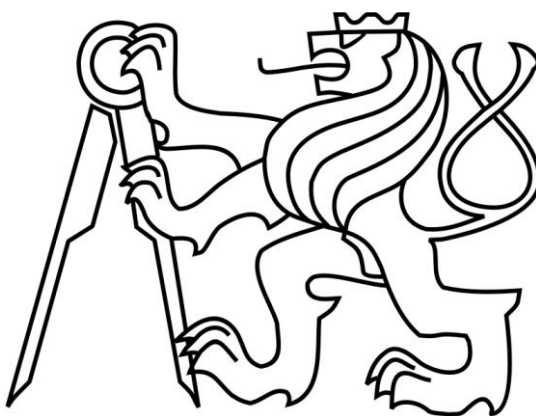


**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta stavební**

**Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí**



**Diplomová práce**

**Lepené spoje pro konstrukce ze skla**

Vypracovala:

Bc. Eliška Kubíková

Školitel:

doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.

Leden 2020

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: KUBÍKOVÁ Jméno: Eliška Osobní číslo: 438121  
Zadávací katedra: Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí  
Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Lepené spoje pro konstrukce ze skla  
Název diplomové práce anglicky: Adhesive bonding for glass structures  
Pokyny pro vypracování:  
Současný stav poznání v oblasti lepených spojů pro konstrukce ze skla, provedení smykových zkoušek lepeného spoje sklo ocel a sklo hliník, vyhodnocení experimentů, numerický model lepeného spoje.  
  
Seznam doporučené literatury:  
Haldimann M. - Luible A. - Overend M.: Structural Use of Glass. ISBN978-3-85748-119-2  
  
Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.  
Datum zadání diplomové práce: 1.10.2019 Termín odevzdání diplomové práce: 5.1.2020  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*  
  
Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*  
  
Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

## SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Eliška Kubíková

Název diplomové práce: Lepené spoje pro konstrukce ze skla

Základní část: Ocelové konstrukce podíl: 100 %

Formulace úkolů: Rešerše současného stavu poznání v oblasti lepených spojů ve stavebnictví, provedení smykových zkoušek lepeného spoje sklo - ocel a sklo - hliník pro dvě lepidla a různé tloušťky lepené spáry, vyhodnocení experimentů, vytvoření numerického modelu a jeho ověření pomocí experimentálních výsledků.

---

Podpis vedoucího DP: ..... Datum: .....

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů: .....

---

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

3. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů: .....

---

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

4. Část: ..... podíl: ..... %

Konzultant (jméno, katedra): .....

Formulace úkolů: .....

---

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

Poznámka:

Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci. (Vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1. stranou zadání již ve 2. týdnu semestru)

### Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci „Lepené spoje pro konstrukce ze skla“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 3.1.2020

.....  
Eliška Kubíková

#### Poděkování

Na prvním místě bych ráda poděkovala své vedoucí diplomové práce doc. Ing. Martině Eliášové CSc. za odborné vedení, dále Ing. Markétě Zikmundové a Michalu Gschrayi za ochotu při tvorbě této práce.

**Lepené spoje pro konstrukce ze skla**

**Adhesive bonding for glass structures**

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce popisuje využití lepených spojů ve stavebnictví, jejich návrh a chování v závislosti na tloušťce lepidla. Experimentální část se zaměřuje na ověření dvou typů polyuretanových lepidel, SikaFast - 5215 NT a Crestabond M7 – 05. Provedené experimenty zkoumají chování lepeného spoje namáhaného smykem pro dvě vybraná lepidla v závislosti na použitém materiálu (sklo, hliník, ocel), tloušťce lepené spáry (1 mm, 3 mm a 5 mm) a úpravě povrchu (pozinkování, broušení). Výsledky z provedených zkoušek dále slouží k ověření numerických modelů sestavených v softwaru Ansys Workbench 2019 R3.

## **Klíčová slova**

Lepený spoj, smykové napětí, poměrná smyková deformace, polyuretanové lepidlo, experimentální zkoušky, numerický model, Ansys Workbench 2019 R3

## **Abstract**

This thesis describes the use of adhesive joints in construction, their design and behaviour in dependence of the adhesive thickness. The experimental part focuses on verification of two types of polyurethane adhesives, SikaFast - 5215 NT and Crestabond M7 - 05. The experiments investigate the adhesive joint behaviour for two selected adhesives whit depending on used material (glass, aluminum, steel), the adhesive thickness (1 mm, 3 mm and 5 mm) and surface treatment (galvanizing, grinding). The results of experiments are served for verification of numerical models which are compiled at Ansys Workbench 2019 R3.

## **Keywords**

Adhesive joint, shear stress, relative shear deformation, polyurethane adhesive, experimental tests, numerical model, Ansys Workbench 2019 R3

## OBSAH

OBSAH.....	8
1 ÚVOD .....	10
2 SKLO PRO NOSNÉ KONSTRUKCE .....	11
2.1 Popis konstrukčního materiálu sklo .....	11
2.2 Mechanické vlastnosti .....	11
2.3 Výroba skla a jeho chemické složení .....	12
2.4 Tepelně upravovaná skla .....	14
2.5 Vrstvené sklo .....	15
2.6 Využití skla ve stavebnictví .....	16
2.7 Spoje skleněných konstrukcí .....	16
2.7.1 Mechnické spoje.....	17
2.7.2 Lepené spoje.....	19
3 LEPIDLA JAKO SPOJOVACÍ MATERIÁL.....	20
3.1 Historie .....	20
3.2 Popis a vlastnosti lepidel .....	20
3.2.1 Tepelné vlastnosti lepidel.....	22
3.2.2 Mechanické vlastnosti lepidel .....	22
3.2.3 Deformace lepidel - polymerů.....	23
3.3 Rozdělení lepidel.....	23
3.3.1 Elastomery .....	24
3.3.2 Plastomery .....	25
3.3.2.1 Termoplasty .....	25
3.3.2.2 Reaktoplasty.....	26
3.4 Rozdělení lepidel podle způsobu tuhnutí ve spoji.....	27
3.4.1 Roztoková a disperzní lepidla .....	27
3.4.2 Reaktivní lepidla .....	27
3.4.3 Tavná lepidla .....	27
4 LEPENÉ SPOJE.....	28
4.1 Popis lepeného spoje .....	28
4.2 Technologie lepení .....	28



4.3	Adhezní a kohezní síly .....	29
4.4	Pevnost lepeného spoje .....	30
4.5	Lepené spoje dle tuhosti .....	32
4.6	Konstrukce lepeného spoje.....	32
4.7	Vady ve vrstvě lepidla.....	33
4.8	Porušení lepeného spoje .....	34
5	EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA LEPENÝCH SPOJŮ .....	36
5.1	Zkušební tělesa .....	36
5.1.1	Volba spojovaných materiálů.....	37
5.1.2	Volba lepidel .....	37
5.2	Popis a uspořádání zkoušky lepeného spoje namáhaného smykem.....	40
5.3	Zpracování experimentů.....	44
6	NUMERICKÁ ANALÝZA LEPENÝCH SPOJŮ.....	58
6.1	Výpočetní program – Ansys Workbench 2019 R3 .....	58
6.2	Geometrie numerického modelu – Autodesk Inventor Professional .....	58
6.3	Vstupní hodnoty a tvorba numerického modelu - Ansys Workbench 2019 R3 .....	60
6.4	Výsledky numerického modelu.....	62
7	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY A NUMERICKÉHO MODELU .....	66
8	ZÁVĚR .....	71
9	LITERATURA.....	72
10	SEZNAM PŘÍLOH.....	74
11	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	80
12	SEZNAM TABULEK.....	82
13	SEZNAM GRAFŮ.....	83

## 1 ÚVOD

Předložená práce shrnuje problematiku návrhu lepeného spoje namáhaného smykem pro různé materiály (sklo, ocel či hliník), kde je mezivrstva tvořena polyuretanovým lepidlem – SikaFast - 5215 NT a Crestabond M7 – 05. Práce je zaměřená na porovnání tří tloušťek lepidel ve spoji a to 1, 3 a 5 mm. Zkoumá jejich chování za smyku, tedy průběh smykového napětí, velikost poměrné deformace vrstvy lepidla a způsob porušení lepeného spoje v závislosti na tloušťce, spojovaném materiálu a úpravě jeho povrchu.

Experimentální analýza se zaměřuje na vyhodnocení statických smykových zkoušek prováděných na lepeném spoji o třech různých tloušťkách vrstvy lepidla. Cílem provedených zkoušek je zjištění chování spojovaného materiálu – lepidla v lepeném spoji, zaznamenávání svislých deformací, síly působící na spoj a následné vyhodnocení smykového napětí a poměrných smykových deformací ve vrstvě lepidla. Na základě experimentální analýzy je porovnáno výsledné působení dvou odlišně chovajících se polyuretanových lepidel a dále porovnání průběhů smykových napětí pro různé tloušťky lepidla v lepeném spoji. Příprava lepených spojů i samotné zkoušky probíhaly v Experimentálním centru Fakulty stavební, ČVUT v Praze.

Výsledky provedených experimentů byly následně použity pro ověření numerického modelu lepeného spoje. Použitým prostředkem pro modelování je konstrukční program Autodesk Inventor Professional a následně programový systém Ansys Workbench 2019 R3, který je založený na bázi metody konečných prvků. Numerické modely byly nejdříve porovnány mezi sebou a následně byly porovnány i s experimentálním výzkumem, který zastupuje skutečné působení lepeného spoje.

## 2 SKLO PRO NOSNÉ KONSTRUKCE

### 2.1 Popis konstrukčního materiálu sklo

Sklo je významným konstrukčním materiálem, který se stal nezbytnou součástí architektury a stavebního průmyslu. Používání skleněných konstrukcí je spjato s výrobou plochého skla. Ploché sklo se vyrábí v Evropě již od 14. století, tedy od středověku.

Hlavním využitím plochého skla ve stavebnictví bylo převážně jen pro výplně menších stavebních otvorů, tedy oken, dveří či výloh. Takto sklo plnilo a plní funkci obalovou či výplňovou. Přináší do budov sluneční světlo, a tím tvoří prostředí interiéru příjemnější.

Vývoj výroby skla se ovšem velkou rychlostí zdokonaluje, a to díky rozvoji technologií. Vlastnosti skla se takto dají ve velké míře vylepšovat, proto se také sklo může v dnešní době řadit mezi materiály používané pro nosné konstrukce. [1], [2]

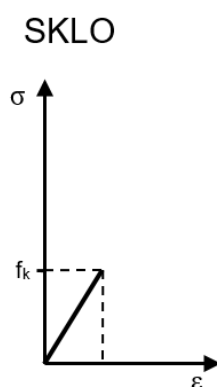
### 2.2 Mechanické vlastnosti

Sklo je anorganickým homogenním materiálem s velmi vysokou viskozitou. Je trvanlivý a odolný vůči velkému množství chemických látek. Na rozdíl od ostatních materiálů, jako je většina kovů, sklo nekoroduje. Dále je sklo odolné vůči vodě, povětrnostním podmínkám a má relativně vysoký bod tání. [2]

K pozitivním mechanickým vlastnostem se řadí tuhost a tvrdost při běžných teplotách a vysoká pevnost v tlaku.

Při návrhu konstrukcí je tedy u skla rozhodující pevnost v tahu, jejíž hodnota se pro plavené sklo pohybuje mezi 10 a 100 MPa. Ve výpočtech se pak charakteristická tahová pevnost skla uvažuje hodnotou 45 MPa. Pevnost v tahu je závislá na mnoha faktorech, jako např. na době trvání zatížení, okolním prostředí, na opracování hran skla, tvaru zatěžovací plochy, výskytu trhlin ve skle či rozdělení napětí po ploše.

Porušení skla nastává při dosažení kritického napětí. V tomto okamžiku se setkáváme s jevem, který se nazývá křehký lom. Pro křehký lom je charakteristický kolaps, ke kterému dochází náhle bez předchozího varování. Na *obr. 2.1* je zobrazen pracovní diagram skla.



Obr. 2.1: Pracovní diagram skla, závislost napětí na deformaci [3]

Porušení skla, tedy křehký lom, je hlavním problémem skleněných konstrukcí. Tomuto jevu můžeme předcházet návrhem skleněné konstrukce v kombinaci s ostatními materiály, jako je např. ocel, hliník či dřevo. Hybridní konstrukce jsou ovšem zatím okrajovou záležitostí. [1]

Z fyzikálních vlastností je pro sklo charakteristická relativně nízká tepelná vodivost a vysoká propustnost světla v části viditelného spektra. [1]

Základní hodnoty materiálových vlastností plaveného skla jsou uvedeny v tab. 2.1 [2]

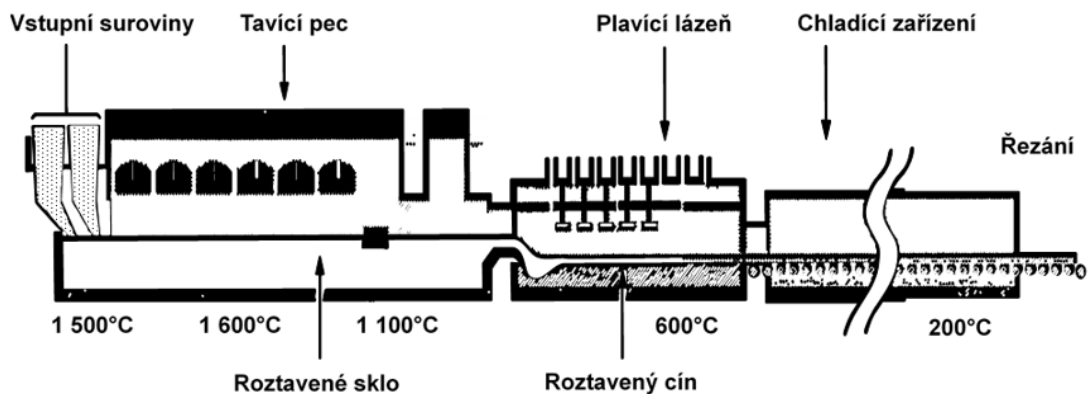
Vlastnosti skla	hodnota	jednotka
Hustota $\rho$	2 500	kg/m <sup>3</sup>
Youngův modul pružnosti E	70 000	N/mm <sup>2</sup>
Poissonova konstanta $\nu$	0,23	-
Modul ve smyku G	30 000	N/mm <sup>2</sup>
Součinitel teplotní roztažnosti $\alpha$	$9 \times 10^{-6}$	1/K
Tepelná vodivost $\lambda$	1,0	W/(mK)
Sálavost (intenzita vyzařování) $\varepsilon$	0,89	-
Charakteristická pevnost v tlaku	více než 1 000	MPa
Charakteristická pevnost v tahu	10 – 100	MPa

Tab. 2.1: Materiálové vlastnosti plaveného skla [2]

### 2.3 Výroba skla a jeho chemické složení

Nejvyužívanějšími výrobky ze skla, které se používají ve stavebnictví, je ploché sklo. Skleněné tabule jsou v současnosti vyráběné procesem plavení.

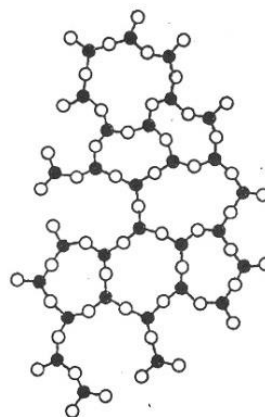
Plavené sklo nebo-li „float glass“ je pevnostně neupravované sklo. Výroba začíná ve sklářské peci, kde se při teplotě 1600 °C začínají tavit vstupní suroviny. Z těchto surovin se po roztavení stává sklovina, která dále pokračuje do komory, kde „plave“ po roztaveném cínu a chladne, viz obr. 2.2. V konečné fázi celého procesu výroby skla přichází další ochlazení, při kterém se teploty pohybují kolem 200 °C. Nadále je sklo rozřezáváno na požadované rozměry. Největší možné rozměry skleněných tabulí jsou 3,21 x 6,0 m.



Obr. 2.2: Výrobní proces plaveného skla [3]

Základní surovinou běžného skla je oxid křemíku ( $\text{SiO}_2$ ). Díky této látce, která ve složení skla převládá, se jedná o sklo křemičité. Dalšími látkami, které jsou charakteristické pro běžná křemičitá skla je vápenec ( $\text{CaO}$ ) a soda ( $\text{Na}_2\text{O}$ ). Některá skla mohou být také zbarvena, což je důsledkem přidání oxidů kovů, jako je např. měď, chrom či železo. [4]

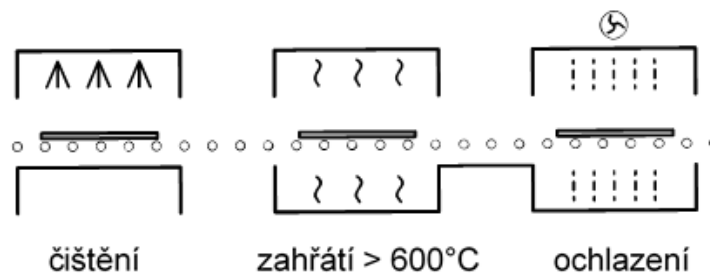
Základní chemickou jednotkou křemičitého skla jsou čtyřstěny oxidu křemičitého, které dohromady tvoří celkovou skelnou síť. Tato síť ovšem nevykazuje stejné vlastnosti, jako krystalické mřížky, je nesymetrická a nepravidelná, viz obr.2.3. [4]



Obr. 2.3: Struktura skla [5]

## 2.4 Tepelně upravovaná skla

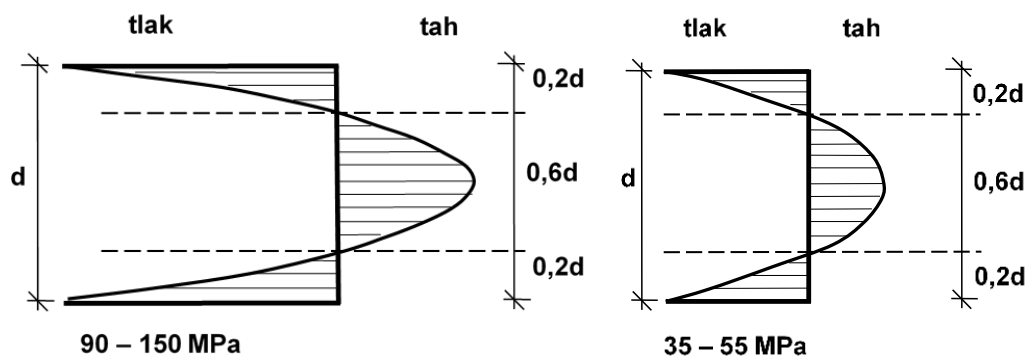
Mezi tepelně upravovaná skla patří sklo tepelně tvrzené (ESG) nebo-li sklo kalené a tepelně zpevněné sklo (TGV). Postupy výroby obou druhů skel jsou téměř identické. Skládají se z povrchového očištění skla, zahřívání na teplotu kolem  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  a následného ochlazení. U tepelně tvrzeného skla je fáze ochlazení velice rychlá, na rozdíl od tepelně zpevněného skla, kde je změna teploty pozvolnější. Postup výroby tepelně upravovaných skel je znázorněn na *obr. 2.4*.



*Obr. 2.4: Postup výroby tepelně upravovaného skla [3]*

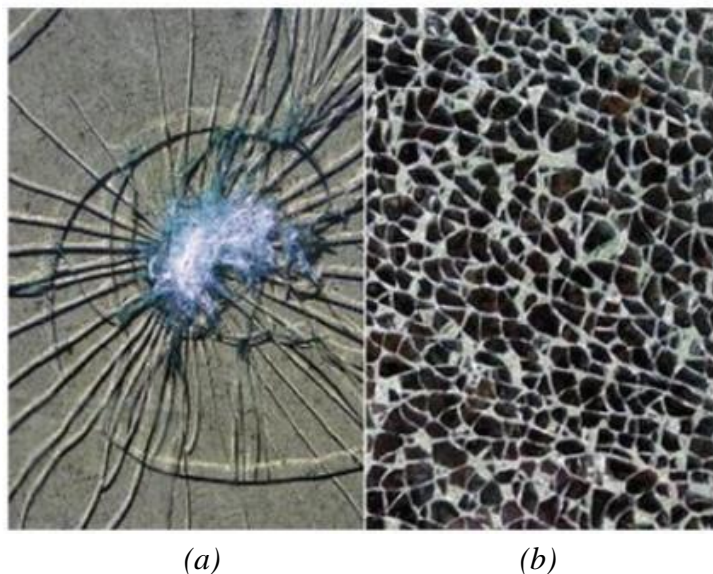
Prudké ochlazení má za důsledek změnu napětí po průřezu skla. Na površích je sklo ochlazováno mnohem více než v jeho středu. Průběh napětí po průřezu je proto parabolického tvaru, kde uvnitř skla vzniká tahové napětí a na površích permanentní povrchové tlakové napětí. Toto napětí zvyšuje celkovou odolnost proti mechanickému a teplotnímu namáhání.

Povrchové tlakové napětí u tepelně tvrzeného skla dosahuje hodnot 90 až 150 MPa, u tepelně zpevněného skla pak 35 až 55 MPa, oba průběhy napětí po výšce průřezu jsou znázorněny na *obr. 2.5*. [6]



*Obr. 2.5: Výsledné rozložení průběhu napětí po průřezu [2]*

Způsob porušení u tepelně zpevněného a tepelně tvrzeného skla je odlišný. Tepelně zpevněné sklo má lom podobný jako sklo plavené. Jsou pro ně charakteristické větší trhliny, situované pouze kolem místa porušení. Zato tabule tepelně tvrzeného skla se roztrhají celá na více menších kousků, viz *obr. 2.6*.



*Obr. 2.6: Lom tepelně zpevněného skla (a) a tepelně tvrzeného skla (b) [6]*

## 2.5 Vrstvené sklo

Skla, která jsou určena pro nosné konstrukce jsou z bezpečnostních důvodů navrhována jako skla vrstvená, nebo-li skla bezpečnostní, viz *obr. 2.7*. Jsou konstruovány z tabulí plavených skel, tepelně upravovaných či jejich kombinací. Spojovací mezivrstva bývá většinou tvořena jednou nebo více vrstvami fólií. Maximální počet použitých tabulí pro vrstvené sklo je 25 kusů. Tloušťka skel však nesmí přesáhnout 100 mm. [2]



*Obr. 2.7: Vrstvené (bezpečnostní) sklo*

Typ použitého skla a fólie a dále celková tloušťka vzorku jsou rozhodujícími faktory pro pevnost vrstveného skla. Výhodou vrstvených skel je zvýšená celková ohybová tuhost prvku. Tvar porušení vrstveného skla je určen typem skla. Na obr. 2.8 jsou uvedeny typy porušení vrstvených skel s charakteristickými pevnostmi skel v tahu za ohybu.



Obr. 2.8: Typy porušení vrstvených skel

## 2.6 Využití skla ve stavebnictví

Využití skla nacházíme zejména v pozemních stavbách. Nejtypičtějším způsobem použití nenosného skla je ve výplních, jako jsou okna a dveře dále u prosklených příček či u celoplošných fasád, nejčastěji administrativních budov a budov občanské výstavby.

Jako nosné konstrukce se pak sklo vyskytuje nejvíce u schodišť, přístřešků, zábradlí, lávek či vyhlídkových míst, kde transparentnost skla v mnohých vyvolává nejistotu a pocit adrenalinu. Důvodem toho je také jejich hojná výstavba v posledních několika málo letech.

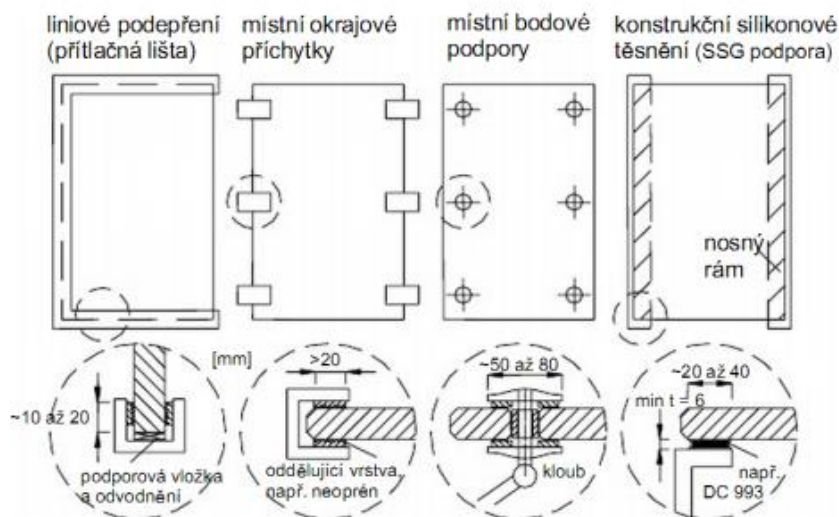
## 2.7 Spoje skleněných konstrukcí

Stejně, jako je tomu u materiálů z oceli, hliníku či dřeva, tak i u skla se setkáváme s konstrukčními spoji. Spoje skleněných prvků jsou nutné při realizaci konstrukcí větších, než jsou limitní rozměry skleněných desek 6,0 x 3,21 m. [7]

Dále se vyskytují spoje u detailů, ve kterých se mění směr konstrukce, jako je tomu např. u rámového rohu. Spoje se provádí také mezi konstrukcemi z různých materiálů, z důvodu vyšší únosnosti, jako je tomu např. u hybridních nosníků, či pro čisté navázání dvou odlišných prvků, např. schodiště a zábradlí.



Spoje konstrukcí ze skla mají nosnou funkci, která rovnoměrně přenáší zatížení na další části konstrukce. Tento úkol zajišťuje roznášecí vrstva, která současně zabraňuje vzájemnému kontaktu skla a např. z oceli. Rozdělení spojů v případě tabulí zatížených kolmo k povrchu je znázorněno na *obr. 2.9*. [6]

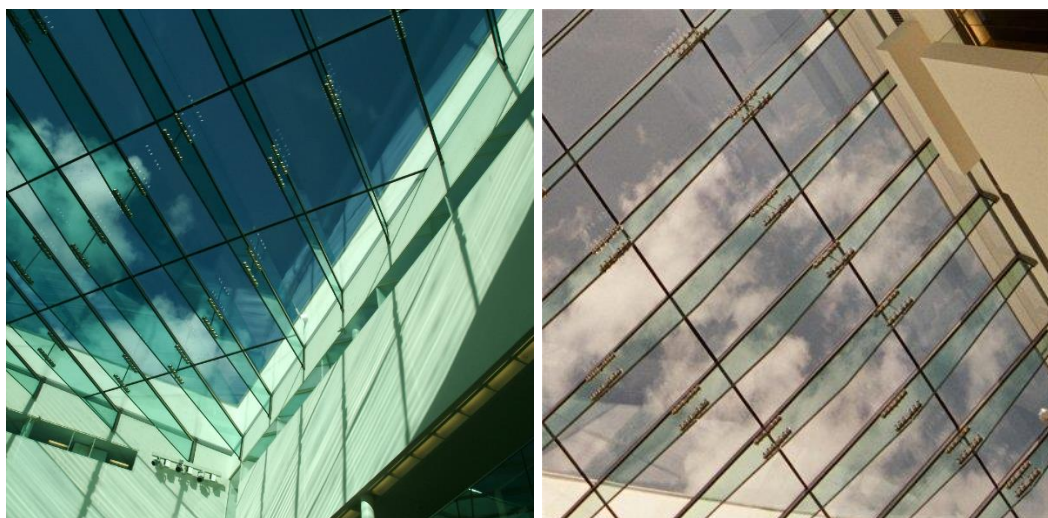


*Obr. 2.9: Rozdělení přípojů skleněných konstrukcí [6]*

Dalším a nejběžnějším rozdělením spojů skleněných prvků je na spoje mechanické a spoje lepené.

### 2.7.1 Mechanické spoje

Mechanické spoje, nebo-li spoje šroubované, se dále rozdělují z hlediska působících sil na spoje střížné a třecí, *obr.2.10*. Šroubované spoje mohou být konstruovány, jako provrtané skrz sklem, viz *obr. 2.11* či jako přítlačné lišty, které zásah do skla nevyžadují.



