

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁRSKA PRÁCA

Lepené spoje při víceosém zatěžování  
Adhesive joints with multiaxial loading

AUTOR: Matúš Priščák

ŠTUDIJNÍ PROGRAM: Výroba a ekonomika ve strojírenství

VEDUCÍ PRÁCE: Ing. Elena Čižmárová, Ph.D.

PRAHA 2019



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Přišćák** Jméno: **Matúš** Osobní číslo: **420465**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**  
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Lepené spoje při víceosém zatěžení**

Název bakalářské práce anglicky:

**Adhesive joints with multiaxial loading**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Literární rešerše v oblasti lepených spojů, výpočtových postupů a používaných lepidel.
- 2) Návrh experimentů pro víceosé namáhání lepených spojů.
- 3) Experimentální určení pevnosti vybraných lepených spojů.
- 4) Návrh pevnostního kritéria pro víceosé namáhané lepené spoje.
- 5) Numerická analýza vybraných lepených spojů.
- 6) Shrnutí obdržených výsledků, diskuze a závěry.

Seznam doporučené literatury:

PETERKA, J.: Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. 1. Vyd. Praha: SNTL, 1980.  
LANDROCK, A. H.: Adhesives Technology Handbook. New Jersey: Noyes Publications, 1985. ISBN: 0-8155-1040-3.  
PETRIE, Edward M.: Handbook of adhesives and sealants. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2007. ISBN 0071479163.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

**Ing. Elena Čizmarová, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS**

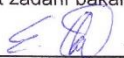
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

**Ing. Ctirad Novotný, Ph.D., odbor pružnosti a pevnosti FS**

Datum zadání bakalářské práce: **02.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **26.07.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Elena Čizmarová, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

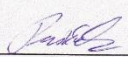
  
prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

15.4.2019  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta



## Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto prácu vypracoval samostatne a to výhradne s použitím prameňov a literatúry, uvedenej v zozname citovaných zdrojov.

V Prahe dňa: .....

Podpis:.....



## Anotácia

Bakalárska práca sa zaoberá testovaním tupého skoseného adhézneho spoja metódou biaxiálneho zaťažovania pomocou ťahovej skúšky a vytvorením pevnostného kritéria pre adhézny spoj. Práca sa ďalej zaoberá numerickou analýzou adhézneho spoja v programe Abaqus.

## Kľúčové slová

Adhézne spoje, tupý skosený spoj, biaxiálne zaťažovanie, technológia lepenia, MKP analýza, Abaqus

## Annotation

This bachelor thesis is dealing with testing of a biaxial loading of a scarf adhesive joint by tensile testing as well, as with numerical analysis of scarf adhesive joint in program Abaqus.

## Keywords

Adhesive joint, scarf joint, biaxial loading, technology of adhesive joints, FEM, numerical analysis, Abaqus



## Pod'akovanie

Ďakujem svojmu vedúcemu bakalárskej práce Ing. Elene Čižmárovej Ph.D. a konzultantovi Ing. Ctirádovi Novotnému, Ph.D. za trpezlivosť, cenné rady a pripomienky pri plnení úloh bakalárskej práce.

Ďalej by som rád poakoval Bc. Pavlovi Šariškému za pomoc s numerickým výpočtom v praktickej časti tejto práce.

V neposlednej rade by som rád poďakoval mojím rodičom a blízkym za podporu a dôveru v celom mojom štúdiu i mimo neho.

# Obsah

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Úvod .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2</b> | <b>Adhezíva a adhézny spoj.....</b>                                   | <b>2</b>  |
| 2.1      | <i>História lepenia .....</i>   | <i>2</i>  |
| 2.2      | <i>Základné pojmy .....</i>   | <i>3</i>  |
| 2.3      | <i>Konštrukcia adhéznych spojov .....</i>                             | <i>4</i>  |
| 2.4      | <i>Delenie adhezív .....</i>  | <i>5</i>  |
| <b>3</b> | <b>Teórie adhéznych spojov .....</b>                                  | <b>9</b>  |
| 3.1      | <i>Adhézia.....</i>   | <i>9</i>  |
| 3.2      | <i>Kohézia.....</i>   | <i>10</i> |
| 3.3      | <i>Zmäčavosť.....</i>   | <i>10</i> |
| <b>4</b> | <b>Technológia a vplyvy prostredia na adhézny spoj.....</b>           | <b>12</b> |
| 4.1      | <i>Vplyv atmosférických podmienok na pevnosť adhézneho spoja.....</i> | <i>12</i> |
| 4.2      | <i>Vplyv fixácie a tlaku na pevnosť spoja .....</i>                   | <i>13</i> |
| 4.3      | <i>Vplyv hrúbky lepenej vrstvy na pevnosť spoja.....</i>              | <i>14</i> |
| 4.4      | <i>Doba otvoreného a uzavretého zostavenia spoja .....</i>            | <i>14</i> |
| 4.5      | <i>Vplyv drsnosti na pevnosť spoja.....</i>                           | <i>15</i> |
| 4.6      | <i>Príprava povrchu .....</i>   | <i>16</i> |
| 4.7      | <i>Vytvrdzovanie adhézneho spoja.....</i>                             | <i>17</i> |
| <b>5</b> | <b>Pevnostná analýza adhézneho spoja.....</b>                         | <b>18</b> |
| 5.1      | <i>Charakter lomu lepeného spoja .....</i>                            | <i>19</i> |
| 5.2      | <i>Tupý skosený spoj.....</i>   | <i>20</i> |
| <b>6</b> | <b>Experimentálne určovanie pevnostných vlastností adhezíva .....</b> | <b>22</b> |
| 6.1      | <i>Ciele a príprava experimentu .....</i>                             | <i>22</i> |
| 6.2      | <i>Statická skúška ťahom adhézneho spoja .....</i>                    | <i>25</i> |
| 6.3      | <i>Vyhodnotenie výsledkov statickej skúšky v ťahu.....</i>            | <i>26</i> |
| 6.4      | <i>Pevnostné kritérium adhezíva .....</i>                             | <i>29</i> |
| <b>7</b> | <b>Numerické určovanie pevnosti adhézneho spoja.....</b>              | <b>32</b> |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 7.1       | <i>Tvorba modelu v programe Abaqus</i> .....             | 32        |
| 7.2       | <i>Vyhodnotenie výsledkov numerickej metódy</i> .....    | 35        |
| <b>8</b>  | <b>Diskusia výsledkov</b> .....                          | <b>39</b> |
| 8.1       | <i>Diskusia výsledkov statickej ťahovej skúšky</i> ..... | 39        |
| 8.2       | <i>Diskusia výsledkov numerickej analýzy</i> .....       | 40        |
| <b>9</b>  | <b>Záver</b> .....                                       | <b>42</b> |
| <b>10</b> | <b>Zoznam použitej literatúry</b> .....                  | <b>43</b> |

# 1 Úvod

Spájanie materiálov je proces bez ktorého sa nezaobíde takmer žiadne moderné odvetvie priemyselnej sféry.

Proces adhézneho spájania materiálov je pre svoje mnohé výhody stále viac využívaná možnosť pri spojovaní materiálov v priemysle. Adhézne spoje sú však využívané aj pri potláčaní vibrácii konštrukcii, tmelení a elektrickej i tepelnej izolácii spojov.

V teoretickej časti sa bakalárska práca zaoberá teóriou adhézných spojov formou rešerše, ktorá zoznamuje so základnými pojmami, s ktorými sa čitateľ v oblasti adhézných spojov stretne a technológiou lepenia adhézných spojov ako aj pevnostnou analýzou vybraných adhézných spojov.

V praktickej časti sa bakalárska práca zaoberá návrhom experimentu pre viacosé namáhanie adhézných spojov. Návrhom technologického postupu vytvorenia adhézneho spoja a následným experimentálnym určením jeho pevnosti pre zvolené charakteristiky, a to vďaka statickej skúške v ťahu a z nej zistených dát. Následne je cieľom práce vytvoriť pevnostné kritérium pre tupý skosený adhézny spoj za použitia adhezíva Acralock SA10-05, ktoré je bežne používaným adhezívom v priemyselnej sfére. V neposlednom rade sa práca zameriava i na možnosť experimentálneho určovania pevnosti spoja numerickou metódou v programe Abaqus a porovnaním numerického výpočtu s reálnymi výsledkami zo statickej skúšky v ťahu.

Motiváciou tejto práce je lepšie pochopenie správania sa adhezíva v reálnej situácii pri pôsobení viacosích napätí.

## 2 Adhezíva a adhézny spoj

### 2.1 História lepenia

Prírodné adhezíva vyrobené zo škrobu, zvierat a podobne sa používajú už storočia. V dnešnej dobe sú stále používané pri balení a spájaní napríklad drevených konštrukcií. V minulosti sa adhezíva nepoužívali len k lepeniu, ale i k tesneniu, takže zastávali i funkcie dnešných tmelov. K lepeniu sa v staroveku používal napríklad albumín zo zvieracej kože, jeleních parohov, dextrín z papyrusu. Varením kostí, koží a zbytkov rýb sa vyrábal glutín a rybí glej. K lepeniu zlatých fólií na papier sa používali vaječné bielky. Prvý patent na adhezívum bol udelený v Amerike v roku 1814. Roku 1823 bolo v Anglicku patentované lepenie kaučukom. Počiatkom priemyselného používania adhezív bol rok 1912, kde sa na výstave v Bautzene predviedol prvý výrobný postup lepenia obuvi, ktorý zahrňoval i špeciálny stroj pre nanášanie adhezíva Ago. Adhezíva na báze gumy boli objavené v období priemyselnej revolúcie v 19. storočí. Moderné syntetické adhezíva na báze fenol-formaldehydov boli objavené na začiatku 20. storočia.

Hlavným spúšťačom dopytu po syntetických adhezívach bola 2. svetová vojna. Nesporným medzníkom v histórii techniky lepenia bol objav adhezív na báze fenol-formaldehydov. Pod názvom Redux umožnili spoločnosti Havilland vo Veľkej Británii v roku 1943 sériovú výrobu lietadla typu DH-103 Hornet. Od tohto obdobia prešli syntetické adhezíva rapídny vývojom, aby sa boli schopné prispôbiť stúpajúcej náročnosti pre ich aplikácie.

V období od objavenia Reduxu až do roku 1965 dochádza k masovému nasadzovaniu technológie lepenia v leteckom priemysle. Adhezíva sa začínajú uplatňovať vo viacerých oblastiach priemyslu napríklad v kozmonautike i automobilovom priemysle. Postupom času a vďaka vytrvalému výskumu sa lepenie začína uplatňovať i v zdravotníctve pri oprave kostí a zastaveniu krvácania v ranách. Technológia lepenia je stále viac používaná k nahradzovaniu tradičných metód spojovania materiálov [1] [5].

## 2.2 Základné pojmy

### Adherend

Materiál, na ktorý je nanášané adhezívum a ktorého povrch sa pred lepením patrične upravuje [1].

### Adhezívum

Adhezívum, lepidlo, je chemická látka nanášajúca sa na povrch adherendu a slúži k spojovaniu materiálov [1].

### Adhélia

Adhélia je stav, kedy príťažlivé sily chemické, mechanické, difúzne a elektrostatické vytvárajú pevný nerozoberateľný spoj . Tento spoj zabezpečuje prenos mechanickej sily. Sú to sily, ktoré vytvárajú priľnavosť adhezíva a spojovaného adherendu [2].

### Lepenie

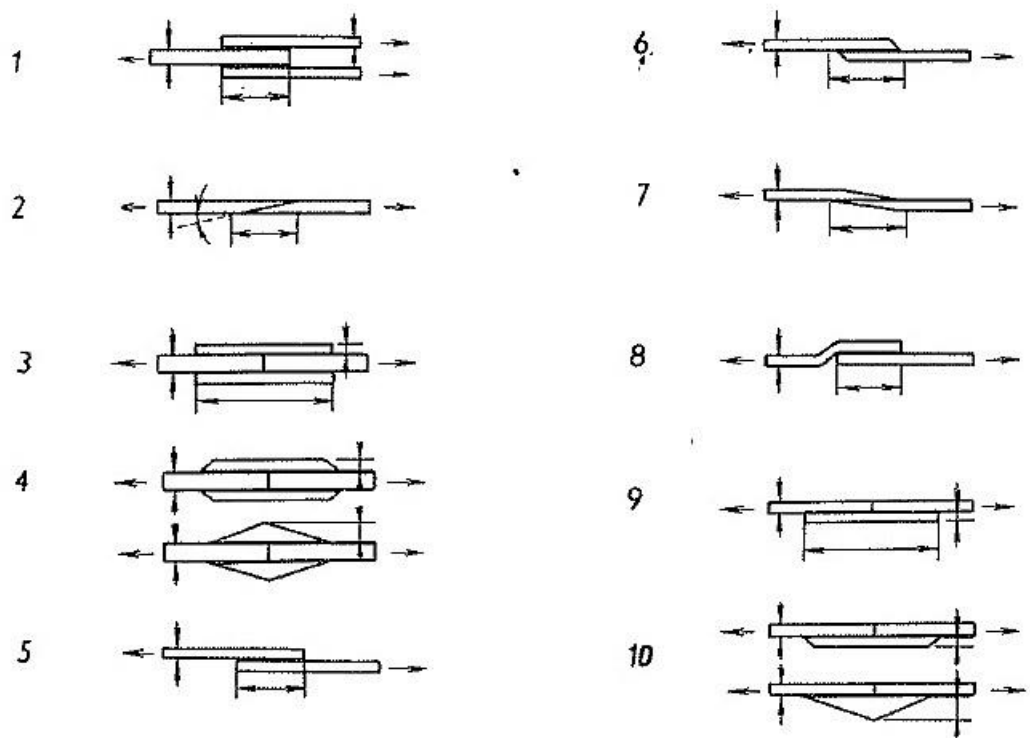
Technologický proces vytvárania adhézneho spoja [1].

Adhezívum je materiál nanášaný na povrch materiálu, ktorý chceme permanentne spájať s iným materiálom. Adhélia referuje k stavu, v ktorom sú dve telesá držané v kontakte tak, že sformovaný spoj prenáša mechanické zaťaženie. Medzifázové sily, ktoré držia dva predmety pohromade pomocou adhezíva vyvstávajú z chemických interakcií, mechanických účinkov alebo elektrostatických síl. Mechanická sila spoja nie je daná len vymenovanými účinkami a silami, ale i materiálovými vlastnosťami spojovaných telies, technológiou lepenia a vplyvmi prostredia.

