

UNIVERZITA PARDUBICE  
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2008

Jiří Folta

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera

Hodnocení pevnosti lepených spojů v konstrukci autobusů

Jiří Folta

Bakalářská práce

2008

Univerzita Pardubice  
Dopravní fakulta Jana Pernera  
Katedra dopravních prostředků  
Akademický rok: 2007/2008

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jiří FOLTA**

Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**

Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**

Název tématu: **Hodnocení pevnosti lepených spojů v konstrukci autobusů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Rozbor aplikace lepených spojů v konstrukci autobusů
2. Technologické a materiálové vlivy na pevnost lepených spojů
3. Rozbor problematiky různé doby vytvrzování v závislosti na použitém materiálu a technologii, metody hodnocení
4. Laboratorní testy vybraných lepených spojů
5. Vyhodnocení výsledků rozborů, rozbor možností testování doby vytvrzování lepených spojů

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. **Petrie, E. M.: Handbook of Adhesives and Sealants. McGraw-Hill, New York USA, 2000, ISBN 0-07-049888-1**
2. **Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I.-II. CERM, s.r.o. Brno 1999, ISBN 80-7204-193-2**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Pavel Švanda, Ph.D.**

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce:

**18. února 2008**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**26. května 2008**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

## SOUHRN

Tato práce se zabývá hodnocením pevnosti lepených spojů v konstrukci autobusů. Jsou zde shrnuty základní technologické postupy při konstrukci lepeného spoje a taky různé technologickými vlivy působící na pevnost spoje. V praktické části je zkoumána závislost pevnosti lepeného spoje na době vytvrzení. Zkouška byla provedena pomocí statické zkoušky tahem a bylo při ní použito polyuretanové lepidlo které se skutečně používá i v konstrukci autobusů.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Lepený spoj, pevnost lepeného spoje, adherend, kohezivní pevnost, adhezivní pevnost

## TITLE

Glued Joint Strength Assesment in Construction of Buses

## ABSTRACT

This work is devoted to the study of strength of glued joints on bus structure. There are summarizing basic technologic process in glued joints construction. There are presented technologic influence treat to joints strength. In practical section is testing dependence of glued joint strength to setting time. Testing was measure using static tensile test using polyurethane glue that is really use in bus manufacturing.

## KEYWORDS

glued joint, glued joint strength, adherend, adhesive strength

*Na tomto místě bych rád poděkoval především vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlu Švandovi, Ph.D. za příkladné vedení, podmětne rady a připomínky.*

*Dále bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Šmerdovi ze společnosti Iveco Czech Republic, a. s. za odbornou pomoc a cenné informace při vytváření této práce.*

# **OBSAH**

Úvod.....	3
1. Rozbor aplikace lepených spojů v konstrukci autobusů.....	4
1.1 Praktická aplikace lepeného spoje.....	5
1.2 Lepidla polyuretanová.....	6
2. Technologické a materiálové vlivy na pevnost lepených spojů.....	9
2.1 Technologie lepení.....	9
2.2 Výhody a nevýhody lepených spojů .....	10
2.3 Návrh lepeného spoje.....	10
2.4 Požadované vlastnosti spoje.....	11
2.4.1 Mechanické vlastnosti.....	11
2.4.2 Tepelná odolnost.....	12
2.4.3 Odolnost vůči vodě a prachu.....	13
2.4.4 Chemická odolnost.....	13
2.5 Konstrukce lepených spojů.....	13
2.5.1 Velkoplošné spoje.....	14
2.5.2 Překlátované spoje.....	15
2.5.3 Ochrana lepených spojů vůči stárnutí, povětrnosti, vyšší teplotě a chemickým vlivům.....	16
2.5.4 Příprava povrchů na lepení.....	17
2.5.5 Nános lepidla.....	18
2.5.6 Doba otevřeného a uzavřeného sestavení spoje.....	19
2.5.7 Vliv fixace a tlaku.....	20
2.5.8 Tuhnutí lepidla ve spoji.....	21
2.5.9 Bezpečnostní opatření.....	22
3.7 Statická zkouška tahem.....	22
3.7.1 Průběh zkoušky.....	23
3.7.2 Vyhodnocení zkoušky.....	23
3.7.3 Pevnostní charakteristiky.....	24
3. Rozbor vlivu použitého lepidla a materiálů.....	26
3.1 Struktura lepeného spoje.....	26
3.2 Základní pojmy adheze a koheze.....	27

3.3 Rozbor nejčastějších příčin poruch lepených spojů.....	28
3.4 Pevnost lepených spojů.....	30
3.5 Rozdělení lepidel .....	31
3.5.1 Rozdělení lepidel podle principu tuhnutí ve spoji.....	31
3.5.2 Rozdělení lepidel dle chemické báze .....	32
3.6 Kataforéza.....	33
3.6.1 Hlavní oblasti použití kataforézního základování.....	34
4. Laboratorní testy-Vliv doby vytvrzování lepidla na pevnost lepených spojů..	35
4.1 Příprava a provedení.....	35
4.2 Měřicí přístroj.....	38
5. Vyhodnocení experimentů.....	40
Závěr.....	46
Seznam použité literatury.....	48



## Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá pevností lepených spojů a to především závislosti pevnosti lepeného spoje na době vytvrzení. Lepidlo použité v praktické části bylo lepidlo skutečně používané v konstrukci autobusů.

Lepení je proces spojování materiálů (adherendů), při kterém se dosahuje trvalé spojení stejných, případně různých materiálů prostřednictvím lepidel (adhesiv). Lepidlo je látka schopná utvořit pevné a trvalé spojení mezi dvěma materiály. Uvedená schopnost závisí od adheze k povrchům lepených materiálů a od koheze samotného lepidla.