Obr. 2.10: Třecí spoj u zastřešení university v Glasgow [8]



Obr. 2.11: Bodové úchyty fasádních skel [9]

U ocelových či dřevěných konstrukcí je použití šroubovaných spojů běžné. U konstrukcí ze skla je realizace šroubových provrtávaných spojů o něco náročnější a přináší řadu úskalí. Samotné vrtání otvorů do skleněných prvků znamená snížení pevnosti skla a vznik tepelných mostů u obalových částí konstrukce. Důležité je také správné opracování a očištění okolí vrtaného otvoru. Jakékoliv mechanické zásahy do skleněných prvků způsobují mikrotrhliny, které mohou vést až k celkovému porušení spoje. Dalším negativním znakem, který je charakteristický pro vrtané spoje, je koncentrace napětí v okolí otvoru, takzvané špičky napětí. [10]

Šroubované spoje, kde spojovacím materiálem je kov (šroub), se vždy musí do stykových ploch osadit poddajný materiál, který zamezí kontaktu mezi sklem a kovem a tím i pravděpodobnému porušení spoje. Tímto materiálem jsou nejčastěji pryžové či plastové vložky nebo injektovaná pryskyřice. [7]

## 2.7.2 Lepené spoje

Z estetických důvodů a z požadavků na vzhled nosných skleněných konstrukcí je dáována přednost spojům s minimálním vizuálním dopadem, což splňují plně transparentní lepené spoje. Lepené spoje jsou ve srovnání se šroubovanými konstruovány bez porušení spojovaných materiálů a jsou spoji nerozebíratelnými. Mají velkou řadu výhod, ale i vlastností, které jsou u spojů méně žádané. V *tab. 2.2* jsou tyto výhody a nevýhody vypsány.

<b>VÝHODY</b>	možnost spojení menších a tenčích materiálů
	možnost spojení odlišných materiálů
	redukce váhy spoje
	možnost spojení ve větší ploše
	rovnoměrné rozdělení napětí po průřezu
	vysoká dynamická odolnost poddajných lepidel
	funkce nosná i těsnící
	nepropustné pro plyny
	nekorodující materiál
	transparentnost
	estetika
snížení výrobních operací	
<b>NEVÝHODY</b>	nežádoucí chování při vysokých teplotách
	pevnost závisí na teplotě
	pevnost je ovlivněna délkou trvání zatížení
	pevnost lepidla v čase klesá
	stárnutí lepidel, degradace
	nízká odolnost spoje v kroucení
	při přípravě nutné zajistit rovnost a čistotu lepeného povrchu

*Tab. 2.2: Výhody a nevýhody lepeného spoje [7]*

## 3 LEPIDLA JAKO SPOJOVACÍ MATERIÁL

### 3.1 Historie

Lepidla i samotná technologie lepení se začala používat již před několika tisíci lety. Prokázané počátky lepení sahají až do období 4 000 př. n. l. První zmínky o používání lepidel popisují způsoby použití živočišných lepidel a jejich výrobu. Lepidla se již v tuto dobu používala pro montáž a dokonce i pro stavební účely. Například Římané používali směs dehtu a včelího vosku jako spojovacího prostředky pro stavbu lodí. [11]

Dalším vývojem, který se odehrál ve středověku a přetrvával až do počátku dvacátého století, byla výroba klihu, dále přibýly způsoby lepení pomocí vaječných bílků a škrobu. [12]

Rozvoj v používání lepidel ovlivnil až pokrok ve vědeckém výzkumu v oblasti chemického průmyslu, kdy začala vznikat nová syntetická lepidla, která se v přírodě nevyskytují. Prvním syntetizovaným polymerem byla nitrocelulóza, tedy termoplastický materiál, který společně s bakelitem (pryskyřice) započal éru plastů.

Období posledních 100 let je charakteristické pro rychlý rozvoj těchto syntetických spojovacích materiálů, jejichž použití je především ve strojírenském, automobilovém, leteckém a stavebním průmyslu.

### 3.2 Popis a vlastnosti lepidel

Používání lepidel ve spojích má velkou technologickou výhodu s vysokou efektivitou. Lepidla jsou materiály o značné vnitřní soudržnosti (koheze), kterou jsou schopné trvale spojovat tuhé prvky pomocí přilnavosti (adheze). Lepidla jsou materiálem permanentně elastickým. Lepené spoje je možné provést jako vodotěsné a plynotěsné. U spojů provedených ze skla dokonce i transparentní, takže jsou z velké části více esteticky přijatelné než spoje mechanické, které vyžadují vrtání otvorů spojovaným materiálem. Nezvyšující se hmotnost spoje a relativně vysoká pevnost lepidel jsou dalším pozitivním znakem jejich použití. [13]

Lepidla se skládají z filmotvorných makromolekulárních látek, které mohou být původem přírodní či syntetické. Filmotvorné látky mohou mít lineární nebo trojrozměrnou strukturu. Lineární struktura, nebo-li struktura termoplastická, je po použití organických rozpouštědel rozpustná. Struktura trojrozměrná se naopak nerozpouští ani netaví.

V dnešní době se na našem trhu objevuje nepřehledné množství druhů lepidel, které podle svého chemického složení vykazují odlišné vlastnosti.

Mezi fyzikální vlastnosti se řadí viskozita a s ní spojené smáčení povrchu. Viskozita charakterizuje vnitřní tření a závisí na přitažlivosti částic daného prvku. Lepidla s vysokou viskozitou jsou charakteristická problematickým nanášením, tedy

nedokonalým smáčením povrchu. Smáčení povrchu se dá popsat jako schopnost kapky lepidla roztéci se po povrchu a tím vytvořit rovnoměrnou vrstvu lepidla, která je ideální pro tvorbu spoje. [14]

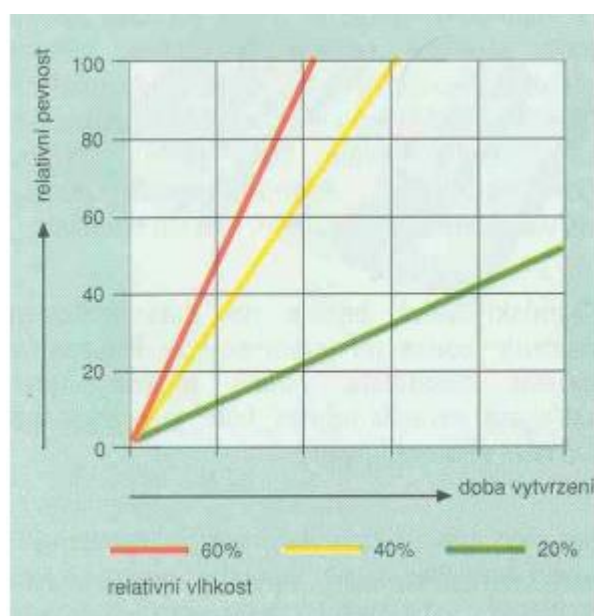
Vlastnost, jež je dále u konstrukčních lepidel požadovaná, je krátká či z části regulovatelná doba vytvrzování. To závisí na celkovém chemickém složení lepidla, jednotlivém podílu složek, na způsobu lepení a dále tvorbě vhodného prostředí, ve kterém se lepidla používají.

Mezi další vlastnosti můžeme zařadit dlouhou dobu skladovatelnosti, tedy dobu před otevřením lepidla a jeho použitím. Každé lepidlo ovšem požaduje jiné skladovací podmínky.

Agresivita lepidel je další vlastností, která závisí na jejich složení a na materiálech spojovaných prvků. [14]

Stupeň kyselosti lepidla je udáván hodnotou pH, kyselost  $\text{pH} < 7$ , zásaditost  $\text{pH} > 7$ . Tato hodnota je důležitá při skladování lepidel a následném vytvrzování. Je tedy vhodné ji kontrolovat. Nastane-li její pokles, začíná lepidlo kondenzovat ještě před použitím, čímž se zpomaluje či úplně zastavuje proces vytvrzování. [15]

Vliv na vytvrzování lepidla má i obsah relativní vlhkosti, *obr.3.1*.



Obr. 3.1: Vliv relativní vlhkosti na dobu vytvrzení [15]

Aby lepidla plnila svou nejdůležitější funkci, tedy spojovala k sobě dva prvky, musí být zajištěna homogenita lepidla. Toto je zásadním problémem u vícesložkových lepidel, kde se musí dbát na správnost pořadí komponent přidávaných do směsi, a jejich řádné promíchání.

Pro správné působení lepidel je dále vyžadována čistota při manipulaci a při nanášení lepidla, tedy přesnost práce. Nedodržení technologických pravidel v průběhu výroby lepeného spoje znamená zhoršení mechanických vlastností. Životnost lepidel a jejich jiné

působení za různých teplot jsou dalšími vlastnostmi, které je třeba při návrhu zohlednit. [16]

### 3.2.1 Tepelné vlastnosti lepidel

Znalost tepelných vlastností lepidel je při jejich návrhu zásadní. Mezi tyto vlastnosti se řadí zejména tepelná vodivost, tepelná roztažnost a měrná tepelná kapacita.

Schopnost látky přenést tepelnou energii mezi jednotlivými částicemi je tepelná vodivost. U lepidel je hodnota tepelné vodivosti podstatně menší, než je tomu u kovů. Např. tepelná vodivost mědi je 510 [W/mK], zatímco hodnota u syntetických lepidel se pohybuje kolem 0,2 [W/mK], rozdíl v hodnotách je tedy více jak tisíckrát menší.

Výkyvy teplot mohou způsobit rozměrové i objemové změny. Tyto změny jsou popsány hodnotou tepelné roztažnosti, přesněji součinitelem délkové roztažnosti  $\alpha$  [ $K^{-1}$ ]. Spolu s rostoucí teplotou roste i součinitel tepelné roztažnosti. Nižší teplotní roztažnost je u lepidel s vyšším modulem pružnosti. Obecně je hodnota teplotní roztažnosti vyšší než u kovů.

### 3.2.2 Mechanické vlastnosti lepidel

Teplota ovlivňuje nejen hodnoty tepelné vodivosti a roztažnosti, ale i celkové mechanické vlastnosti lepidel. Spolu s teplotou závisí mechanické vlastnosti i na chemickém složení látky, velikosti stavebních prvků – makromolekul, a jejich uspořádání.

Modul pružnosti  $E$  [MPa] je jedna z vlastností lepidel, která se dá zjistit ze zkoušek v tahu, ohybu či smyku. Modul pružnosti v tahu je lehce ovlivnitelný složením zkoušeného materiálu.

Další hodnota, kterou lze stanovit ze zkoušky tahem, tlakem či ohybové zkoušky, je mez pevnosti. Zvýšením teploty klesá pevnost lepidla. Velikost poklesu pevnosti však závisí i na teplotě lepidel a prostředí, ve kterém se pevnost zjišťuje.

Tvrdoost je poslední z důležitých mechanických vlastností. Jedná se o odpor, který je vyvolán proti vnikání těles jiného materiálu. Univerzální metoda pro zjištění tvrdosti u všech druhů lepidel neexistuje. Pro zjištění se používají různé metody podle toho, jakou má vzorek konzistenci.

### 3.2.3 Deformace lepidel - polymerů

Vlivem působení vnějšího zatížení nastává, jako u většiny materiálů tak i u polymerů, přetvoření materiálu, tedy deformace. Přetvoření mohou být trojího charakteru:

- *elastická deformace*, jedná se o vratnou deformaci způsobenou změnou v uspořádání elektronů
- *visko-elastická deformace*, vratná, závislá na čase a způsobena protažením molekulových řetězců struktury lepidla
- *visko-plastická deformace*, nevratná, závislá na čase a způsobena posunem molekulárních řetězců

Zmíněné faktory, které způsobují následné přetvoření, nemusí u polymerů nastávat postupně, ale je důležité uvažovat jejich kombinace. Vznik deformací je závislý na typu a struktuře lepidla. [1]

### 3.3 Rozdělení lepidel

Lepidla můžeme rozdělit podle několika kritérií. Z chemického hlediska a původu jsou lepidla rozdělena na přírodní a syntetická. Přírodní lepidla se dále dělí na živočišná, jako jsou lepidla glutinová, kaseinová či včelí vosk, a lepidla rostlinná. Rostlinná lepidla jsou vyráběna z rostlinných produktů, jako jsou brambory, rýže, semena hrachu či z pryskyřic jehličnatých stromů. [17]

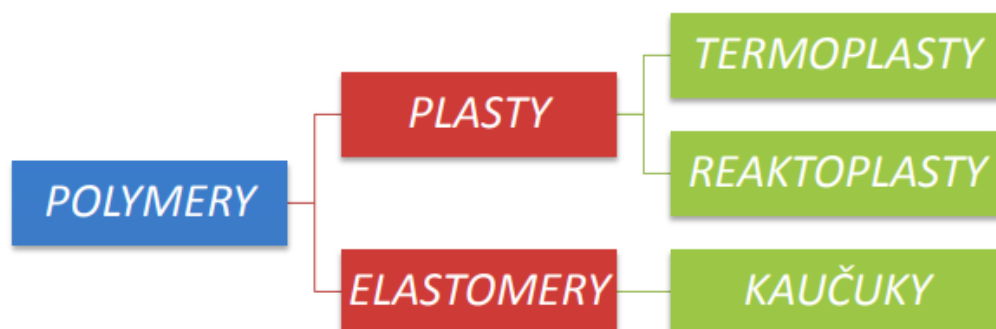
Druhým typem jsou lepidla syntetická, která jsou na rozdíl od lepidel přírodních vyráběna chemickým procesem. Vzhledem k jejich příznivým vlastnostem, jako je odolnost jak chemická, tak biologická a vysoká pevnost, nahrazují ve velké míře přírodní lepidla. K syntetickým lepidlům řadíme v dnešní době nejvíce používané polymery. [4], [1]

Polymery, nebo-li plasty jsou velice široký pojem pro chemické látky rozdílných vlastností, rozdílného původu i chemického složení. Plasty se obecně řadí mezi makromolekulární látky s hmotností vyšší než  $10^4$ . Z chemického hlediska jsou to látky organické a obsahují z velké části atomy uhlíku. Tyto atomy mají schopnost vzájemného vázání a vytváření dlouhých řetězců. [18]

Vznik polymerů probíhá pomocí polymerace, tedy chemické reakce, při které dochází ke spojování molekul, takže obsahují alespoň jednu dvojnou či trojnou vazbu.

Polymerní lepidla se na základě mechanických vlastností dále rozdělují na elastomery a plasty (plastomery), viz *obr. 3.2*. [1]





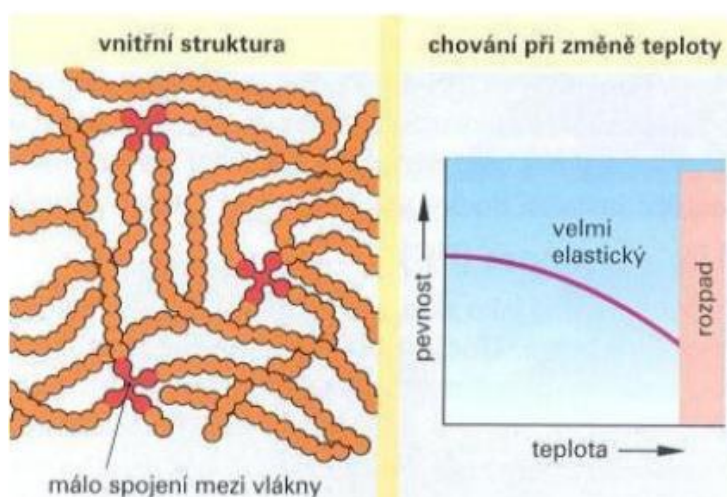
Obr. 3.2: Rozdělení polymerů [19]

### 3.3.1 Elastomery

Elastomery jsou polymerní materiály se silně visko-elastickým chováním a velmi nízkým modulem pružnosti. Jsou tvořeny dlouhými sesíťovanými polymerními řetězci s velmi malým počtem chemických vazeb, díky čemuž jsou pružné a relativně měkké i za normální teploty, obr. 3.3. Ochlazené elastomery pod teplotu skelného přechodu ( $T_g$  – teplota mezi skelným a vysoce elastickým stavem) vykazují menší pružnost. [1]

Charakteristickým znakem elastomerů je návrat do původního tvaru po odstranění působícího zatížení, tedy jejich deformace je vratná. Elastomery mají schopnost absorpce energie a dobře snášejí nerovnoměrné zatížení a dynamické účinky.

Mezi typické elastomery se řadí termoplastický elastomer (TPE), polyuretanový kaučuk (PUR) či silikonový kaučuk. [20]



Obr. 3.3: Struktura a chování elastomerů [20]



### 3.3.2 Plastomery

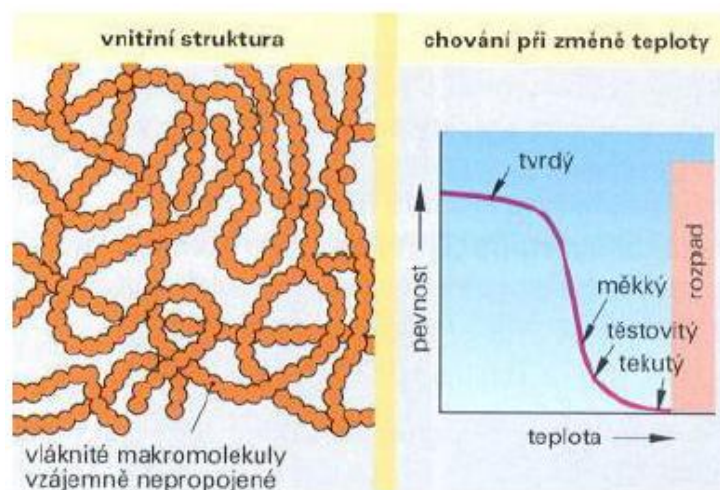
Jako plastomery nebo-li plasty, se označují polymery, jež jsou za běžných podmínek tvrdé a křehké. Při vyšších teplotách se stávají plastickými a tvárnými. Pokud po opakovaném zahřátí plastomery změknou a při ochlazení opět ztuhnou, jedná se o termoplasty. V jiném případě může vlivem chemické reakce nastat změna trvalá, což je charakteristické pro reaktoplasty (termosety). [19], [1]

#### 3.3.2.1 Termoplasty

Termoplasty jsou polymery tvořené lineárními řetězci se slabými intermolekulárními vazbami. Při zahřívání, vlivem vzniklé energie, se začínají makromolekuly termoplastů rozkmitávat, čímž narušují vnitřní soudržné síly, viz obr. 3.4. Vlivem toho začínají řetězce měnit svůj tvar. Polymer přechází do plastického stavu, tedy měkne a dá se tvářet. V tomto stavu jsou jeho vlastnosti podobné kaučuku.

Opakované zahřívání a ochlazování může mít u termoplastů za následek degradaci oxidací materiálu, nebo-li tepelné stárnutí. [20]

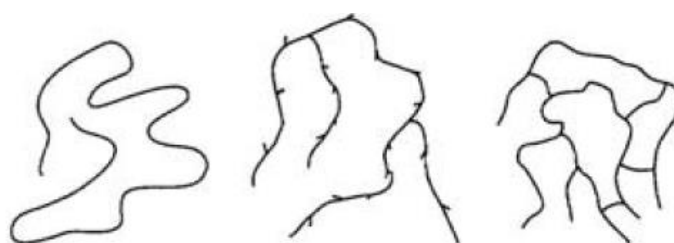
Mezi nejznámější a nejpoužívanější termoplasty se řadí polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS) či polyvinylbutyral (PVB) z něhož jsou vyráběny i fólie pro vrstvená skla. [1]



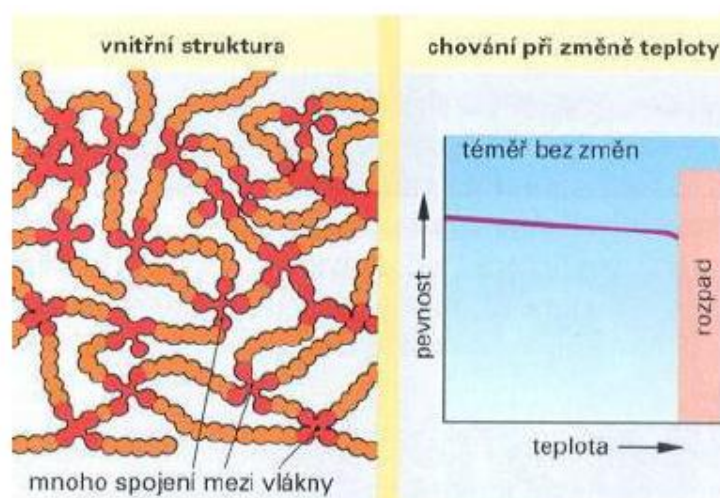
Obr. 3.4: Struktura a chování termoplastů [20]

### 3.3.2.2 Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou známé také pod jménem termosety. Strukturální složení jejich makromolekul je lineární, ovšem při zahřátí, tedy dodání tepelné energie, nastává zesíťování. Zesíťování je proces, při kterém se řetězce začínají spojovat chemickými vazbami a vytvářejí tak prostorovou trojrozměrnou síť, *obr. 3.5*. V tomto momentu se již řetězce nemohou oddělit. Působí zde tak velké chemické vazby, že hmotu nelze roztavit. Naopak po vystavení teplu a dokončení zesíťování termosety nevratně tuhnou, viz *obr. 3.6*. Proces tuhnutí nastává při zahřátí na teplotu vyšší než 200°C, dále pomocí tlaku a někdy i katalyzátorů. [1], [4], [20]



*Obr. 3.5: Strukturální vývoj reaktoplastů [4]*



*Obr. 3.6: Struktura a chování reaktoplastů [20]*

Při zesíťování se spojují molekuly o velké molekulové hmotnosti, což má za následek i nárůst teploty skelného přechodu a s tím spojené zlepšení odolnosti proti působení vlivů okolního prostředí, jako je např. působení vysokých teplot. Díky tomu se reaktoplasty využívají v extrémních tepelných podmínkách více než termoplasty.

Mezi reaktoplasty se řadí např. epoxidové a fenolytické pryskyřice (PE), akryláty či dvou složkové polyuretany. [20]

### 3.4 Rozdělení lepidel podle způsobu tuhnutí ve spoji

Při konstrukci lepeného spoje jsou lepidla v tekutém stavu. Pro správně vytvořený spoj je nutné, aby film lepidla prošel fází tuhnutí a jeho konečný stav byl schopný správně plnit všechny funkce lepidel ve spoji. Podle způsobu, jakým se lepidla dostanou z fáze tekuté do fáze tuhé, se rozdělují do několika skupin.

#### 3.4.1 Roztoková a disperzní lepidla

Tato lepidla tuhnou následkem vsakování a odtékávání vody nebo organických rozpouštědel. Jsou tvořena 20-60% přírodních či syntetických látek, jež jsou rozpuštěna nebo dispergována ve vodě či organických rozpouštědlech. Jejich použití je možné pouze pokud jeden z adherendů je propustný pro plyny. Správné nanášení těchto lepidel by mělo probíhat na obě kontaktní plochy, následně musí být zajištěno správné přiléhání obou těchto ploch. K tomuto slinutí může dojít pouze nad tzv. minimální filmotvornou teplotou, odlišnou pro jednotlivé disperze. Vlivem vysychání dispergačních látek a rozpouštědel se původní objem lepidel zmenšuje a vytváří se ideálně tenký film. [12],

Patří sem např. sloučeniny celulózy, lepidla polyamidová, polyvinylacetátová a lepidla na bázi PVC.

#### 3.4.2 Reaktivní lepidla

Tato lepidla, která jsou na bázi epoxidových a fenolických pryskyřic, se hojně používají v průmyslu. Proces tuhnutí u nich nastává se změnou ve vnitřní struktuře.

Dále se dělí na:

- jednosložková lepidla: vytvrzení se děje za zvýšené teploty
- vícesložková lepidla: aktivace nastává smíšením složek lepidla nebo následně zvýšenou teplotou.

Reaktivní lepidla ovšem nemusí tuhnou pouze vlivem teploty, ale i vlivem vlhkosti okolního prostředí, jako je tomu u lepidle kyanoakrylátových či silikonových. Dalším aktivátorem tuhnutí je kontakt s kovy (akrylátová lepidla) či přidání tvrdidel (epoxidová, polyuretanová lepidla). [21]

#### 3.4.3 Tavná lepidla

Tavná lepidla mají za normální teploty stejné vlastnosti i strukturu jako termoplastické polymery. Jejich zpracování je založeno na principu zahřívání na teplotu

160 - 200°C, kdy se lepidlo taví, zkapalní a stane se lepivým. Nanášení lepidla probíhá pouze na jednu stranu adherendu, následně se spoj nechává vychladit, či se spoj může po krátkou dobu ponechat pod tlakem, což vnáší spoji počáteční pevnost.

Jelikož jsou tavná lepidla termoplastickým materiálem, který si udržuje termoplasticitu i v lepeném spoji, dá se tento spoj rozpojit zahřátím a dále znovu spojit. Tepelná odolnost lepidla, a tedy i celého spoje je omezena bodem tání lepidla. [12]

## 4 LEPENÉ SPOJE

### 4.1 Popis lepeného spoje

Lepené spoje jsou v dnešní době v oblasti stavebního průmyslu poměrně často používané. Lepené spoje jsou spoji nerozebíratelnými. Dávají možnost k sobě spojit jakékoliv materiály, např. plasty, dřevo, sklo, kovy a jejich různé kombinace. U tohoto spoje není nutné vkládat mezi spojované materiály distanční destičky, jelikož samotné spoje přebírá tuto funkci. Lepidla mohou být nanášena i ve velkých plochách, což u lepidel zajišťuje rovnoměrné rozdělení působícího napětí. Ve spoji tedy nevznikají nežádoucí špičky napětí, jako je tomu u vrtaného otvoru ve skle. Lepenými spoji lze také docílit vyrovnání různých délkových deformací, způsobených odlišnou tepelnou roztažností použitých materiálů. Tyto schopnosti dovolují ve velké míře použití lepených spojů nejen ve stavebnictví, ale i u leteckého či automobilového průmyslu.

Z estetického hlediska je spoj díky vzhledu a části i transparentnosti přijatelnější, než spoj šroubovaný. V oblasti konstrukčního stavitelství však působí tato technologie jako nedůvěryhodná i přesto, že spojení má vysokou únosnost a je již několik desetiletí ve stavebním odvětví používána. [7]

Lepené spoje nevyžadují použití dalších spojovacích prvků, jako např. šrouby, matice či distanční podložky, je však důležitý správný výběr lepidla, kterých je na trhu velká řada. Materiál lepidla je rozhodujícím faktorem pro správně fungující spoj, tak aby splňoval požadované mechanické vlastnosti. Lepidla musí být dostatečně tuhá a zároveň poddajná. Tuhost zajišťuje optimální interakci spojovaného materiálu a poddajnost zaručí efektivní rozdělení napětí. [1]

### 4.2 Technologie lepení

V současné době se s technologií lepení setkáváme stále častěji i přes to, že do nedávna byla brána spíše jako doplňková. Je to způsobeno prudkým rozvojem techniky a intenzivním výzkumem, který je v oblasti lepení na velmi vysoké úrovni.

Lepidla jsou materiálem, který je schopen spojovat k sobě povrchy tuhých těles v důsledku přilnavosti (adheze) a vlastní soudržnosti (koheze), jež je tvořena souhrnem

všech přitažlivých sil, které brání oddálení jednotlivých molekul lepidla od sebe. Adheze i koheze působí v lepeném spoji souběžně. Interakce lepených materiálů přispívá také ke zlepšení jejich kvality, a dokonce i k vytváření nových výrobků s lepšími materiálovými vlastnostmi. [16], [11], [22]

Metoda lepení se vyznačuje nejen mnoha výhodami, viz *kap. 2.7.2*, ale i limitujícími faktory, jako jsou např. vysoké nároky na očištění materiálů a přesnost při provádění těchto spojů. [16]

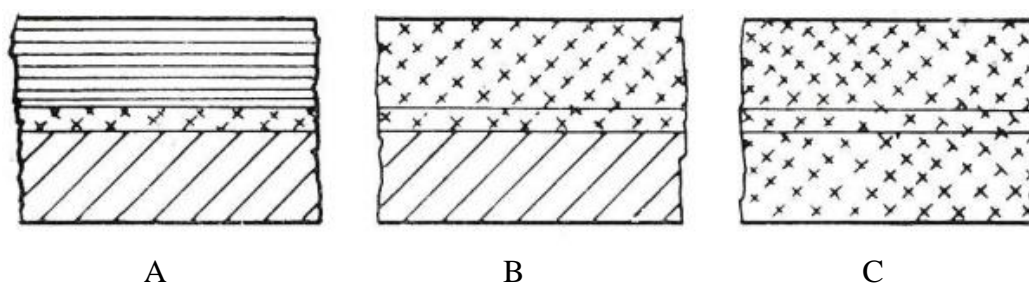
### 4.3 Adhezní a kohezní síly

Výzkum v oblasti lepených spojů je velice rychlý, ale přesto jsou zde fyzikální pravidla, jejichž princip se ani s vývojem nemění.