Okrem spájania materiálov je ďalšou dôležitou funkciou adhezíva ochrana povrchu pred vplyvom vonkajšieho prostredia. Pomocou adhezíva môžeme napríklad v spojoch utlmiť mechanické vibrácie, vďaka tejto vlastnosti sa zvyšuje únavová odolnosť konštrukcie. Lepením môžeme spájať i krehké súčasti, ktoré by iné metódy spájania nemuseli štrukturálne zniesť. Adhézne spoje nezaťažujú adherendy svojou váhou tak, ako nity a nenesú so sebou riziko vytvorenia vrubu, ktorý by oslabil konštrukciu, ako pri nitovaní a zvaraní a tepelne neovplyvňujú spojované materiály ako u zvarania [2].

### 2.3 Konštrukcia adhéznych spojov

Adhézne spoje sú známe hlavne svojou dobrou pevnosťou v šmyku, naopak pevnosť v odlupovaní je u adhezív veľmi zlá. Pri lepení sa snažíme konštrukčné diely zostavovať tak, aby dochádzalo k čo možno najmenšiemu namáhaniu adhézneho spoja na odlupovanie. Na Obr. 1 sú uvedené niektoré typy prekryvaných adhéznych spojov. Okrem správne zvoleného konštrukčného riešenia adhézneho spoja môžu byť nepriaznivé vplyvy potlačené i chemickými úpravami. Napríklad použitím rôznych nosičov a plnív [5].

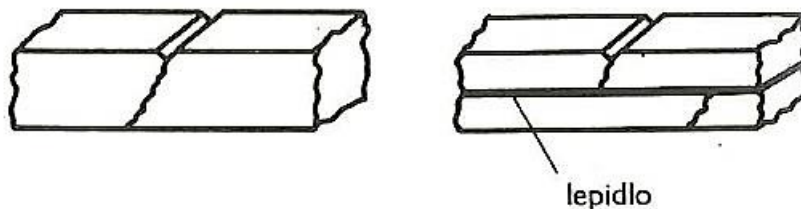


Obr. 1 Príklad vybraných plochých adhéznych spojov. 1 - dvojito preplátovaný spoj, 2 - skosený tupý spoj, 3 - spoj s dvoma príložkami, 4 - spoj s dvoma skosenými príložkami, 5 - jednoduchý preplátovaný spoj, 6 - jednoducho preplátovaný modifikovaný spoj, 7 - jednoduchý preplátovaný skosený spoj, 8 - lemový spoj, 9 - spoj s jednou príložkou, 10 - spoj s jednou skosenou príložkou [5]

#### Výhody adhézneho spoja

- Rovnomerná distribúcia napätia.
- Spájanie materiálov nezávisle na ich hrúbke, štruktúre a rozmeroch.
- Zabraňuje alebo celkom potlačuje elektrochemickú koróziu, ktorá môže vzniknúť medzi materiálmi s nerovnakým zložením.
- Odoláva únave a cyklickému zaťaženiu.
- Vytvára spoje bez vrubov.

- Pomáha chrániť spoje pred účinkami prostredia.
- Izoluje tepelný a elektrický prenos.
- Pomáha znižovať vibrácie.
- Dosahuje sa dobrý pomer medzi silou spoja a váhou.
- Rýchla a lacná forma spoja.
- Obmedzenie účinku vrubu Obr.2 [2] [5].



*Obr. 2 Obmedzenie účinku vrubu vrstvou adhezíva. Vľavo priebeh poruchy u plného materiálu, vpravo vzorka zlepená adhezívom [5].*

#### **Nevýhody adhézneho spoja**

- Je treba venovať veľkú pozornosť úprave povrchu, na ktorý sa adhezívum použije.
- V niektorých prípadoch je treba počítať s dlhým vytvrdzovacím časom.
- Obyčajne sú spoje použiteľné do teplôt len okolo 200°C.
- Veľmi striktná kontrola výroby.
- Pevnosť spoja je často nižšia, než u iných spôsobov spojovania.
- Životnosť, adhézneho spoja závisí na prostredí, ktorému je vystavené.
- Použitie metód ako fixovanie, vypekanie v peci, aplikovanie tlaku, použitie autoklávy, ktoré nie sú nutné pri iných konvenčných spôsoboch vytvárania spojov.
- Spoj nie je možné obvykle posúdiť vizuálnou skúškou [2].

#### **2.4 Delenie adhezív**

Najbežnejšie rozdelenie adhezív je podľa ich vzniku na prírodné a umelé. **Prírodné adhezíva**, sem patria najčastejšie adhezíva na báze škrobu, albumín, adhezíva na báze zvierat a prírodných gúm. Majú dlhú skladovaciú životnosť a ľahko sa aplikujú. Ich použitie je limitované na papier, kartón, fólie a ľahké drevo. Majú nízku pevnosť.

**Syntetické adhezíva**, ktoré sa delia na termoplastické, reaktoplastické, elastoméry a zmesi [2].



## **Delenie:**

### **a. podľa spôsobu vytvárania lepeného spoja**

Pre vytvorenie adhézných podmienok v spoji musí adhezívum prejsť z fáze tekutej do tuhej. Tento proces nazývame vytvrdzovanie. Rozlišujeme vytvrdzovanie:

- za normálnej teploty +15° až +25 °C
- za tepla +30° až +100 °C
- za horúca +100 °C

Podľa spôsobu, akým táto zmena prebehne, charakterizujeme jednotlivé druhy adhezív na:

- **roztokové a disperzné** – vytvrdzujú následkom vsakovania, alebo odtekania vody, alebo organického rozpúšťadla.
- **reaktívne** - tuhnú alebo sa vytvrdzujú následkom chemických reakcií vyvolaných napr. zvýšením teploty, prídavkom tvrdidla, kontaktom s kovmi a pod.
- **tavné a netavné** – tuhnú po predchádzajúcom roztavení pri ochladení na izbovú teplotu.
- **citlivé na tlak** – napríklad lepiace pásky, spoj vzniká za pôsobenia tlaku [5] [7].

### **b. podľa vytvrdzovania chemickou reakciou**

Vytvrdzovacie reakcie je možné deliť do troch typov a to polykondenzácia, polymerácia, polyadícia.

- **Polykondenzácia** je vytvrdzovanie pomocou zlučovania väčšieho počtu molekúl stupňovitým mechanizmom do makromolekúl, sprevádzané tvorbou jednoduchých molekúl (vody, alkoholu a pod.). Výsledný produkt má iné elementárne zloženie ako počiatočné monoméry.
- **Polymerácia** je polyreakcia, pri ktorej sa molekuly monoméru reťazovo spájajú do makromolekúl polyméru. Pri tomto type vytvrdzovania nedochádza k tvorbe jednoduchých molekúl ako v prípade polykondenzácie. Produkt má obvykle rovnaké elementárne zloženie ako počiatočný monomér.
- **Polyadícia** je podobná polykondenzácii z hľadiska mechanizmu. Nedochádza však k tvorbe nízkomolekulových látok. Elementárne zloženie polyméru je rovnaké ako zloženie monoméru [5].

## Delenie syntetických adhezív

- **Reaktoplastické** adhezíva sa vyznačujú neschopnosťou opätovného vytvrdenia po zahriatí. Vytvrdenie adhezíva prebieha pomocou chemickej reakcie pri izbovej alebo zvýšenej teplote v závislosti od typu. Niektoré adhezíva tohto typu potrebujú pre vytvrdenie zvýšený tlak, iné len kontaktný tlak. Sú bežne dostupné v tekutom stave, prípadne pasty v tuhom stave. Obvykle sú v dodávané ako jednozložkové, alebo dvojjložkové balenia. Jednozložkové balenia obvykle potrebujú pre vytvrdzovanie zvýšené teploty a majú krátky skladovací čas. Dvojjložkové balenia majú dlhšiu dobu skladovania a vytvrdzovanie prebieha za izbovej teploty. Nevýhodou je presné dávkovanie oboch súčastí, zabezpečujúc ich zmiešanie s ohľadom na homogenitu výslednej zmesi. Po zmiešaní zložiek je treba čo najskôr prejsť k aplikácii na spoj.

Ich odolnosť voči zvýšeným teplotám je vysoká, pri týchto teplotách preukazujú malú elastickú deformáciu. Pevnosť v odlupovaní je veľmi dobrá. Z týchto charakteristík vyplýva ich použitie ako konštrukčné spojivo v prostredí zvýšených teplôt. Patria sem napríklad epoxidy, polyamidy, polyester a ďalšie [2].

- **Termoplastické** sa vyznačujú schopnosťou opätovného vytvrdenia po zahriatí. Sú to jednozložkové systémy, ktoré sa vytvrdzujú ochladením z rozpusteného stavu. Termoplastické adhezíva nie sú doporučené pre použitie nad 66°C, i keď v určitých podmienkach je možné ich použitie do teploty 90°C. Majú veľmi slabú odolnosť voči creepu ale dobrú pevnosť pri namáhaní odlupovaním. Používajú sa predovšetkým na spájanie nekovových adherendov, ako sú drevo, koža, plasty a papier. Nie sú občajne používané ako konštrukčné spojivá. Patria sem napr.: polyamidy, polyvinylchloridy, polyvinylacetáty a ďalšie [2].

- **Elastoméry** sú založené na syntetických alebo prírodných polyméroch. Majú výbornú pevnosť a elasticitu. Je možné ich použiť v širokej škále aplikácií. Občajne sú požadované práve pre svoju vysokú flexibilitu a pevnosť pri odlupovaní. Dodávané sú v rôznych formách, ako pásy citlivé na tlak, pasty, disperzie a i. Sú odolnejšie voči teplu než termoplasty, ale menej ako reaktoplasty. Doporučené teplotné rozmedzie pre ich použitie 66°C - 204°C. Pri prekročení prípustných teplôt sa nikdy nerozpustia kompletne. Sú používané na málo zaťažované spoje pre ľahké materiály. Spájajú sa

nimi materiály ako guma, textil, fólie, papier, koža. Patria sem napríklad prírodná guma, polyizobutylén, polyuretán, polysulfid, silikón, neoprén a ďalšie [2].

- **Zmesi** sú kombináciou zložiek z dvoch chemických skupín vybraných z termoplastických, reaktoplastických, alebo elastomérnych. Okrem určitých epoxidových zlúčenín je pre väčšinu z nich na vytvrdenie potrebný tlak a zvýšená teplota. Majú obyčajne vyššiu pevnosť, flexibilitu a vyššie tepelné rozpätie použitia, než ostatné adhezíva. Preto sú používané ako štrukturálne adhezíva. Spojované materiály zahŕňajú keramiku, kovy, sklo a reaktoplasty. Aplikačné použitie je v prostredí so zvýšenou teplotou, kde prenášajú vyššie zaťaženie napr. armáda, priemysel [2].

## 3 Teórie adhézných spojov

### 3.1 Adhézia

#### Mechanická teória adhézie

Má význam u členitých poréznych a drsných povrchov. Adhézny spoj sa vytvorí preniknutím adhezíva do pórov a iných nerovností na povrchu adherendu. Povrch s veľkým množstvom iregularít by teda mal mať vyšší potenciál pre pevnejší spoj. Pri týchto nerovnostiach v makroskopickej škále sa javia ako najlepšie materiály na lepenie textílií. Makroskopické nerovnosti sa vo vrstve adhezíva správajú ako vruby [1] [2].

#### Absorpčná teória adhézie

Molekuly adhezíva sú fyzicky absorbované povrchom adherendu. Je nutné, aby molekuly patrili do polárnej funkčnej skupiny (schopnosť vzájomného pôsobenia). Pevnosť spoja zaisťujú Van der Waalove sily. Musí byť dosiahnutý dostatočný kontakt adherendu a adhezíva, takto dôjde k dobrej pevnosti spoja [1] [2].

#### Difúzna teória adhézie

Difúzna teória má význam predovšetkým pri lepení polymérov, u kovov a anorganických adherendov sa prakticky neuplatňuje. Táto teória naznačuje, že adhézia je vytvorená interdifúziou medzi adhezívom a adherendom. Vhodné podmienky a druh materiálu teda ovplyvňujú jej vznik. Pri difúzií nevznikajú žiadne koncentrátoary napätia, pretože nedochádza k diskontinuite vo vlastnostiach materiálu [2] [5].

#### Elektrostatická teória adhézie

Adhézia je vytváraná dôsledkom nerovnakého elektrického potenciálu na rozhraní adhezívum-adherend. Pri dotyku vrstiev dochádza k prenosu elektrónov a jedna z vrstiev sa tak stáva bohatšia a druhá chudobnejšia na elektróny, takto opačne nabité časti spoja sa navzájom priťahujú na základe rozdielných polarít. Elektrostatická teória je uspokojujivé vysvetlenie pre formovanie spojení polymér-kov, čoho dôkazom je elektrické vybitie, ktoré bolo pozorované pri rozlepovaní týchto typov spojov [2].

## Chemická teória adhézie

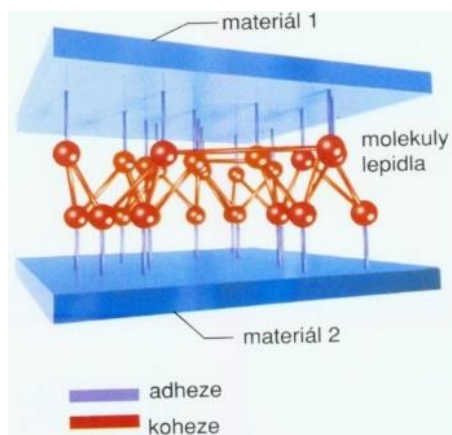
Adhézia je v tomto prípade dosahovaná chemickou kovalentnou väzbou na rozhraní medzi adhezívom a adherendom. Obe atómy zúčastňujúce sa na vytvorení väzby majú spoločnú dvojicu elektrónov, od každého atómu jeden [2].

### 3.2 Kohézia

Predstavuje vlastnú pevnosť adhezíva, s ktorým chceme spájať substrát. Je výsledkom kohéznych medzimolekulárnych síl vo vnútri adhezíva. Pokiaľ dôjde k porušeniu adhézneho spoja vo vrstve adhezíva, tak je adhézna pevnosť vyššia než kohézna pevnosť. Kohézna pevnosť je závislá na:

- Zložení samotného adhezíva.
- Na tepelnom namáhaní lepeného spoja [4].

Zlyhanie spoja vplyvom kohézneho poškodenia, kedy sa spoj preruší vo vnútri adhezíva, je ideálny typ porušenia, pretože pri tomto type poškodenia bola dosiahnutá maximálna sila adhezíva v spoji. V analýze adhézných spojov sa ako spôsob zlyhania udáva pomer medzi kohéznym a adhéznym zlyhaním. Ideálny stav je 100% kohézneho zlyhania vo vrstve adhezíva. Na Obr.3 je ilustrovaná adhézia a kohézia v adhéznom spoji [2] [8].