Důležitým krokem před samotným lepením součástí je povrchová úprava adherendů, protože se na jeho povrchu nacházejí různé vrstvy, které brání dokonalému smáčení povrchu lepidla a tím slepení materiálů. Proto je nutné tyto vrstvy odstranit. Odstraňování těchto vrstev se provádí několika způsoby. V první řadě se jedná o mechanické úpravy povrchu materiálu a poté ještě o úpravy chemické.

Pevnost lepidla je ve srovnání s pevností kovů malá. Aby mohlo být využito alespoň z části pevnosti kovového adherendu, musí být lepená plocha velká a převážná část zatížení musí působit v rovině lepené plochy tak, aby byl spoj zatěžován ponejvíce smykovým napětím. Kovy jsou materiálem nepropustným pro plyny, vyznačují se zpravidla dobrými adhezními vlastnostmi a vysokou teplotní odolností. V oblasti lepení kovů se převážně využívají epoxidová lepidla.

Jedním z aspektů majících výrazný vliv na pevnost lepených spojů v provozu je vliv teploty a času. Tento aspekt je nazýván stárnutím, které se projevuje změnou mechanických vlastností v čase, především snížením výsledné pevnosti a spolehlivosti lepených spojů.

# **1. Rozbor aplikace lepených spojů v konstrukci autobusů**

Nárůst požadavků na technickou úroveň konstrukcí se projevuje v poslední době intenzivně i v oblasti spojování materiálů, kde lepení je často jedinou, nebo nevhodnější spojovací metodou, která nenarušuje vlastnosti citlivých materiálů, poskytuje nové kombinační schopnosti a dovoluje získat takové tvary a vlastnosti, které nejsou jiným způsobem dosažitelné.

K tomu aby nám lepené spoje dobře sloužily, je důležité znát nejen vlastnosti lepidel a lepených materiálů, ale i způsob, jakým budou lepené materiály namáhány. Má-li mít lepený spoj dlouhou životnost musí být konstruován jako lepený spoj. Ovšem lepený spoj nemůžeme používat jen proto, že použití vhodnější technologie je pro nás nedostupné, anebo jako poslední záchranu, když ostatní technologie nevyhovějí.

Technologie lepení patří k pokrokovým způsobům spojování různorodých materiálů, vzhledem k dosahovaným úsporám finančním i k úsporám deficitních kovů a času. Kvalita či poruchovost lepených spojů závisí na mnoha faktorech, např. na volbě lepeného materiálu, úpravě lepeného povrchu, volbě lepidla aj. Lepený spoj dosahuje optimálních vlastností při dodržení všech technologických zásad. Z tohoto důvodu je důležitá znalost základních faktorů, které ovlivňují lepené spoje. Pokud se spoje lepí bez dobrých technologických znalostí, dosahuje se výrazně horších výsledků i za použití odolných a drahých lepidel.

Výhodou lepení je, že lze aplikovat téměř na všechny materiály, kovy i nekovy, ke vzájemnému spojování nejen mezi sebou, ale i s jinými materiály. Lepení umožňuje vytvořit spoje pevné a pružné, ale lze i vrstvit materiál na sebe. Za optimální pevnost konstrukčních lepených spojů se v hlavních kritériích namáhání považují hodnoty odpovídající hodnotám spojovaného materiálu. Pevnost lepeného spoje je soubor dílčích pevností nebo složek pevnosti, jako jsou pevnosti stanovené krátkodobými zkouškami, dále pevnosti spoje při dlouhodobém statickém a dynamickém zatěžování, pevnosti při zvýšených či snížených teplotách, pevnosti při vlivu různých prostředí.

Lepidla zažívají stále větší uplatnění a tak se i ve výrobě autobusů přechází z běžných konstrukčních spojení (svařování, nýtování, šroubování apod.) právě na lepení. Ve výrobě autobusů se lepení využívá díky jejich přednostem poměrně hojně. Velice často se právě používají lepidla polyuretanová, a to jak jednosložková, tak dvousložková. Proto bylo při praktické části této bakalářské práce použito právě jednosložkové polyuretanové lepidlo *BETASEAL 1001* používané ve výrobě.

## 1.1 Praktická aplikace lepeného spoje

Mezi typické představitele možnosti aplikace lepeného spoje u firmy Iveco Czech Republic, a. s. jsou:

- Lepení zasklení (boční zasklení, zadní a čelní sklo) - Betaseal HV3, Betaseal 1001
- Lepení víka motoru - Betaseal 1001 + WeldON SS305
- Lepení pásů nadokenního oplechování - Betaseal 1001
- Lepení zadního panelu - Betaseal 1001
- Lepení podlahy zavazadlového prostoru - 1K PUR Emfimastic PU60 (teoreticky lze použít Betaseal 1001)
- Lepení podlah cestujících - 2K PUR Betamate 2810 (teoreticky lze použít i Betaseal 1001)
- Lepení bočního oplechování - 1K PUR Sikaflex 254 + Booster (teoreticky lze použít i Betaseal 1001)
- Lepení spodního oplechování - 1K PUR Sikaflex 252 (teoreticky lze použít i Betaseal 1001)
- Lepení blatníků - 1K PUR Sikaflex 252 + WeldON SS305 (teoreticky lze použít i Betaseal 1001)
- Lepení jednotky klimatizace na střechu vozu - Betaseal 1001
- Lepení ventilací na střechu vozu - Betaseal 1001
- Lepení drobných dílů (výztuhy, krací lišty, krycí plechy) - různé druhy 1K PUR (teoreticky lze použít na vše Betaseal 1001)