Mezi lepeným materiálem (adherendem) a lepidlem (adhezivem) působí síly, které vyvolávají přilnavost, nebo-li adhezi. Adhezní síly se dále rozdělují na síly chemické a fyzikální (van der Waalsovy síly, Londonovy síly apod.) Při stejném složení lepidla a spojovaného materiálu se jedná o auto adhezi. [1]

Další druh sil, který se u lepeného spoje vyskytuje a má značný podíl na jeho pevnosti, je soudržnost samotné vrstvy lepidla, tedy kohezní síly. Částice lepidla jsou zde drženy pohromadě díky valenčním a mezimolekulárním silám. Koheze je přímo závislá na složení lepidla a průběhu lepení. [16]

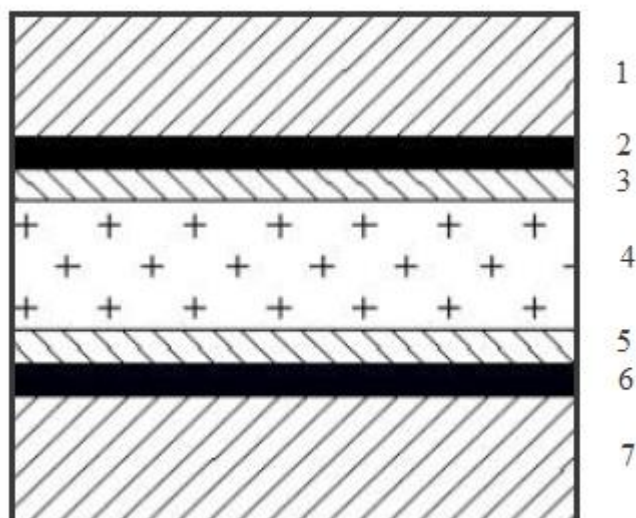
Je možné popsat několik možností vztahu lepidla ke spojovanému materiálu, viz *obr 4.1*.



*Obr. 4.1: Působení mezi lepidlem a spojovaným materiálem [16]*

- A – běžný adhezní stav: složení lepidla a spojovaných dílců je odlišné
- B – jednostranná adheze: složení lepidla je totožné s jedním ze spojovaných dílců
- C – úplná adheze: složení lepidla a spojovaných dílců je totožné

Celkovou strukturu lepeného spoje popisuje *obr. 4.2*, na kterém je patrné, že z konstrukčního hlediska se spoj skládá ze tří hlavních vrstev a dvou mezivrstev.



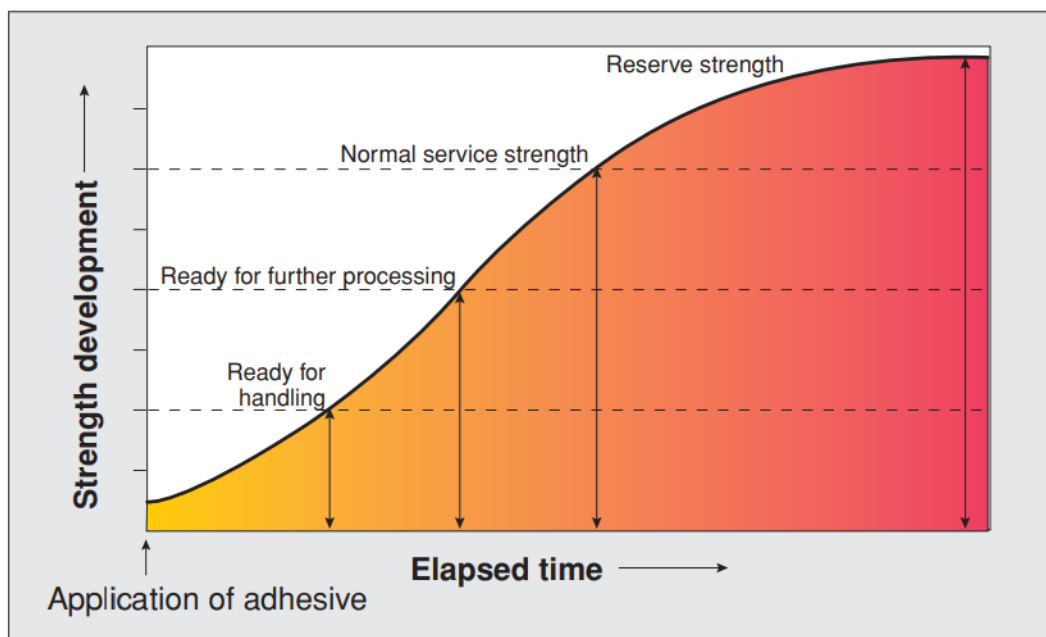
Obr. 4.2: Struktura lepeného spoje, působící zóny [21]

- 1 – Lepený materiál (adherend)
- 2 – Adhezní zóna
- 3 – Přejížděvací kohezní zóna
- 4 – Kohezní zóna
- 5 – Přejížděvací kohezní zóna
- 6 – Adhezní zóna
- 7 – Adherend

#### 4.4 Pevnost lepeného spoje

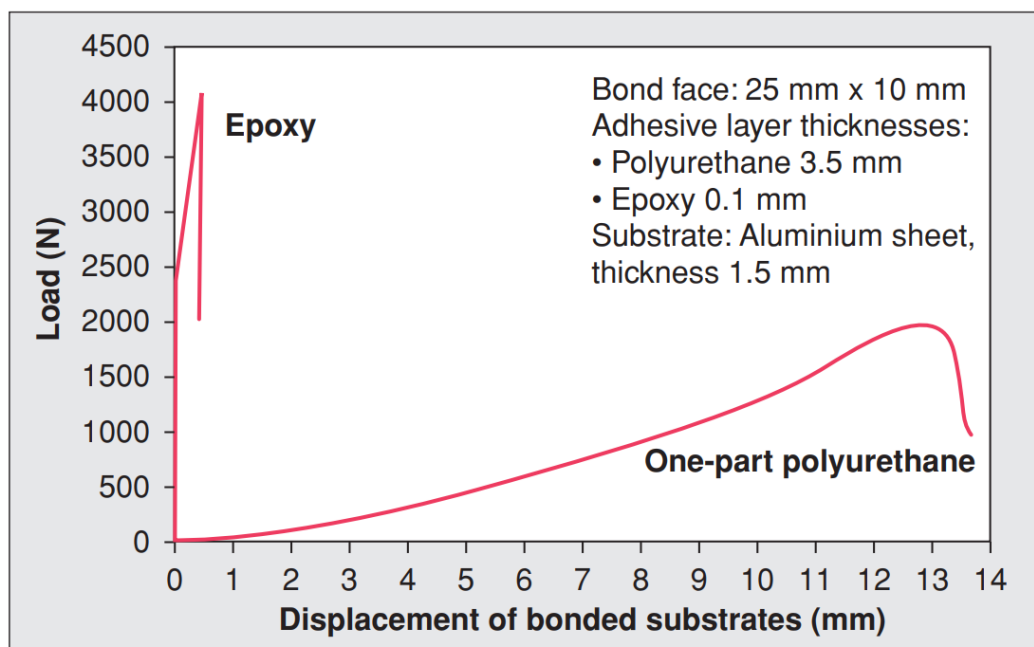
Pevnost lepeného spoje je závislá na adhezních a kohezních silách. Ovlivněna je geometrií a rozměry spojované konstrukce, úpravou jednotlivých částí i celkového spoje, dále na délce a způsobu působení zatížení. Velký vliv na pevnost spoje má okolní prostředí, tedy jeho vlhkost, teplota, UV záření a další.

Po zkonstruování lepeného spoje nedochází k okamžité maximální pevnosti, jako je tomu u spojů šroubovaných. Pro celkovou pevnost spoje je důležité, aby lepidlo bylo zcela vytvrzeno. Podle typu lepidla se doba vytvrzování může regulovat. Existují lepidla, jejichž tvrdnutí probíhá ve dvou fázích. První fáze trvá velice krátce a lepidlo dosáhne pouze počáteční pevnosti, druhá fáze potom trvá delší dobu, po jejím uplynutí je teprve dosažena maximální pevnost spoje, obr. 4.3.



Obr. 4.3: Závislost doby tvrzení na pevnosti spoje [13]

Pevnost lepeného spoje je ovlivněna i tloušťkou vrstvy lepidla (adheziva). Tloušťka vrstvy ovlivňuje zejména spoje, u kterých bylo použito lepidlo nepoddajné. Porovnání tuhých a poddajných lepidel v závislosti na tloušťce vrstvy je znázorněno na obr 4.4.



Obr. 4.4: Pracovní diagram tuhého (epoxidového) a poddajného (jednosložkového polyuretanu) lepidla - závislost zatížení a posunutí kontaktních ploch vrstvy lepidla [13]



Při dodržení doporučené tloušťky nanášeného lepidla, dle technických listů výrobce, dosahujeme její předepsané pevnosti. Tloušťky vrstvy lepidla se odvíjejí od chemického složení lepidla, jeho konzistence či viskozity. Vysoká viskozita lepidla je při aplikaci vhodná spíše pro lineární spoje o vyšší tloušťce vrstvy, naopak nízkoviskózní lepidla jsou více používána pro menší tloušťky i menší stykované plochy, tedy pro bodové spoje.

Lepený spoj a jeho pevnost je ovlivněna rovněž působícím zatížením a jeho rychlostí. Také modulem pružnosti, nízký modul pružnosti je vhodný pro tuhé lepené spoje, naopak lepidla s vysokým modulem pružnosti dovolují přenášet smykové síly.

Pevnost lepeného spoje nemusí být ovlivněna pouze pevností lepidla. U některých lepených spojů, např. spoj se skleněnými prvky, může dojít dříve k porušení skla než lepidla a tím i k celkovému kolapsu skleněné konstrukce. [1]

Pevnost lepidel uvedená výrobcem je založena především na experimentálních zkouškách a není shodná s pevností celkového lepeného spoje. Pro bezpečný návrh spoje je nejlepší celkový detail zkonstruovat a experimentálně odzkoušet.

#### **4.5 Lepené spoje dle tuhosti**

Dle tuhosti se lepené spoje rozdělují na tuhé a poddajné. Pro jejich zařazení je důležité znát jejich Youngův modul pružnosti  $E$  [MPa], či modul pružnosti ve smyku  $G$  [MPa].

Vysoký modul pružnosti lepidla nanesený v tenké vrstvě vede ke konstrukci tuhého spojení, naopak nízký modul pružnosti u lepidel aplikovaných ve větší tloušťce je charakteristický pro poddajný spoj.

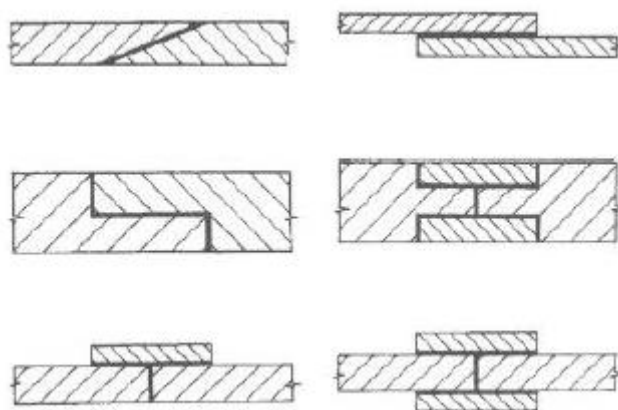
Tuhé spoje jsou odolnější proti vyšším hodnotám zatížení a jejich posun ve vrstvě lepidla je velice malý. Lepidla u poddajných spojů se před porušením protáhnou, tedy zdeformují, ale jejich pevnost nedosahuje takových hodnot, jako u tuhých spojů.

#### **4.6 Konstrukce lepeného spoje**

Lepené spoje jsou vystaveny velké řadě mechanických namáhání, jako je namáhání v tahu, tlaku a smyku, dále rázové pevnosti, pevnosti v kroucení či odlupování částí spoje. Odolat veškerým namáháním je pro spoj náročné, proto je žádoucí najít vhodnou geometrii lepeného spoje a eliminovat tím namáhání spoje v kroucení a odlupování, jelikož těmto spoj nejmeně odolává.

Pro vytvoření pevného spoje musí být stykovaná plocha co největší. Její zvětšení můžeme dosáhnout pomocí stykovaných desek, zkosení stykovaných ploch nebo pomocí vhodného tvarování stykovaného prvku. Příklady možného spojení jsou naznačeny na obr. 4.5





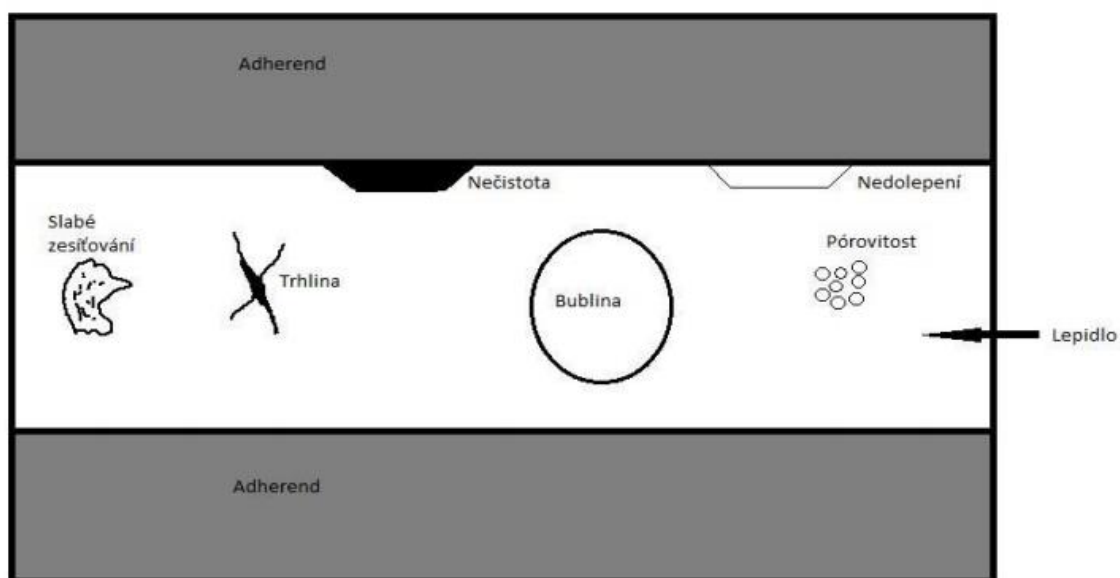
Obr. 4.5: Příklady geometrie lepených spojů [22]

Optimálních hodnot mechanické pevnosti dosahujeme u spojů přeplátovaných, tedy u spojů s jednostrannou či oboustrannou příložkou nebo vytvořením spoje s geometricky upravovanými stykovými plochami. Obecně se ovšem, z technologického hlediska, musí dbát na co nejméně členěné dotykové plochy lepených materiálů. [23]

#### 4.7 Vady ve vrstvě lepidla

Při konstrukci lepeného spoje je důležité dodržení správného postupu lepení, který udává pro jednotlivé typy lepidel výrobce. Při dodržení těchto postupů dosahujeme požadovaných a výrobcem deklarovaných mechanických vlastností a zároveň tak předejdeme vzniku nežádoucích vad ve vrstvě lepidla. I menší vady v lepidle mohou totiž způsobit koncentraci nežádoucího napětí, změnu rozložení napětí po průřezu a následný kolaps lepeného spoje.

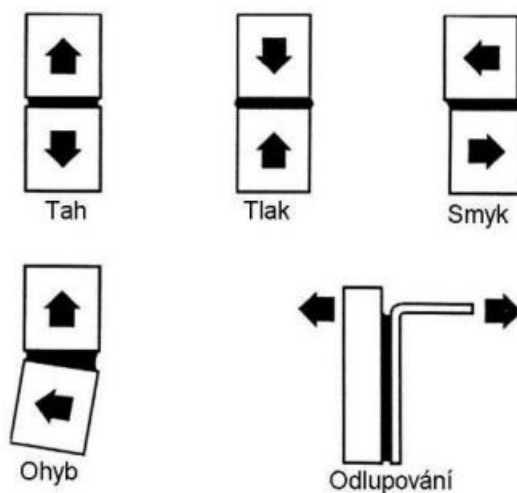
Pomocí vizuální kontroly nebo různých fyzikálních metod (skenování ultrazvukem či infračerveným zářením atd.) lze tyto vady identifikovat. Mezi nejčastější vady patří pórovitost lepidla, vzduchové bubliny, nečistoty v lepidle či na spojovaných plochách, slabé zesíťování lepidla a trhliny, obr. 4.6.



Obr. 4.6: Vady ve vrstvě lepidla [24]

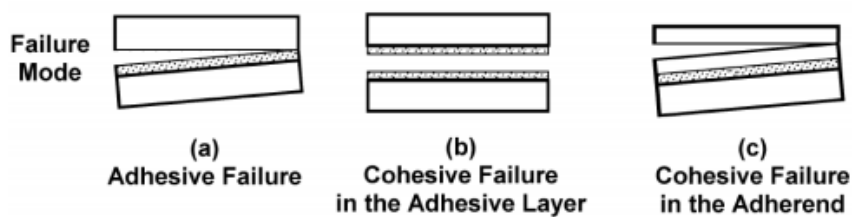
## 4.8 Porušení lepeného spoje

Lepené spoje mohou být namáhány různými druhy zatížení, viz obr. 4.7.



Obr. 4.7: Typy namáhání lepených spojů

Druh zatížení, jeho velikost a doba působení, dále i teplota, vlhkost, apod. ovlivňují, jakým způsobem se lepený spoj poruší. U skleněných konstrukcích v lepeném spoji dochází ke třem typům porušení, obr. 4.8.



Obr. 4.8: Typy porušení lepeného spoje [25]

- a) Adheze – malá přilnavost lepidla (adheziva) k lepeným povrchům (adherendům), prokluz či utrnutí vrstvy lepidla od povrchu
- b) Koheze – porucha soudržnosti lepidla, překročení smykové či tahové pevnosti lepidla
- c) Ztráta vnitřní soudržnosti skla (adherendu) – překročení tahové či smykové pevnosti skleněného prvku, následné porušení

## 5 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA LEPENÝCH SPOJŮ

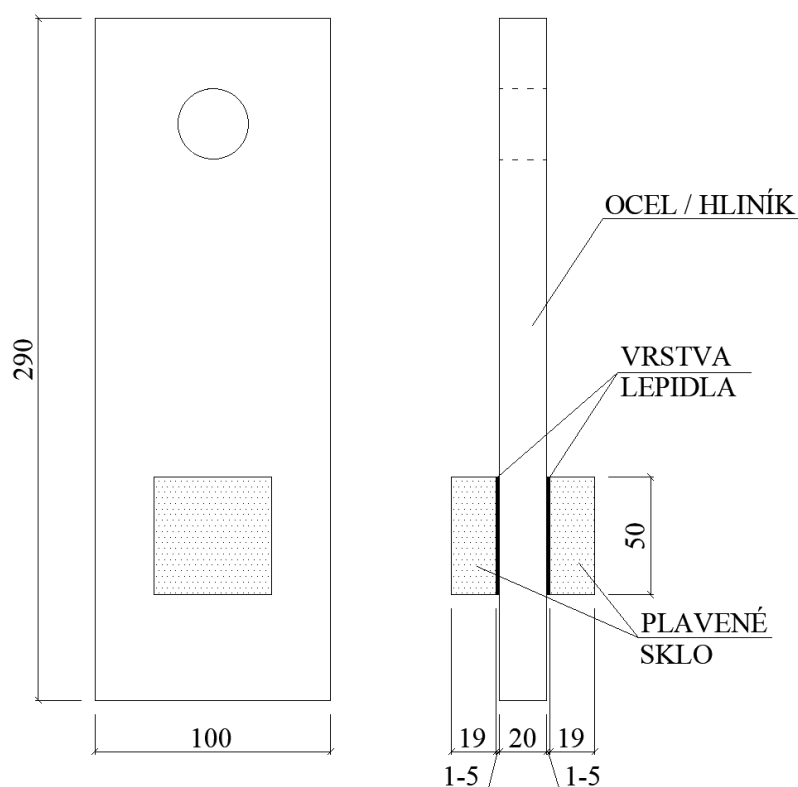
Experimentální analýza byla zaměřena na ověření mechanických vlastností lepeného spoje namáhaného smykem. Experimentální zkoušky představují jednu z nejpřesnějších možností, jak pochopit působení lepeného spoje a dále napomáhá ve zkonstruování přesnějšího výpočetního modelu.

Experimenty byly zaměřeny na účinek adheze dvou typů lepidel a vliv tloušťky daného lepidla při smykovém namáhání spoje s ohledem na spojovaný materiál (sklo – ocel, sklo – hliník). Zkoumanými faktory byla poměrná deformace a smykové napětí.

Cílem experimentální analýzy bylo zjistit skutečné působení lepeného spoje pro různé tloušťky vrstev lepidla a nadále tyto výsledky porovnat s numerickým modelem vytvořeným ve vybraném 3D nelineárním programu.

### 5.1 Zkušební tělesa

Zkušební tělesa byla tvořena plaveným sklem, vrstvou polymerního lepidla a pozinkované oceli nebo broušeného hliníku, viz *obr. 5.1, 5.2*. Tvar zkušebních těles byl zvolen tak, aby byla lepená spára v průběhu zkoušky rovnoměrně zatěžována.



Obr. 5.1: Popis vrstev zkušebního tělesa, rozměry jsou uváděny v [mm]



Obr. 5.2: Zkušební tělesa

### 5.1.1 Volba spojovaných materiálů

Zkušební tělesa byla vyrobena z rozdílných materiálů (adherendů). Jednalo se o plavené sklo, pozinkovanou konstrukční ocel a broušený hliník. Skleněná destička o tl. 19 mm měla geometrické rozměry 50 x 50 mm, viz *obr 5.1*. Ocelová či hliníková část spoje měla rozměry 100 x 290 x 20 mm, viz *obr 5.1*. Veškeré rozměry byly kontrolovány opakovaným měřením, před zahájením experimentů.

### 5.1.2 Volba lepidel

Volba vhodného polymerního lepidla pro konstrukci detailu je důležitým krokem pro soudržnost celého spoje. Základem pro jeho výběr je zjištění materiálových vlastností adherendů, tedy plaveného skla, konstrukční oceli a hliníku. Tyto vlastnosti ovlivňují výběr lepidla z hlediska adheze, koheze a jeho tuhnutí ve spoji.

V oblasti polymerních materiálů je v současné době na trhu velká škála lepidel s poměrně různorodými materiálovými vlastnostmi. Tyto materiálové vlastnosti nelze popsat jednou konstantní hodnotou, jelikož pracovní diagram lepidla je obvykle nelineární.

Platí přímá úměra pružného protažení vrstvy lepidla k jeho tloušťce, z toho důvodu byla aplikována lepidla v různých několikamilimetrových vrstvách.

Pro tuto experimentální část práce byly vybrány dva druhy dvousložkových lepidel:

- CRESTABOND M7-05
- SikaFast – 5215 NT

### **CRESTABOND M7-05**

Jedná se o dvousložkové konstrukční lepidlo. Využíváno je pro širokou škálu materiálů, jakými jsou například kovy, plasty či kompozitní materiály. Crestabond zaručuje vynikající pevnost ve smyku, tahu a vykazuje odolnost proti únavě ve spoji. Jedná se o lepidlo, které neklade velké nároky na přípravu a očištění povrchu jednotlivých spojovaných částí, čímž se zrychluje a zvyšuje produktivita práce s tímto výrobkem.

Garantovaná doba pro manipulaci s lepidlem je 4 – 7 min, doba tvrdnutí je pak 18 – 22 min. Použití lepidla je možné v tloušťce vrstvy od 1 do 5 mm.

### **SikaFast – 5215 NT**

Rychle vytvrzující, elastické dvousložkové lepidlo. Je vhodné pro konstrukční a montážní lepení plechů, plastů, lakovaných povrchů, skla a dřeva. Nárůst pevnosti je velice rychlý. Zaručuje vysokou pevnost a odolnost proti nárazu.

Otevřený čas pro aplikaci lepidla je 5 min, čas fixace je zhruba 15 min.

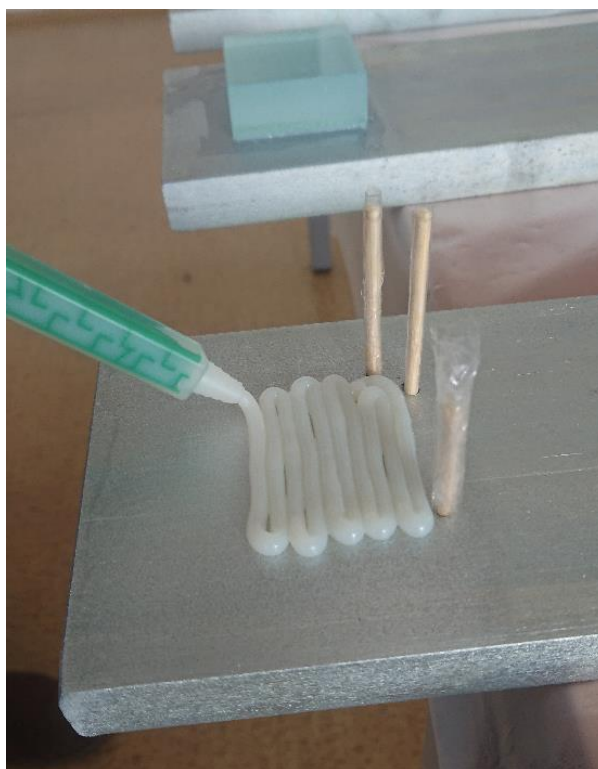
## **5.1.3 Výroba a popis zkušebních těles**

Výroba zkušebních těles probíhala v laboratořích katedry ocelových a dřevěných konstrukcí na Fakultě stavební, ČVUT. Tělesa byla tvořena destičkami plaveného skla, které byly vrstvou lepidla přichyceny k ocelové či hliníkové desce, a to symetricky z obou stran, viz *obr. 5.1*.

Před lepením se obě stykové plochy očistily a odmastily. Pro tuto přípravu byly použity certifikované technologie. Lepidlo se nanášelo pomocí aplikační pistole, která umožňuje správné promíchání obou složek lepidla, viz *obr. 5.3*.

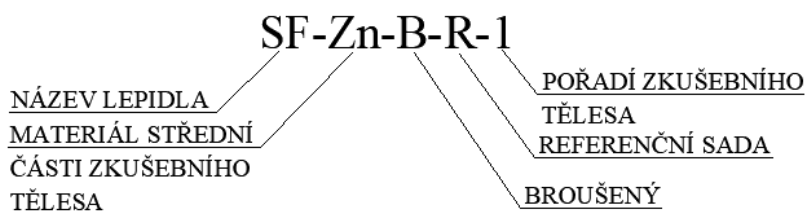
Připraveno a odzkoušeno bylo celkem 40 těles ve dvou referenčních sadách. Každá referenční sada obsahovala 20 vzorků. Vzorky je možné rozdělit podle typu použitého lepidla ve spoji – celkem 10 těles lepených lepidlem SikaFast - 5215 NT a 30 těles s vrstvou lepidla Crestabond M7-05. Lepidlo bylo nanášeno ve třech tloušťkách a to 1, 3 a 5 mm. Pro zajištění přesné tloušťky lepidla byly u vrstvy 1 mm použity skleněné kuličky o průměru 1 mm, osazené do středu lepeného spoje. U tlouštěk 3 a 5 mm byla použita pěnová páska přilepená po okrajích spoje.