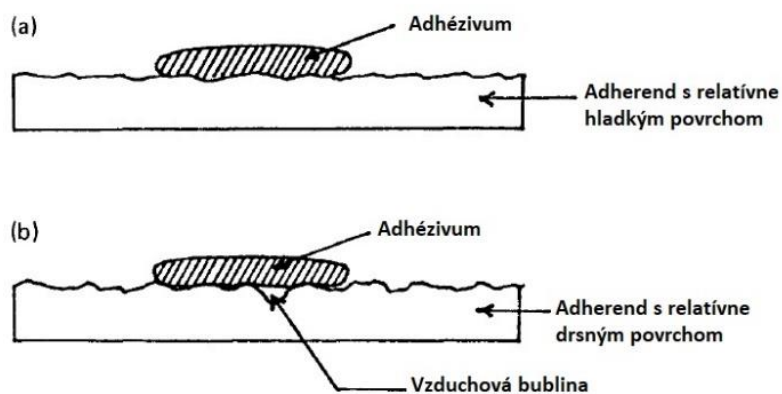
Obr. 3 Adhézia a kohézia [10]

### 3.3 Zmäčavosť

Charakteristikou zmáčavosti u adhézných spojov je povrchové napätie adhezíva, to musí byť menšie než povrchové napätie adherendu. Toto je podmienkou kvalitného adhézneho spoja. Mierou zmáčavosti je kontaktný uhol vznikajúci medzi povrchom

tekutiny a adherendom. Zmäčavosť je tým väčšia, čím nižší je kontaktný uhol. Pokiaľ je kontaktný uhol väčší ako  $90^\circ$ , zmení sa zmáčavosť na odpudivosť.

Dobrá zmáčavosť sa prejavuje dobrou zabiehavosťou adhezíva do nerovností povrchu adherendu, ako je vidieť z Obr. 4 a). Zlá sa prejavuje pri zlej zabiehavosti, čo vyúsťuje do menšej celkovej plochy kontaktu medzi činiteľmi spoja, Obr. 4 b). Vytváranie vzduchových bublín a im podobným defektom zhoršuje kvalitu adhézneho spoja [2] [8].



Obr. 4 Príklad dobrej (a) a zlej zmáčavosti povrchu (b) [2]

## 4 Technológia a vplyvy prostredia na adhézny spoj

### 4.1 Vplyv atmosférických podmienok na pevnosť adhézneho spoja

Vplyv atmosféry je daný pôsobením niekoľkých faktorov: teploty, vody a jej pár, kyslíka a ultrafialového žiarenia. Zahrievanie adhézných spojov v atmosférických podmienkach nastáva periodicky, má teda cyklický charakter. Z takéhoto pôsobenia atmosféry a jej faktorov vznikajú tepelno-vlhkostné napätia cyklického charakteru, čo spôsobuje urýchlené starnutie. Čím väčšie sú tieto napätia a čím rýchlejšie sú ich zmeny, tým rýchlejšie nastáva únava spoja a znižuje sa jeho životnosť [9].

#### Vplyv vlhkosti

Vystavením difúznemu pôsobeniu vody dochádza k narušeniu medzimolekulárnych a chemických väzieb adhezíva, a tým sa znižuje kohézna pevnosť spoja. Dochádza k hydrolýze, teda rozpúšťaniu. Súbežne plastifikácia pri navlhnutí vytvára možnosť uplatnenia relaxačných procesov. Striedanie napätí pri vlhnutí, alebo vysúšaní pôsobí ako únavové cykly na adhézny spoj. Ovplyvnenie spoja vlhkosťou môže pôsobiť i adhéznou degradáciu. Pri takomto ovplyvnení spoja nastáva adhézny zlom.

Pri narušení spoja vplyvom vlhkosti je treba brať do úvahy aj rozmerový faktor  $\varepsilon$ , pretože malé vzorky majú pomer plochy vrstvy na lepenie  $S$  k jeho obvodu  $P$  malý. Pri lepení nepórovitých materiálov, ako je napríklad kov, kde voda nemôže difundovať do rozhrania adhezívum-adherend sa hodnota tohto pomeru veľmi podstatne odráža na odolnosti spoja proti vode. Čím je pomer lepiacej plochy k obvodu lepeného spoja väčší, tým je spoj pevnejší [3] [5] [9].

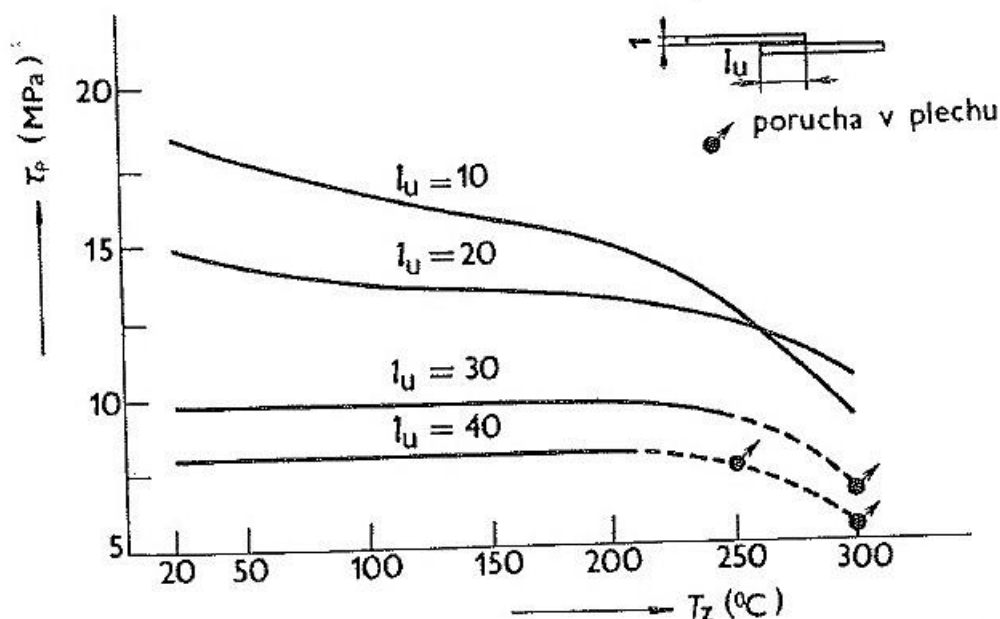
#### Vplyv teploty

Spoľahlivosť adhézných spojov koreluje s ich odolnosťou pri striedaní sa zvýšených a znížených teplôt. Schopnosť zachovať si mechanické vlastnosti i pri zvýšenej (zníženej) teplote nazývame tepelná stálosť. Tepelná stálosť závisí i na odolnosti proti prudkej zmene teploty. Odolnosť voči takémuto tepelnému rázu sa dá navýšiť zvýšením elasticity adhezíva.

Nízke teploty (menej ako 10°C) a vysoká vlhkosť (vyššia ako 80%) spôsobujú kondenzáciu vzdušnej vlhkosti na povrchu adherendov a zabraňujú tak správne vytvoreniu spojov. Miestnosti pre vytváranie adhézných spojov by teda mali dosahovať

parametre pre správnu teplotu (teplota medzi 15-30°C) a vzdušnú vlhkosť (medzi 30 až 65% RH) [3] [5] [9].

Pri krátkom pôsobení vysokých teplôt dochádza u adhezív k tepelnému rozkladu. Pri dlhom pôsobení nízkych teplôt dochádza k termooxidačnej deštrukcii. Zmena teploty môže podmieniť zmenu štruktúry, tým následnú zmenu mechanických vlastností a narušenie integrity spoja. Nezanedbateľné nie sú ani tepelné napätia vznikajúce z dôvodu rôznych tepelných rozťažností systému adherend-adhezívum. Zatiaľ čo u malých dĺžok prekrytia spoja pevnosť v šmyku klesá, u veľkých dĺžok prekrytia tomu tak byť nutne nemusí, ako ukazuje Obr. 5 [5] [9].



Obr. 5 Vplyv teploty na pevnosť v šmyku pri rôznej dĺžke prekrytia adhézneho spoja. Lepidlo Hidux 1197, Substrát AlCuMg2, chemický činený povrch. [5]

#### 4.2 Vplyv fixácie a tlaku na pevnosť spoja

Dôležitým úkonom pred vyvodením tlaku na práve zostavený spoj je zaistenie správnej vzájomnej plochy zostavovaných častí konštrukcie. Fixácia je nutná, pretože niektoré adhezíva, napríklad reaktívne, v prvej fáze zmenia hustotu a môžu tak spôsobiť zmenu polohy dielcov.

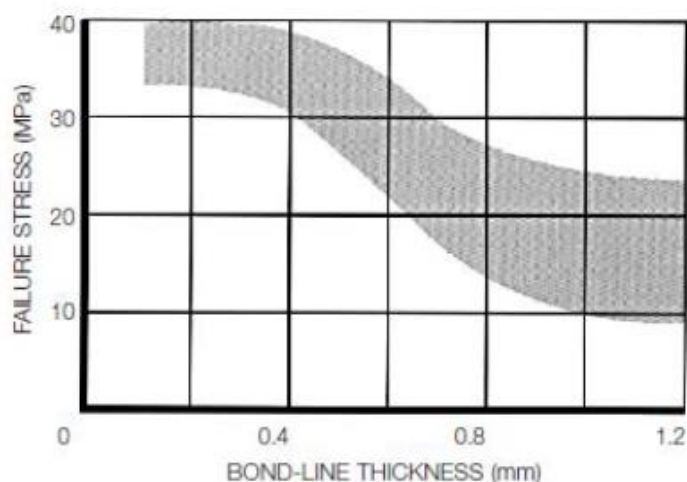
Účelom vyvíjania tlaku na spoj je predovšetkým rovnomerné rozvrstvenie adhezíva v medzere medzi substrátmi (u mäkkších hmôt, napr. drevo, i pre vyrovnanie nerovností adherendu). Tlak musí pôsobiť kolmo na lepené plochy a byť primeraný pevnosti podkladu a viskozite adhezíva. Pokiaľ to je možné, je treba sa riadiť priloženým návodom výrobcu. Kvapkovité vytekanie adhezíva zo spoja je najlepším dôkazom toho,



že sa v spoji vytvoril rovnomerný adhézný film. Pôsobenie tlaku je časovo vymedzenou dobou potrebnou k stuhnutiu adhezíva, ktorá je obvykle určená výrobcom [7].

#### 4.3 Vplyv hrúbky lepenej vrstvy na pevnosť spoja

S hrúbkou lepenej vrstvy klesá pevnosť v šmyku daného spoja. Na Obr. 6 je znázornená závislosť hrúbky lepenej medzery a šmyková pevnosť fóliového epoxidového adhezíva. Z grafu je vidieť že optimálna hrúbka adhezíva medzi je 0,1mm až 0,4mm.



Obr. 6 Závislosť pevnosti v šmyku v MPa na hrúbke lepenej medzery v mm [6]

U veľmi tenkých lepených medzier je nutné dávať pozor, aby sa adhezívum skutočne nanieslo na celý povrch adherendu [6] [9].

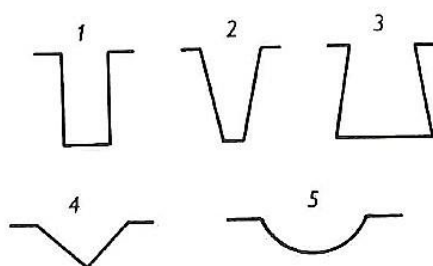
#### 4.4 Doba otvoreného a uzavretého zostavenia spoja

Je časový interval, ktorý začína okamihom naniesenia tekutého adhezíva a končí okamihom priloženia druhej lepenej plochy, tj. uzavretím spoja. Závisí na reaktivite adhezíva a jeho nanesej vrstve, teplote okolia a porozite adherendu. Je udaná výrobcom. V dobe otvoreného spoja je spoj možno predušovať. Doba otvoreného spoja nesmie prekročiť limit pracovnej životnosti lepidla [7].

#### 4.5 Vplyv drsnosti na pevnosť spoja

Efekt drsnosti povrchu na adhéziu spojovaných materiálov si je možné priblížiť jednoducho. Vezmime dve Johansonove mierky, ktoré majú veľmi nízku drsnosť povrchu a priložme ich k sebe, môžeme sledovať, že pre ich oddialenie musíme vynaložiť určitú silu. Je to dôsledok spojenia mierok vplyvom difúzie. To je možné dosiahnuť len u veľmi hladkých povrchov. Pri teoreticky bezchybnom povrchu, dochádza k samovoľnej adhézii bez použitia adhezíva.

Dôvodom, prečo potrebujeme pre spájanie materiálov adhezíva, je fakt, že plochy, ktoré spájame, nemajú nikdy perfektne hladký povrch. Aj po leštení sa nerovnosti pohybujú v rozmedzí od  $10^{-8}$  až  $10^{-7}$  m.



Obr. 7 Základné typy vád povrchu. 1 – válcová nerovnosť, 2 – kónická otvorená nerovnosť, 3 – kónická uzavretá nerovnosť, 4 – kónická plochá nerovnosť, 5 – kónická misková nerovnosť. [5]

Na Obr. 7 je De Bruyneho rozdelenie nerovností. De Bruyne dochádza k záveru, že pevnosť spoja je tým väčšia, čím menšia je hĺbka a priemer nerovností. Každá z tvarových chýb má svoje špecifiká. Zo znalosti tvarových chýb povrchu je možno prisúdiť danému spoju najlepšiu možnú konštrukciu pri danom prevažujúcom zaťažení. Dôležitým poznatkom je teda že:

- Pri dosiahnutí molekulárne hladkosti-rovinnosti dochádza k adhézii bez použitia adhezíva.
- Platí, že nie každé zdrsnenie zvýši pevnosť spoja. Rozhodujúce je zvýšenie účinného povrchu.

Výhoda hladkosti-rovinnosti povrchu proti zdrsneniu sa ukáže len vtedy, ak dôjde na priblíženie lepených povrchov na vzdialenosť jednej molekuly. I tak ale dochádza po zdrsnení k vyššej pevnosti lepeného spoja. Je to preto, že zdrsnenia zvyšujú účinný povrch. Odtiaľ vyplýva výhoda zdrsnenia a zdanlivé poprenie De Bruynovej teórie. Najvhodnejšia hĺbka zdrsnenia býva uvádzaná 1-6 mikrometrov [5].

## 4.6 Príprava povrchu

Z technologického hľadiska je nutné, aby lepené plochy adherendu boli čo najmenej členité, čisté a po zlepení nevyžadovali ďalšie úpravy. Príprava povrchu je nutná, aby dopomohla adherendu k formovaniu pevného a odolného spoja. Je potrebné zbaviť sa nežiadúcich vrstiev oxidov, farby, chromátového povlaku, fosforického povlaku, alebo silikónu a ďalších. Tieto vrstvy zabraňujú adhezívu spojiť sa s povrchom adherendu [2][3][7].