**1K** – jednokomponentní lepidlo

**2K** – dvoukomponentní lepidlo

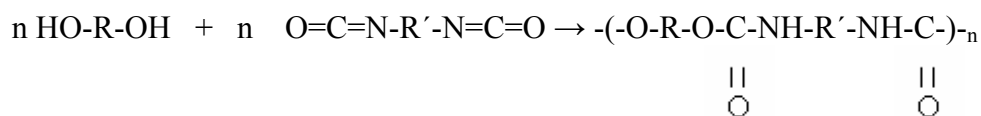
**booster** - "urychlovač", přídavný materiál která zajistí protvzení tmele najednou v celém průřezu (tzn. materiál netvrdne standardní cestou, tj. postupně od vnějšíku dovnitř)

Volba různých druhů tmelů je závislá na několika faktorech. Ty hlavní jsou barva, viskozita, pevnost, rychlost vytvrzování a samozřejmě na prvním místě také cena.

Nevýhodou u dvousložkových lepidel je to že je nutné míchat dva komponenty v určitém poměru, to se provádí například pomocí směšovačů. Při použití směšovačů, ale vznikají ztráty, protože v něm zůstane určité množství nevyužitého lepidla a poté je následně vyhozeno. Proto se nevyplatí ho používat u malých nebo velmi málo aplikovaných spojů, kde poměr objemu lepidla použitého ve spoji a zbylého ve směšovači je malý.

## 1.2 Lepidla polyuretanová

Polyuretanové pryskyřice vznikají adiční polymerací polyisokyanátů s vícemocnými alkoholy nebo polyesterovými pryskyřicemi obsahujícími hydroxylové skupiny



K přednostem polyuretanových lepidel patří dobrá mechanická pevnost spojů, pružnost a odolnost proti dynamickému namáhání a v neposlední řadě i odolnost vůči vlhkosti a povětrnostním vlivům. Jsou zpracovatelná v širokém rozmezí teplot včetně nízkých teplot kolem 0 °C [4].

Polyuretanová lepidla jsou vhodná pro spojování mnoha materiálů, především kovů, dále dřeva, pryže, keramiky, porcelánu, reaktoplastů i termoplastů. Tyto materiály lze jimi také vzájemně kombinovat. Sortiment těchto lepidel je velmi pestrý, vyrábějí se jako reaktivní roztočová lepidla, ale i jako tavná lepidla nebo v podobě lepící fólie [4].

Nejvýznamnější skupinu tvoří dvousložková lepidla polyuretanová. Reakce základních složek, tj. polyesteru, nebo jiné polyhydroxy-sloučeniny a polyisokyanátu, probíhá za

normální teploty. Proto se připravuje jen tolik lepicí směsi, kolik ji lze zpracovat. Po vytvrzení je spoj netavitelný a nerozpustný [1].

Volbou vhodných typu základních složek je možné získat spoje od pružných až po pevné a tvrdé tak, jak jsou nejvýhodnější ze vztahu k vlastnostem spojovaných materiálů.

Vlastnosti spojů ovlivňuje i poměr obou složek. Nižší přídavek polyisokyanátů vede k měkčím produktům, přebytek k produktům tužším (dává též předpoklad pro vyšší adhezi lepidla k podkladu) [1]

Poměr mísení obou složek je obvykle 1 : 1 až 1 : 3, přičemž vlastnosti spojů nejsou tak citlivé na dodržení předepsaného poměru, jako je tomu u epoxidových lepidel. Dostatečně dlouhé jsou i doby použití připravených směsí obou složek, které se pohybují od 15 minut do několika hodin [4].

Viskozita výchozích polyesterů značně kolísá podle jejich složení a ovlivňuje způsob zpracování polyuretanových lepidel [1].

Vyrábějí se proto bezrozpouštědlové i rozpouštědlové typy polyuretanových lepidel. Dvousložkové bezrozpouštědlové typy jsou založeny na bázi polyetherových pryskyřic s koncovými hydroxylovými skupinami a dvojfunkčních aromatických isokyanátů. Podle složení dávají pružné a tuhé spoje, mají dobré plnicí vlastnosti. Jsou vhodné pro spojování plastů, lehčených hmot, dřeva a jiné. Rozpouštědlové systémy vycházejí z polyesterových pryskyřic a koncovými hydroxylovými skupinami a aromatických trojfunkčních isokyanátů. Používají se především k lepení kovů, některých plastů, jako je tvrdý PVC, ABS-kopolymery, reaktoplasty, polyamidy, dále k lepení dřeva k nalepování polyuretanových lehčených hmot na tkaniny a jiné [4].

*Příklad složení jednosložkových polyuretanových lepidel:*

Pedpolymery lineárních polyesterů a diisokyanátů s koncovými hydroxylovými skupinami se používají v roztoku organických rozpouštědel neobsahující vodu nebo

alkohol. Zpracovávají se bez dalších přísad, popřípadě jen s přidavkem trojfunkčních aromatických isokyanátů, které zvyšují pevnost a tepelnou odolnost spojů [1].

Předpolymery polyesterů a diisokyanátů s koncovými isokryanátovými skupinami jsou lepidla tvrditelná vzdušnou vlhkostí nebo vlhkostí lepených povrchů. Vytvrzení probíhá ve dvou stupních. V prvním stupni se řetězce duktu (předpolymeru) naneseného na lepené ploše po odpaření rozpouštědla prodlouží vlivem reakce s vodou ze vzdušné vlhkosti nebo z lepeného povrchu. Zvýší se viskozita polymeru a lepené plochy je možné přiložit k sobě. Spoj se vytvrdí za mírně zvýšené teploty pod tlakem od 0.02 MPa. Tyto typy lepidel jsou vhodné k lepení kovů, betonů, pryže, kůže, tkaniny, dřeva aj [1].