Systém značení zkušebních těles je popsán na *obr. 5.4*.

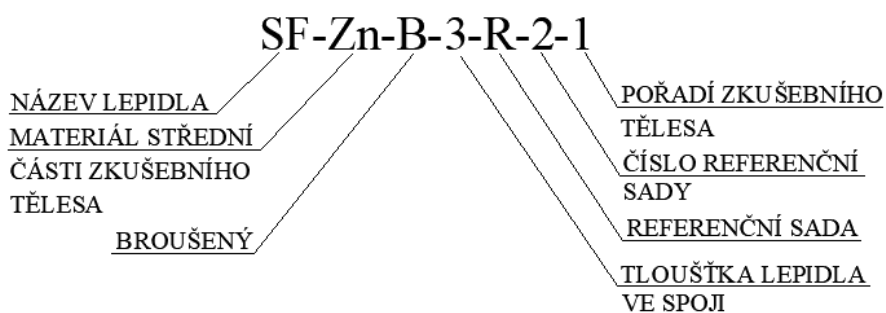


Obr. 5.3: Proces lepení

ZNAČENÍ 1.REFERENČNÍ SADY:



ZNAČENÍ 2.REFERENČNÍ SADY:



Obr. 5.4: Značení zkušebních těles

### 5.1.4 Možné způsoby porušení zkušebního tělesa

Smykové zkoušky byly prováděny do okamžiku porušení zkušebního tělesa. Vzorky mohly být porušeny několika způsoby. Prvním z nich je porušení adhezní, značeno ve výsledných tabulkách – **A**. Při tomto porušení se adherend oddělí od lepidla, vrstva lepidla není nijak poškozena. Adhezní porušení v případě experimentálních zkoušek bylo ještě dále děleno na adhezní porušení od střední kovové části zkušebního tělesa a adhezní porušení od skla.

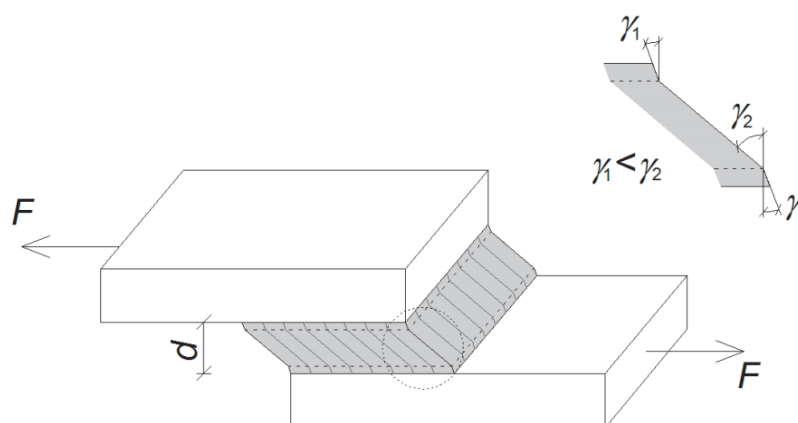
Druhým způsobem je porušení kohezní – **K**, kdy došlo k porušení ve vrstvě lepidla.

Posledním způsobem porušení a také nejčastějším u těchto experimentů je porušení substrátu - **S**, v tomto případě plaveného skla. V případě porušení substrátu je patrné, že bylo dosaženo pevnosti skla a zkoušené lepidlo dosahuje vyšších hodnot.

## 5.2 Popis a uspořádání zkoušky lepeného spoje namáhaného smykem

Pro návrh celého spoje je důležité najít správný vztah mezi smykovým napětím a poměrnou smykovou deformací použité vrstvy, také vztah mezi posunem a silou působící na daný lepený spoj. Tyto vztahy byly zkoumány pomocí smykových zkoušek.

Smykové zkoušky jsou dále prováděny pro zjištění charakteristik lepeného spoje, jelikož jsou odlišné od materiálových charakteristik lepidla. Důvodem je jiný způsob namáhání lepidla uprostřed plošného spoje a zároveň tužší chování vrstvy lepidla u stykových ploch mezi lepidlem a adherendem. Na *obr. 5.4* je tato nesouměrná deformace znázorněna. Hodnota úhlu zkosení u stykových ploch  $\gamma_1$  je menší než  $\gamma_2$ , tedy hodnota zkosení střední části vrstvy. [26]



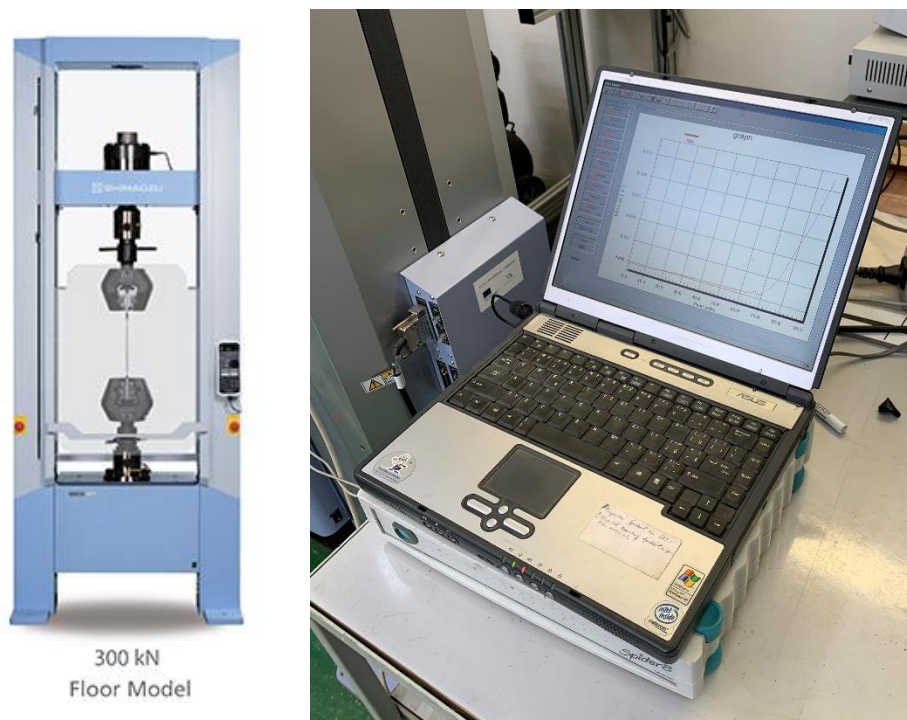
Obr. 5.5: Deformace vrstvy lepidla ve spoji [26]



## 5.2.1 Uspořádání experimentu

Před měřením byla zaznamenána teplota a vlhkost zkoušeného prostředí.

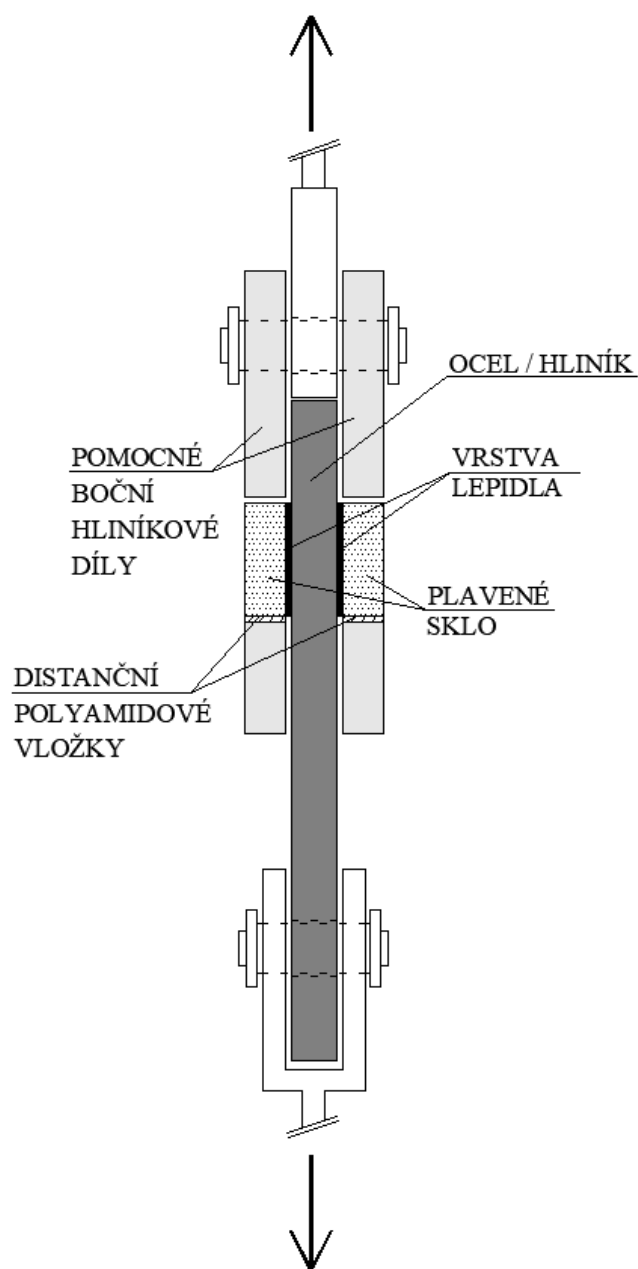
K provedení experimentů bylo použito zkušební zařízení Shimadzu AGS-X 300 kN, které bylo připojeno na měřicí ústřednu Spider 8, jež zaznamenávala a zálohovala naměřená data, viz obr. 5.6.



Obr. 5.6: Shimadzu AGS-X a zaznamenávací ústředna Spider 8 s počítačem

Zkušební tělesa byla osazena do předem vytvořené sestavy, viz obr. 5.6 a obr. 5.7, která se skládala ze zkušebního tělesa a dvou bočních hliníkových dílů, které umožňují vyvození rovnoměrného smykového namáhání ve vrstvě lepidla. Střední díl zkušebního tělesa je vyroben s otvorem pro umístění čepu, přes které je umožněno, pomocí závitové tyče, spojení s čelistmi zkušebního zařízení.

Pro zabránění koncentrace napětí ve skle při styku sklo - kov byly mezi tyto dva materiály vloženy polyamidové vložky.



Obr. 5.7: Schéma a popis zkušebního tělesa osazeného do měřícího stroje



Obr. 5.8: Osazení zkušebního tělesa před začátkem experimentu

Pro vyvození smyku ve vrstvě lepidla byla zařízením vyvolána tahová osová síla. Spoje poté byly zatěžovány kontrolovaným posunem o rychlosti 1 mm/min pro vzorky s tloušťkou lepidla 1 mm, 3 mm/min pro tloušťku lepidla 3 mm a 5 mm/min pro 5 mm vrstvu lepidla.

Měřena byla působící síla a tomu odpovídající posun ve vrstvě lepidla, ze kterého se dále zjistila poměrná smyková deformace, nebo-li zkosení. K zaznamenávání svislých posunů byly použity dva potenciometry umístěné na zkoušeném vzorku, viz obr. 5.8, s označení potenciometrů bylo čísla 1. a 2. Nutná byla kalibrace potenciometrů, vznikly tak dvě konstanty  $k_1 = -0,027193$  [ - ] a  $k_2 = -0,026841$  [ - ]. Pro správnost výsledných posunů je nutné přenásobit hodnoty těmito konstantami.

Síla zaznamenaná měřící ústřednou byla ve voltech [V]. Bylo tedy nutné stanovit přepočec mezi jednotkami volt a kilonewton. V našem případě byl přepočec pro prvních 10 těles  $300\text{kN} = 5\text{V}$  a pro zbylých 30 těles  $100\text{kN} = 5\text{V}$ .



Obr. 5.9: Umístění potenciometru na zkušební těleso

## 5.3 Zpracování experimentů

### 1. Referenční sada

První referenční sada obsahovala 10 zkušebních těles s lepidlem SikaFast – 5215 NT o tloušťce 1 mm, z toho 5 těles byly vzorky sklo - ocel a 5 těles sklo - hliník. U dalších 10 zkušebních těles bylo použito lepidlo Crestabond M7-05, opět v tloušťce vrstvy lepidla 1 mm, z toho 5 těles byly vzorky sklo - ocel a 5 těles sklo - hliník.

Prvních 10 těles bylo zkoušeno za teploty 22°C a vlhkosti 37 – 38%, druhá polovina referenční sady byla měřena za stejné teploty 22 °C, vlhkost však byla 41%.

U této referenční sady měla lepená plocha rozměry 50 x 50 mm. Naměřené a zpracované výsledné hodnoty první referenční sady jsou shrnuty v *tab. 5.1* a na *grafu 5.1* a *grafu 5.2*. Z dat je patrné, že průměrná hodnota smykového napětí lepidla Crestabond M7 – 05 dosahovala u vzorků se střední ocelovou částí 12,348 MPa, viz *tab. 5.1* a u vzorků lepených na hliníku byla hodnota smykového

napětí 11,267 MPa, viz *tab. 5.1*. V průměru byla hodnota smykového napětí přibližně 12,0 MPa pro veškeré vzorky lepené lepidlem Crestabond M7 – 05 a to za průměrného přetvoření 0,499 [-]. Zkušební tělesa s lepidlem Crestabond M7 – 05 dosahovala větších hodnot, než je tomu u lepidla SikaFast – 5215 NT, kde se průměrná hodnota smykového napětí pohybovala okolo 8,4 MPa, pro vzorky s ocelovou střední částí byla hodnota 7,756 MPa a pro vzorky s částí hliníkovou byla 8,989 MPa. Poměrné přetvoření bylo v průměru 2,7 [-].

Lepidlo Crestabond M7 – 05 je na základě srovnání několikanásobně tužší než lepidlo SikaFast – 5215 NT. Je to zřejmé i ze způsobu porušení zkoušených těles, kdy u lepidla Crestabond M7 – 05 se ve většině případů porušil substrát, způsobem porušení skla, viz *obr 5.10*.



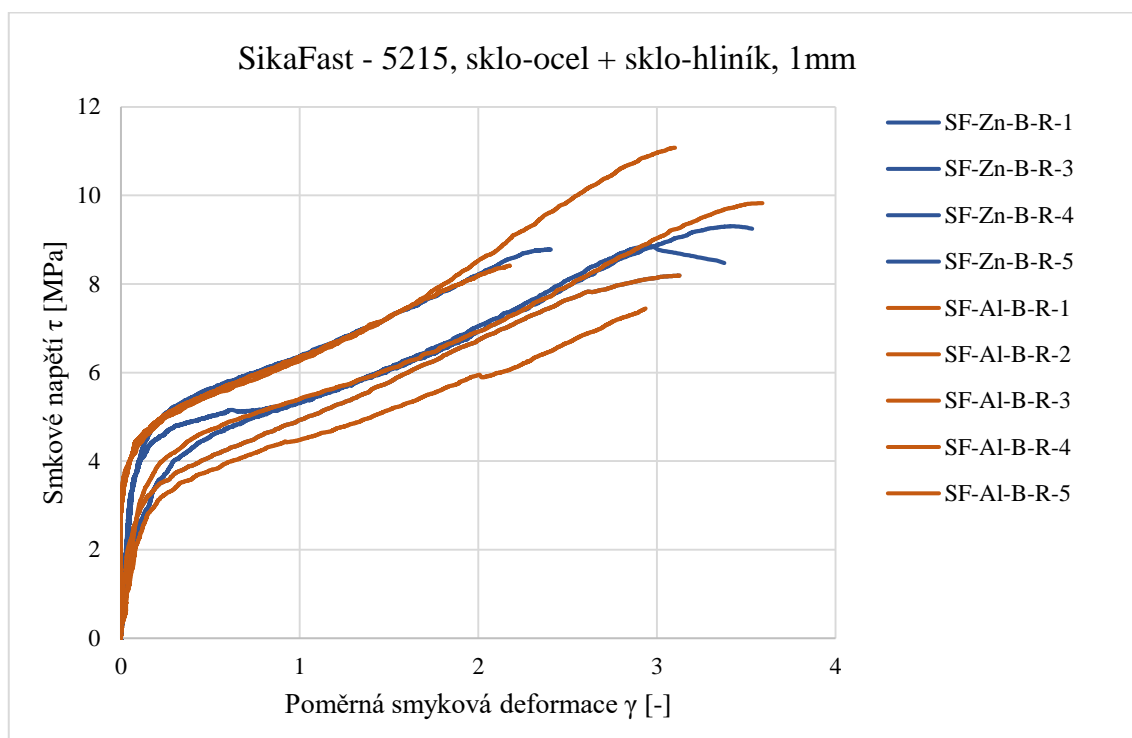
*Obr. 5.10: Porušení zkušebních těles, Crestabond M7-05, 1mm*

Maximální síly, které byly zaznamenány zkušební stanicí byly u zkoušených těles s lepidlem Crestabond M7 – 05 vyšší než hodnoty pro lepidlo SikaFast – 5215 NT, viz *tab. 5.1*. Lepidlo Crestabond M7 – 05 přenese vyšší zatížení než lepidlo SikaFast – 5215 NT.

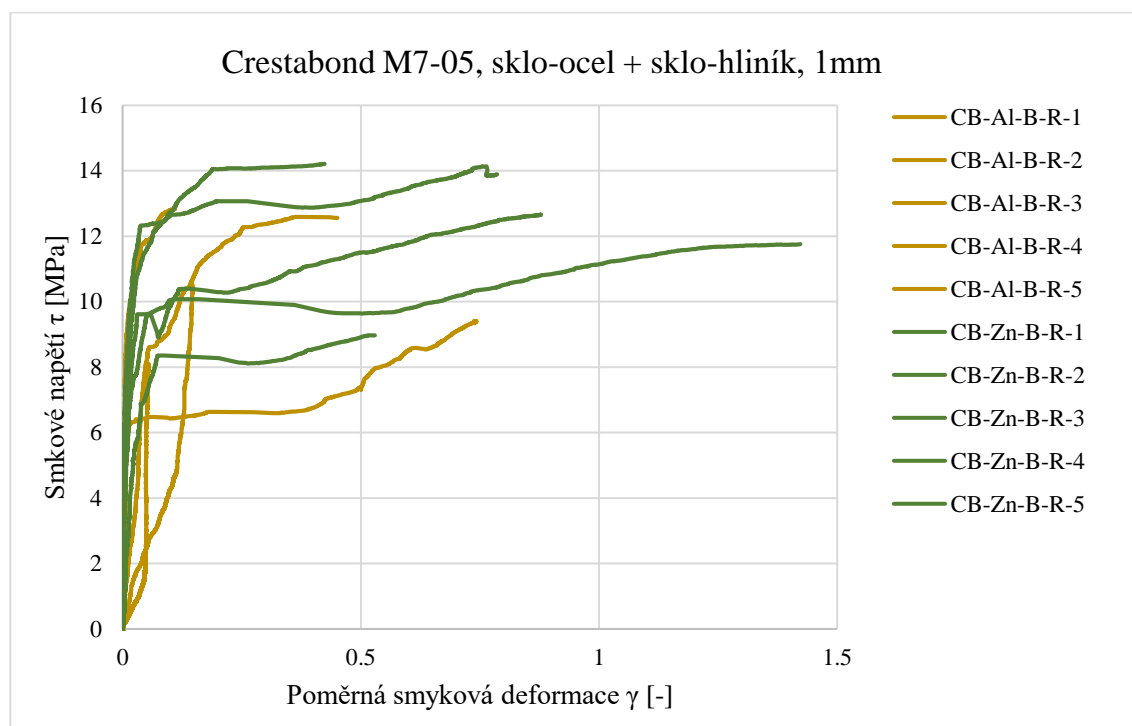


	MAX. SÍLA	MAX. HODNOTA SMYKOVÉHO NAPĚTÍ	MAX. PŘETVOŘENÍ 1	MAX. PŘETVOŘENÍ 2	PRŮMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ	ZPŮSOB PORUŠENÍ	
	[kN]	[MPa]	[-]	[-]	[-]		
SF-Zn-B-R-1	43.904	8.7808	2.4011	2.8699	2.6355	A-K-S	roztříštění skla
SF-Zn-B-R-2	29.264	5.8528	0.9996	3.4802	2.2399	A-S	porušení převážně skla
SF-Zn-B-R-3	29.848	5.9696	2.6181	0.5481	1.5831	A-S	roztříštění skla, kusy skla zůstaly na lepidle
SF-Zn-B-R-4	46.504	9.3008	3.4023	2.9429	3.1726	A-K-S	
SF-Zn-B-R-5	44.392	8.8784	2.9314	-	2.9314	A-S	roztříštění skla
<b>průměr</b>	<b>38.782</b>	<b>7.756</b>	<b>2.471</b>	<b>2.460</b>	<b>2.512</b>		
<b>směrodatná odchylka</b>	<b>8.482</b>	<b>1.696</b>	<b>0.904</b>	<b>1.304</b>	<b>0.625</b>		
SF-Al-B-R-1	37.224	7.4448	2.9363	1.9159	2.4261	A-K-S	ulomení části skla
SF-Al-B-R-2	42.072	8.4144	2.1754	3.3133	2.7444	A.K.S	drcení skla
SF-Al-B-R-3	40.944	8.1888	3.1261	2.0319	2.5790	A-K-S	drcení skla
SF-Al-B-R-4	49.128	9.8256	3.5786	3.1796	3.3791	A-K-S	
SF-Al-B-R-5	55.368	11.0736	3.0934	3.4496	3.2715	A-K-S	
<b>průměr</b>	<b>44.947</b>	<b>8.989</b>	<b>2.982</b>	<b>2.778</b>	<b>2.880</b>		
<b>směrodatná odchylka</b>	<b>7.246</b>	<b>1.449</b>	<b>0.510</b>	<b>0.741</b>	<b>0.424</b>		
CB-Al-B-R-1	52.536	10.5072	0.1474	0.0317	0.0895	S	porušení skla, lepidlo pouze mírné protažení
CB-Al-B-R-2	54.504	10.9008	-	0.3140	0.3140	S	porušení skla, lepidlo pouze mírné protažení
CB-Al-B-R-3	62.928	12.5856	0.3627	0.1847	0.2737	S	mírné porušení lepidla
CB-Al-B-R-4	47.592	9.5184	0.7821	1.4222	0.8112	S	mírné porušení lepidla
CB-Al-B-R-5	64.104	12.8208	0.1104	0.2308	0.1706	S	porušení skla, lepidlo pouze mírné protažení
<b>průměr</b>	<b>56.333</b>	<b>11.267</b>	<b>0.351</b>	<b>0.437</b>	<b>0.332</b>		
<b>směrodatná odchylka</b>	<b>7.037</b>	<b>1.407</b>	<b>0.308</b>	<b>0.560</b>	<b>0.282</b>		
CB-Zn-B-R-1	63.36	12.672	0.8963	1.6851	1.2907	S	drcení skla
CB-Zn-B-R-2	70.656	14.1312	0.7549	-	0.7549	K-S	porušení skla, část lepidla oddělena kohezně
CB-Zn-B-R-3	71.088	14.2176	0.4286	0.2153	0.3219	A-K-S	porušení skla, část lepidla oddělena kohezně
CB-Zn-B-R-4	58.776	11.7552	1.4222	0.2002	0.8112	A-K-S	porušení skla, část lepidla oddělena kohezně
CB-Zn-B-R-5	44.832	8.9664	0.5145	0.0816	0.2980	A-K-S	porušení skla, část lepidla oddělena kohezně
<b>průměr</b>	<b>61.742</b>	<b>12.348</b>	<b>0.803</b>	<b>0.546</b>	<b>0.695</b>		
<b>směrodatná odchylka</b>	<b>10.772</b>	<b>2.154</b>	<b>0.393</b>	<b>0.762</b>	<b>0.409</b>		

Tab. 5.1: Výsledné hodnoty pro 1. referenční sadu, Crestabond M7-05 + SikaFast – 5215 NT, tl. vrstvy lepidla 1 mm



Graf 5.1: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, SikaFast- 5215 NT, 1 mm

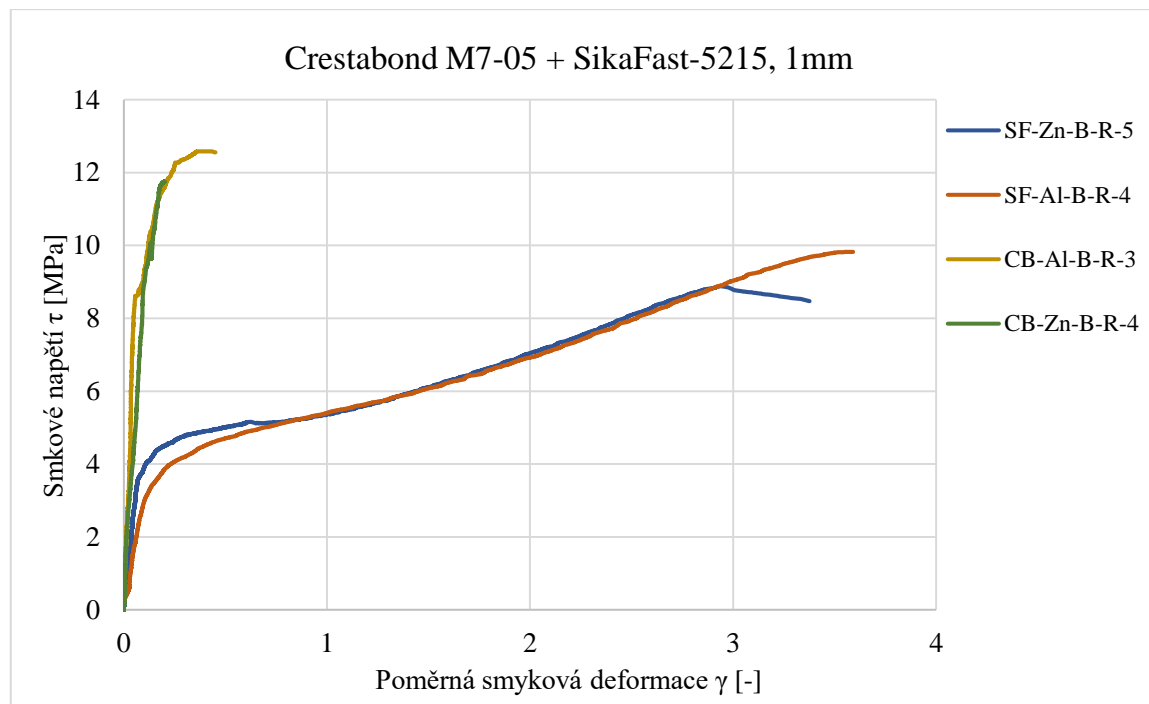


Graf 5.2: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7-05 + SikaFast- 5215 NT, 1 mm

Graf 5.1 zobrazuje závislost smykového napětí na poměrné deformaci pro lepidlo SikaFast- 5215 NT. Na druhém grafu 5.2 je opět znázorněna závislost smykového napětí na poměrné smykové deformaci pro tělesa lepená lepidlem Crestabond M7 – 05. Z porovnání je zřejmé, že lepené spoje sklo – hliník a sklo – ocel se chovají stejně.

Na grafu 5.3 je znázorněno porovnání poměrné smykové deformace v závislosti na smykovém napětí obou použitých lepidel (Crestabond M7 – 05 a SikaFast – 5215 NT) s tloušťkou vrstvy lepidla 1 mm. Za každé lepidlo byl vybrán jeden reprezentativní vzorek ze sady obsahující ve spoji ocel a jeden vzorek pro spoj s hliníkem. I zde je vidět, že lepidlo Crestabond M7 – 05 je lepidlem tužším, dosahuje větších hodnot smykového napětí a jeho přetvoření ve vrstvě není skoro patrné.

Lepidlo SikaFast – 5215 NT dosahuje poměrně velkých hodnot přetvoření za nižšího smykového napětí, jedná se tedy o lepidlo pružnější.