### Mechanická príprava povrchu

Medzi mechanické úpravy povrchu sa počíta: otryskávanie, brúsenie, pilovanie, pieskovanie na dosiahnutie zdrsnenia povrchu kvôli zvýšeniu kontaktnej plochy. Chemickým leptaním sa odstránia oxidické vrstvy, ktoré len veľmi slabo držia na povrchu adherendu, z povrchu adherendu a dopomôžu vytvoreniu oxidov, ktoré sú pevne späté z povrchom adherendu. Alternatívou k tomuto kroku je aplikovanie Primeru pre zvýšenie zmáčavosti povrchu a ochrane proti oxidácii.

Obsluha by mala mať pri manipulácii z dielmi čisté rukavice. Manipulácia s dielmi by sa mala vykonávať v bezprašnom prostredí. Ručné mechanické úpravy nie sú preferované, využívajú sa vtedy, ak nie je dostupný iný spôsob. Povrchy čistých kovov majú vysokú voľnú povrchovú energiu. To je s nízkou voľnou povrchovou energiou adhezív podmienkou veľmi pevného spoja. Jednou z úloh povrchovej úpravy je odstrániť absorbovaný film vytvorený vplyvom prostredia a nahradiť ho povrchovou vrstvou, ktorá je pre lepenia vhodná a ktorá nie je rýchlo znečisťovaná okolitou atmosférou [2][5].

### Príprava a čistenie povrchu kovu

Príprava povrchov kovu pre silný adhézy spoj vyžaduje niekoľko krokov. Ako bolo uvedené, kovy majú vysokú povrchovú energiu, a preto absorbujú oleje a iné kontaminanty, ktoré môžu byť prítomné v okolitom prostredí v plynnom stave a na povrchu vytvárajú film, ktorý nie je vhodný k aplikácii adhezíva [2][5].

Postup čistenia adherendu zahrňuje:

1. Odstránenie uvoľnených častí pri procese výroby adherendu.

2. Čistenie pomocou rozpúšťadla - je proces očistenia povrchu adherendu od nečistôt zachytených na povrchu pomocou organického rozpúšťadla bez fyzickej alebo chemickej zmeny čisteného materiálu.
3. Chemické očistenie – čistenie pomocou chemických prípravkov. V tomto prípade je chemické zloženie povrchu upravené, aby sa zvýšila adhézia povrchu. Tomuto typu čistenia by vždy malo predchádzať očistenie pomocou rozpúšťadla. Nemusí tomu tak ale byť vždy.
4. Aplikácia Primeru – v niektorých prípadoch vyžadovaný krok. Pre zaručené vynikajúce a pevné spoje zvlášť v nepriaznivých prostrediach. Primer zabezpečí:
  - zlepšenie zmáčavosti
  - ochrana povrchu adherendu proti oxidácií po očistení povrchu
  - zamedzenie vzniku korózie [2].

#### **4.7 Vytvrdzovanie adhézneho spoja**

Vytvrdzovanie je proces premeny reaktívnej vrstvy adhezíva z tekutého stavu do pevného stavu chemickou reakciou pri určitej teplote a tlaku. Roztokové a disperzné adhezíva tuhnú následkom vsakovania a odtekania vody, alebo rozpúšťadla. Reaktívne adhezíva vytvrdzujú následkom chemickej reakcie, vyvolanej rôznymi vplyvmi (zvýšená teplota, kontakt s kovom a pod.). Tavné adhezíva tuhnú po predchádzajúcom roztavení a ochladení na nižšiu teplotu.

Pre niektoré materiály sa vytvrdzovanie dá zvýšenou teplotou urýchliť. Premenné, čas a teplota, musia byť počas celej doby vytvrdzovania kontrolované a musia zodpovedať doporučenému štandardu výrobcu adhezíva. Pri lepení za normálnej teploty je treba hlavne pozorovať spodnú teplotnú hranicu, pretože pri nižšej teplote, než je to doporučené, rozpúšťadlové adhezíva len pomaly vysychajú. Mechanické charakteristiky adhezíva závisia na jeho vytvrdení [7].

## 5 Pevnostná analýza adhézneho spoja

Reálna pevnosť tuhých látok je približne 3x menšia ako pevnosť spočítaná teoreticky zo síl vzájomného medzimolekulového pôsobenia častíc. Tento rozdiel sa vysvetľuje hneď niekoľkými dôvodmi: nedokonalosťami štruktúry tuhých látok, prítomnosťou mikrotrhlín, ktoré v dôsledku tepelných, mechanických a iných účinkov predstavujú počiatočné defekty v štruktúre. Pevnosť však závisí i na technológii a podmienkach lepenia.

Adhézne spoje predstavujú heterogénne systémy a teda sa vlastnosti jednotlivých zložiek spoja od seba odlišujú. Heterogénne systémy sa líšia od homogénnych predovšetkým napätím na rozhraní fáz, ktoré vznikajú pri tvorbe, ale aj pri využívaní systému. Tieto napätia sa zvyšujú v dôsledku rozdielu deformačných charakteristík vplyvom teploty, vlhkosti, štrukturalizácie a deformácie pri starnutí i vplyvom externého namáhania.

Nosnosť a deformácia adhézných spojov závisí od mechanických vlastností spoja a napäťovo-deformačného stavu adhézneho spoja. Ten je daný deformačnými vlastnosťami spoja a adherendov, geometriou spoja a spôsobom namáhania.

Napäťovo deformačný stav je väčšinou nerovnomerný. Lom spoja začína v mieste v ktorom napätie dosahuje kritické hodnoty. Pri krátkodobom hodnotení pevnosti adhézných spojov využívame najčastejšie 3 parametre: stredná pevnosť, maximálne napätie, energia deštrukcie.

- **Stredná pevnosť** - predstavuje napätie, ktoré je dané pomerom sily potrebnej na lom k ploche lepeného spoja  $\sigma = \frac{F_{MAX}}{S}$ . Stredná pevnosť pri skúškach prekrývaných adhézných spojov závisí na geometrii adhézneho spoja, od hrúbky a dĺžky lepených doštičiek.
- **Maximálne napätie** - je napätie v štruktúre spoja, ktoré v ploche spoja dosahuje maximálne hodnoty. Je to miesto, kde sa adhézny spoj začína porušovať.
- **Energia deštrukcie** – energetický parameter, používa si pri hodnotení spojov namáhaných nerovnomerným odtrhovaním. Je to energia, pri ktorej dôjde k porušeniu lepeného spoja [9] [5].

Maximálnu pevnosť adhézneho spoja dosiahneme už dodržaním niekoľkých jednoduchých zásad:

- najväčšia pevnosť spoja musí byť orientovaná v smere maximálneho namáhania

- koncentrácie napätí znížiť na minimum
- vrstva adhezíva musí byť rovnomerná s požadovanou hrúbkou
- dosiahnutie správnych povrchových vlastností adherendu [5].

## 5.1 Charakter lomu lepeného spoja

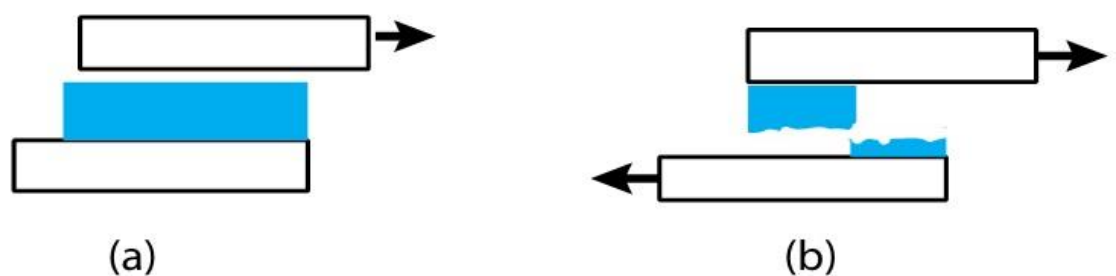
Pri zaťažovaní adhézneho spoja nad kritickú hranicu mechanickej únosnosti spoja vzniká v najslabšom mieste spoja, buď to v adhezíve, alebo na rozhraní adherendu a adhezíva, lom. Najčastejším lomom vyskytujúcim sa u adhezíva je adhézny a kohézny lom, prípadne kombinácia oboch.

### Adhézny lom

Pokiaľ zlyhanie spoja nastane na rozhraní adherendu a adhezíva hovoríme o adhéznom lome. Pri tomto type lomu je adhezívum pevnejšie, ako sila spojenia materiálov na rozhraní. Tento typ zlyhania je vo všeobecnosti nežiadúci.

### Kohézny lom

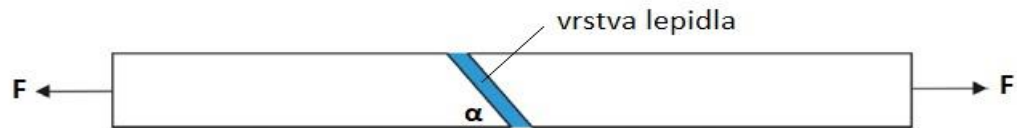
Ak sa adhézny spoj poškodí práve vo vrstve adhezíva nazývame tento typ lomu kohézny. V tomto prípade, keďže zlyhanie nastáva vo vrstve adhezíva, je pevnosť spojenia dvoch materiálov na rozhraní väčšia, ako pevnosť vrstvy adhezíva. Tento typ lomu je vo všeobecnosti preferovaným typom zlyhania adhézneho spoja [14].



Obr. 8 a) Adhézny lom, b) Kohézny lom [14]

## 5.2 Tupý skosený spoj

Na Obr. 9 je prekryvaný spoj, ktorého uhol medzi osou vrstvy adhezíva a osou adherendu je väčší než  $0^\circ$  a menej ako  $90^\circ$  [11].



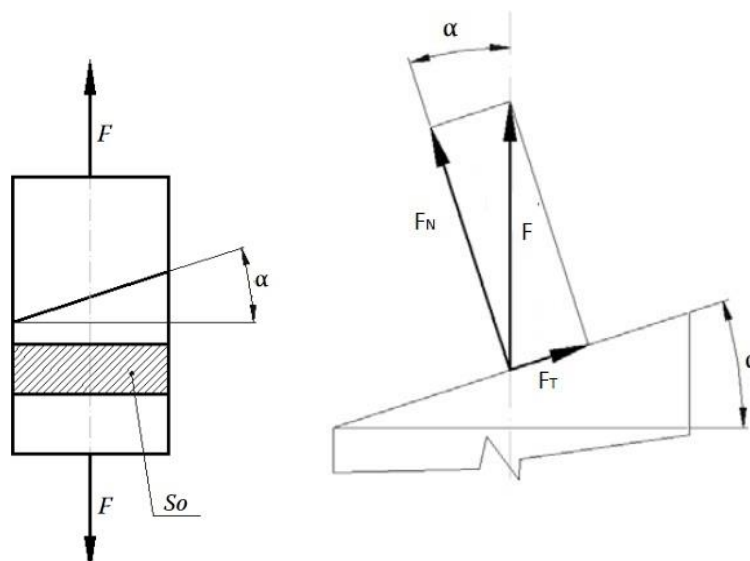
Obr. 9 Tupý skosený spoj [12]

Pri pôsobení vonkajšej sily na plochu platí všeobecne vzťah pre napätie  $\sigma$  :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (1)$$

kde  $F$  je vonkajšia pôsobiaca sila a  $S_0$  je plocha. Pre náš spoj je rozloženie síl na Obr.10.

Pri rozklade síl dostaneme pre sily v normálovom a tangenciálnom smere vzťahy:



Obr. 10 Model tupého skoseného spoja [11]

$$F_N = F \cdot \cos\alpha \quad (2)$$

$$F_T = F \cdot \sin\alpha \quad (3)$$

kde  $F_N$  je normálová sila v reze,  $F_T$  je sila pôsobiaca v lepidle tangenciálne k rovine rezu skosenia,  $F$  je sila vyvíjaná na spoj,  $\alpha$  je uhol skosenia rezu. Pre plochu  $S_0$  platí:

$$S = \frac{S_0}{\cos\alpha} \quad (4)$$

Pre normálové napätie  $\sigma_\alpha$  a šmyškové napätie  $\tau_\alpha$  pre tupý skosený spoj po dosadení:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{F_N}{S} = \frac{F \cdot \cos \alpha}{\frac{S_0}{\cos \alpha}} = \frac{F}{S_0} \cdot \cos^2 \alpha = \frac{\sigma_0}{2} \cdot (1 + \sin(2\alpha)) \quad (5)$$

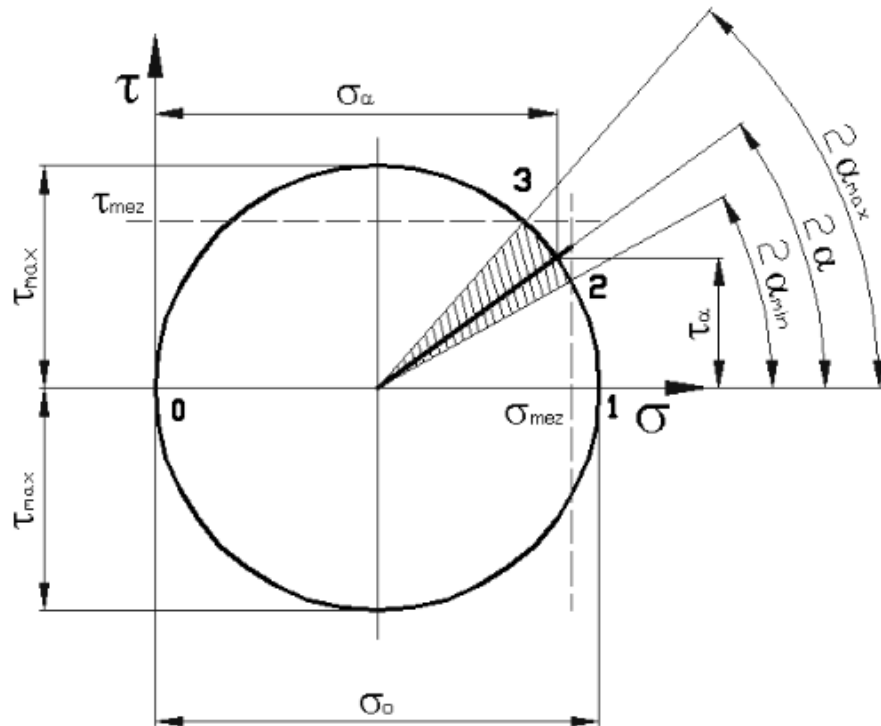
$$\tau_{\alpha} = \frac{F_T}{S} = \frac{F \cdot \sin \alpha}{\frac{S_0}{\cos \alpha}} = \frac{F}{S_0} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha = \frac{\sigma_0}{2} \cdot \sin(2\alpha) \quad (6)$$

Všetky adhezíva majú svoju kritickú hranicu, a to silu, kedy dôjde k zlyhaniu spoja a spoj nie je naďalej schopný prenášať požadované napätie, v normálovom aj tangenciálnom smere. Ak vynesieme do Mohrovho diagramu z Obr. 11, kritické normálové napätie, vieme určiť minimálny uhol skosenia spoja. Analogicky, pri vynesení kritického šmykového napätia vieme určiť maximálny uhol pre tupý skosený spoj a takto určiť oblasť vhodných hodnôt uhlu  $\alpha$  pre dané podmienky.

$$\sigma_{mez} = \frac{\sigma_0}{2} \cdot (1 + \cos(2\alpha_{min})) \quad (7)$$

$$\alpha_{min} = 2 \cdot \arccos\left(2 \cdot \frac{\sigma_{mez}}{\sigma_0} - 1\right) \quad (8)$$

Kde  $\alpha_{min}$  je minimálny uhol pre spoj a  $\sigma_{mez}$  je medzné napätia spoja [12].