Vytvrzování polyuretanových dvousložkových lepidel se reguluje teplotou a urychlovačem, například pomocí solí kyseliny trichloroctové a N-dimethylstearylaminu při 90 °C se zkrátí na několik minut. Životnost lepicí směsi se však také zkracuje, a proto je nutný kompromis. Urychlovači lze urychlit vytvrzení při 10 °C na 4 až 5 hodin, při 20 °C na 3 hodiny, při 60 °C na 30 minut. Bez urychlovače vytvrzení trvá při 20 °C 1 až 2 dny [4].

Samotné isokyanáty se používají především jako adhezní nátěry při spojování pryže, nebo pryže s kovy a to ve formě 20 %ního roztoku v methylenchloridu [4].

## **2 Technologické a materiálové vlivy na pevnost lepených spojů**

### **2.1 Technologie lepení**

Na základě teorie lepení můžeme určit základní podmínky lepení jako jsou, správná volba lepeného materiálu a lepidla, správný návrh konstrukce spoje, vhodná povrchová úprava materiálů, dodržování předepsaného postupu při lepení, utvoření fyzikálněchemických a jiných podmínek vzniku pevných vazeb. Při volbě materiálů na lepení se přihlíží na jejich chemickou povahu (chemické složení), polaritu, mechanické, povrchové, fyzikální a fyzikálněchemické vlastnosti. V případě lepidel to jsou například chemická povaha, viskozita lepidla, povrchově napětí, bod vzplanutí, způsob vytvrzování, tepelná roztažnost a mechanické vlastnosti.

Princip lepení a jeho pracovní postup se ve všeobecnosti skládá z přípravy povrchu lepených materiálů, přípravy lepidla, nanášení lepidla, montáže spoje a utvoření pevného spoje (např. vytvrzování). Kvalitu lepeného spoje můžeme ovlivnit: způsobem nanášení lepidla, tloušťkou nanesené vrstvy, podmínkami při vytvrzování (tlak, teplota, čas), použitím ultrazvuku, tepelného ovlivnění lepidla různými zdroji ohřevu (např. infračervený anebo laserový paprsek), přípravou povrchu materiálu a úpravou lepidla na jeho použití.

Jestliže zhodnotíme všechny výhody a nevýhody lepení a zvážíme je ve srovnání s jinými spojovacími metodami, tak v případě, že lepený spoj je nejvhodnější spojovací technikou pro naši aplikaci, vytvoříme návrh lepených spojů, abychom dosáhli nejlepší geometrie pro lepený spoj. Před vlastním lepením je nutné provést vhodnou přípravu povrchů, které se mají spojit. Poté následuje výběr vhodného lepidla vzhledem k materiálu a jeho použití. Doporučuje se provést několik prototypových spojů a vyzkoušet slepené komponenty přímo v zamýšlených aplikacích.

## 2.2 Výhody a nevýhody lepených spojů

Výhody:

- mohou se spojovat materiály stejné, nebo zcela různé bez ohledu na jejich tloušťku
- většina lepidel má dobré mechanické tlumící vlastnosti (tlumení hluku, vibrací)
- montáž se dá ve většině případů provádět při relativně nízkých teplotách
- spoj je plynotěsný i vodotěsný a jako takový vytváří spolehlivý těsný uzávěr
- spoj je trvalý, což dává rovnoměrnější distribuci napětí přes lepenou plochu (vyloučí se místní koncentrace napětí)
- lepení snižuje hmotnost celé konstrukce (není stanovena minimální tloušťka dílů)
- spoje mohou být průhledné, nebo i barevně přizpůsobivé
- lepení je ve srovnání s jinými spojovacími technikami poměrně jednoduché
- aplikací lepidel není narušena celistvost spojovaných dílců

Nevýhody:

- pevnost spoje je často nízká ve srovnání s jinými spojovacími technikami
- klade vysoké požadavky na rovnost a čistotu povrchu lepených dílců
- většina lepených spojů je citlivá vůči namáhání v odlupování a kroucení
- maximální pevnosti spoje je dosaženo až po určité době
- plné pevnosti se dosáhne až po vytvrzení
- lepidla mohou být napadána některými chemikáliemi
- většinou nejsou vhodná pro spoje s proměnlivým zatížením
- často je obtížné oddělit spojené díly nedestructivní metodou
- lepení v průmyslovém měřítku je náročnější na vybavení pracoviště
- s ohledem na zdraví musí být při jejich použití dbáno na bezpečnostní opatření

## 2.3 Návrh lepeného spoje

Lepené spoje jsou vystaveny napěťovým, tlakovým, střižným, odlupujícím nebo rozštěpným silám, často i jejich kombinacím. Lepidla jsou nejodolnější pokud jde o pevnost ve stříhu a tlaku, ale vykazují nízkou odolnost při zatížení na loupání a štípání.



Dále musí být lepené spoje navrženy tak, aby se tyto štípací nebo loupací síly minimalizovaly nebo zcela vyloučily [8].

## **2.4 Požadované vlastnosti spoje**

Důležitým hlediskem pro výběr lepidla a technologie lepení jsou vlastnosti lepeného souboru požadované při jeho použití. Jsou to nároky na mechanickou pevnost, tepelnou odolnost, chemickou stálost, vodovzdornost spoje, odolnost vůči povětrnostním vlivům, popřípadě další požadavky. Ne vždy je možné vyhovět všem nárokům současně a proto je třeba uvážit, která z nich jsou z hlediska funkce nejdůležitější a volit kompromisní řešení.