Graf 5.3: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7-05 + SikaFast- 5215 NT, 1 mm

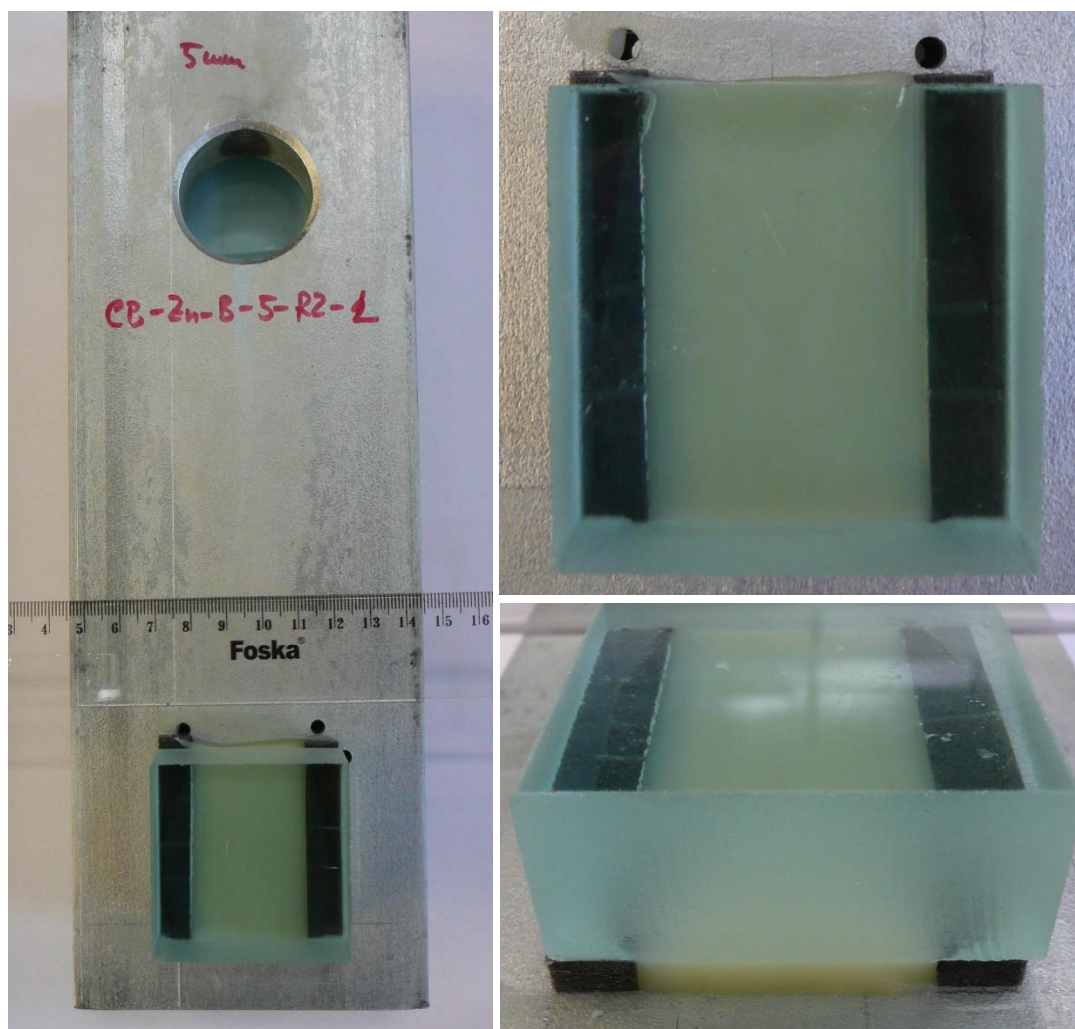


## 2. Referenční sada

Druhá referenční sada obsahovala 20 těles, všechna tělesa byla lepena stejným typem lepidla Crestabond M7 – 05. Deset vzorků z celkového počtu byly spoje sklo – hliník a 10 vzorků sklo – ocel. Ze sady sklo – hliník bylo 5 vzorků spojeno tloušťkou lepidla 3 mm a zbylých 5 vzorků bylo o tloušťce lepidla 5 mm. Sada se spojem sklo – ocel byla rozdělena také na 5 vzorků s 3 mm tloušťkou lepidla a 5 vzorků s tloušťkou lepidla 5 mm.

Zkoušky proběhly za teploty 22°C a vlhkosti 27 %.

Výsledné hodnoty jsou zobrazeny v *tab. 5.2*. Pro tělesa s tloušťkou lepidla 3 a 5 mm byla styková plocha zmenšena o dvojnásobek šířky pěnové pásky. Šířka pásky byla 9 mm. Zkoušená plocha tedy byla 50 x 32 mm, viz *obr. 5.11*.



Obr. 5.11: Pěnová distanční pásky, šířka 9 mm

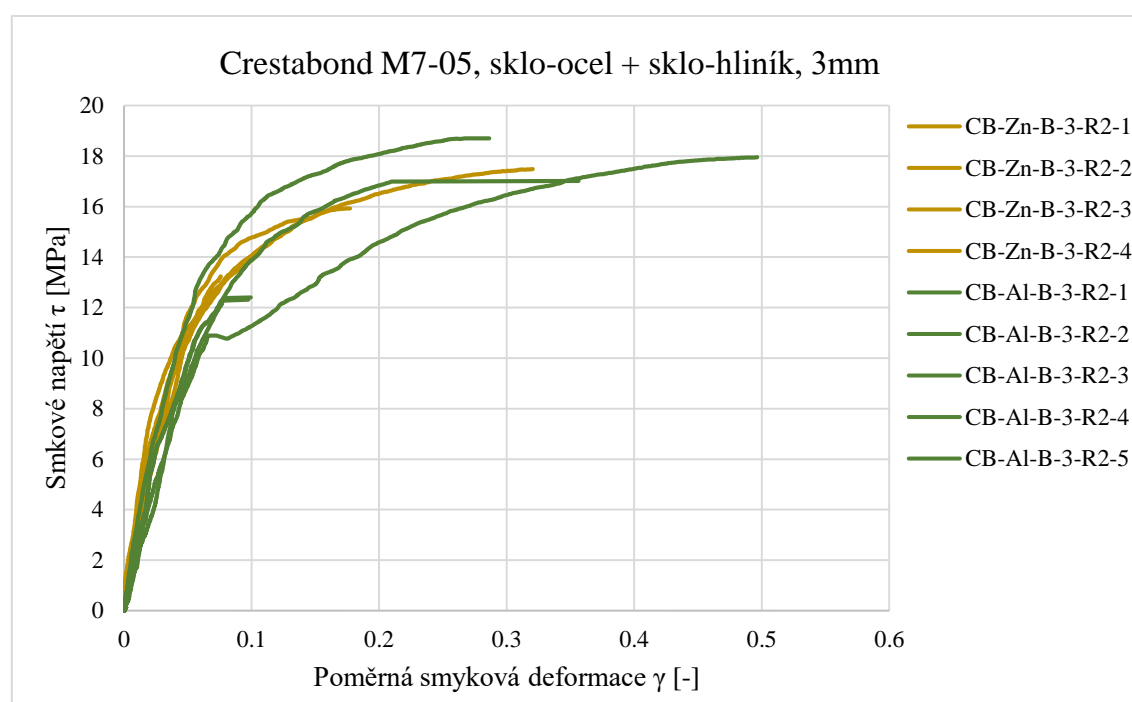
	MAX. SÍLA	MAX. HODNOTA SMYKOVÉHO NAPĚTÍ	MAX. PŘETVOŘENÍ 1	MAX. PŘETVOŘENÍ 2	PRŮMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ	ZPŮSOB PORUŠENÍ	
	[kN]	[MPa]	[-]	[-]	[-]		
CB-Zn-B-5-R2-1	43.296	13.530	0.240	0.056	0.148	A-K	od oceli
CB-Zn-B-5-R2-2	44.712	14.027	0.566	0.137	0.351	S	porušení skla
CB-Zn-B-5-R2-3	43.632	13.529	0.199	0.033	0.116	A-S	od oceli, porušení skla
CB-Zn-B-5-R2-4	52.992	16.432	0.864	0.211	0.537	A-S	od oceli, porušení skla
CB-Zn-B-5-R2-5	-	-	-	-	-	A-S	od oceli, porušení skla
<b>průměr</b>	<b>46.158</b>	<b>14.380</b>	<b>0.467</b>	<b>0.109</b>	<b>0.288</b>		
<b>směrodatná</b>	<b>4.596</b>	<b>1.388</b>	<b>0.311</b>	<b>0.081</b>	<b>0.196</b>		
<b>odchylka</b>							
CB-Al-B-5-R2-1	49.176	14.679	1.000	0.089	0.545	A-K-S	od oceli, porušení skla
CB-Al-B-5-R2-2	58.608	17.896	0.289	0.439	0.364	A-S	od oceli, porušení skla
CB-Al-B-5-R2-3	45.264	14.035	0.407	0.059	0.233	A-K-S	porušení skla
CB-Al-B-5-R2-4	41.544	12.932	-	0.023	0.023	A-K-S	od oceli, porušení skla
CB-Al-B-5-R2-5	53.832	16.564	0.194	0.340	0.267	K-S	porušení skla
<b>průměr</b>	<b>49.685</b>	<b>15.221</b>	<b>0.472</b>	<b>0.190</b>	<b>0.286</b>		
<b>směrodatná</b>	<b>5.775</b>	<b>1.765</b>	<b>0.363</b>	<b>0.187</b>	<b>0.140</b>		
<b>odchylka</b>							
CB-Zn-B-3-R2-1	52.968	15.930	0.273	0.081	0.177	A-S	od oceli + porušení skla
CB-Zn-B-3-R2-2	44.352	13.239	0.113	0.039	0.076	A-S	od oceli + porušení skla
CB-Zn-B-3-R2-3	57.264	17.485	0.325	0.316	0.320	A-S	od oceli + lehké porušení skla
CB-Zn-B-3-R2-4	52.080	15.546	0.174	0.115	0.145	A-S	od oceli + lehké porušení skla
CB-Zn-B-3-R2-5	-	-	-	-	-	A	od oceli
<b>průměr</b>	<b>51.666</b>	<b>15.550</b>	<b>0.221</b>	<b>0.138</b>	<b>0.180</b>		
<b>směrodatná</b>	<b>5.376</b>	<b>1.754</b>	<b>0.096</b>	<b>0.123</b>	<b>0.103</b>		
<b>odchylka</b>							
CB-Al-B-3-R2-1	63.600	18.706	0.217	0.356	0.286	S	porušení skla
CB-Al-B-3-R2-2	41.544	12.401	0.123	0.000	0.123	S	porušení skla
CB-Al-B-3-R2-3	41.544	12.309	0.120	0.074	0.097	S	porušení skla
CB-Al-B-3-R2-4	59.688	17.951	0.649	0.344	0.496	A-S	od skla + porušení skla
CB-Al-B-3-R2-5	55.296	17.014	0.263	0.449	0.356	S	porušení skla
<b>průměr</b>	<b>52.334</b>	<b>15.676</b>	<b>0.274</b>	<b>0.245</b>	<b>0.272</b>		
<b>směrodatná</b>	<b>10.279</b>	<b>3.091</b>	<b>0.218</b>	<b>0.196</b>	<b>0.166</b>		
<b>odchylka</b>							

Tab. 5.2: Výsledné hodnoty pro 2. referenční sadu, Crestabond M7-05, vrstvy lepidla 3 mm a 5 mm

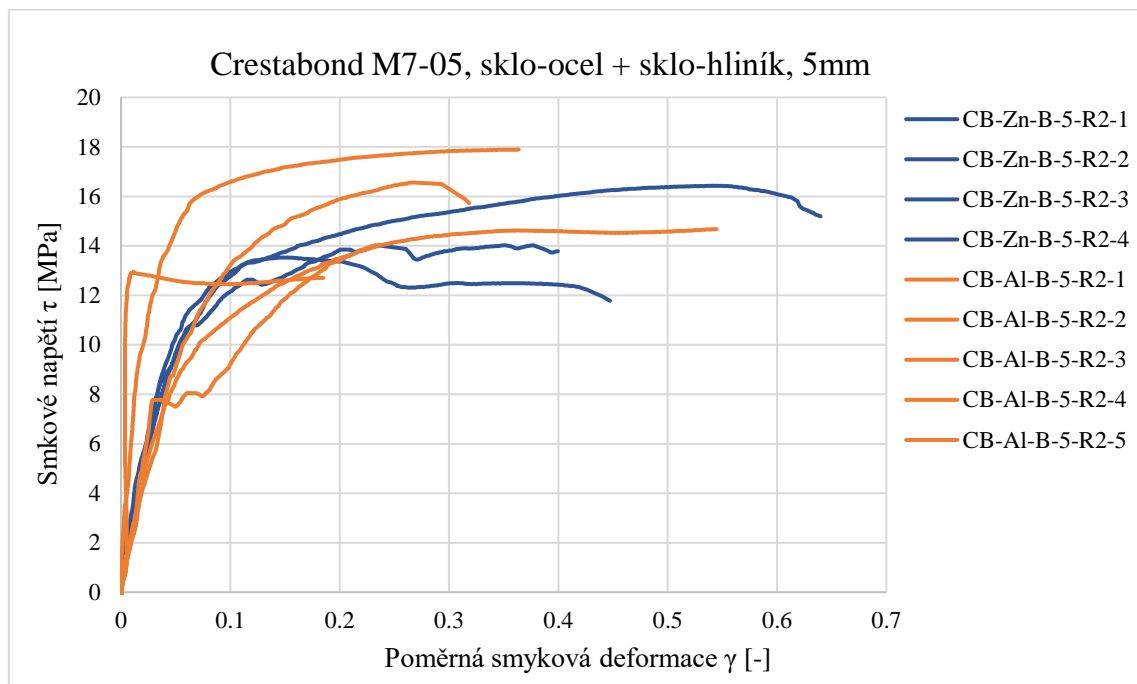
Průměrné maximální napětí, které přenesly tělesa lepená lepidlem Crestabond M7 – 05 o tloušťce 3 mm bylo pro spoj sklo – ocel 15,55 MPa, při poměrném přetvoření 0,18 [-] a pro spoj sklo – hliník 15,676 MPa, odpovídající přetvoření 0,272 [-]. Tyto hodnoty maximálního napětí jsou nepatrně větší než pro zkušební tělesa s tloušťkou lepidla 5 mm. Zde bylo průměrné maximální napětí u spoje sklo – ocel 14,38 MPa, při poměrném smykovém přetvoření 0,288 [-] a u spoje sklo – hliník 15,221 MPa, poměrná smyková 0,286 [-]. Poměrné smykové přetvoření dosahuje téměř stejných hodnot jak u těles s vrstvou lepidla 3 mm, tak u těles s vrstvou 5 mm.

Graf 5.4 obsahuje odzkoušená tělesa sklo – ocel a sklo – hliník s tloušťkou lepidla 3 mm. Křivky všech zkoušených těles zobrazují ze začátku téměř stejné průběhy smykového napětí závislé na zkosení vrstvy lepidla. Opět můžeme z grafu vyčíst, že na soudržnost neměl materiál střední části skoro žádný vliv.

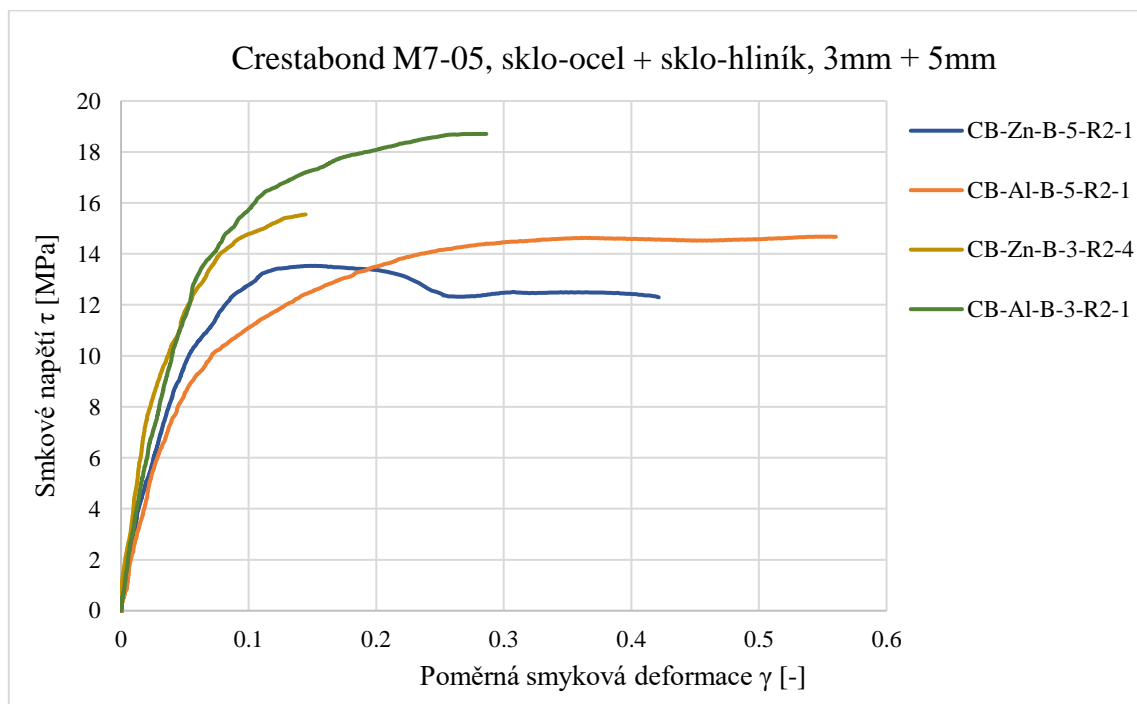
Graf 5.5 zobrazuje křivky smykového napětí a poměrného přetvoření pro všechna odzkoušená tělesa o vrstvě lepidla Crestabond M7 – 05, 5 mm.



Graf 5.4: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7-05, 3 mm



Graf 5.5: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7- 05, 5 mm

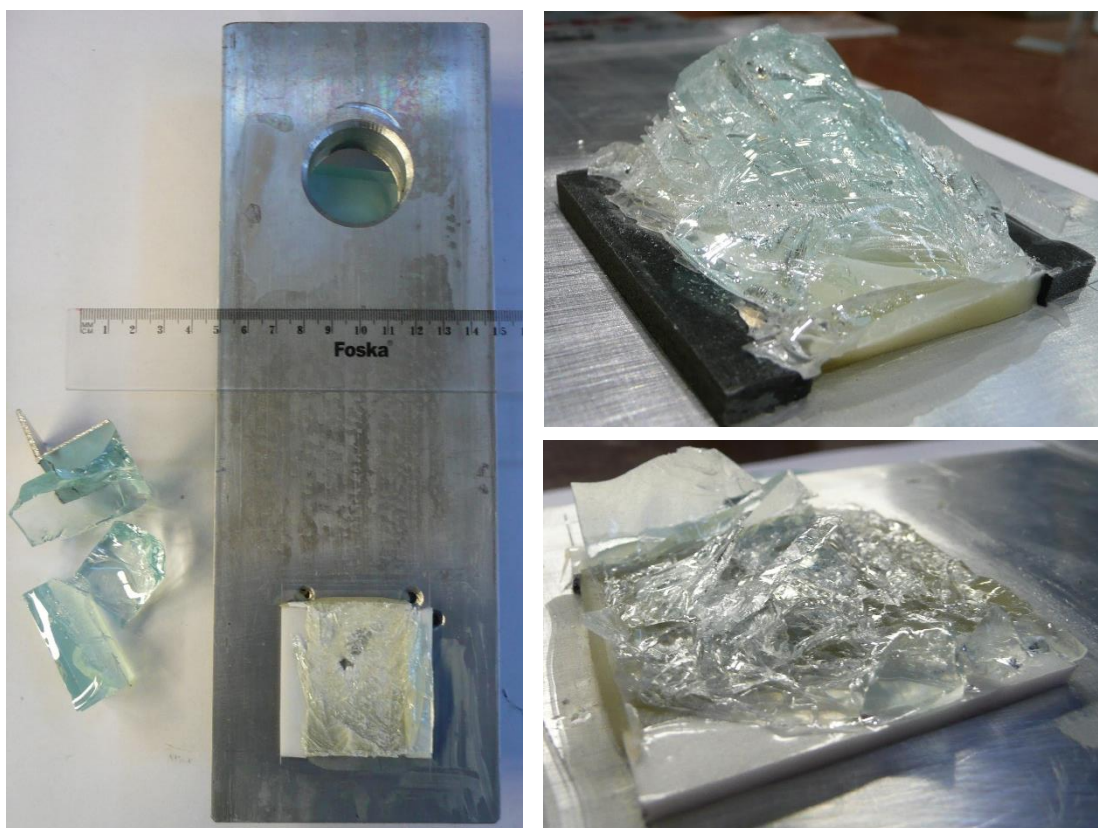


Graf 5.6: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7-05, 3 mm a 5 mm

Na souhrnném grafu 5.6 jsou znázorněny reprezentativní (průměrné) křivky vzorků, které byly z každé sady vybrány: sklo – ocel 3 mm, sklo – ocel 5 mm, sklo – hliník 3 mm,

sklo – hliník 5 mm. Křivky popisující lepidlo o tloušťce 3 mm nabývají v průměru o 0,8 MPa většího smykového napětí než lepené spoje 5 mm. Poměrné smykové deformace jsou u obou tloušťek lepidel téměř shodné.

U většiny zkušebních vzorků, při obou tloušťkách lepidla bylo zaznamenáno porušení substrátu, tedy skleněné části. Toto porušení lze vidět na *obr. 5.12*.



*Obr. 5.12: Porušení substrátu - skleněné části spoje*

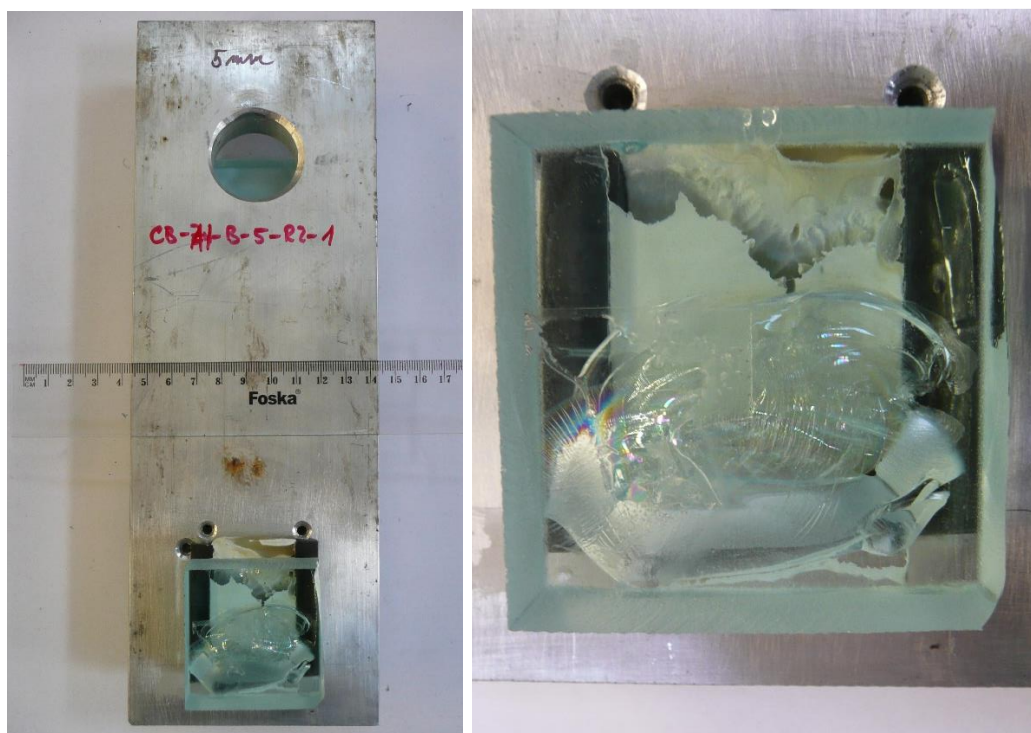
Méně typické adhezní porušení po celé stykové ploše nastalo u zkušebního tělesa CB-Zn-B-5-R2-3, tedy spoj sklo – ocel s tloušťkou lepidla 5 mm, viz *obr. 5.13*. Jedná se o adhezní porušení – malou přilnavost lepidla k ocelovému povrchu. Takového utržení ve spoji je nežádoucí a naznačuje možné nedodržení technologického postupu.





Obr. 5.13: Adhezní porušení spoje od oceli

Ojediněle se vyskytlo porušení spoje, které se vyznačuje počáteční ztrátou adheze na části rozhraní plochy skla a lepidla. Celkový kolaps nastal až po překročení vnitřní soudržnosti lepidla. Podle viditelného porušení skla, lze předpokládat, že i ve stejnou chvíli překročila skleněná část zkušebního vzorku tlakovou pevnost. Toto porušení lepeného spoje lze klasifikovat jako adhezně - kohezní s porušením substrátu.



Obr. 5.14: Adhezně – kohezní porušení + porušení substrátu

### 5.3.1 Souhrnné vyhodnocení experimentů

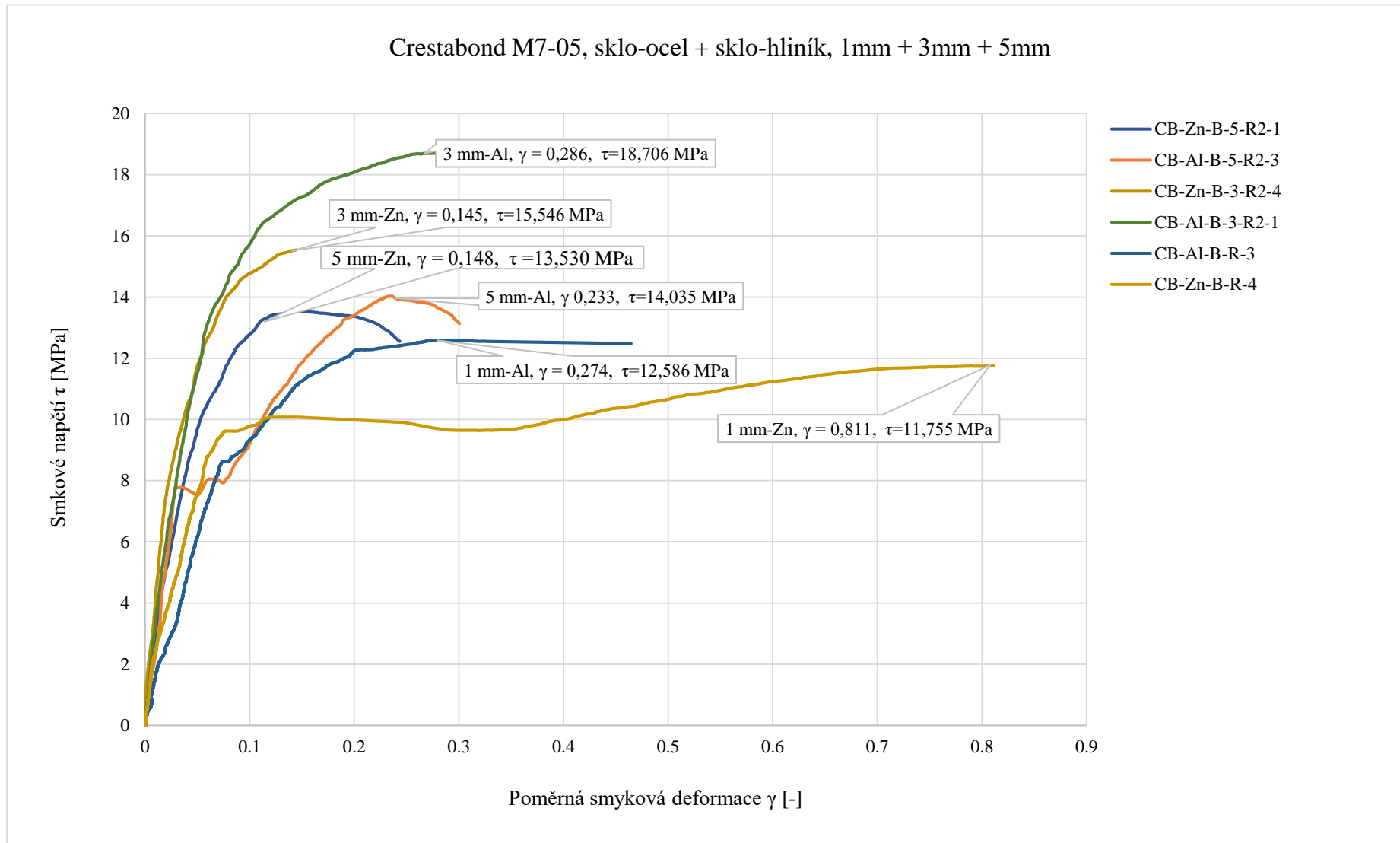
Experimentální část zahrnovala zkoušky dvou referenčních sad lepených spojů, celkem 40 kusů zkušebních těles z materiálu sklo, ocel a hliník. Použité byly dva typy lepidel, aplikované ve třech rozdílných tloušťkách. Vyhodnocení experimentů a následné porovnání jednotlivých těles přineslo několik zjištění, jež jsou dále shrnuty.