Obr. 11 Mohrova kružnica s vyšrafovanou optimálnou oblasťou pre uhol  $\alpha$  [11]



## 6 Experimentálne určovanie pevnostných vlastností adhezíva

### 6.1 Ciele a príprava experimentu

Cieľom experimentu bolo vytvoriť pevnostné kritérium pre adhezívum Acralock SA10-05 BLK. Skúšaným typom spoja bol tupý skosený spoj. Vrstava adhezíva pri statickej skúške v ťahu bola zaťažovaná z podstaty geometrie spoja biaxiálnym zaťažovaním dvoch napätí a to normálového a šmykového. Takéto skúšanie adhezíva odpovedá reálnym podmienkam lepšie, ako klasická statická ťahová skúška pri tupom spoji, alebo pri statickej skúške ťahom pre šmyk. Pretože v realite sú adhezíva často namáhané hneď niekoľkými druhmi napätí. Skúška by teda mala poskytnúť lepšie informácie o skutočnom správaní adhezíva.

Ako adherend boli použité vzorky z uhlíkovej ocele C60E (C60R) bez povrchovej úpravy. Z oceľovej tyče s priemerom 17 mm boli odrezané kusy s dĺžkou 140 mm, Obr. 12, v celkovej počte 15 kusov. Tieto sme v strede narezali postupne pod uhlom 45°, 53°, 60°.



Obrázok 12 Vzorky pre statickú ťahovú skúšku pred lepením



Obr. 14 Lepidlo Acralock SA 10-05 BLK



Obr. 13 Aplikačná pištoľ DS-51-10-00

Pre lepenie vzoriek bolo zvolené adhezívum Acralock na Obr.14. Jedná sa o rýchlo vytvrditeľné metylmetakrylátové dvojzložkové adhezívum pôvodne vyvinuté pre uplatnenie vo výrobe lodí, dnes používané i v automobilovom či leteckom priemysle. Nanášanie adhezíva bolo vykonané za pomoci aplikačnej pištole DS-51-10-00, z Obr. 13. Výhody tohto adhezíva zahrňujú absenciu nutnosti použitia Primeru pri lepení kovových povrchov. Technické údaje adhezíva Acralock SA 10-05 BLK :

|                               |                                   |
|-------------------------------|-----------------------------------|
| Farba:                        | Čierna (po zmiešaní)              |
| Doba spracovania:             | 4-7 min                           |
| Doba fixácie:                 | 15 min (minimum)                  |
| Hustota:                      | 0.98-1.00 g/cm <sup>3</sup>       |
| Spôsob vytvrdzovania:         | vzdušnou vlhkosťou                |
| Prevádzková teplota:          | - 55 až 120° C (200°C po dobu 1h) |
| Pevnosť v ťahu:               | 21-24 MPa                         |
| Pevnosť v šmyku (ASTM D1002): | 17-21 MPa                         |

Po konzultácií s technickým oddelením firmy Acralock boli pre lepšie pevnostné charakteristiky adhezíva uplatnené niektoré odporúčania. Doporučenia zahŕňali prebrúsenie povrchu substrátu z uhlíkovej ocele ručne brúsny papierom P 120 a následné odmastenie isopropylalkoholom. Iné úpravy povrchov pre dané adhezívum nie sú potrebné.

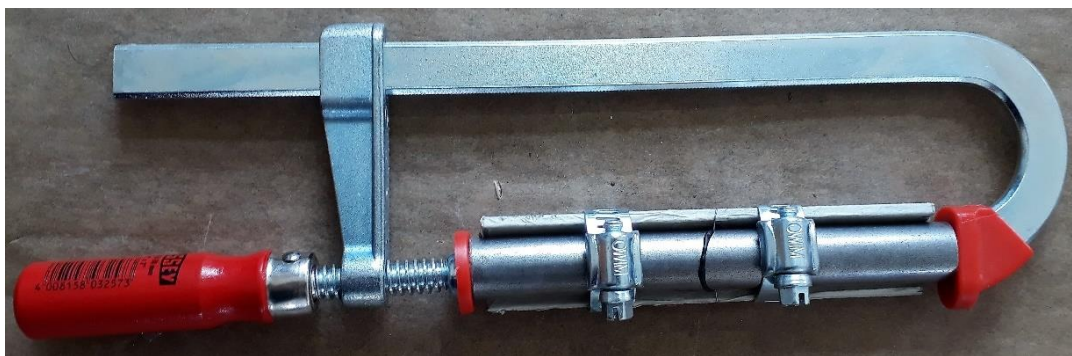
Pri nanášaní adhezíva je nutné, aby sa nanášalo v dostatočnej vrstve po celej ploche substrátu. Predchádza sa tým vzniku vzduchových bublín v spoji. Dobrý indikátor splnenia tejto podmienky je, že sa adhezívum po vyvinutí tlaku na spoj zo špáry vytlačí von. V opačnom prípade riskujeme nedostatočný objem adhezíva v lepenej špáre a oslabujeme tak výslednú silu spoja.

Po nanesení adhezíva po asi 1 až 1,5 minúty, čo zahrňovalo manipulačný čas, sa obe časti spojili k sebe tlakom vo fixačnom prípravku. Správna veľkosť špáry 0,4 mm bola zabezpečená jedným distančným drôtikom v strede lepenej plochy. Pre fixáciu vzoriek bol vyrobený fixačný prípravok, ktorý je na Obr. 15.



*Obr. 15 Zostavený fixačný prípravok bez naneseného adhezíva*

Prípravok sa skladal z trojuholníkového profilu z uhlíkovej ocele, ktorý bol kvôli zamedzeniu prilepeniu adhezíva k oceleovému profilu potiahnutý papierovou lepiacou páskou, a dvoch svoriek z nerezovej ocele, ktoré zamedzovali pohybu vzorku pri vyvíjaní tlaku. Oceleový profil a svorky zamedzovali pohyb súčasti v dvoch osiach a natočení. Zamedzenie pohybu v tretej ose, ako aj zabezpečenie tlaku, bolo zaistené stolárskou svorkou s maximálnym možným vyvinuteľným tlakom 150 N, Obr. 16.



*Obr. 16 Fixačný prípravok po aplikácii adhezíva na vzorku*

Po vytvrdení adhezíva a vyňatí vzorky bolo po obvode spoja vidieť vytvrdené adhezívum, Obr. 17. Adhezívum bolo po vytvrdení veľmi neelastické.



*Obrázok 17 Vzorka po vytvrdení adhezíva, uhol 45°*

Túto prebytočnú hmotu bolo nutné odstrániť, aby sa neprejavovala pri výsledkoch konečnej pevnosti adhézneho spoja. Na Obr. 18 môžeme vidieť vzorky po odstránení prebytočného adhezíva.



*Obr. 18 Vzorky po odstránení prebytočného adhezíva*

## **6.2 Statická skúška ťahom adhézneho spoja**

Statická skúška v ťahu bola vykonaná na stroji Instron 5582 Ústavu materiálového inžinierstva Českého vysokého učení technického v Prahe. Vzorky boli po zbavení prebytočného adhezíva vložené do stroja Instron na Obr.19.



*Obr. 19 Instron 5582*

Vzorka bola umiestnená do čelustí s Obr. 20. tak, aby bola v ose ťahového namáhania stroja. Následne sa do programu zadala šírka a dĺžka samotného vzorku, číslo vzorky a rýchlosť posuvu čelustí. Rýchlosť posuvu čelustí bola stanovená na 0,5mm/min.



Obr. 20 Vzorka v čelustiach uhol 45°

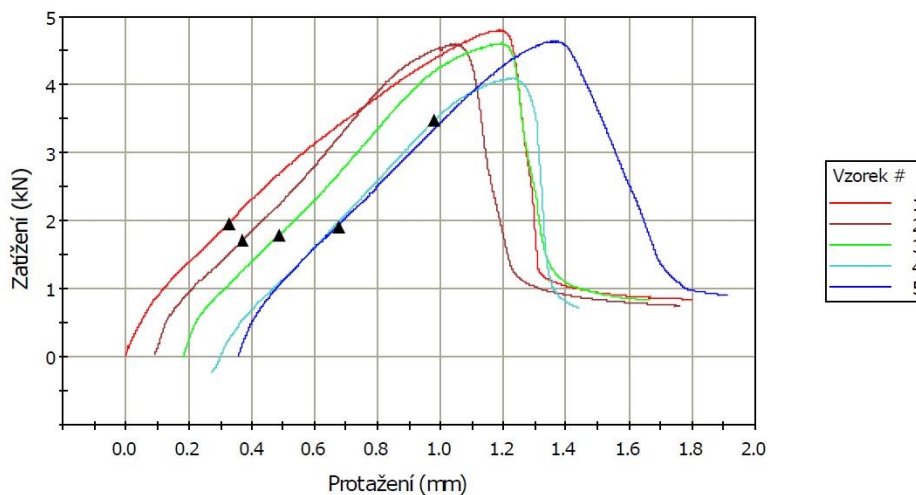
Pre každý uhol bol určený minimálny počet vzoriek pre testovanie. Pre každý z uholov 45°, 53°, 60° bolo vyhotovených 5 rovnakých vzoriek. Maximálna sila bola spočítaná ako aritmetický priemer z piatich skúšaných vzoriek pre každý uhol spoja. Nutnosť vyhotovenia piatich vzoriek vychádza z predpokladu, že i za rovnakých podmienok dôjde v experimente k odchýlkam. Pre jednotlivé sily a napätia bola spočítaná aj smerodajná odchýlka.

### 6.3 Vyhodnotenie výsledkov statickej skúšky v ťahu

Úlohou tejto skúšky bolo zistiť maximálnu silu pre dané uhly, ktorá vyvolá porušenie adhézneho spoja a jeho schopnosť prenášať napätie. Výsledky na grafoch Obr. 21, Obr. 22, Obr. 23. Pre zistenie medze pevnosti v ťahu bol použitý vzťah:

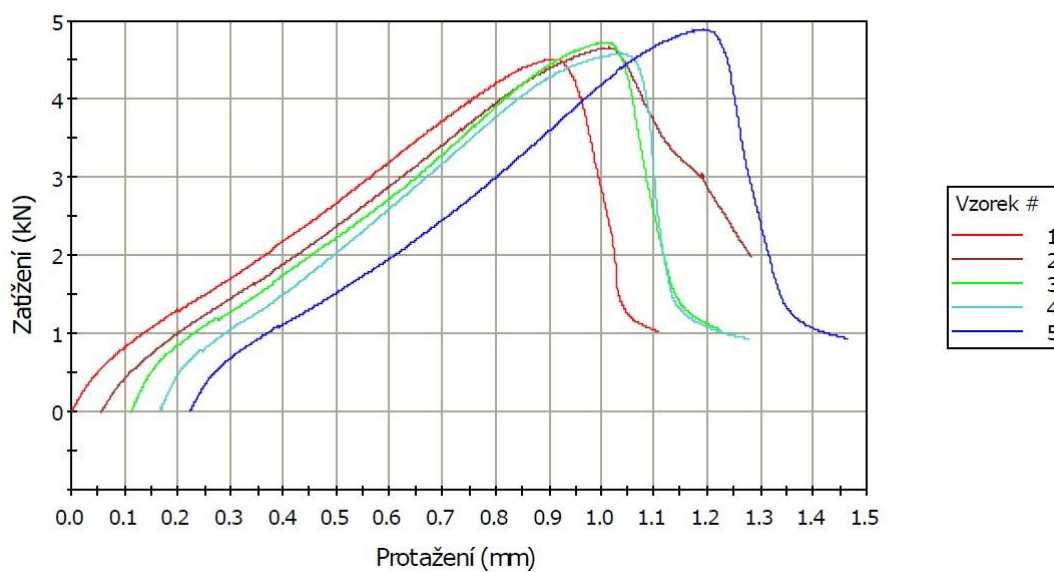
$$R_m = \frac{F_{MAX}}{\frac{S_0}{\cos \alpha}}$$

Vzorek 1 až 5



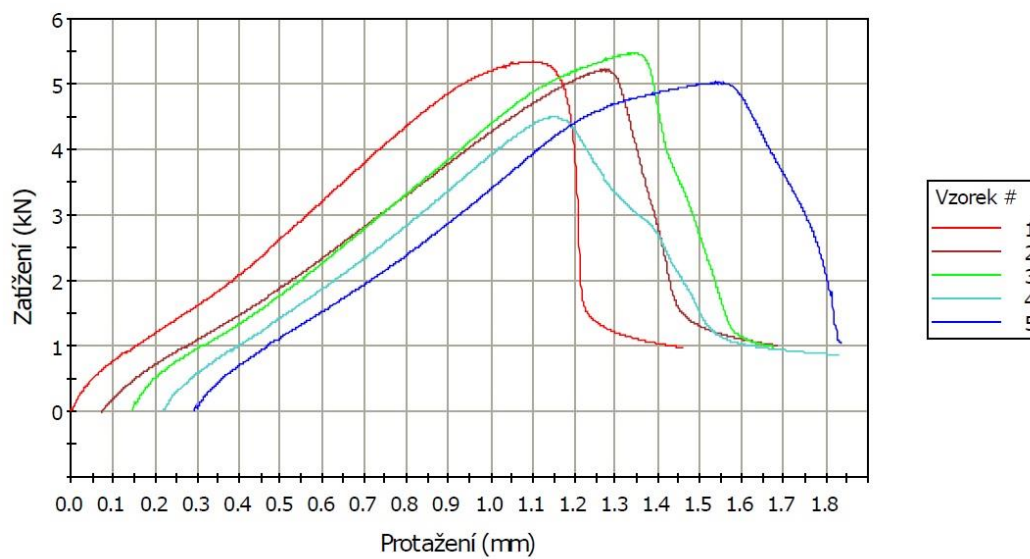
Obr. 21 Priebeh statickej skúšky v ťahu pre uhol  $45^\circ$