### **2.4.1 Mechanické vlastnosti**

Ve své funkci může být lepený spoj zatěžován buď staticky, například jen hmotností adherendů, nebo dynamicky, například trvalým chvěním, opakovanými rázy, kroucením, atd.

Potřebná jakost staticky namáhaného spoje může být poměrně snadno definována hodnotami minimální pevnosti ve smyku, tahu a odlupování, naměřenými na normovaných zkušebních tělesech, připravených z materiálu budoucích adherendů, povrchově upravených předpokládanými metodami (zdrsnění, odmaštění, popřípadě moření) a slepených vybraným lepidlem za podmínek praxe [4].

Komplikovanější je hodnocení požadované jakosti spojů vystavených dynamickému namáhání. Takové spoje jsou velmi časté zejména u výrobků automobilového a leteckého průmyslu a u sportovních potřeb. Hlavní problém spočívá v tom, že dynamické namáhání jako takové je obtížně definovatelné, protože jde často o namáhání amplitudově i časově nepravidelné, což do průběhu neharmonické, popřípadě komplikované dalšími vlivy. Napodobit takovéto namáhání zkušební metodou je vždy velice nesnadné [4].

Zajímavé výsledky v tomto směru zjistili odborníci, kteří se tímto problémem zabývali. Pro ověření odolnosti vybraných lepidel vůči dynamickému namáhání zvolili zkušební metodu, jež spočívá v přípravě speciálních zkušebních těles a jejich namáhání oboustranným průhybem při stálé frekvenci 50 Hz a různých amplitudách, od 0,5 do 0,05 mm. Pro každou amplitudu byl určen počet cyklů, při nichž se spoj porušil. Výsledkem zkoušky pak byly únavové křivky lepidel, znázorňující závislost mezi amplitudou a počtem cyklů do poruchy stroje [4].

Podle průběhu únavových křivek je možné zkoušená lepidla rozdělit do tří skupin:

1. do první lze zařadit lepidla se strmou křivkou, charakterizující malou závislost na velikosti amplitudy. Tato lepidla jsou vhodná pro občasné dynamické namáhání s nízkou frekvencí kmitů.
2. lepidla druhé skupiny se vyznačují malou odolností při vyšších amplitudách. Při malých amplitudách odolávají poměrně dobře a proto budou použitelná pro spoj zatěžovaný jen nevýrazným chvěním
3. lepidla třetí skupiny se vyznačují obdobným průběhem únavové křivky jako lepidla skupiny druhé, avšak s výrazně vyšším počtem cyklů, takže lze jejich odolnost vůči dynamickému namáhání považovat za nejlepší.

Z těchto zkoušek lze vyvodit, že pro dynamicky namáhané spoje konstrukčních materiálů, například kovů a laminátů, vyhovují reaktivní lepidla poskytující tvrdý, houževnatý film, který nepodléhá tečení. Takovými lepidly jsou především lepidla polyuretanová, epoxidová tvrzená aminoamidy, dále lepidla fenolická, lepidla modifikována nitrilkaučukem podobně.

#### **2.4.2 Tepelná odolnost**

Tepelné namáhání lepeného spoje má být definováno údaji o minimální a maximální teplotě, časovým průběhem namáhání a spodními limity mechanických vlastností za daných podmínek. Tepelně odolné spoje poskytuje vedle anorganických pojiv a silikonových pryskyřic většina termoreaktivních lepidel tvrzených za vyšší teploty. Z běžného sortimentu mezi nejodolnější patří lepidla fenol-rezorcinolová,

polyuretanová a epoxidová. Tepelnou odolnost lepidel zvyšují dále přídavky minerálních plniv, například azbestu a kovových prachů [4].

### **2.4.3 Odolnost vůči vodě a prachu**

Většina lepidel na bázi přírodních surovin a lineárních polymerů rozpustných nebo dispergovatelných ve vodě poskytuje spoje neodolné, nebo málo odolné vůči vodě a vlhkosti. Dobrou odolnost vůči vodě a vlhkosti se vyznačují po vytvrzení lepidla fenolická, fenol-rezolcinolová a podobné, a to i tehdy, je-li jejich aplikační formou vodný roztok. Vynikající odolností se dále vyznačují lepidla polyuretanová, samovulkanizující lepidla ze syntetických kaučuků a z oblasti lineárních polymerů.

### **2.4.4 Chemická odolnost**

Při výběru lepidla je nutné, kromě jiného, uvážit i možnosti chemického ovlivnění spoje agresivními výpary, nebo kapalinami, ať už cestou difúze přes některých adherendů, nebo z okraje spáry, takový případ je třeba řešit individuálně na základě technických údajů o složení a odolnosti filmotvorného polymeru obsaženého v lepidle.

## **2.5 Konstrukce lepených spojů**

Lepené spoje jsou mechanicky namáhány v tahu, tlaku, smyku, odlupování, rázové pevnosti, v kroucení a podobně. Ne všem těmto vlivům lepidla dobře odolávají. Proto musí být konstrukce upraveny tak, aby byl spoj namáhán co nejméně v odlupování a kroucení, na němž je většina lepidel velmi citlivá. Namáhání se v takových případech soustřeďuje jen do určitých míst spoje, což vede k lokálnímu přetížení a poškození filmu lepidla. Také spoje čelních ploch, tzv. spoje na tupo, namáhané převážně v tahu nebo v lámání, je možno volit jen tehdy, jsou-li spojované plochy dostatečně velké.