- Ze získaných dat obou odzkoušených referenčních sad byl sestaven *graf 5.7*. Na tomto grafu jsou znázorněny průběhy vybraných reprezentativních těles s vrstvou lepidla Crestabond M7 – 05, a to ve všech tloušťkách, tedy 1, 3 a 5 mm. Porovnání těchto tří typů zkušebních těles je znázorněno závislostí maximálního smykového napětí a poměrného smykového přetvoření. Pro porovnání byla vybrána referenční tělesa, která vykazovala hodnoty napětí a přetvoření blízké se hodnotám průměrným. *Tab. 5.3* znázorňuje vybraná tělesa.

ZKUŠEBNÍ TĚLESA	MAX. HODNOTA SMYKOVÉHO NAPĚTÍ [MPa]	PRŮMĚRNÉ PŘETVOŘENÍ [-]
1 mm		
CB-Al-B-R-3	12.586	0.274
CB-Zn-B-R-4	11.755	0.811
3 mm		
CB-Al-B-3-R2-1	18.706	0.286
CB-Zn-B-3-R2-4	15.546	0.145
5 mm		
CB-Al-B-5-R2-3	14.035	0.233
CB-Zn-B-5-R2-1	13.530	0.148

*Tab. 5.3: Hodnoty smykového napětí a průměrného přetvoření pro vybrané zkušební tělesa lepená lepidlem Crestabond M7 – 05*

Na souhrnném *grafu 5.6* i v *tab. 5.3* je patrné, že největší smykové napětí vzniklo u vzorků s tloušťkou lepidla 3 mm. Při této tloušťce byly zaznamenány také malé, poměrné přetvoření vrstvy. V technickém listu výrobce - *příloha A, B* je definován optimální interval 1 až 5 mm pro tloušťku lepené vrstvy. Experimentálně odzkoušené vzorky ,z velké části pokrývají tento interval a můžeme tedy říci, že pro rozhraní tlouštěk lepidla 1 – 5 mm dokáže Crestabond M7 – 05 přenést relativně vysoké napětí, které ve vrstvě vznikalo.



Graf 5.7: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7-05, 1 mm, 3 mm a 5 mm



- Porovnáním obou typů polyuretanových lepidel Crestabond M7 – 05 a SikaFast – 5215 NT ve stejné tloušťce lepené vrstvy 1 mm se prokázalo, že lepidlo Crestabond M7 – 05 je lepidlem mnohem tužším, než je lepidlo SikaFast – 5215 NT. Poukazují na to výsledná vyšší průměrná smyková napětí vzniklá ve vrstvě lepidla a zároveň nízké hodnoty poměrných smykových přetvoření. Vrstva lepidla nebyla schopná tak velkých deformací, proto u mnoha vzorků byl celkový kolaps způsoben roztrháním skla, tedy překročením jeho pevnosti. Z toho vyplývá, že lepidlo Crestabond M7 – 05 není vhodným spojovacím materiálem pro skleněné konstrukce.

Lepidlo SikaFast - 5215 NT je podle jeho chování ve spoji lepidlem polotuhým. U zkušebních těles s tímto lepidlem docházelo ke zřetelně vyšším hodnotám úhlu zkosení. Vrstva lepidla se snažila přenést více zatížení. Celkový kolaps spoje byl nejčastěji adhezně-kohezního typu, tedy docházelo více k porušení ve vrstvě lepidla. Toto chování je pro lepené spoje ze skla příznivějším než u lepidla Crestabond M7- 05.

- Střední část lepeného spoje byla tvořena dvěma kovovými materiály, broušeným hliníkem a pozinkovanou ocelí. Při jejich porovnání však nebyly pozorovány žádné větší rozdíly mezi těmito dvěma adherendy. Závěrem tedy je, že použití hliníkové či ocelové části ve spoji nemá žádný podstatný vliv na přilnavost lepidla k podkladu. Celková únosnost spoje se nijak nemění.

Experimenty dále prokázaly, že velký vliv na výsledné hodnoty má okolní prostředí, zejména teplota a vlhkost. Tyto veličiny tvořící okolní prostředí ovlivňují celkové chování vzorků. Je nutné dbát na jejich optimální hodnoty při přípravě vzorků, při jejich skladování i v době samotného zkoušení. Nemělo by se stát, že vzorky podstoupí velkou a náhlou změnu teploty, např. při skladování, dochází tak k degradaci materiálu. Dalším poznatkem je správný a pečlivý technologický postup lepení uvedený v návodech od výrobců lepidel. Při jeho nedodržení nemusí lepidla dosáhnout úplné adheze a materiál tak automaticky ztrácí únosnost.

## 6 NUMERICKÁ ANALÝZA LEPENÝCH SPOJŮ

Geometrie lepeného spoje byla vytvořena ve 3D konstrukčním softwaru Autodesk Inventor Professional 2020. Lepený spoj byl následně modelován ve výpočetním softwaru Ansys Workbench 2019 R3. Zde byly numerickému modelu nadefinovány materiálové vlastnosti jednotlivých částí spoje, určeny okrajové podmínky, vymodelována optimální síť konečných prvků a vneseno zatížení v podobě posunu.

### 6.1 Výpočetní program – Ansys Workbench 2019 R3

Ansys Workbench 2019 R3 umožňuje vytvoření nelineárních numerických modelů, které slouží pro analyzování dané problematiky z různých hledisek. Zaměřuje se např. na strukturální a termodynamickou analýzu. Využívá se také jako CFD program (Computational Fluid Dynamics), pro analýzu proudění kontinua.

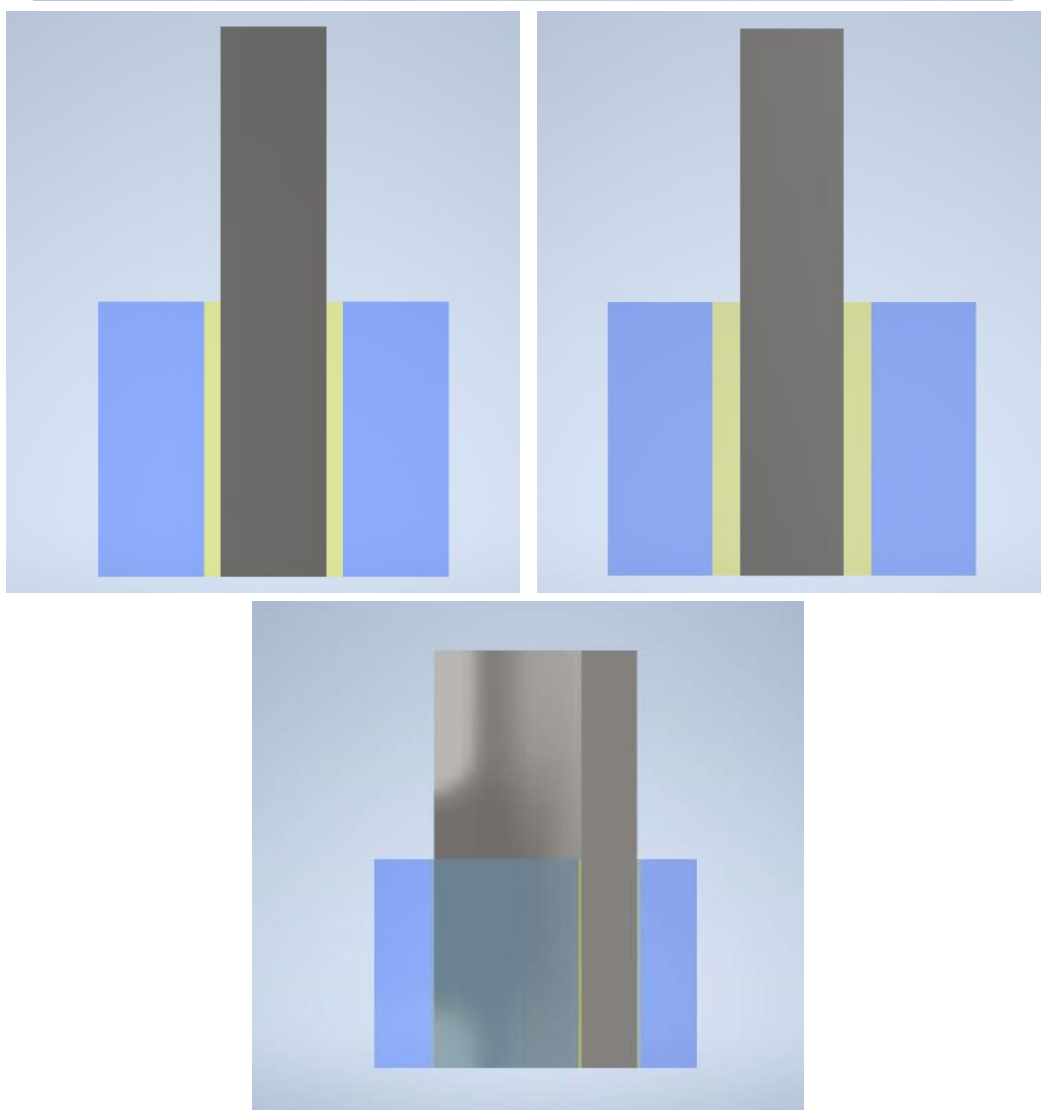
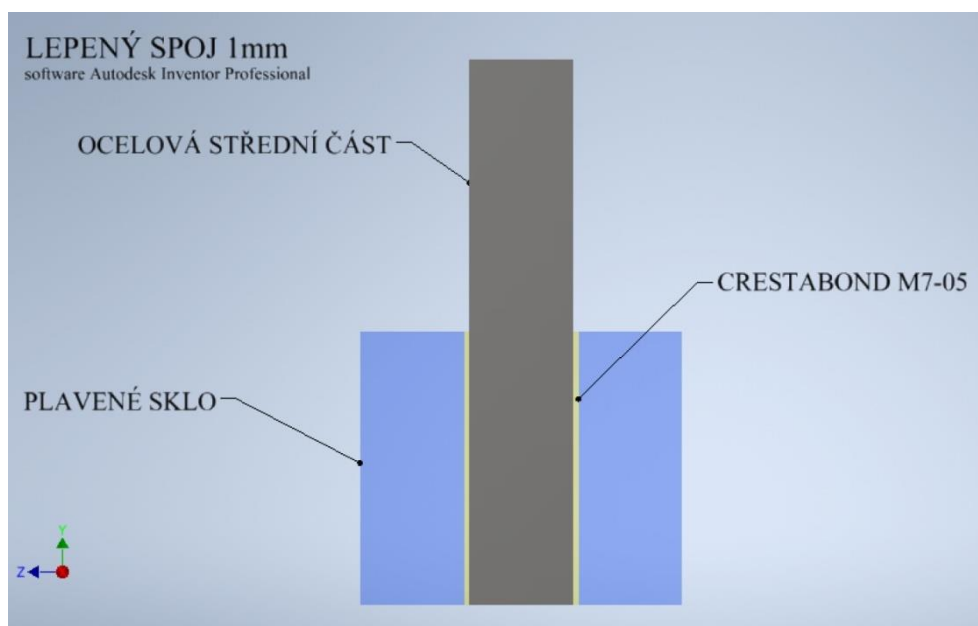
Software Ansys využívá metodu konečných prvků (Finite Element Method). Od svého počátku je velice přínosný pro obory: strojírenství, automobilová technika, energetika či stavební inženýrství.

Pro správný výpočet musí být přesně definovány vstupní hodnoty a okrajové podmínky, jelikož schopnost výpočtu závisí na převodu konkrétního reálného problému do matematického modelu. Pomocí aproximace zkoumané konstrukce dostáváme síť konečných prvků, jež idealizují a popisují daný model. Ansys využívá různých druhů konečných prvků, které se snaží co nejlépe vystihnout chování zkoumaných konstrukcí. [27]

### 6.2 Geometrie numerického modelu – Autodesk Inventor Professional

Pro výpočet pomocí numerického modelu byly vybrány vzorky s lepidlem Crestabond M7 – 05 o třech tloušťkách: 1, 3 a 5 mm, ve spoji sklo - ocel.

Vytvořeny byly tři numerické modely, jejichž geometrie se shodovala s rozměry zkušebních těles odzkoušených pomocí experimentální analýzy. Pro model s tloušťkou lepidla 1 mm byl rozměr destiček skla 50 x 50 x 19 mm, střední kovová část spoje byla o rozměrech 50 x 100 x 20 mm a spojovaný materiál 50 x 50 x 1 mm, viz *obr. 6.1*. Pro zbylé dva modely, kde tloušťka spojovaného materiálu byla 3 a 5 mm, byla geometrie upravena tak, aby styková plocha materiálů odpovídala vzorkům experimentálně odzkoušeným. U reálných zkušebních těles byla styková plocha zmenšena z důvodu použití distančních pěnových pásek, viz *obr. 5.11*. V numerickém modelu zkušebních těles s lepidlem tak měly skleněné destičky rozměry 32 x 50 x 19 mm a střední ocelová část 32 x 100 x 20 mm, viz *obr. 6.1*.



Obr. 6.1: Geometrické znázornění lepeného spoje 1, 3, 5 mm, modelováno v programu Autodesk Inventor Professional

### 6.3 Vstupní hodnoty a tvorba numerického modelu - Ansys Workbench 2019 R3

Materiálový model skla byl definován jako lineárně izotropní. Vstupními hodnotami pro definování tohoto materiálu byl Youngův modul pružnosti  $E = 70\,000$  MPa a Poissonovo číslo  $\nu = 0,23$  [-].

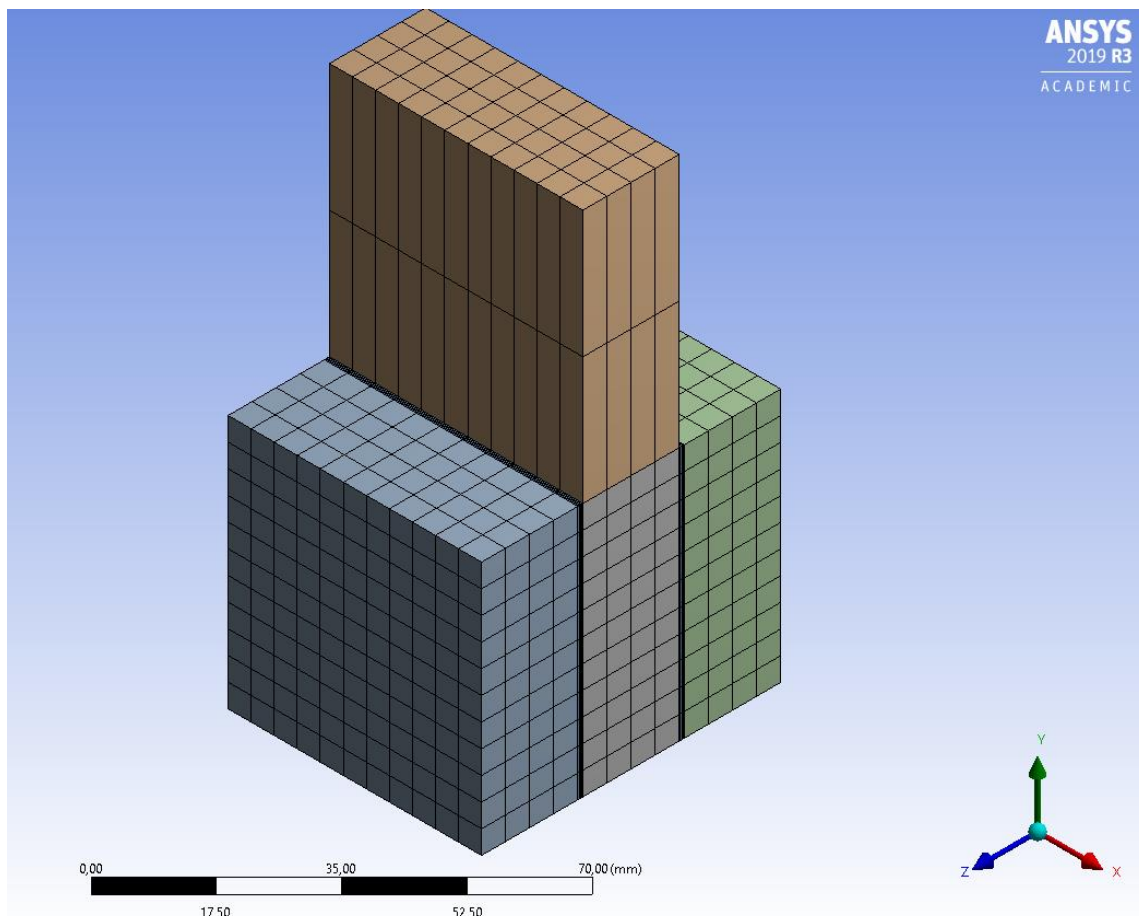
Pro střední část lepeného spoje byl zvolen materiál z konstrukční oceli, u kterého je předpokladem, že nedojde k překročení meze kluzu, (mez kluzu oceli byla uvažována hodnotu 250 MPa), modul pružnosti je  $E = 210\,000$  MPa, Poissonovo číslo oceli je  $\nu = 0,3$  [-].

Jako spojovací materiál bylo zvoleno polyuretanové lepidlo Crestabond M7 – 05. Popsáno bylo pomocí izotropně elastického materiálového modelu. Aby chování materiálu odpovídalo reálnému působení, byl Youngův modul pružnosti nastaven na hodnotu  $E = 18\,000$  MPa a Poissonovo číslo  $\nu = 0,4$  [-].

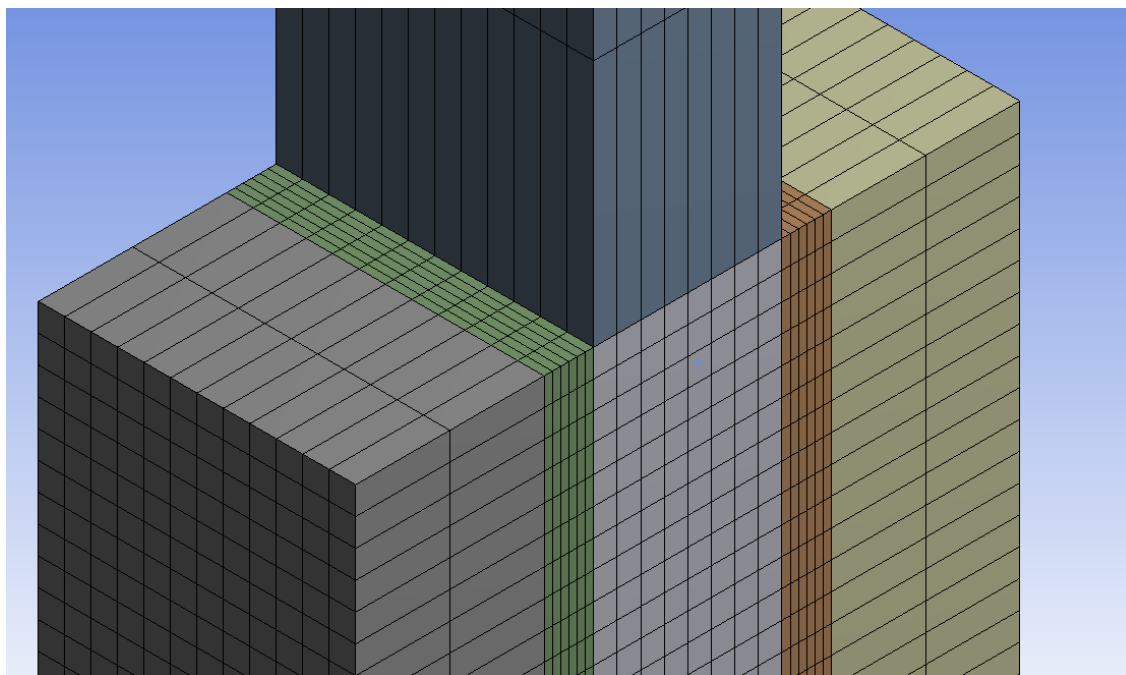
Pro tloušťku lepidla 3 mm byl na základě výsledných průběhů smykového napětí experimentální analýzy, zkonstruován druhý model definovaný, jako multilineárně izotropní materiálový model. Důvodem byl nedostačující lineární model, který nepokrýval celý průběh smykových napětí v závislosti na zkosení, pro tuto tloušťku vrstvy.

Teplota prostředí byla stanovena stejná, jako při provádění experimentů na 22°C.

U materiálového modelu lepeného spoje je důležité vhodné nastavení sítě konečných prvků, *obr. 6.2*. Střední ocelová část není modelována jako jeden ucelený kus, nýbrž jako dvě totožné části, z důvodu lepšího rozdělení dané sítě konečných prvků. Chování této střední části je ovšem stále stejné jako u jednoho celku, díky definovanému kontaktu. Jelikož zkoumanou částí ve spoji je vrstva lepidla, byla zde síť konečných prvků, u všech modelů, po tloušťce zhuštěna, viz *obr. 6.3*. Pro model s tloušťkou lepidla 1 mm byla vrstva lepidla po šířce rozdělena na 4 shodné části, pro 3 mm vrstvu na 5 shodných částí a u 5 mm vrstvy na 6 shodných částí sítě konečných prvků.

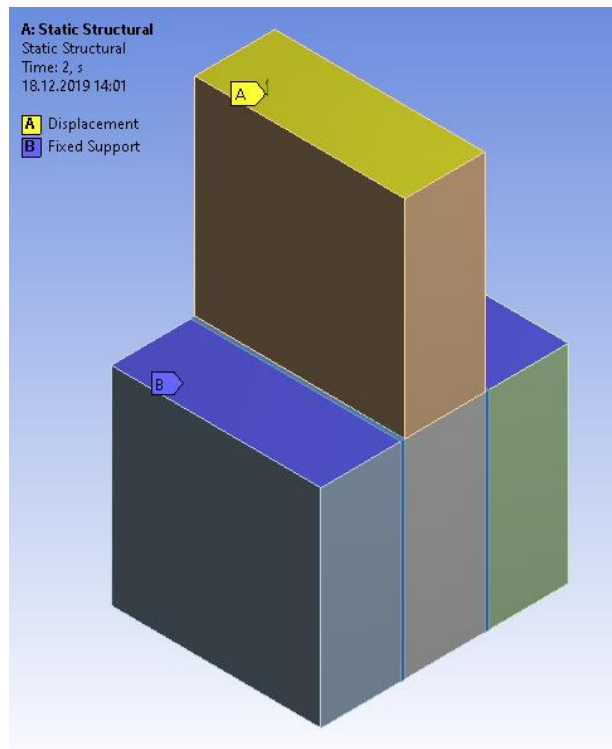


Obr. 6.2: Síť konečných prvků lepeného spoje



Obr. 6.3: Zhuštění sítě konečných prvků pro vrstvu lepidla

Dalším důležitým krokem je správné nastavení okrajových podmínek a vnesení zatížení. Na *obr. 6.4* jsou znázorněny okrajové podmínky (fixace) pro boční skleněné části, které nadále neměly možnost pohybu. Směr zatížení byl rovnoběžný s osou y (směrem nahoru), aby lepený spoj byl namáhán smykem.



*Obr. 6.4: Fixace a určení směru zatížení*

Zatěžování numerického modelu bylo pomocí řízeno posunem, tedy stejně jako u experimentálně zkoušených těles. Jelikož se jedná o spoje s vrstvou lepidla 1, 3 a 5 mm, zatěžovalo se posunem 1 mm /min, 3 mm /min a 5 mm /min.

## 6.4 Výsledky numerického modelu

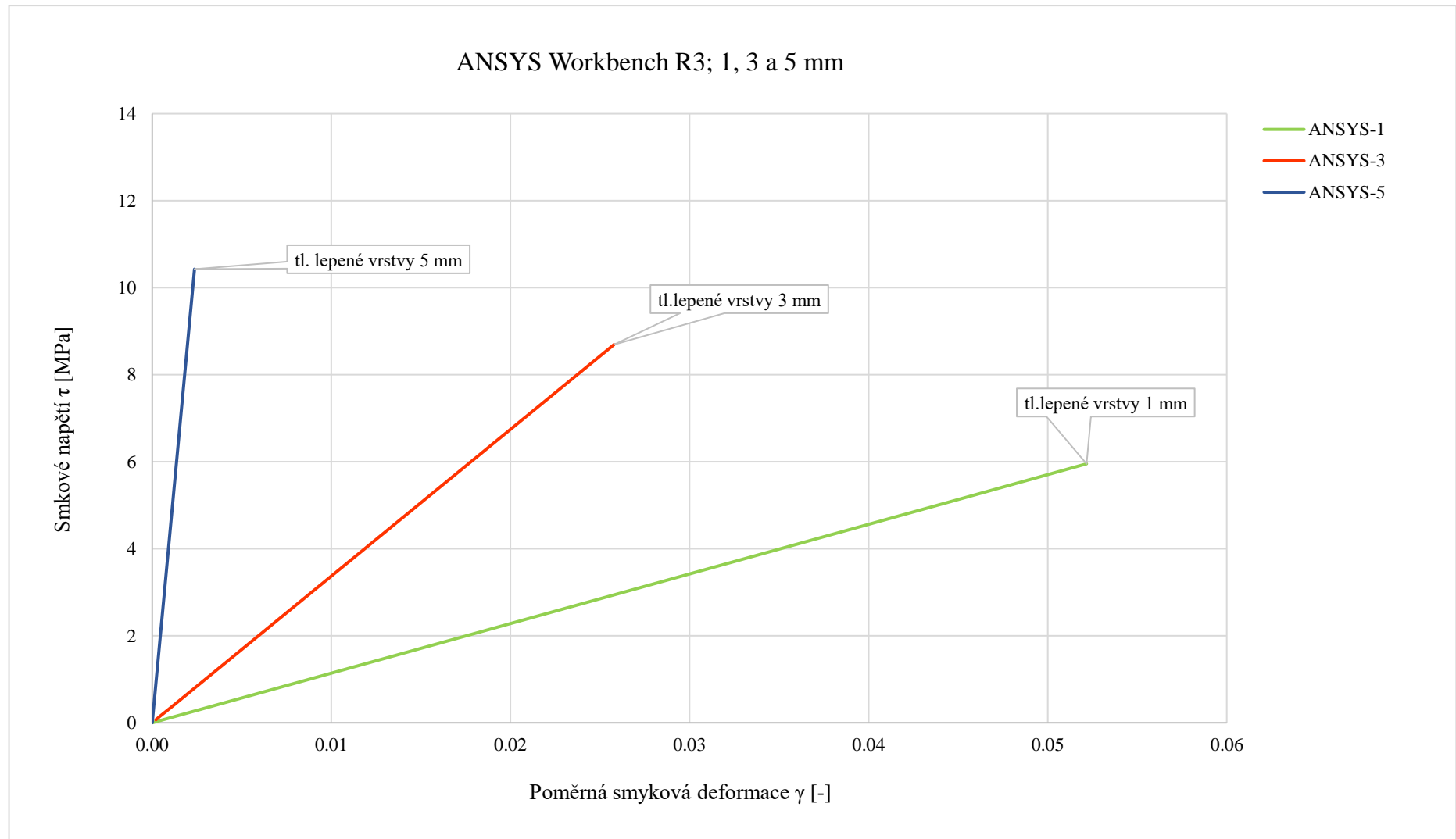
Pomocí numerických modelů bylo zjištěno působení lepených spojů v programu Ansys Workbench 2019 R3.

Stejně jako u experimentálních zkoušek, tak i zde byla zkoumaným materiálem mezivrstva tvořená polyuretanovým lepidlem Crestabond M7 - 05. Byl zjištěn průběh smykového napětí ve vrstvě lepidla a poměrná smyková deformace. Další hodnoty, které byly pro správnost modelu, kontrolovány, byly celkové deformace spoje, *obr. 6.5* a průběhy napětí ve spoji, viz *obr. 6.6*.