Vzorek 1 až 5

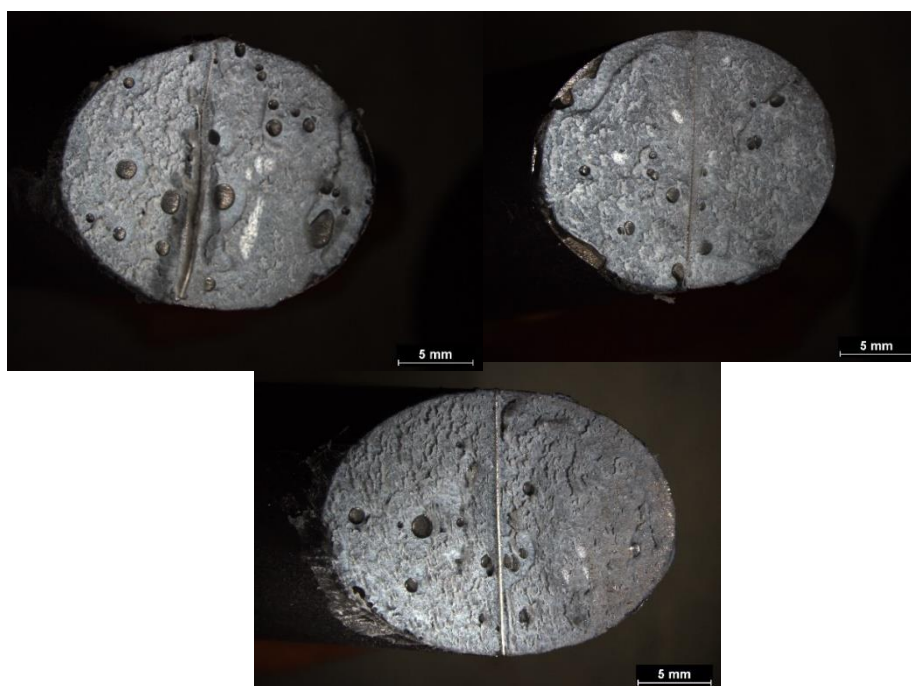


Obr. 22 Priebeh statickej skúšky v ťahu pre uhol  $53^\circ$

Vzorek 1 až 5



Obr. 23 Priebeh statickej skúšky v ťahu pre uhol  $60^\circ$



Obr. 24 Lomové plochy vzoriek. Z ľavej strany 45°, 53°. Dole 60°

Z Obr. 24 je pozorovateľný kohézny lom vo vrstve adhezíva, ku ktorému došlo pri pretrhnutí vzorku, je možno všimnúť kružnicové útvary vo vrstve adhezíva. Vyskytovali sa naprieč všetkými skúšanými vzorkami. Tieto útvary sú pravdepodobne pozostatky vzduchu zachyteného vo vrstve adhezíva pri lepení spoja alebo plynové kapsule vzniknuté z chemickej reakcií pri vytvrdzovaní. Žliabok v strede je pozostatok po distančnom drôtku.

Výsledné maximálne sily a nominálne napätia spojov zo statickej skúšky v ťahu sú uvedené v Tab. 1.

Tab. 1 Priemerné hodnoty maximálnych síl a nominálnych napätí spojov zo statickej skúšky v ťahu pre osové zaťaženie vzoriek a ich smerodajné odchyľky

| Uhol spoja v [°] | Sila [N]   | Plocha [mm <sup>2</sup> ] | R <sub>m</sub> [MPa] |
|------------------|------------|---------------------------|----------------------|
| 45               | 4546,9±152 | 321                       | 14,2±0,7             |
| 53               | 4730,6±238 | 377,2                     | 12,5±0,3             |
| 60               | 5251,3±342 | 457                       | 11,6±0,8             |

Najväčšiu prenášanú silu preniesol spoj s uhlom 60°. Druhú najväčšiu silu preniesol spoj s uhlom 53° a najmenšiu silu z troch sledovaných uhlov preniesol spoj s uhlom 45°.

#### 6.4 Pevnostné kritérium adhezíva

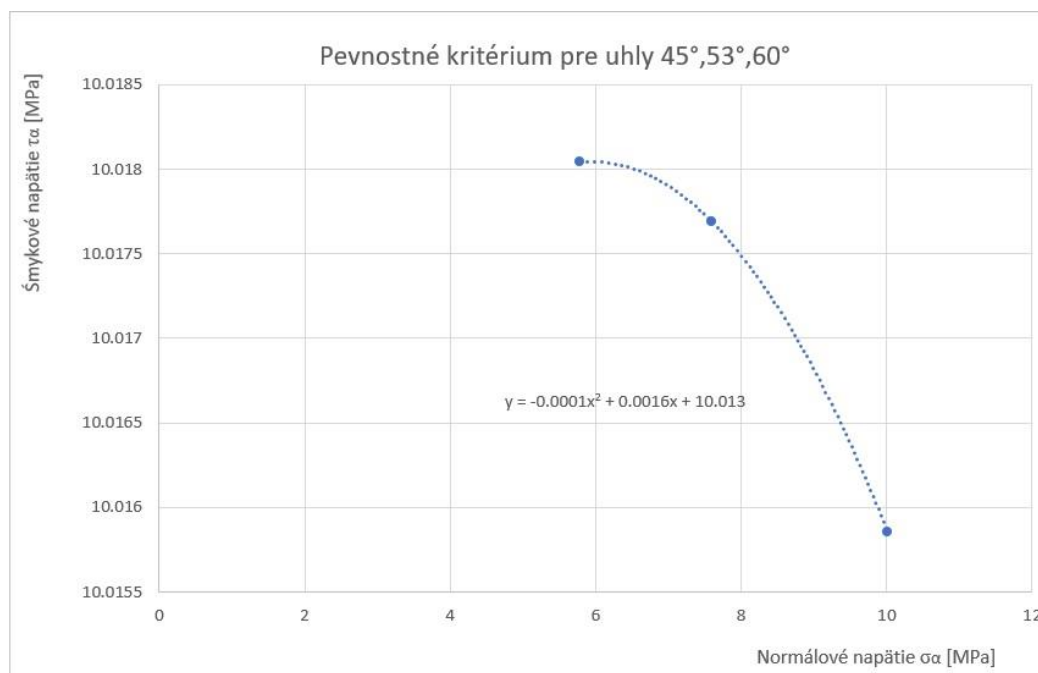
Pre vytvorenie pevnostného kritéria bolo najprv nutné analyticky spočítať maximálne nominálne normálové a šmykové napätie vo vrstve adhézneho spoja z príslušných maximálnych síl zistených pomocou statickej skúšky v ťahu. Pre jednotlivé uhly sa tieto napätia zisťovali prepočítaním pomocou rovníc (5), (6). Výsledné napätia pre obe zložky sú uvedené v Tab. 2. Podľa predpokladov sa maximálne nominálne normálové napätie s rastúcim uhlom znižuje. A analogicky sa s rastúcim uhlom maximálne nominálne šmykové napätie zväčšovalo. Zmena však bola zanedbateľná, pretože sa pohybovala v radoch tisícín MPa. Zmena šmykového napätia bola teda menšia než prislúchajúca smerodajná odchýlka.

Tab. 2 Hodnoty maximálneho nominálneho normálového  $\sigma_{\alpha}$  a šmykového napätia  $\tau_{\alpha}$  pre uhly 45°, 53°, 60° a ich smerodajné odchýlky

| Uhol spoja v [°] | Sila [N]   | Plocha [mm <sup>2</sup> ] | $\sigma_{\alpha}$ [MPa] | $\tau_{\alpha}$ [MPa] |
|------------------|------------|---------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 45               | 4546,9±152 | 321                       | 10±0,5                  | 10±0,5                |
| 53               | 4730,6±238 | 377,2                     | 7,6±0,2                 | 10±0,3                |
| 60               | 5251,3±342 | 457                       | 5,8±0,4                 | 10±0,7                |



Krivka nad ktorou dochádza k deformácii pre adhezívum Acralock je na Obr. 25. vznikla preložením bodov  $[\sigma_\alpha, \tau_\alpha]$  z Tab. 2 krivkou v Exceli.



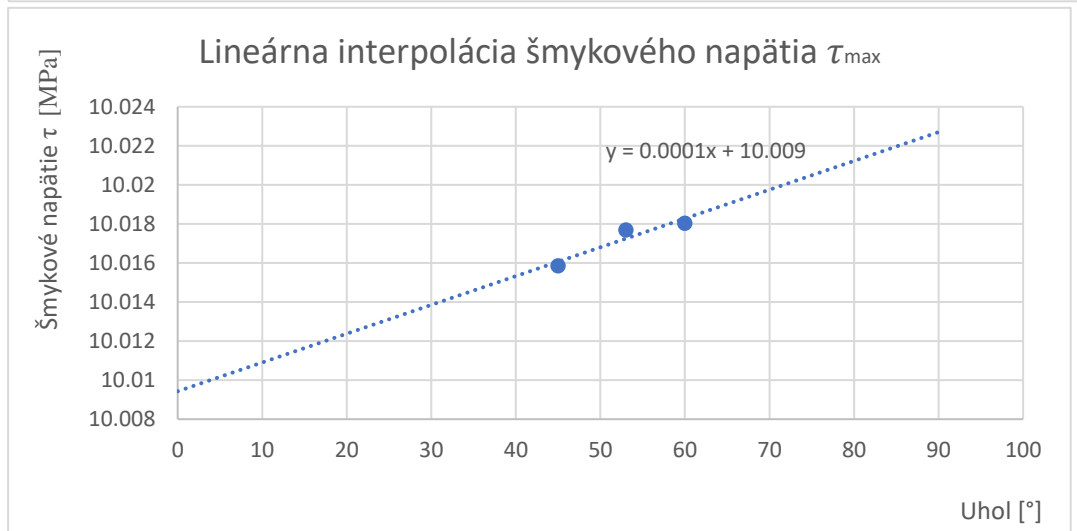
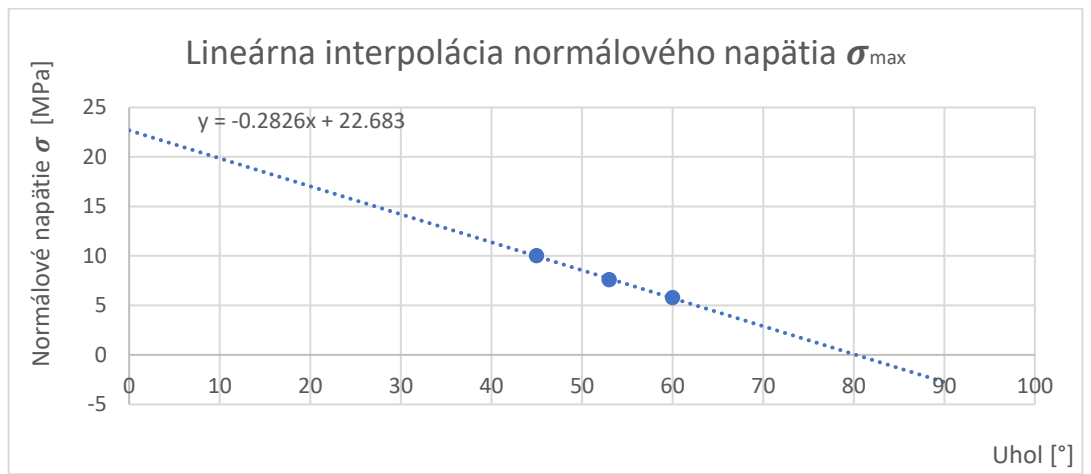
Obr. 25 Krivka nad ktorou dochádza k porušeniu spoja, adhezívum Acralock SA10-05

Nad touto krivkou dochádza u adhezíva k poškodeniu a deštrukcií spoja. Z tejto krivky bolo odvodené pevnostné kritérium pre dané adhezívum. Pre pevnostné kritérium bol vytvorený vzťah:

$$\sigma_{max} \geq \frac{\sigma}{-0.0001 \left( \frac{\tau}{\tau_{max}} \right)^2 + 0.0016 \left( \frac{\tau}{\tau_{max}} \right) + 10.013}$$

kde  $\sigma_{max}$  je hodnota maximálneho nominálneho normálového napätia zo statickej skúšky ťahom.  $\tau_{max}$  je hodnota maximálneho nominálneho šmykového napätia pre dané adhezívum. A  $\sigma$  a  $\tau$  sú zložky normálového a šmykového napätia vo vrstve adhezíva.

Pre nájdenie hodnôt  $\sigma_{max}$  a  $\tau_{max}$  bola použitá lineárna interpolácia v programe Excel. Priebeh funkcií pre normálové a šmykové napätie je na Obr. 26. Získaná hodnota pre  $\tau_{max}$  bola 10,02 MPa a pre  $\sigma_{max}$  bola 22,7 MPa.



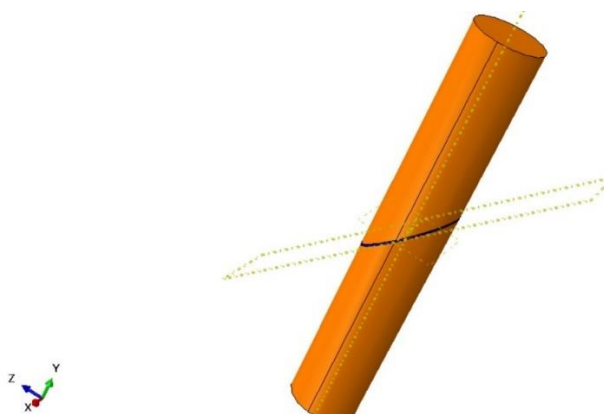
Obr. 26 Graf lineárnej interpolácie pre normálové a šmykové napätie adhezíva

## 7 Numerické určovanie pevnosti adhézneho spoja

Analytické postupy sa obvykle zaoberajú dvojdimenzionálnymi modelmi kvôli ich jednoduchšej modelácii. Tieto zaužívané postupy sú skvelou pomôckou inžiniera pri riešení menej zložitých úloh. Riešenie komplexných úloh z technickej praxe však často nie je možné za použitia bežných analytických postupov. Pre riešenie takýchto problémov často potrebujeme pracovať s komplexnými informáciami o správaní sa danej konštrukcie resp. súčasti konštrukcie. Príkladom takéhoto problému je 3D riešenie adhézneho spoja. Pre lepšie pochopenie priebehu napätí v tupom adhéznom spoji bola preto zvolená výpočtová 3D metóda konečných prvkov v programe Abaqus.