Optimálních hodnot mechanické pevnosti se za daných podmínek dosahuje použitím spojů s uměle zvětšenou spárou, zejména u spojů jednostranně a oboustranně přeplátovaných, u spojů s jednostrannými nebo oboustrannými příložkami, u spojů čelních ploch s tzv. spárou tvaru V, u spojů násuvných podobně. Úpravami se zvětší

geometrický povrch dotykových ploch a dosáhne se takového rozvedení sil, že spoj je zatěžován převážně ve smyku [4].

Z technologického hlediska je při konstrukci lepených spojů nutné dbát i na to, aby dotykové plochy lepených materiálů byly co nejméně členité a po slepení nevyžadovaly další úpravy. Lepení souboru by mělo probíhat vždy v jedné operaci, aby nevznikly časové ztráty a aby předchozí spoj nebyl dodatečně zatěžován vyšší teplotou a tlakem.

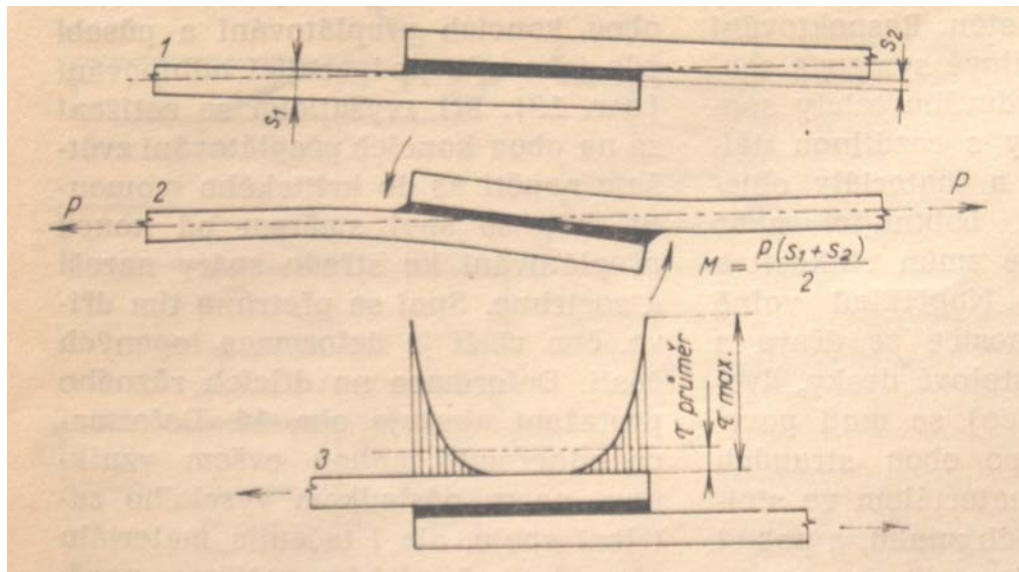
Lepenou konstrukci je třeba rozdělit na části co nejméně složité a vhodné na lepení. Při lepení je třeba dodržovat technologický předpis. Třeba se vyhnout dvojitému lepení. Není vhodné lepit dílce, které jsou při montáži vystavené odlupujícím silám. Na lepení se nehodí dílce s velkým a složitým zakřivením. Mechanické namáhání musí být rozděleno rovnoměrně a nesoustředilo se pouze v místě spoje. Spoj musí být namáhán v tahu a smyku a minimálně namáhán v odlupování. Plocha spoje musí být dostatečně velká a napětí v celém lepeném spoji musí být rovnoměrně rozdělené. Lepené materiály by měli mít v místě spoje stejné anebo podobné koeficienty roztažnosti. Nejběžnější jsou jednoduše přeplátované spoje. Lepších výsledků se dosahuje u tenčích adherendů. Po lepení se můžou v místě spoje vrtat otvory a například nýtovat. Lepidlo si konstruktér vybírá dle požadované pevnosti spojů, dle technologie zpracování lepidla a samozřejmě podle ceny. Pro většinu spojů platí, že pevnost spojů ve smyku není příliš závislá v rozmezí tloušťky vrstvy lepidla 0,05 - 0,4 mm. Pevnost spojů ve smyku zpravidla stoupá s pevností adherendu.

### **2.5.1 Velkoplošné spoje**

Nejjednodušším typem lepeného spoje je spoj velkoplošný. Je častý hlavně při povrchových úpravách deskových materiálů a sendvičových konstrukcí za pomoci nábytkových krytin (laminátů), fólií, tapet, plechů a podobně. Respektování požadavků materiálové symetrie souboru je nutné, především tehdy, spojují-li se materiály s rozdílnou délkovou roztažností a materiály objemově nestálé, tj. bobtnající nebo smršťující se podle změn vlhkosti a teploty prostředí. Velkoplošné spoje se dále využívají při výrobě vícevrstvých materiálů, například laminátů, sklo laminátů, kombinované lamináty z kovů a plastů [4].