Průběhy elastické části pro všechny tři numerické modely jsou znázorněny na *grafu 6.1*. Křivka znázorňující chování vrstvy lepidla o tloušťce 1 mm dosahuje nejmenšího smykového napětí za největšího přetvoření, tedy poměrných smykových

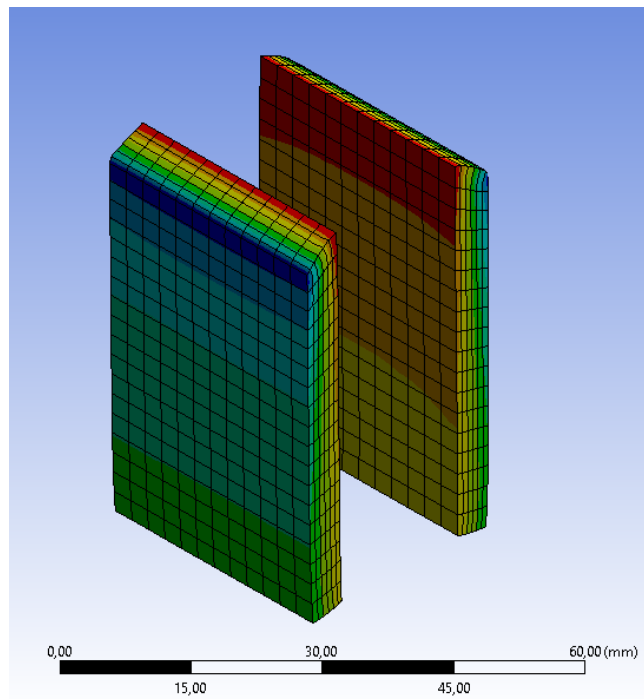
deformací. Sklon křivky se při stejné závislosti zvětšuje, a to s rostoucí tloušťkou vrstvy lepidla.

Dle výsledků numerické analýzy pomocí programu Ansys Workbench 2019 R3, dokáže lepidlo nanesené v tloušťce 5 mm přenést nejvyšší smykové napětí při nejmenším poměrném přetvoření, za předpokladu stejného modulu pružnosti, jako u modelů s tloušťkou vrstvy 1 a 3 mm. Vrstva lepidla 5 mm, Crestabond M7 – 05 je tedy nejtuzším ze všech tří modelových situací. Tyto výsledné hodnoty neodpovídají předpokladům a výsledným hodnotám získaným experimentálním výzkumem. Pro více odpovídající chování lepidla Crestabond M7 – 05 ve spoji, by musel být lépe dodefinován materiálový model.

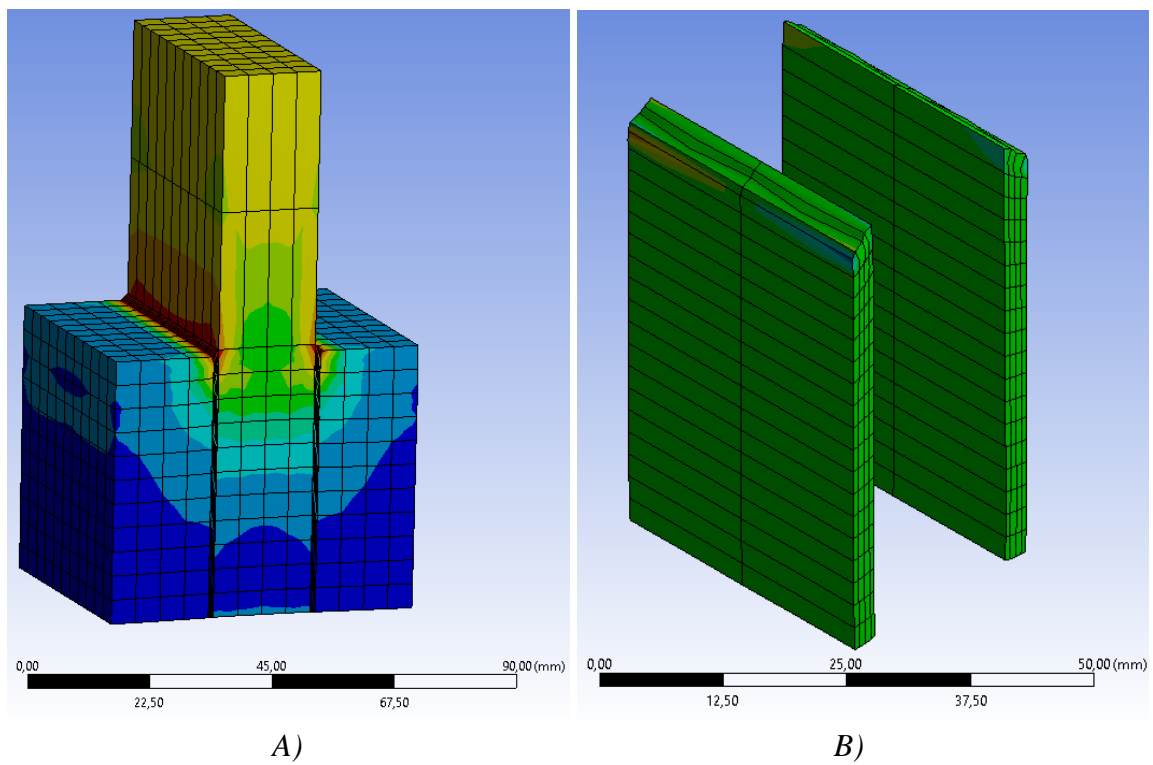


Graf 6.1: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci pro vrstvy lepidle tloušťky 1, 3 a 5 mm, Ansys Workbench 2019 R3





Obr. 6.5: Grafické znázornění deformací vrstvy lepidla



Obr. 6.6: Grafické znázornění :

A) průběhu napětí na lepeném spoji

B) průběhu napětí ve vrstvě lepidla

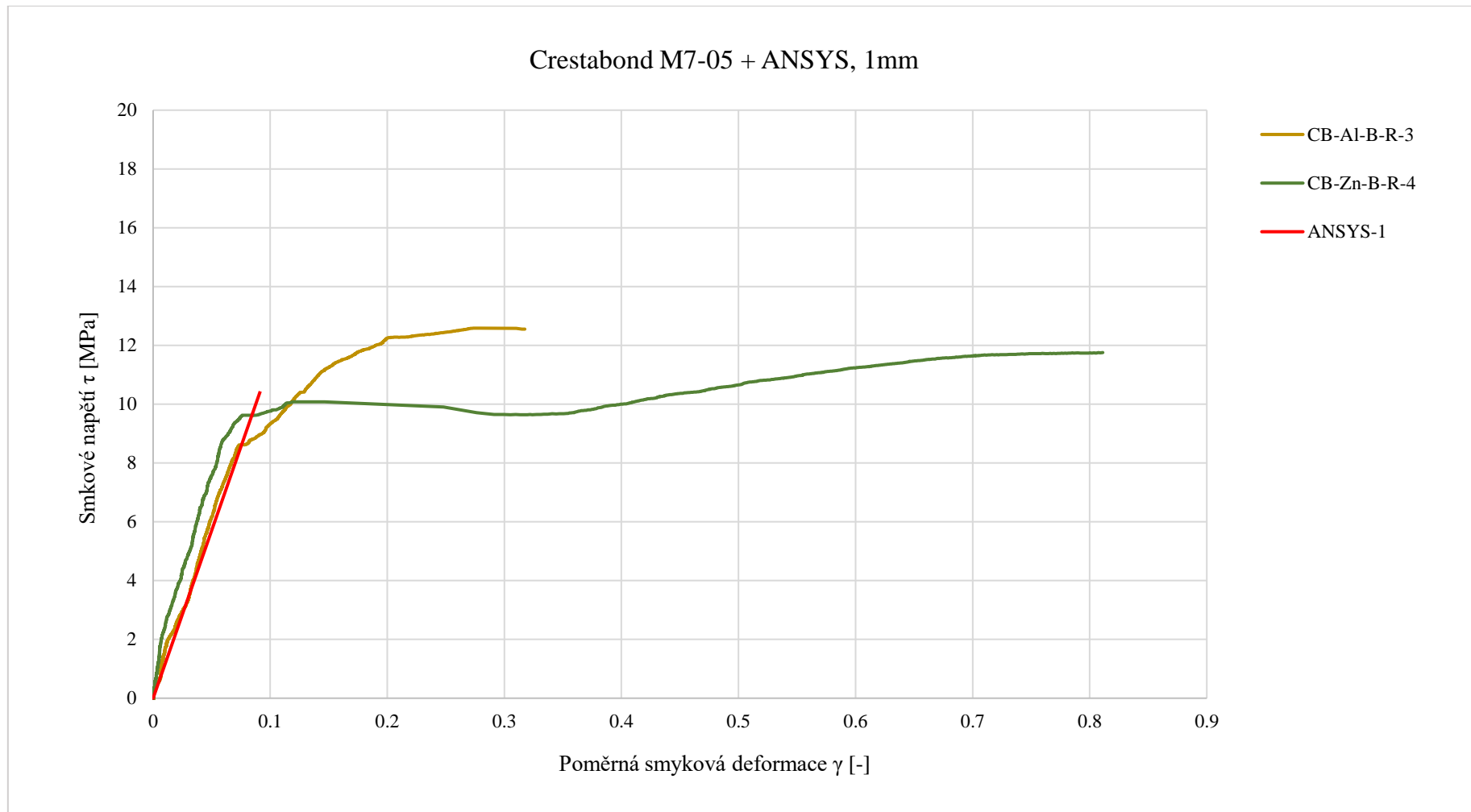
## 7 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY A NUMERICKÉHO MODELU

Výsledky experimentálně ověřeného lepeného spoje a numerické modely vytvořené v softwaru Ansys Workbench 2019 R3 byly následně porovnány.

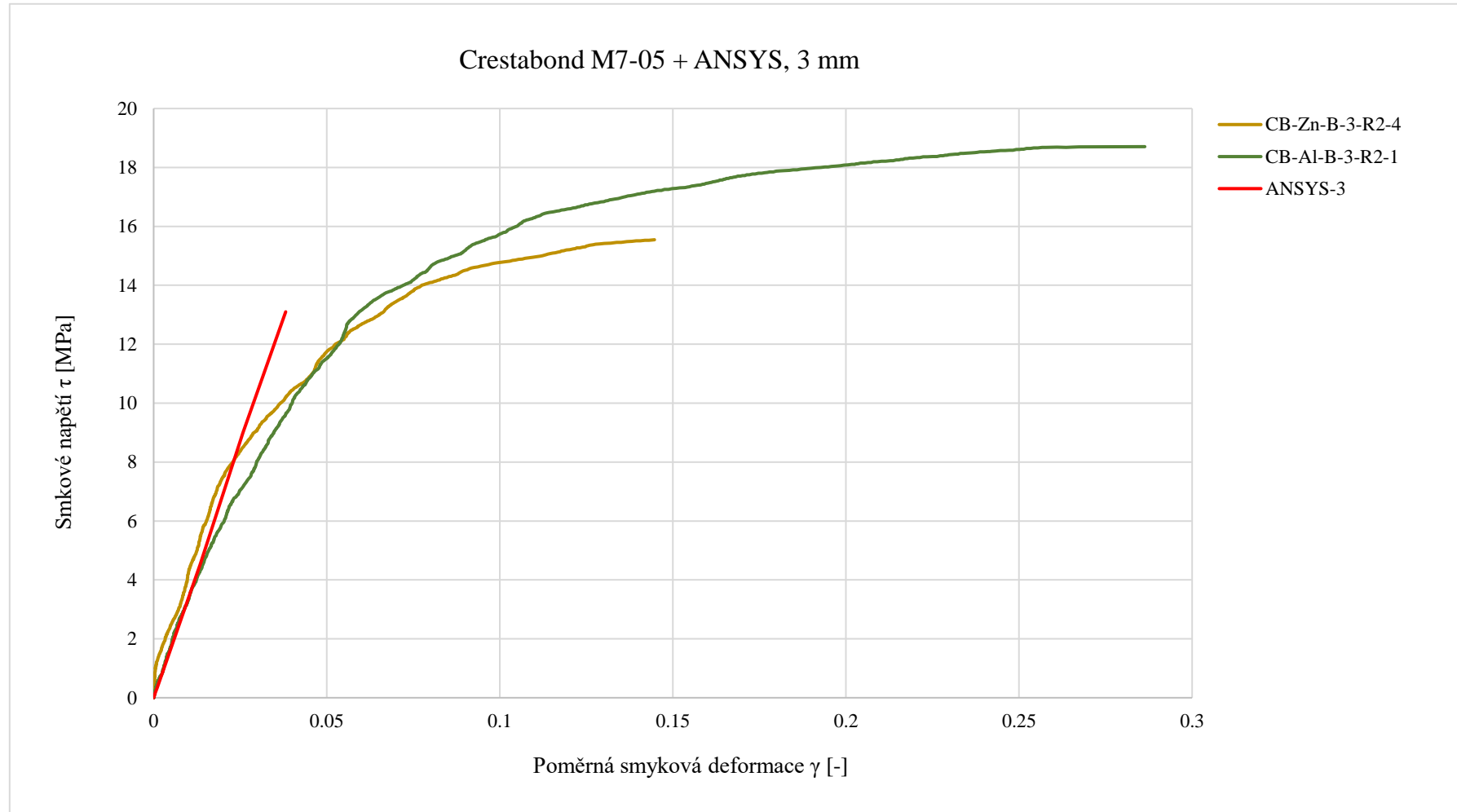
Porovnání chování lepeného spoje sklo – ocel s tloušťkou lepidla 1, 3 a 5 mm je provedeno v *grafu 7.1, 7.2, 7.3, 7.4*, kde jsou znázorněny závislosti smykového napětí na poměrné smykové deformaci z experimentů a z numerických modelů. Pro porovnání byly vybrány vždy dvě reprezentativní tělesa, která byla experimentálně odzkoušená. Počáteční sklon průběhů znázorňující jak výsledné hodnoty numerického modelu, tak hodnoty získané experimentální analýzou se pro tloušťky vrstev lepidla 1 mm a 3 mm téměř shodují, viz. *graf 7.1 a 7.2*. U druhého numerického modelu s tloušťkou lepidla 3 mm můžeme porovnat celkový průběh, tedy elastickou i plastickou část *grafu 7.3*, který je zobrazením smykového napětí závislého na poměrné smykové deformaci. Tento průběh, získaný pomocí výpočetního programu Ansys Workbench 2019 R3, se dá prohlásit za shodný s křivkami sestavenými z hodnot pro dvě referenčních tělesa, která byla podrobena experimentálním zkouškám.

U porovnání průběhů smykových deformací a přetvoření vrstvy lepidla o tloušťce 5 mm, které je znázorněno na *grafu 7.4*, se křivky experimentálně zkoušených těles neshodují s výsledným numerickým modelem. Pro správnou kalibraci numerického modelu by bylo vhodné provést kontrolní sadu experimentů a zpřesnit zadávané materiálové vlastnosti lepidla.

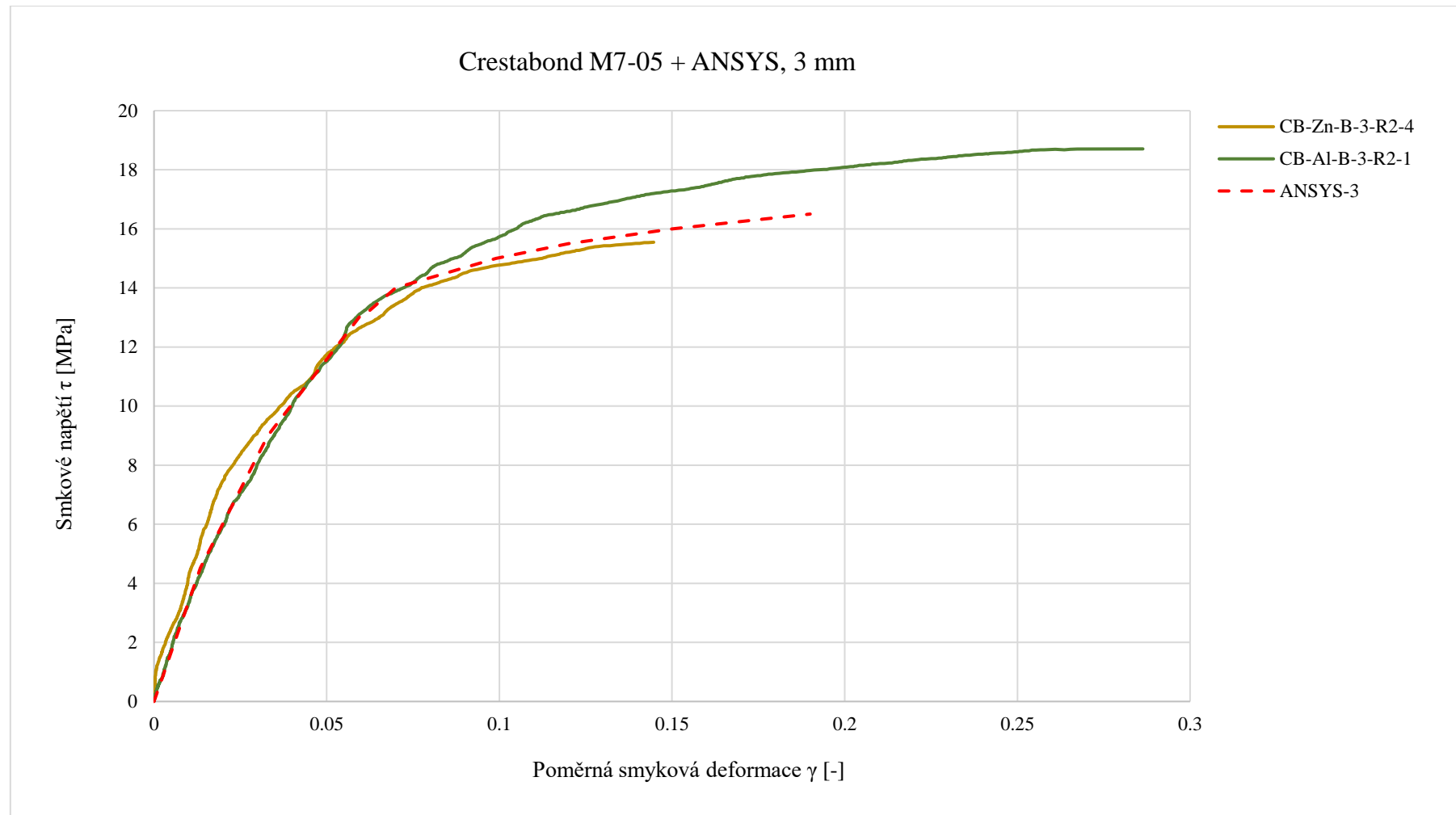
Na těchto porovnání je zřejmé, že správná definice materiálového modelu a správné vstupní hodnoty materiálů jsou pro celkové chování modelu spoje velice důležité. Dále na základě experimentálního výzkumu a numerické analýzy lze prohlásit, že univerzální model, který by zastupoval veškeré zkoušené tloušťky lepidel je obtížné až nemožné sestavit.



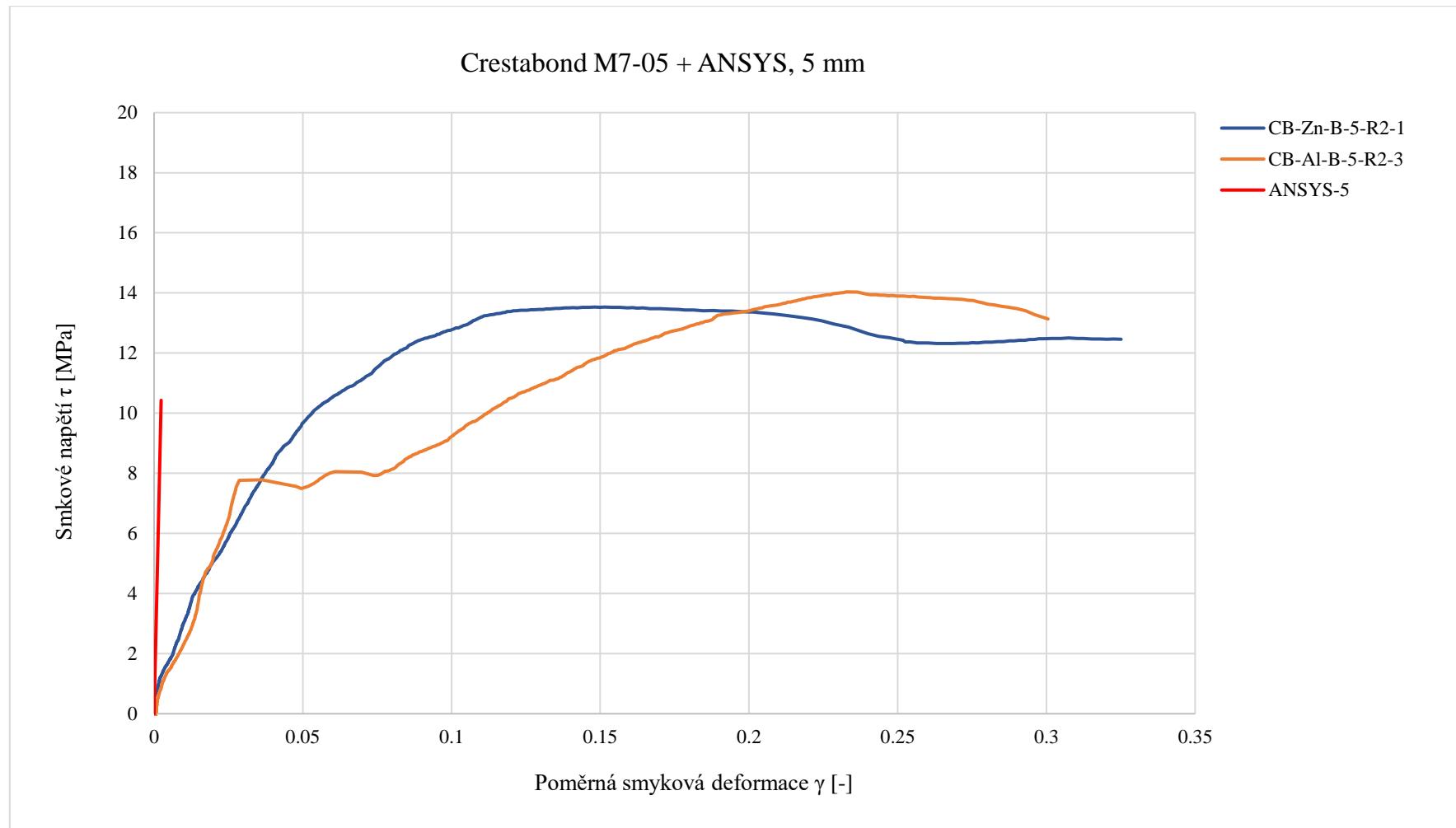
Graf 7.1: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci - Izotropně-elastický model, Crestabond M7-05, software Ansys Workbench 2019 R3, 1 mm



Graf 7.2: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci - Izotropně-elastický model, Crestabond M7-05, software Ansys Workbench 2019 R3, 3 mm



Graf 7.3: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci- multilineární izotropní model, Crestabond M7-05, software Ansys Workbench 2019 R3, 3 mm



Graf 7.4: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci - Izotropně-elastický model, Crestabond M7-05, software Ansys Workbench 2019 R3, 5 mm

## 8 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo ověřit chování lepeného spoje sklo – ocel a sklo – hliník namáhaného smykem pomocí experimentů. Byly připraveny a odzkoušeny zkušební tělesa s lepeným spojem, u kterých se použilo polyuretanové lepidlo Crestabond M7 – 05 o tloušťkách 1, 3 a 5 mm a akrylátové lepidlo SikaFast - 5215 NT o tloušťce 1 mm. Celkem bylo vyzkoušeno 40 těles ve dvou referenčních sadách. Výsledné hodnoty experimentální analýzy byly následně použity pro ověření numerického modelu lepeného spoje, který byl vytvořen pomocí konstrukčního programu Inventor Professional 2020 a dále nadefinován a vypočten v softwaru Ansys Workbench 2019 R3.

Experimentální výzkum prokázal, že na chování lepených spojů nemá zásadní vliv, zda je střední část spoje z broušeného hliníku či z pozinkované oceli, adheze lepidla k podkladu byla stejná u všech tloušťek lepidla experimentálně odzkoušených. Typické porušení, které ve spoji vznikalo a čímž docházelo k celkovému kolapsu bylo porušení substrátu, dále se vyskytovalo porušení adhezně – kohezní či adhezní.

Z porovnání lepidel SikaFast - 5215 NT a Crestabond M7 – 05 o tloušťce lepidla 1 mm vyplývá, že lepidlo Crestabond M7 – 05 je několikanásobně tužší než SikaFast - 5215 NT. Dokáže přenést větší zatížení působící na spoj. Ovšem celkový kolaps lepeného spoje se projevuje roztrháním skleněné části, což naznačuje, že byla překročena pevnost skla. Na základě toho lze říci, že lepidlo Crestabond M7 – 05 není vhodné pro lepené spoje sklo – ocel, sklo - hliník.

Z porovnání experimentálních zkoušek lepených spojů s lepidlem Crestabond M7 – 05 pro tloušťky lepidel 1, 3 a 5 mm bylo zjištěno, že nejvhodnější tloušťkou lepidla je vrstva 3 mm. Při této tloušťce bylo lepidlo, tedy lepený spoj, schopen přenést největší smykové napětí a zároveň vznikaly relativně malé poměrné deformace vrstvy lepidla. Pro ověření těchto výsledků by však bylo vhodné provedení dalších kontrolních zkoušek.

Experimentální část sloužila také pro zjištění charakteristik dvousložkového lepidla Crestabond M7 – 05, jež byly následně použity pro sestavení numerického modelu. Výsledné hodnoty zjištěné numerickým modelem pro tloušťku lepené vrstvy 5 mm však neodpovídají hodnotám experimentálně odzkoušeným. Vytvořený materiálový model pro lepený spoj s lepidlem Crestabond M7 – 05 by bylo vhodné vylepšit. Při definování více materiálových vlastností lepidla by se dalo dosáhnout úplné shody s jeho reálným chováním. Pro toto chování by bylo ovšem potřeba dostatek podkladů od výrobců lepidel, či více zkoušek, při kterých by se vstupní hodnoty získaly.

## 9 LITERATURA

- [1] MACHALICKÁ, Klára. *Lepené spoje v nosných konstrukci z skla namáhané smykem*. Praha, 2015. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.
- [2] KUBÍKOVÁ, Eliška. *Návrh skleněných tabulí z vrstveného skla: experimentální a numerická analýza*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Martina Eliášová, CSc.
- [3] ELIÁŠOVÁ, Martina. *Sklo: Materiál pro nosné konstrukce*. b.r.
- [4] HALDIMANN, Matthias, Andreas LUIBLE a Mauro OVEREND. *Structural Use of Glass*. 10. ETH Zürich, Switzerland: IABSE, 2008. ISBN 978-3-85748-119-2.
- [5] *Krystalické látky: Projekt FRVŠ č.814/2006* [online]. Ústav geologických věd, Přírodovědecká fakulta Masarykova univerzita, Brno, 2006 [cit. 2019-10-13]. Dostupné z: <http://mineralogie.sci.muni.cz/>
- [6] HOŘKÝ, Marek. *Statická analýza stavebních prvků ze skla*. Brno, 2013. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Kytýr, CSc.
- [7] VOJTA, Aleš. *Lepené spoje v konstrukci z skla*. Praha, 2013. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Martina Eliášová, CSc.
- [8] Glasgow Medical School. *Hansen Facades* [online]. Glasgow: HansenFacades Company, 2018 [cit. 2019-10-23]. Dostupné z: <http://www.hansenfacades.com/web/glasgow-medical.php>
- [9] Spider Facade. *APG co.* [online]. Saudi Arabia: Arabian Processing Glass Co., 2009 [cit. 2019-10-24]. Dostupné z: <https://arabian-glass.com>
- [10] ELIÁŠOVÁ, Martina, ed. *Spoje nosných konstrukcí ze skla. Steel* [online]. Praha: Department of Steel and Timber Structures of Czech Technical University in Prague, 2017 [cit. 2019-10-24]. Dostupné z: [http://steel.fsv.cvut.cz/infaso/09\\_Eliasova.pdf](http://steel.fsv.cvut.cz/infaso/09_Eliasova.pdf)
- [11] VESELÝ, Jakub. *Vliv stavu povrchu na únavovou a statickou pevnost lepeného spoje*. Plzeň, 2013. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Petr Beneš, Ph.D.
- [12] ZELINKA, Jindřich. *Rozdělení lepidel používaných v automobilovém průmyslu*. Liberec, 2008. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Pavel Doubek, Ph.D.
- [13] BURCHARDT, Bernd a Kurt DIGGELMANN, A.g. BLUNDEN. *Elastic Bonding: The basic principles of adhesive technology and a guide to its cost effective use in industry*. 2. Munich, Germany: abavo GmbH, 2006. ISBN 3-937889-35-3.