### 7.1 Tvorba modelu v programe Abaqus

Tvorbu výpočtového modelu bude prezentovaná na tvorbe modelu s uhlom rezu  $45^\circ$ . Pre tvorbu MKP modelu bol použitý výpočtový program Abaqus FEA verzia 6.14. Postup tvorby modelu začína u vytvorenia náčrtu a zadání podmienok pre materiál. Pretože boli vzorky valcového tvaru, zvolil sa pre proces tvorby modelu (tzv. *Part-u*) rotácia okolo osi a materiálová charakteristika "*Solid*" čiže plný tvar. Ďalej bola vybraná funkcia "*Deformable*", teda deformovateľné. Funkcia zaručí deformáciu podľa zvolených kritérií materiálových charakteristík a podľa zaťaženia na celom objeme vzorku. Pomocou konštrukčných prvkov programu sa vytvorila rovina rezu a model sa rozdelil na tzv. "*Partitions*", alebo celky. Týmto celkom budú v ďalšej fáze priradené materiálové vlastnosti. Výsledkom je základ modelu na Obr. 27. Oranžovou farbou je označená oceľ a modrou je označená vrstva adhezíva 0,4 mm.



Obr. 27 Model vzorku v Abaquse. Uhol spoja  $45^\circ$

## Materiálové charakteristiky

Pre rozdelené celky boli pre použité materiály, oceľ a adhezívum. Pre adhezívum boli zadané príslušné materiálové charakteristiky z materiálového listu adhezíva. Pre oceľ boli zvolené hodnoty Youngovho modulu pružnosti  $E = 210 \text{ GPa}$  a Poissonovo číslo  $\mu = 0,3$ . Materiálové vlastnosti adhezíva sa modelovali pomocou funkcie "Traction-Separation", teda zaťaženie a posuv. Tento model predpokladá zozačiatku lineárne elastické správanie sa adhezíva, obmedzené hraničnými nominálnymi napätiami, pri prekročení ktorých nasleduje nevratná deformácia elementov adhezíva, iniciácia a evolúcia trhliny. Elastické správanie materiálu je zapísané ako matica, ktorá spája zaťaženie s predĺžením po celom rozhraní adhezíva. Pre tvorbu adhezíva bol zadaný modul pružnosti v ťahu  $E = 600 \text{ MPa}$  a modul pružnosti v šmyku  $G = 300 \text{ MPa}$ . Tento modul je z charakteru matice zadávaný dvakrát, pre oba hlavné smery šmyku s rovnakým číslom, ako je vidieť z Obr.28.

|   | E/Enn | G1/Ess | G2/Ett |
|---|-------|--------|--------|
| 1 | 620   | 300    | 300    |

Obr. 28 Zápis materiálových charakteristík. Modul pružnosti E a modul v šmyku G v MPa

Spoločne s modulmi pružnosti bolo pre správne spočítanie deformácie nutné zadať maximálne nominálne napätia pre dané adhezívum. Maximálne nominálne napätie v ťahu z materiálového listu spoločnosti Acralock, bolo zadané  $19,3 \text{ MPa}$  a maximálne nominálne napätie v šmyku  $20,7 \text{ MPa}$ , tabuľka Obr. 29. Tieto napätia sú vlastne napäťové hranice, ktoré je dané adhezívum schopné vydržať pri normálovom a šmykovom ťahovom zaťažení. Po prekročení týchto napätí nastáva v modeli nevratná deformácia, iniciácia poškodenia a evolúcia trhliny. Bez zadania týchto hodnôt by nebolo možné sledovať kedy vlastne nastane napäťový stav, ktorý by vyvolal deštrukciu vrstvy adhezíva, tvorbu trhliny a následné roztrhnutie spoja.

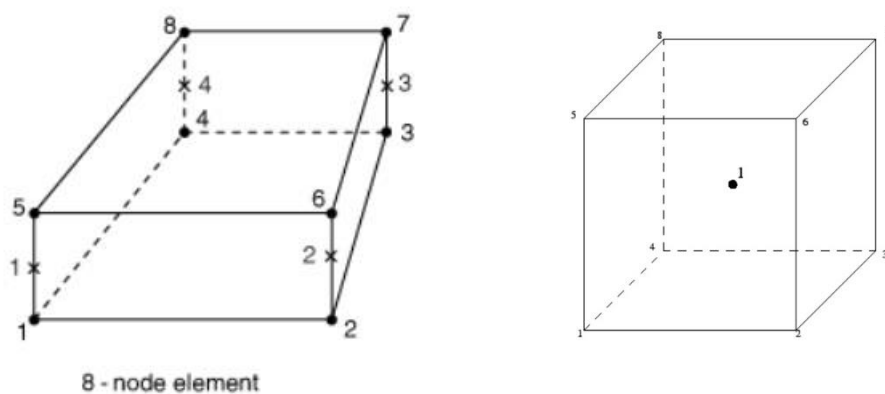
|   | Nominal Stress<br>Normal-only Mode | Nominal Stress<br>First Direction | Nominal Stress<br>Second Direction |
|---|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 19.3                               | 20.7                              | 20.7                               |

Obr. 29 Zápis materiálových charakteristík. Nominálne napätia pre ťah a šmyk v MPa

## Vytvorenie výpočtovej siete "Mesh"

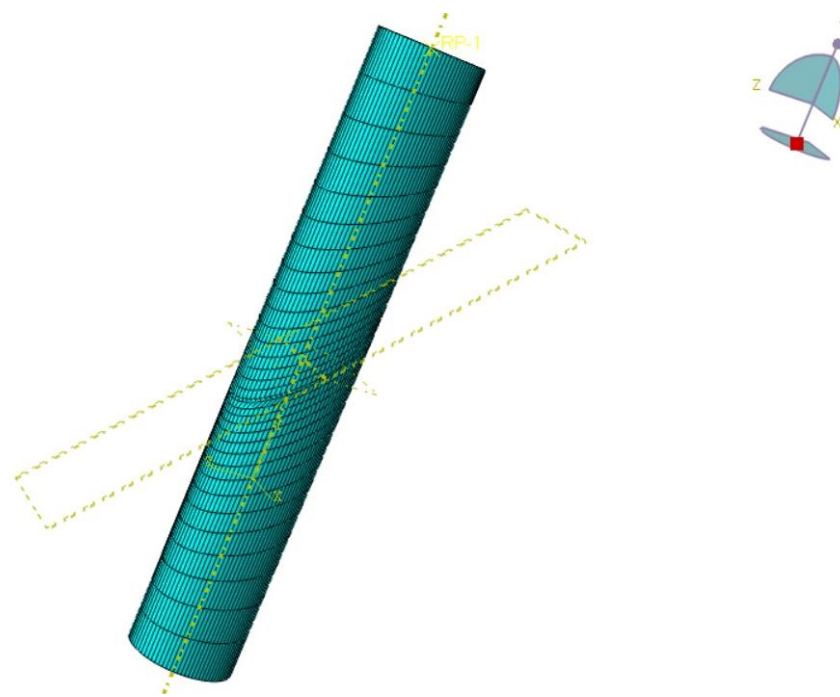
Vytvorenie výpočtovej siete v programe Abaqus je základ výpočtového postupu. Myšlienka spočíva diskretizácii problému na určitý počet menších, jednoduchších elementov, ktoré sú nazývané konečné prvky. Odtiaľ názov metóda konečných prvkov,

v skratke MKP. Jednoduchšie rovnice priradené k týmto prvkom sú potom zoradené do väčších systémov modelujúcich celý zložitý problém. V našej úlohe boli u adhezíva zvolené elementy na Obr. 30. COH3D8 podľa doporučenia pre modelovanie kohéznych elementov v Abaquse. Typ elementu bol zvolený ako "Cohesive", teda kohézny. Pre oceľ boli volené objemové prvky C3D8R. Celkový počet prvkov bol u spoja s uhlom 45° 22935 a počet uzlov 25024.



Obr. 30 Element COH3D8 naľavo a C3D8R napravo

Výpočtová sieť mala prednastavenú funkciu postupného zhusťovania od oboch koncov modelu smerom k oblasti vyplnenej adhezívom, kvôli väčšej presnosti výsledkov. Adhezívum samotné bolo modelované jemnou sieťou pre lepšie výstupné údaje a presnosť. Hotovú sieť zobrazuje Obr. 31.



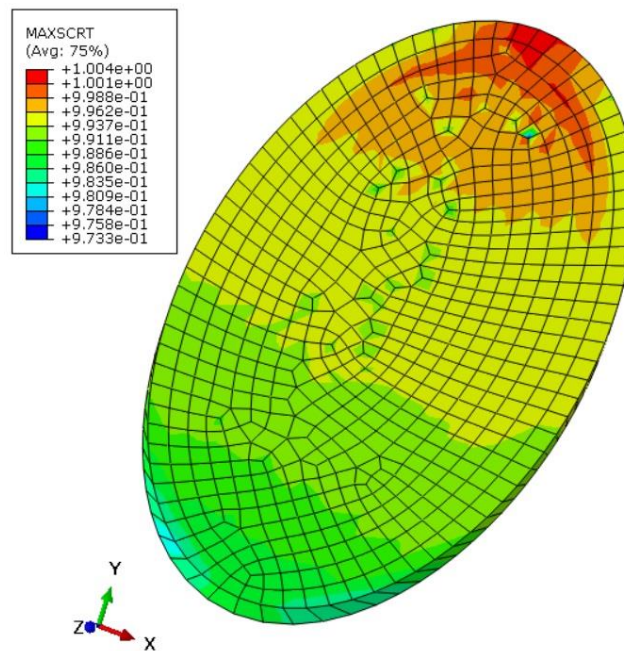
Obr. 31 Hotová výpočtová sieť. Uhol spoja 45°

## 7.2 Vyhodnotenie výsledkov numerickej metódy

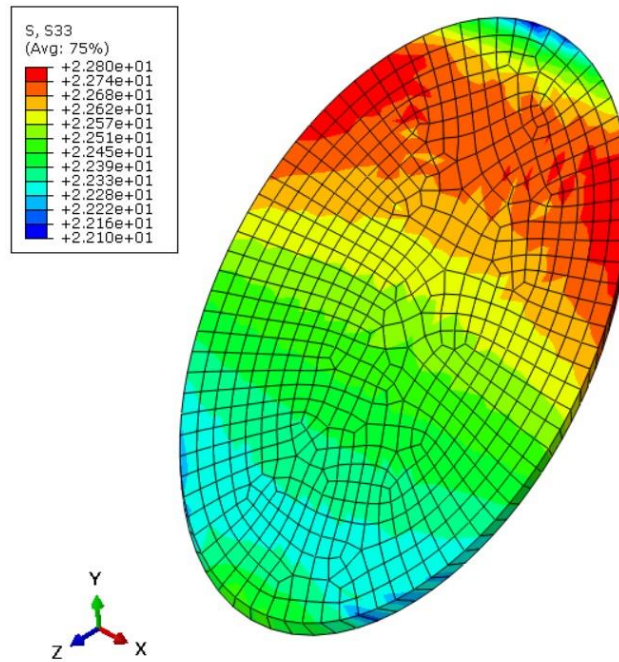
V našej úlohe bolo pre každý zo sledovaných uhlov pomocou programu Abaqus hľadané miesto, kedy sa adhezívum dostane na hranicu svojej pevnosti a dochádza k nevratnej deformácii vrstvy adhezíva. Po prekročení tohto bodu nastáva deštrukcia spoja. Zisťovala sa i hodnota normálového napätia dosiahnutého v tomto mieste. Pre určenie maximálnej pevnosti vrstvy adhezíva bolo použité kritérium *MAXSCRT*, pre ktoré platí:  $\max \left\{ \frac{t_n}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1$ , kde  $t_n^0, t_s^0, t_t^0$  sú maximálne hodnoty napätia pre normálový ( $t_n^0$ ) a obe hlavné šmykové napätia ( $t_s^0, t_t^0$ ) pre daný materiál a  $t_n, t_s, t_t$  sú napätia v normálovom ( $t_n$ ) a šmykovom ( $t_s, t_t$ ) smere. Pri dosiahnutí rovnosti z množiny  $\max \left\{ \frac{t_n}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0}, \frac{t_t}{t_t^0} \right\} = 1$ , pre toto kritérium v programe, je v objeme adhezíva dosiahnutá maximálna predpísaná pevnosť adhezíva [15].

Následne nás zaujímalo rozloženie normálového napätia a jeho maximum pri dosiahnutí tohoto kritéria pre porovnanie so spočítanými hodnotami z analytického riešenia.

Na Obr. 32 je vidieť virtuálnu vrstvu adhezíva s farebnou škálou. Tieto farby signalizujú naplnenie, alebo prekročenie kritéria *MAXSCRT*. Oranžová farba znamená, že v týchto elementoch sa ako prvých začína plniť volené kritérium. Tieto miesta môžeme pozorovať na vrchole vrstvy.

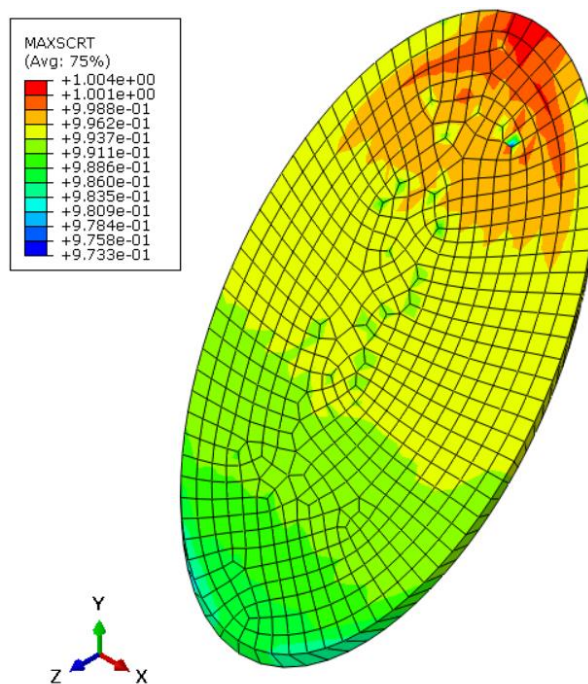


Obrázok 32 Kritérium *MAXSCRT*

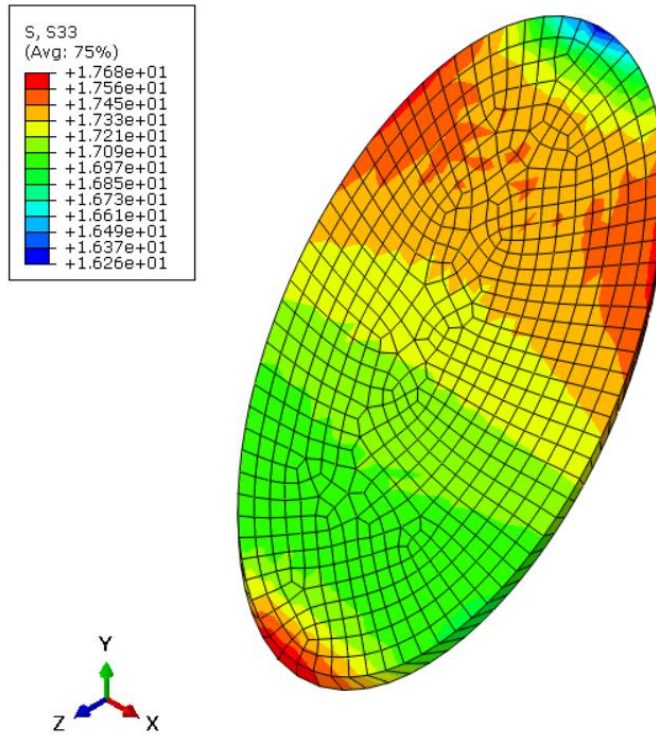


Obr. 33 Rozloženie normálových napätí na hranici deformácie uhol spoja 45°

Rozloženie maximálneho normálového napätia v elementoch pre uhol 45° pri naplnení kritéria MAXSCRT, Obr. 32. Maximum normálového napätia pri naplnení tohto kritéria bolo 22 MPa, Obr. 33.