## 2.5.2 Přeplátované spoje

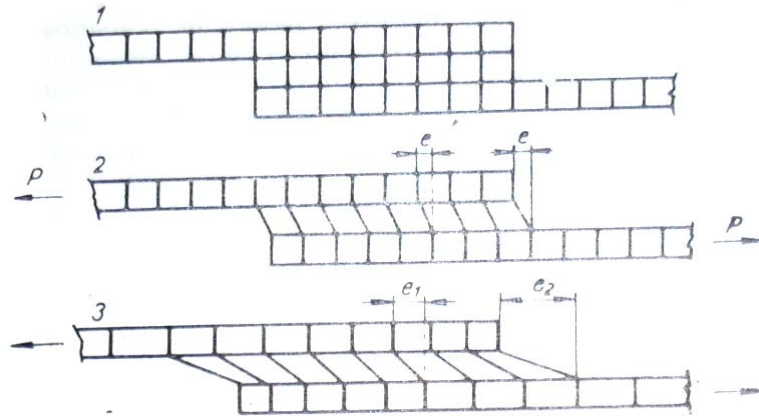
Spoje jednostranně přeplátované jsou rovněž plošné spoje a vyžívají se zejména při lepení tenkých materiálů, například lepení plechů. V těchto případech lze totiž zanedbat vliv ohybového momentu, vznikající následkem excentricky zatíženého spoje u souborů tlustších adherendů. U jednostranně přeplátovaných spojů se soustřeďuje takové napětí především na obou koncích přeplátování a působí zde jako síla podporující odlupování [4].



Obr. 2.1 Deformace jednostranně přeplátovaného spoje [4]

Při zvyšujícím se zatížení se na obou koncích přeplátování zvětšuje až do kritického momentu, kdy se spoj směrem od konců ke středu spáry naruší a roztrhne. Spoj se přetrhne tím dříve, čím větší je deformace lepených částí. Deformace adherendů mohou ovšem vzniknout nejen následkem vysokého zatížení spoje, ale i tečením materiálu při relativně nízkém zatížení, například lepením tvrdých termoplastických hmot (PVC, PMMA aj.). Na vzniku kritického napětí se podílejí i další činitele například jakost filmu lepidla, teplotní délková roztažnost obou adherendů. Film lepidla, který překonává rozdíly protažení mezi jednotlivými lepenými částmi, je při tom zatížen smykovými silami, které jsou nejvyšší na obou koncích přeplátování a nejnižší uprostřed. Protažení adherendů a následná deformace lepeného souboru jsou tedy u jednostranně přeplátovaných spojů příčinou toho, že je dosahováno menších pevností

v momentu zlomu, než jakých by se dosáhlo u materiálu absolutně tuhých, namáhaných výhradně ve smyku.



**Obr 2.2 Možnost protažení adherendů a lepidla [4]**

Délka přeplátování závisí na druhu materiálů a tloušťce lepených dílců. Matematické vyjádření je vždy složité a nepřesné, protože nemůže podchytit všechny děje souvisící například s deformacemi spáry. V praxi je však možné řídit se pravidlem, že délka přeplátování má být nejméně pětinasobkem tloušťky lepených dílců. Nosnost, vyjadřující maximální celkové zatížení spoje stoupá se zvětšující se délkou přeplátování. Pevnost ve smyku vyjadřující přepočet na jednotku lepené plochy naopak se zvětšující se délkou přeplátování klesá. Podobný vztah platí i pro šířku přeplátování. Se zvětšováním šířky spoje vzrůstá pouze jeho celková nosnost. Kladný vliv větší tloušťky a tedy i tuhosti adherendů na pevnost přeplátovaných spojů ve smyku vychází z předpokladu vyšší tvarové stálosti a tím i nižších deformací vedoucích k namáhání spoje v odlupování [4].

### **2.5.3 Ochrana lepených spojů vůči stárnutí, povětrnosti, vyšší teplotě a chemickým vlivům**

Z konstrukčního hlediska se snažíme upravit spoj tak, aby byl mimo přímý dosah uvedených vlivů. Není-li to možné, je třeba zvětšit dotykové plochy, například dvojnásobnou délkou přeplátování, nebo chránit čelní plochy spoje zvláštní lištou, nebo odolnou nátěrovou hmotou. Tak je možné účinky koroze oddálit.

## 2.5.4 Příprava povrchů na lepení

Předběžné úpravy lepených povrchů jsou pro dosažení maximální pevnosti spoje velmi důležité. Patří sem úkony fyzikální i chemické a v podstatě jde o vyrovnání povrchu a odstraňování nečistot a korozních zplodin, ale i vnitřního pnutí a zvýšení adhezních vlastností. Pevnost lepených spojů je určena přilnavostí použitého lepidla a adhezí mezi lepidlem a povrchem materiálu. Adhezní síly jsou ovlivněny elektrostatickými a chemickými efekty a jako takové velmi závisí na přípravě povrchu. Dobré přilnavosti lze dosáhnout pouze vhodnou přípravou povrchů, zatímco špatná nebo žádná příprava způsobí, že lepený spoj je slabší a způsobí nakonec poruchu. Příprava materiálů na lepení se skládá z dělení, obrábění, čištění a odmaštění a slícování lepených dílců. Cílem přípravy povrchu je dosáhnout maximální adhezi a zabránit podoxidování lepidla. Povrchová úprava adherendu je jednou z nejdůležitějších operací při lepení. Navrhuje se dle druhu a stavu lepeného materiálu, podle druhu použitého lepidla, podle provozních podmínek a životnosti spoje, dle únosnosti výrobních nákladů apod. Na čištění a odmašťování se používají alkalické odmašťovadla, tamponování rozpouštědly a odmašťování v parách rozpouštědla. Pro odmašťování a čištění lepených materiálů se nedoporučuje používat laková rozpouštědla a benzin. Vhodná rozpouštědla jsou např. aceton, MEK, technický líh, toluen, éter aj. Poměrně často se používá moření materiálů v různých kyselinách. V případě moření se obvykle dosahuje vyšší pevnost spojů, než jako při mechanické úpravě povrchu. Z hlediska kvality lepených spojů je důležitá také drsnost povrchu. K těmto úpravám náleží i úprava vlhkosti nasákových materiálů. Všechny druhy povrchových úprav se nemusí provádět současně. Záleží na tom, jaké materiály se spojují, jaké se požadují vlastnosti spoje a jaké prostředky jsou k dispozici. Povrchovou úpravu adherendů s dobrými adhezními vlastnostmi (například kovů) je možné omezit na broušení a odmaštění. V takovém případě však jde o tzv. nouzovou povrchovou úpravu, kterou je možné zajistit jen zlomek dosažitelných hodnot mechanické pevnosti stroje. Rozdíly v pevnostech spojů, při různých provedeních povrchových úprav, jsou zvláště výrazné při lepení kovů. Je dobrou praxí začít s lepením pokud možno co nejdříve po dokončení přípravy povrchu, dokud na něj ještě nepřiměřeně nepůsobilo vnější okolí svými vlivy. Povrchy se připravují jednou z následujících přípravných procedur. Pevnost lepených spojů až z 80 procent závisí na úpravě povrchu před lepením [4].