- [14] Nauka o materiálech: Lepidla. *Nauka o materiálech* [online]. Havířov, 2011, 2011(1), 8 [cit. 2019-11-03]. Dostupné z: <http://evawolna.sweb.cz/prvak-mat8.php>
- [15] TRHOŇ, Vojtěch. *Analýza lepidel ve všeobecném strojírenství*. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.
- [16] HUBÁČEK, Ondřej. *Lepení LLDPE*. Zlín, 2012. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Ing. Martin Bednařík.
- [17] ZELA, Vladimír. *Úprava reologie lepidla určeného pro lepení materiálů na bázi dřeva s cílem omezení sedimentace plniv*. Brno, 2006. Diplomová práce. Univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Daniela Tesařová.
- [18] STUHLÍK, Petr. *Polymery jako konstrukční materiály*. Zlín, 2011. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc, Ing. Miroslav Maňas, CSc.
- [19] ZUBÍK, Michal. *Výzkum použití polymerního recyklátu*. Zlín, 2015. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. David Maňas, Ph.D.
- [20] BÍLÍK, Jan. *Využití plastů v automobilovém průmyslu*. Brno, 2013. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Votava, Ph.D.
- [21] VACLACH, Jan. *Lepení kovů*. Zlín, 2013. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc. Ing. David Maňas, Ph.D.
- [22] KONVIČNÁ, Iveta. Lepené spoje. *Investice do rozvoje vzdělávání*. 2014, 2014 (1), 1-5. ISSN 1802-4785.
- [23] FOLTA, Jiří. *Hodnocení pevnosti lepených spojů v konstrukci autobusů*. Pardubice, 2008. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera.
- [24] RŮŽIČKA, Vojtěch. *Hodnocení nových úprav povrchů plechů používaných pro výrobu dílů karosérie*. Liberec, 2014. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [25] AMMAR, . Theories of Adhesion. *Pains and Adhesives*. 2006, 2006(1), 1-5.
- [26] PRAVDOVÁ, Iva. *Ztráta příčné a torzní stability hybridních nosníků z oceli a skla*. Praha, 2018. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Martina Eliášová, CSc.
- [27] DROZDA, Jiří, Hana HASNÍKOVÁ, Václav JIRSÁK a Eva MAŠOVÁ. *Příručka ANSYS Workbench*. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2012. ISBN 978-80-01-05175-7.

## **10 SEZNAM PŘÍLOH**

příloha A.

Technický list – SikaFast - 5215 NT

příloha B.

Technický list – Crestabond M7 -05

## SikaFast<sup>®</sup>-5215 NT

rychle vytvrzující 2-komponentní lepicí systém pro konstrukční lepení

### technická data

	komponent A SikaFast <sup>®</sup> -5215 NT	komponent B SikaFast <sup>®</sup> -5200
chemická báze	akrylát	
barva komponent (CQP <sup>1)</sup> 001-1)	bílá	černá
barva směsi	šedá	
mechanismus vytvrzení	polymerizace	
hustota komponent (CQP 006-4)	1,15 kg / l	1,5 kg / l
hustota směsi	1,19 kg / l	
poměr míchání	objemový	10 : 1
	hmotnostní	10 : 1,3
stabilita	tixotropní pasta	
teplota zpracování	+ 5°C ÷ + 40°C	
otevřený čas <sup>2)</sup> (CQP 526-1)	ca 5 min	
čas fixace <sup>2)</sup> doba potřebná k dosažení 80% kon. pevnosti	ca 15 min	
tvrdost Shore A (CQP 023-1 / ISO 868)	90	
tvrdost Shore D (CQP 023-1 / ISO 868)	50	
pevnost v tahu <sup>2)</sup> (CQP 036-1 / ISO 37)	ca 10 MPa	
prodloužení při přetržení <sup>2)</sup> (CQP 036-1 / ISO 37)	ca 200 %	
E - modul <sup>2)</sup> (CQP 036-1 / ISO 37)	ca 250 MPa	
pevnost ve smyku (CQP 046-6 / ISO 4587)	ca 10 MPa	
teplota přechodu ke sklovitosti (CQP 509-1 / ISO 6721-2)	ca 60°C	
teplotní odolnost	-40 °C až + 80 °C	
skladovatelnost <sup>3)</sup> (CQP 016-1)	kartuše 50 ml	15 měsíců
	kartuše	9 měsíců
	hobok / sud	12 měsíců
		9 měsíců

<sup>1)</sup> CQP = Corporate Quality Procedures

<sup>2)</sup> při 23°C a 50 % rel. vzdušné vlhkosti

<sup>3)</sup> skladováno při teplotě pod 25°C, nevystaveno přímému slunečnímu záření

### Popis

SikaFast<sup>®</sup>-5215 NT je rychle vytvrzující, strukturální, 2-komponentní lepicí systém na bázi ADP polymerní technologie odvozené z akrylátů.

Nevytvrzený SikaFast<sup>®</sup>-5215 NT je pastovitý, nestékavý materiál umožňující jednoduchou a precizní aplikaci.

SikaFast<sup>®</sup>-5215 NT je vyráběn v souladu s normami kvality ISO 9001 a 14001 a v souladu s programem « Responsible Care ».

### Přednosti produktu

- nárůst pevnosti v několika minutách po aplikaci
- adheze na široké spektrum podkladů s minimální přípravou povrchu
- vysoká pevnost a odolnost proti nárazu
- bez rozpouštědel a kyselin
- snadné míchání
- nízký zápach oproti MMA

### Oblast použití

SikaFast<sup>®</sup>-5215 NT je rychle tuhnoucí, flexibilní lepidlo určené k nahrazení technologií jako jsou svařování, nýtování, šroubování a mechanické kotvení.

Je vhodný zejména pro konstrukční a montážní lepení na různé podklady včetně kovů, plastů, skla, dřeva atd.

Tento produkt je vhodný pouze pro profesionální uživatele.

Před aplikací je nutno uskutečnit testy adheze s aktuálními podklady a podmínkami.



## Vytvrzování

Lepidlo SikaFast®-5215 NT vytvrzuje polymerací při smíchání s komponentem B SikaFast®-5200.

SikaFast®-5215 NT je vynikající lepidlo pro výrobní procesy v krátkých cyklech. Aby byla zaručena maximální pevnost spoje, musí podklady zůstat v klidu do doby fixace. Úpravy lepených částí jsou možné pouze v době lepidlosti materiálu.

## Chemická odolnost

SikaFast®-5215 NT je odolný vůči mnoha chemikáliím. Pro konkrétní informace se prosím obraťte na Technický servis firmy Sika.

## Dosažitelná adheze

Následující tabulka shrnuje výsledky smykového namáhání získané u různých substrátů. Tyto výsledky jsou orientační. Vzhledem k širokému rozsahu variant substrátů jsou doporučeny předběžné testy.

Tabulka adheze

substrát	L.	hodnota
AlMg3	K	10 MPa
nerozová ocel	K/ S	8 MPa
galvanická ocel	K/ S	10 MPa
sklo	K/ S	9 MPa
ABS	S	8 MPa
PVC	K	10 MPa
PC	K	10 MPa

Tab. 1: pevnost dle ISO 4587, tloušťka 1.5 mm

Lom: porušení Substrátu, Kohezivní

## Pokyny pro zpracování

### Příprava podkladu

Lepené plochy dílů musí být čisté, suché a zbavené všech mastnot. Nepevné části povrchu musí být mechanicky odstraněny.

V kombinaci se SikaFast®-5215 NT je nutno plochy očistit / aktivovat pomocí přípravku Sika®ADPrep.

Vzhledem k rozmanitosti podkladů je nutné provést před aplikací zkoušky. V případě specifických aplikací doporučujeme konzultovat s technickým oddělením Industry.

### Aplikace

SikaFast®-5215 NT se nanáší ve směšovací poměru 10:1 pomocí daného mixéru (24 elementů). Při aplikaci většího množství materiálu dochází v závislosti na množství vlivem exotermní reakce k vývinu tepla. Pro zabránění nadměrného vývinu tepla by neměla tloušťka spoje přesahovat 3 mm, minimálně však musí být 0,5 mm. Ustavení spoje je možno pouze v čase do 5 minut po smíchání, materiál dosahuje manipulační pevnosti v cca čase 15 minut. Optimální teplota pro lepení je mezi 15 °C až 25 °C. Schválený rozsah teplot podkladů a lepidla je 5 °C až 40 °C.

Pro přípravu a návrh zpracování aplikace a volbu zařízení doporučujeme využít technicko - uživatelské poradenství našeho oddělení System Engineering.

### Odstranění zbytků lepidla

Nevytvrzený materiál krátce po nanesení je možné neprodleně utřít suchou utěrkou. Odstranění SikaFast®-5215 NT je možné pomocí materiálu Sika Remover 208. Vytvrzený materiál možno odstranit pouze mechanicky.

Ruce je možno očistit pomocí utěrky Sika Handclean nebo mycí pasty a oplachem vodou.

Nepoužívejte rozpouštědla!

## Další informace

Kopie následujících publikací jsou na vyžádání k dispozici

- bezpečnostní list produktu
- všeobecné směrnice pro SikaFast

## Balení

SikaFast®-5215 NT (komp. A):	20 l hobok
SikaFast®-5215 NT (komp. A):	169 l sud
SikaFast®-5200 (komp. B):	18 l hobok
duální kartuše (komp. A+B)	250 ml
duální kartuše (komp. A+B)	50 ml

## Měřené hodnoty

Všechna technická data v tomto technickém listu jsou stanovena na základě laboratorních testů. Aktuálně naměřené hodnoty se mohou odchýlovat vzhledem k odlišným podmínkám měření mimo naší kontrolu.

## Důležité

Další údaje o chemickém charakteru materiálu, toxikologii, ekologii, skladování, dopravě, likvidaci jsou obsaženy v bezpečnostním listu materiálu.

## Upozornění

naše technicko uživatelské písemné či ústní informace a poradenství je sestaveno na základě našeho nejlepšího vědění, současného stavu znalostí z oblasti vývoje chemických produktů a získaných dlouholetých praktických zkušeností ze spolupráce s výrobcí a opravami v dané oblasti. Naše doporučení jsou však nezávazná, netvoří žádný právní závazek a nezabývají kupujícího možností realizovat vlastní zkoušky našich produktů ve vztahu ke konstrukčním, technologickým a zprávcovatelským podmínkám realizace a to zejména s ohledem na práva třetího. V ostatních záležitostech platí všeobecná ustanovení obchodního zákoníku. V případě technických informací se obraťte na naše oddělení Industry.



**Sika Schweiz AG**  
Tüffenwies 16  
8048 Zürich  
Switzerland  
Tel: +41 58 436 40 40  
Fax: +41 58 436 45 30

**Sika CZ s.r.o.**  
Bystrcká 1132 / 36  
CZ - 624 00 Brno  
Česká republika  
tel: +420 546 422 464  
fax: +420 546 422 400  
e-mail: [sika@cz.sika.com](mailto:sika@cz.sika.com)

**Sika Slovensko spol. s r.o.**  
Rybničná 38  
SK - 831 07 Bratislava  
Slovensko  
tel: +421 2 4920 0406  
fax: +421 2 4920 0444  
e-mail: [sika@sk.sika.com](mailto:sika@sk.sika.com)



# CRESTABOND<sup>®</sup> M7-05

## Methacrylate Structural Adhesive

### Product Overview

Crestabond M7-05 is a toughened, two component acrylic adhesive designed for bonding composites, thermoplastics and metals. This new generation of structural methacrylate adhesive meets the bonding requirements of most assembly operations, demonstrating excellent impact, peel, shear, compressive strength and fatigue resistance properties across all bonded parts. Crestabond M7-05 is a primer-less adhesive, requiring only minimal surface cleaning of the substrates to be bonded and demonstrates high toughness in all assembled parts with a gap filling capability up to 5mm.

### Features and Benefits

- Primer-less metal application
- High strength and modulus
- Fast setting and curing
- Excellent environmental resistance
- Ready-to-use two component adhesive
- Speeds assembly process
- Replaces mechanical fasteners
- Reduce labour
- Bonds difficult metals and plastics

### Characteristics of Crestabond M7-05

Characteristics	Typical Value
Working Time/Geltime <sup>1</sup>	4 – 7 Minutes
Fixture Time	18 – 22 Minutes
Gap Filling	1 – 5 mm
Flash Point	10°C
Mixed Colour	Off White

1. Working time measured with 12g mass of adhesive with 1:1 mix ratio by volume at 24°C.

### Liquid Properties

Property	Typical Value	
	M7-05 Adhesive	M7-05/15 Activator
Viscosity <sup>2</sup>	50,000 – 70,000 cP	30,000 – 50,000 cP
Specific Gravity	0.98 – 1.02	0.98 – 1.02
Mix Ratio (by volume)	1.0	1.0
Mix Ratio (by weight)	1.0	1.0
Colour	Off White	Off White
Stability at 20°C <sup>3</sup>	6 Months	6 Months

2. Viscosity measured using a Brookfield Viscometer at 24°C.

3. Stability defined from date of manufacture when left un-opened in the original containers and out of direct sunlight.

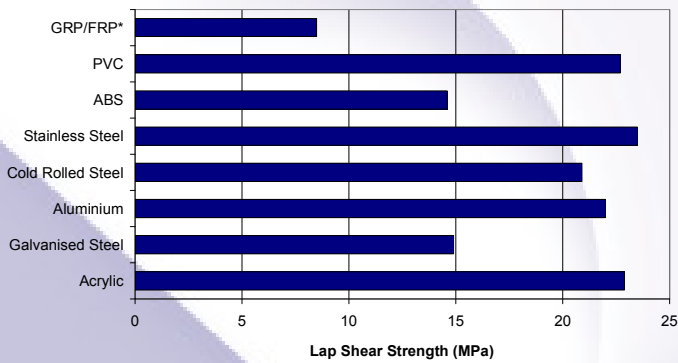
### Typical Material Properties

Property	Typical Value
Tensile Strength	23 – 25 MPa
Tensile Modulus	2000 – 2700 MPa
Tensile Elongation	33 – 37%

Tested to ASTM D638.

## Bond Joint Strength – Typical Lap Shear Strengths at 23°C

Values are based on substrate failure where marked by \*

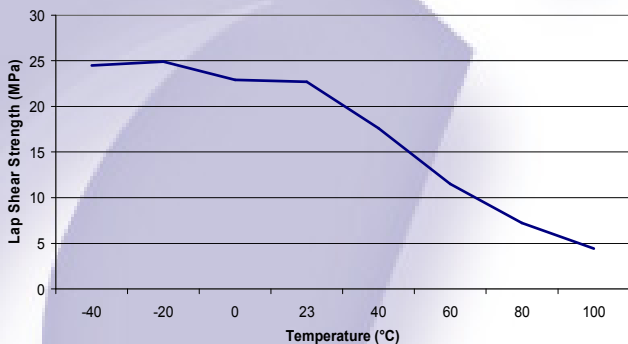


Material	Surface Preparation	Bondline Thickness	Test Method
GRP	Solvent Degrease	3.00mm	ASTM 5868
PVC	Solvent Degrease	0.76mm	ASTM 2564
ABS	Solvent Degrease	0.76mm	ASTM 2564
Stainless Steel	Grit Blast & Degrease	0.26mm	ISO 4587
Cold Rolled Steel	Degrease, Abrade & Degrease	0.26mm	ISO 4587
Aluminium	Solvent Degrease	0.26mm	ISO 4587
Galvanised Steel	Solvent Degrease	0.26mm	ISO 4587
Acrylic	Solvent Degrease	0.76mm	ASTM 2564

Please contact Scott Bader Technical Services for information on other substrates.

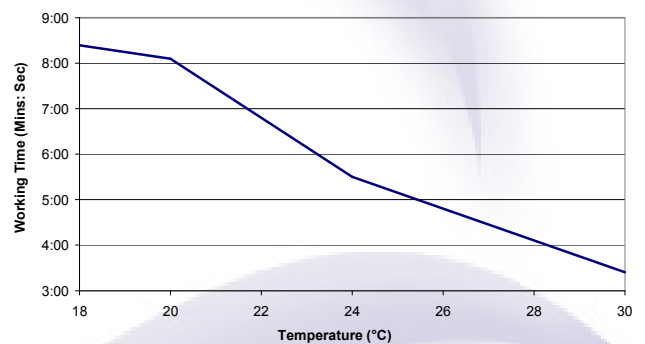
### Temperature Performance Lap Shear Testing

Tested to ISO 4587 0.26mm bondline, aluminium 6061-T6, acetone wipe surface preparation.



### Working Time Testing

The time taken for a 12g mass to reach 30°C at different ambient temperatures.



### Recommended Substrates

#### Metals

Aluminium  
Stainless Steel  
Carbon Steel  
Powder Coated Metals  
Galvanised/Zinc Coated Metals

#### Thermoplastics

Acrylic  
Styrenics  
ABS  
PVC/CPVC  
Nylon

#### Composites

GRP/FRP  
Epoxy<sup>4</sup>  
Polyester & DCPD Modified  
Vinyl Esters  
Urethanes  
Gelcoats<sup>5</sup>  
Carbon Fibre

- Surface preparation of epoxy laminates may be necessary and testing should be performed to ensure sufficient bond strength is achieved.
- Surface preparation is likely to be needed on gelcoat surfaces to ensure no release agents are present.

Please contact Scott Bader Technical Services for information on other substrates and advice.

### Non-Recommended Substrates

- Polyethylene
- Polypropylene
- Polytetrafluoroethylene
- Polyacetals

### Surface Preparation

The surface to be bonded can affect the strength and durability of the bond joint. Appropriate treatment may be required to ensure that there are no traces of oil, grease or dirt through the use of a degreasing agent, for instance acetone or another degreasing agent on the joint surfaces.

Mechanically abrading or chemically etching degreased surfaces can make bond joints more durable and stronger. If abrading, a second treatment of degreasing is required.

Do not use gasoline (petrol), low grade alcohol or paint thinners.



### **i) Metals**

Typically, the surface should be clean and dry by using an alcohol/solvent wipe and allowing the solvent to evaporate before application. Certain metals, such as carbon steel may also require mechanical abrasion and a subsequent alcohol solvent wipe prior to bonding.

### **ii) Thermoplastics**

The surface must be clean, dust-free and dry. A suitable solvent such as iso-propanol can be used to degrease.

### **iii) Composites**

The surface must be clean, free of dust and dry. This can be achieved by the use of proprietary strippable cloths such as peel-ply (without lubricant contaminates). The laminate should be fully cured prior to bonding and if the laminate surfaces are more than 3 days old, it is recommended that the surface must be cleaned with a suitable solvent or cleaner with a lint-free, clean cloth prior to bonding.

Surface preparation, such as mechanical abrasion, is likely to be needed on gel coat surfaces and moulded surface where release agents are likely to be present. When bonding epoxy laminates please test bond strength prior to application.

### **Application**

Crestabond M7-05 is supplied ready to use in pre-packed 400ml and 50ml cartridges and in bulk (18Kg pails and 180Kg drums). Prior to bonding, ensure the substrate surface is clean by following instructions provided. Bulk dispensing equipment should be in good operating condition. Check the cartridge outlet for any obstructions and remove as necessary to ensure product flows easily. Dispense the adhesive at slow rate initially onto a non-bonding surface until the bead colour is uniform. Check the dispensed bead for cure quality before beginning the bonding process. Dispense enough adhesive to fill the bond gap before parts are mated. Avoid dry bonds by using adequate pressure to mate parts and clamp properly to prevent joint movement.

All these processes must be completed before the working time of the mixed adhesive expires. The effect of temperature upon this working time can be seen in the graph on the previous page. The viscosities of both adhesive and activator are affected by temperature. The adhesive, activator and parts to be bonded should be allowed to attain workshop temperature of between 18°C and 25°C prior to bonding. This temperature should be maintained during the bonding process and until the adhesive is sufficiently cured to allow movement of the assembly.

For industrial/commercial use only. Not to be used in household applications. The user must determine the suitability of a selected adhesive for a given substrate and application. Contact your local Scott Bader representative for questions or assistance with the selection of adhesives for your use. This product is intended for use by skilled individuals at their own risk. Recommendations contained herein are based on information we believe to be reliable. The properties and strength values obtained under controlled conditions at the Scott Bader laboratory.

### **Storage**

The shelf life for Crestabond M7-05 is defined from date of manufacture when stored at the recommended temperature of between 15°C and 23°C. Long term exposure above 23°C will reduce the shelf life of these materials. Prolonged exposure above 35°C should be avoided as the product will thicken and become unusable, additionally the reactivity of the product is quickly diminished. The expiry date is indicated on the product labels.

Crestabond products should be stored in their original container out of direct sunlight. The bulk product or cartridge material should be opened only immediately prior to use and it's highly recommended that products should never be frozen or exposed to temperatures above 35°C.

### **Packaging**

Crestabond M7-05 is supplied in 18Kg plastic pails, 180Kg drums, pre-packed 400ml co-axial and 50ml side by side cartridges.

### **Health and Safety**

See separate Material Safety Data Sheet.

Version 3 : March 2014

All information on this data sheet is based on laboratory testing and is not intended for design purposes. Scott Bader makes no representations or warranties of any kind concerning this data. Due to variance of storage, handling and application of these materials, Scott Bader cannot accept liability for results obtained. The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

### **SCOTT BADER COMPANY LIMITED**

Wollaston, Wellingborough, Northamptonshire, NN29 7RL

Telephone: +44 (0) 1933 663100

Facsimile: +44 (0) 1933 666623

[www.scottbader.com](http://www.scottbader.com)

## 11 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Pracovní diagram skla, závislost napětí na deformaci [3] .....	12
Obr. 2.2: Výrobní proces plaveného skla [3] .....	13
Obr. 2.3: Struktura skla [5] .....	13
Obr. 2.4: Postup výroby tepelně upravovaného skla [3] .....	14
Obr. 2.5: Výsledné rozložení průběhu napětí po průřezu [2] .....	14
Obr. 2.6: Lom tepelně zpevněného skla (a) a tepelně tvrzeného skla (b) [6] .....	15
Obr. 2.7: Vrstvené (bezpečnostní) sklo .....	15
Obr. 2.8: Typy porušení vrstvených skel .....	16
Obr. 2.9: Rozdělení přípojů skleněných konstrukcí [6] .....	17
Obr. 2.10: Třecí spoj u zastřešení university v Glasgow [8] .....	18
Obr. 2.11: Bodové úchyty fasádních skel [9] .....	18
Obr. 3.1: Vliv relativní vlhkosti na dobu vytvrzení [15] .....	21
Obr. 3.2: Rozdělení polymerů [19] .....	24
Obr. 3.3: Struktura a chování elastomerů [20] .....	24
Obr. 3.4: Struktura a chování termoplastů [20] .....	25
Obr. 3.5: Strukturální vývoj reaktoplastů [4] .....	26
Obr. 3.6: Struktura a chování reaktoplastů [20] .....	26
Obr. 4.1: Působení mezi lepidlem a spojovaným materiálem [16] .....	29
Obr. 4.2: Struktura lepeného spoje, působící zóny [21] .....	30
Obr. 4.3: Závislost doby tvrzení na pevnosti spoje [13] .....	31
Obr. 4.4: Pracovní diagram tuhého (epoxidového) a poddajného (jednosložkového polyuretanu) lepidla - závislost zatížení a posunutí kontaktních ploch vrstvy lepidla [13] .....	31
Obr. 4.5: Příklady geometrie lepených spojů [22] .....	33
Obr. 4.6: Vady ve vrstvě lepidla [24] .....	34
Obr. 4.7: Typy namáhání lepených spojů .....	34
Obr. 4.8: Typy porušení lepeného spoje [25] .....	35
Obr. 5.1: Popis vrstev zkušební tělesa, rozměry jsou uváděny v [mm] .....	36
Obr. 5.2: Zkušební tělesa .....	37
Obr. 5.3: Značení zkušebních těles .....	39
Obr. 5.4: Značení zkušebních těles .....	39
Obr. 5.5: Deformace vrstvy lepidla ve spoji [26] .....	40
Obr. 5.6: Shimadzu AGS-X a zaznamenávací ústředna Spider 8 s počítačem .....	41
Obr. 5.7: Schéma a popis zkušební tělesa osazeného do měřicího stroje .....	42
Obr. 5.8: Osazení zkušební tělesa před začátkem experimentu .....	43
Obr. 5.9: Umístění potenciometru na zkušební těleso .....	44
Obr. 5.10: Porušení zkušebních těles, Crestabond M7-05, 1mm .....	45
Obr. 5.11: Pěnová distanční páska, šířka 9 mm .....	49
Obr. 5.12: Porušení substrátu - skleněné části spoje .....	53



Obr. 5.13: Adhezní porušení spoje od oceli .....	54
Obr. 5.14: Adhezně – kohezní porušení + porušení substrátu .....	54
Obr. 6.1: Geometrické znázornění lepeného spoje 1, 3, 5 mm, modelováno v programu Autodesk Inventor Professional .....	59
Obr. 6.2: Síť konečných prvků lepeného spoje .....	61
Obr. 6.3: Zhuštění sítě konečných prvků pro vrstvu lepidla .....	61
Obr. 6.4: Fixace a určení směru zatížení .....	62
Obr. 6.5: Grafické znázornění deformací vrstvy lepidla .....	65
Obr. 6.6: Grafické znázornění : .....	65

## 12 SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Materiálové vlastnosti plaveného skla [2]	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Tab. 2.2: Výhody a nevýhody lepeného spoje [7]	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
Tab. 5.1: Výsledné hodnoty pro 1. referenční sadu, Crestabond M7-05 + SikaFast – 5215 NT, tl. vrstvy lepidla 1 mm .....	46
Tab. 5.2: Výsledné hodnoty pro 2. referenční sadu, Crestabond M7-05, vrstvy lepidla 3 mm a 5 mm .....	50
Tab. 5.3: Hodnoty smykového napětí a průměrného přetvoření pro vybrané zkušební tělesa lepená lepidlem Crestabond M7 – 05 .....	55

## 13 SEZNAM GRAFŮ

Graf 5.1: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, SikaFast- 5215 NT, 1 mm.....	47
Graf 5.2: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7-05 + SikaFast- 5215 NT, 1 mm.....	47
Graf 5.3: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7-05 + SikaFast- 5215 NT, 1 mm.....	48
Graf 5.4: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7-05, 3 mm .....	51
Graf 5.5: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7- 05, 5 mm .....	52
Graf 5.6: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7-05, 3 mm a 5 mm .....	52
Graf 5.7: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci, Crestabond M7-05, 1 mm, 3 mm a 5 mm .....	56
Graf 6.1: Průběh symkového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci pro vrstvy lepidle tloušťky 1, 3 a 5 mm, Ansys Workbench 2019 R3.....	64
Graf 7.1: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci - Izotropně-elastický model, Crestabond M7-05, software Ansys Workbench 2019 R3, 1 mm.....	67
Graf 7.2: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci - Izotropně-elastický model, Crestabond M7-05, software Ansys Workbench 2019 R3, 3 mm.....	68
Graf 7.3: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci- multilineární izotropní model, Crestabond M7-05, software Ansys Workbench 2019 R3, 3 mm .....	69
Graf 7.4: Průběh smykového napětí v závislosti na poměrné smykové deformaci - Izotropně-elastický model, Crestabond M7-05, software Ansys Workbench 2019 R3, 5 mm.....	70