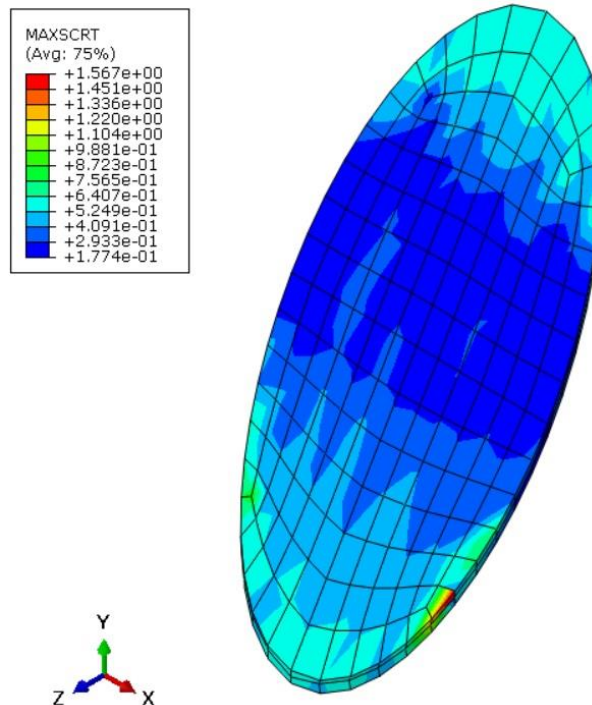


Obr. 34 MAXSCRT pre uhol spoja 53°



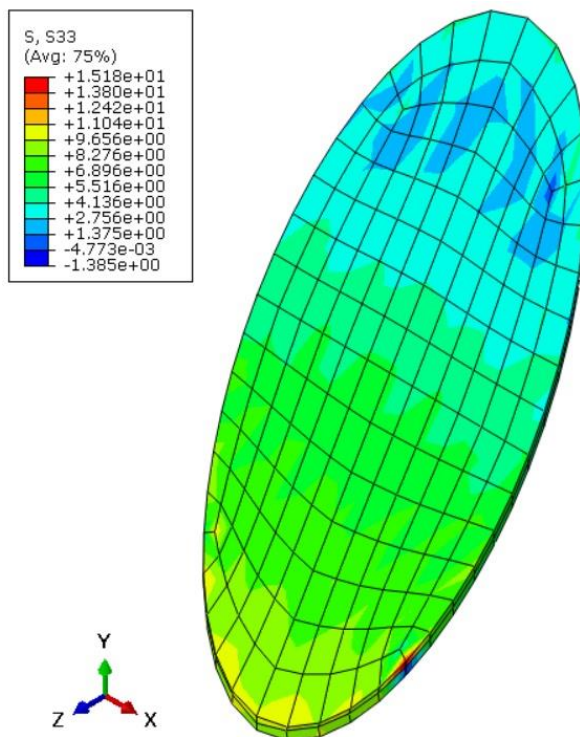
Obr. 35 Rozloženie normálových napätí na hranici deformácie uhol spoja 53°

Maximum normálového napätia v elementoch pre uhol 53° pri naplnení kritéria MAXSCRT, opäť na vrchole vrstvy, Obr. 34, je z Obr. 35 približne 18 MPa.



Obr. 36 MAXSCRT pre uhol spoja 60°





*Obr. 37 Rozloženie normálových napätí na hranici deformácie uhol spoja 60°*

Rozloženie normálového napätia a maximum normálového napätie v elementoch pre uhol 60° pri naplnení kritéria MAXSCRT, Obr. 36, je z Obr. 37, približne 15 MPa.

## 8 Diskusia výsledkov

### 8.1 Diskusia výsledkov statickej ťahovej skúšky

Pre testovanie viacosého zaťažovania v podmienkach statickej skúšky ťahom bol zvolený tupý skosený prekrývaný spoj. V tupom skosenom prekrývanom spoji vďaka jeho geometrii pri statickej ťahovej skúške vznikajú vo vrstve adhezíva normálové aj šmykové napätia.

Porovnaním výsledkov lineárnej interpolácie a parametrov adhezíva Acralock SA10-05 z materiálového listu bolo možné pozorovať, že spočítané maximálne nominálne normálové napätie 22,7 MPa, zhruba odpovedalo rozmedziu uvádzaného výrobcom a to 22-24 MPa. Pre spočítané maximálne nominálne šmykové napätie 10 MPa, sa výsledná hodnota líšila o zhruba 41%, ak vezmeme do úvahy spodnú hranicu 17 MPa udávanú výrobcom. Môžeme teda vyvodiť teóriu, že koncentrátoři napätia, distančný drôtik a vzduchové bubliny na Obr. 24 v lomovej ploche adhezíva, majú veľký vplyv na hodnoty maximálneho nominálneho šmykového napätia a sú zodpovedné za jeho zníženie. Zároveň môžeme konštatovať, že majú minimálny vplyv na hodnoty maximálneho nominálneho normálového napätia v adhéznom spoji testovaného adhezíva. Hodnoty pre  $\sigma_{max}$ ,  $\tau_{max}$  boli získané z lineárnej interpolácie v programe Excel, Obr. 26. Bolo zistené, že pevnosť adhézných spojov je skutočne veľmi závislá na správnom technologickom postupe. I malá chyba môže spôsobiť veľké zníženie pevnosti udávanej výrobcom.

Pevnostné kritérium adhezíva sformulované pomocou údajov zo statickej skúšky v ťahu je:

$$\sigma_{max} \geq \frac{\sigma}{-0.001 \left( \frac{\tau}{\tau_{max}} \right)^2 + 0.0016 \left( \frac{\tau}{\tau_{max}} \right) + 10.013}$$

Z Tab.1 je možné vidieť, že najväčšiu silu z experimentu preniesol adhézný spoj s uhlom 60° a to 5251,3 N a najmenšiu silu preniesol spoj s uhlom 45° a to 4546,9 N.

Maximálne nominálne normálové napätie vo vrstve adhezíva sa so zvyšujúcim uhlom znižovalo. A analogicky sa s rastúcim uhlom nominálne šmykové napätie vo vrstve adhezíva zväčšovalo. Jeho zmena bola však v tisícinách MPa. Bola menšia než prislúchajúce smerodajné odchylky a bola teda zanedbateľná, Tab. 2.

Pevnosť tupého skoseného adhézneho spoja je z veľkej miery závislá na konštrukčnom prevedení adhézneho spoja, ako bolo experimentálne ukázané. Ďalej na čistote a správnej predpríprave adherendu a správne zvolenej technológii lepenia a atmosférických podmienkach. Pri dizajne adhézneho spoja je nutné venovať patričnú pozornosť každému s týchto faktorov, ak chceme zaistiť maximálnu pevnosť spoja.

## 8.2 Diskusia výsledkov numerickej analýzy

Z numerickej analýzy a vybraných parametrov z Obr. 33, Obr. 35 a Obr. 37 je možné pozorovať nerovnomerné rozloženie normálového napätia pre vybrané uhly vo vrstve adhezíva. Zároveň sú z výsledkov viditeľné miesta, kde dochádza k počiatkovej deformácii vrstvy adhezíva Obr. 32, Obr. 34, Obr. 36. Vďaka týmto informáciám je možné lepšie dimenzovať adhézny spoj, meniť jeho geometriu i šírku lepenej špáry bez nutnosti všetko najprv testovať v realite. Takéto testovanie je ekonomicky i časovo výhodné.

Z približných hodnôt nominálnych normálových napätí pozorujeme klesajúci trend tohto napätia s rastúcim uhlom, ako tomu bolo v reálnom experimente. Avšak z numerickej analýzy je vidieť, že maximá nominálneho normálového napätia spočítané v programe Abaqus sú pre naše uhly vyššie, než tomu bolo u statickej skúšky v ťahu. Pre uhol 45° sme numericky spočítali najvyššie normálové napätie 22 MPa, pre 53° bola hodnota 18 MPa a pre 60° 15 MPa. Tieto napätia sa líšia experimentálnych napätí zo statickej skúšky v ťahu ako ukazuje Tab. 3

Tab. 3 Porovnanie normálových napätí zo statickej skúšky ťahom a normálových napätí z numerickeho výpočtu v programe Abaqus

| Uhol adhézneho spoja [°] | Maximálne nominálne normálové napätie z numerickej analýzy [MPa] | Maximálne nominálne normálové napätie zo statickej skúšky v ťahu [MPa] | Percentuálny rozdiel maximálnych nominálnych normálových napätí [%] |
|--------------------------|--|--|---|
| 45                       | 22   | 14,2   | 36  |
| 53                       | 18   | 12,5   | 31  |
| 60                       | 15   | 11,6   | 23  |

Vysvetlením tohto javu je, že spoj vo virtuálnom prostredí má ideálny charakter, povrch adherendu je dokonalý, v našom modeli sa nevyskytujú vruby vo vrstve adhezíva, samotné adhezívum je dokonale izotropné a vplyv technológie a atmosférických podmienok je odstránený. Všetky tieto faktory sa spoločne podieľajú na vyššej pevnosti adhézneho spoja vo virtuálnom prostredí.

## 9 Záver

Predmetom tejto bakalárskej práce bolo viacosé zaťažovanie adhézných spojov. Teoretická časť práce sa venuje rešerši v oblasti adhézných spojov, technológií lepenia, teórie adhézneho spoja a pevnostným výpočtom adhézných spojov, konkrétne tupého skoseného prekrývaného spoja.

V tejto práci bol v praktickej časti navrhnutý experiment pre viacosé zaťažovanie adhézneho spoja s použitím statickej skúšky v ťahu. Metódou statickej skúšky v ťahu bolo testované adhezívum Acralock SA10-05 BLK. Pre toto adhezívum bolo navrhnuté pevnostné kritérium pomocou analytického výpočtu. Numerickou analýzou v programe Abaqus bolo sledované rozloženie normálového napätia vo vrstve adhezíva, ako aj miesta počiatočnej deformácie vo vrstve adhezíva. Normálové napätia zistené z reálneho experimentu boli porovnané s numerickým výpočtom v programe Abaqus.

Bolo vytvorené pevnostné kritérium pre adhezívum Acralock. Pomocou numerického výpočtu bolo spočítané rozloženie normálových napätových polí v adhéznej vrstve i miesta počiatočnej deformácie adhéznej vrstvy. Navyše sa experimentom pri statickej skúške v ťahu odhalila skutočnosť, že koncentrátoory napätia môžu mať na určité typy napätí rôzny vplyv. Z výsledkov experimentu a použitia lineárnej interpolácie sme takto mohli pozorovať, že koncentrátoory napätia nemajú markantný vplyv na maximálne normálové napätie, zato však majú veľký vplyv na maximálne šmykové napätie vo vrstve adhezíva v spoji.

Problematika adhézných spojov je obsiahla progresívna oblasť nerozoberateľného spájania materiálov v priemyselnej sfére, ktorá sa neustále vyvíja. Náročnosť prípravy a citlivosť adhézneho spoja na správnu prípravu je jednou z jeho najväčších nevýhod. Ďalším je jeho malá pevnosť v porovnaní napríklad s nitovaním či zvaraním.

Správne dodržanie pokynov výrobcu je kľúčovým faktorom pre dobrú pevnosť adhézneho spoja. Tieto nedostatky sa však vytrácajú s neustále postupujúcim výskumom v tejto oblasti. Adhézne spoje sú už niekoľko storočí používané v priemyselnej sfére a v tejto sfére zastávajú stále väčšie miesto v otázkach konštrukcie nerozoberateľných spojov, tlmenia vibrácií a tesnení.

## 10 Zoznam použitej literatúry

- [1.] MAYS G. C., HUTCHINSON A. R. *Adhesives in Civil Engineering*. Cambridge University Press, 1992. ISBN: 9780511529597
- [2.] 2] EBNESAJJAD Sina , LANDROCK Arthur H. *Adhesives Technology Handbook (Plastics Design Library)*. 2. vydanie. William Andrew, 2008. ISBN 9780815515333
- [3.] COGNARD Phillippe. *Handbook of Adhesives and Sealants, Volume 2 General Knowledge, Application of Adhesives, New Curing Techniques*. 1. vydanie. Elsevier Science, 2006. ISBN: 9780080447087
- [4.] *Základy teorie lepení* [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: [http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie\\_lepeni%20\\_%20LEAR.pdf](http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20_%20LEAR.pdf)
- [5.] PETERKA, J.: *Lepení konštrukčných materiálů ve strojírenství*. 1. Vyd. Praha: SNTL, 1980.
- [6.] *Users guide to adhesives* [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <http://freemansupply.com/datasheets/adhesivesguide.pdf>
- [7.] OSTEN, Miloš. *Práce s lepidly a tmely*. Praha: SNTL, 1986.
- [8.] BOUBLÍK, Vlastimil. *Lepidla a jejich příprava*. Praha: SNTL, 1966.
- [9.] FREJDIN, Anatolij. *Pevnosť a životnosť lepených spojov*. Bratislava: Alfa, 1988.
- [10.] *Lepení materiálů* [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_lepeni\\_materialu\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_lepeni_materialu_mrna.pdf)
- [11.] *Loading capacity determination of wooden scarf joint* [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: [https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/22\\_2008-RAE.pdf](https://www.agriculturejournals.cz/publicFiles/22_2008-RAE.pdf)
- [12.] *Structural adhesive bonded joints* [online]. [cit. 2019-06-24]. Dostupné z: <https://cdn.intechopen.com/pdfs/59097.pdf>
- [13.] *Adhesive Failure modes* [online]. [cit. 2019-06-27] Dostupné z: <http://pubs.sciepub.com/ajme/7/2/2/figure/1>
- [14.] *Adhesive failure* [online]. [cit. 2019-06-27]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/adhesive-failure>
- [15.] *Defining the constitutive response of cohesive elements using a traction-separation description modes* [online]. [cit. 2019-06-27]. Dostupné z: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAEELMRefMap/simaelm-c-cohesivebehavior.htm>