOL. S R. O. *Technical Data Sheet LOCTITE® EA 3430*. 2014



## Zoznam použitej literatúry

- [13] ČSN EN 1465 (668510) [online]. [vid. 2023-04-28]. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-1465-668510-215651.html>
- [14] LEE, Lieng-Huang. *Adhesive Bonding*. New York: Plenum Press, 1991. ISBN 0-306-43471-7.
- [15] *Adhesively Bonded Joints: Testing, Analysis, and Design* - W. Steven Johnson - Google Books [online]. [vid. 2023-05-20]. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?hl=en&lr=&id=bbPS44K1haQC&oi=fnd&pg=PA264&dq=krieger+bonded+joint&ots=-VMsS1YJmR&sig=eUOVBCbYIEmXk15GOxtCOtx319U&redir\\_esc=y#v=onepage&q=krieger%20bonded%20joint&f=false](https://books.google.cz/books?hl=en&lr=&id=bbPS44K1haQC&oi=fnd&pg=PA264&dq=krieger+bonded+joint&ots=-VMsS1YJmR&sig=eUOVBCbYIEmXk15GOxtCOtx319U&redir_esc=y#v=onepage&q=krieger%20bonded%20joint&f=false)
- [16] *What is Adhesion?* [online]. [vid. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.brighton-science.com/what-is-adhesion>
- [17] NEZHAD, Hamed a Dimosthenis STRATAKIS. *PERFORMANCE OF AEROSPACE COMPOSITES IN THE PRESENCE OF PROCESS-INDUCED DEFECTS* [online]. B.m., 2017. b.n. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.20580.83848
- [18] *Huntsman to provide advice for adhesive bonding applications - Composites in Manufacturing* [online]. [vid. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.composites.media/huntsman-to-provide-advice-for-adhesive-bonding-applications/>
- [19] ÖZER, Halil a Halil ÖZER. Introductory Chapter: Structural Adhesive Bonded Joints. *Applied Adhesive Bonding in Science and Technology* [online]. 2018 [vid. 2023-04-01]. Dostupné z: doi:10.5772/INTECHOPEN.74229
- [20] SHIGLEY, Joseph Edward. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [21] *MOOC: Introduction to Aerospace Structures and Materials | TU Delft Online* [online]. [vid. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://online-learning.tudelft.nl/courses/introduction-to-aerospace-structures-and-materials/>
- [22] VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *OT1-A Lepené spoje.pdf*. 2022



### Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Počet elementov a uzlov.....	27
Tabuľka 2 Vlastnosti elementov .....	28
Tabuľka 3 Mechanické vlastnosti zliatiny hliníka Alclad 2024-T3.....	28
Tabuľka 4 Hodnoty napätia 1 .....	37
Tabuľka 5 Priebeh napätí po celej dĺžke preplátovania.....	39
Tabuľka 6 Priemerné hodnoty napätia + ťahová skúška.....	39
Tabuľka 7 Zhrnutie maximálnych a minimálnych hodnôt šmykových napätí .....	44





### Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Adhézne a kohézne sily v lepenom spoji (upravené) [16].....	12
Obrázok 2 Lepené spoje na lietadle Airbus A380 (upravené) [17] .....	13
Obrázok 3 Spôsoby zaťažovania lepeného spoja a príslušné priebehy napätia (upravené) [18].....	15
Obrázok 4 Odlupovanie z dôvodu excentrickosti zaťažovacej dráhy (upravené)[19]	15
Obrázok 5 Konštrukcie lepených spojov (upravené) [20].....	16
Obrázok 6 Mechanizmy porušenia spoja (upravené) [21].....	17
Obrázok 7 Jednoducho preplátovaný spoj (upravené)[22].....	18
Obrázok 8 Diagram šmykového napätia pri danej teplote a spoľahlivosti spoja [1] ...	20
Obrázok 9 Rozloženie adhézneho šmykového napätia vo zdvojenej vrstve (upravené) [14].....	23
Obrázok 10 Typy konečných prvkov.....	25
Obrázok 11 Rozmery modelu.....	26
Obrázok 12 Hrúbky adherentu a lepidla detail.....	26
Obrázok 13 Detail siete v oblasti preplátovania .....	27
Obrázok 14 Sieť modelu .....	27
Obrázok 15 Aplikácia okrajových podmienok a zaťaženia .....	28
Obrázok 16 Priebeh šmykového napätia na reálne zdeformovanej 2D vzorke .....	30
Obrázok 17 Priebeh šmykového napätia na 2D vzorke detail 1 (pohľad z boku) .....	30
Obrázok 18 Priebeh šmykového napätia na 2D vzorke detail 2 (pohľad z boku) .....	30
Obrázok 19 Priebeh šmykového napätia na reálne zdeformovanej 3D lineárnej vzorke .....	31
Obrázok 20 Priebeh šmykového napätia na 3D lineárnej vzorke detail 1 (pohľad z boku) .....	31
Obrázok 21 Priebeh šmykového napätia na lepidle 3D lineárnej vzorky detail čela ..	31
Obrázok 22 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke 20% zaťaženia .	32
Obrázok 23 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke 40% zaťaženia .	32
Obrázok 24 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke 60% zaťaženia .	33
Obrázok 25 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke 80% zaťaženia .	33
Obrázok 26 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke 100% zaťaženia	34
Obrázok 27 Priebeh napätí na hornom povrchu lepidla 3D lineárna analýza .....	35
Obrázok 28 Priebeh napätí v reze stredom lepidla 3D lineárna analýza .....	36
Obrázok 29 Vrstvy lepidla - pohľad zhora.....	41
Obrázok 30 pohľad na lepidlo zhora lineárna vs nelineárna úloha.....	42
Obrázok 31 Priebeh šmykového napätia na 3D nelineárnej vzorke .....	42



### Zoznam grafov

Graf 1 Porovnanie priebehov šmykových napätí 1 .....	36
Graf 2 Porovnanie šmykových napätí s ťahovou skúškou .....	40
Graf 3 Porovnanie priebehu napätia pozdĺž preplátovania na vrstvách lepidla .....	41
Graf 4 Porovnanie šmykového napätia v 3D lineárnej a nelineárnej úlohe .....	43