Procedury jsou uvedeny podle vzrůstající efektivity s ohledem na pevnost vytvořeného spoje:

- očištění a odmaštění - špína, mastnota a barva brání dobré přilnavosti
- mechanické obroušení středně hrubozrnným brusným papírem - zvyšuje a aktivuje kontaktní povrchy částí, které mají být spojeny
- chemická příprava povrchu - chemické naleptání značně zlepšuje afinitu lepených povrchů k lepidlu, vedle chemického naleptání je také možná aktivace povrchu plamenem nebo koronovým výbojem.

V případě rozpouštědlového lepení chemické naleptání materiálu odpadá.

### **2.5.5 Nános lepidla**

Jedním z předpokladů vzniku soudržného spoje je i rovnoměrný, přiměřeně tlustý film lepidla ve spáře. Závisí na optimálním nánosu lepidla dané jakosti pro určité vlastnosti obou lepených dílců a vhodnou technologii nanášení lepidla, fixace spoje a způsobu vytvrzování.

Pro jakost lepidla je nejdůležitější obsah sušiny, popřípadě filmotvorného polymeru. Vysoká viskozita tekutého lepidla ještě nemusí být zárukou, že se ve spáře vytvoří přiměřeně tlustý film lepidla. Její hodnota nezávisí jen na obsahu filmotvorné látky, ale také na stupni jeho polymerace [8].

Limitujícím činitelem pro nános lepidla je pórovitost, tloušťka a struktura adherendů. Při nalepování tenkých porézních materiálů, například tkaniny, dýh, papíru a dýhovacích fólií, u nichž není možné vyloučit prosáknutí lepidla na lícovou stranu adherendů, musí být nános vždy co nejúspornější, avšak natolik dostatečný, aby stačil k smáčení obou kontaktních ploch. Při vzájemném lepení kompaktních materiálů s většími nerovnostmi povrchu můžeme nanášet relativně tlustší vrstvu lepidla [4].

Nános lepidla má být vždy tak tlustý, aby v souladu s ostatními činiteli lepení umožňoval tloušťky 0,05 až 0,25 milimetrů ztuhlého filmu ve spáře.



Hrozí li nebezpečí, že by lepidlo mohlo být v počáteční fázi tvrzení ze spáry vytlačeno (u aktivních lepidel je tvrzení provázáno řidnutím směsí), vkládají se pro zajištění tloušťky do spáry distanční dráty průměru 0,05 až 0,2 milimetrů. Stejného efektu se dosáhne i příměsí 1 až 3 % tříděných korundových zrn do lepicí směsi. Při použití lepivých tmelů je nános i tloušťka filmu větší.

Optimální dávkování a rozložení lepidla ve spáře umožňují oboustranné lepicí fólie s vrstvou reaktivních nebo jiných lepidel fixovaných na velmi tenkém porézním nosiči. Způsob nanášení může být usměrněn i požadovanou tuhostí spoje. S takovým případem se setkáme například při laminaci měkkých pěnových hmot na bázi polyuretanů textilními potahovými materiály. Aby se dosáhlo odpovídající měkkosti a ohebnosti spoje, nanáší se lepidlo na dotykové plochy adherendů v podobě pravidelně rozmístěných bodů nebo tenkých proužků [4].

V ostatních případech je celoplošný nános lepidla samozřejmý, protože tlakový režim sám o sobě nedokáže lepidlo po povrchu rovnoměrně rozetřít. Oboustranný nános lepidla, pokud jsou k tomu podmínky, dává vždy větší jistotu, že budou smáčeny oba povrchy, než nános jednostranný.

### **2.5.6 Doba otevřeného a uzavřeného sestavení spoje**

Dobou otevřeného sestavení spoje je časový interval, počínající okamžikem nanesení tekutého lepidla a končící přiložením druhé lepené plochy, tj. uzavřením spoje. Závisí na složení lepidla, jeho reaktivitě a nánosu, dále na teplotě okolí a porózitě podkladu. Působením těchto vlivů se doba otevřeného sestavení spoje buď zkracuje, nebo prodlužuje. U lepidel rozpouštědlových a disperzních je možné například přidavkem nízkovroucích rozpouštědel dobu otevřeného sestavení zkrátit a naopak přidavkem výševroucích rozpouštědel prodloužit. V časovém úseku otevřeného sestavení spoje je možné nános lepidla předběžně ovlivnit, zejména předsušením za zvýšené teploty. Doba otevřeného sestavení spoje však nesmí překročit limit pracovní životnosti lepidla. Některé disperze a kontaktní pojiva dovolují otevřené sestavení spoje až 30 minut. U reaktivních dvousložkových lepidel je tato doba podstatně kratší [4].

Při aplikaci lepidel s obsahem vody na porézních adherendech, například na dřevě, umožňuje správné využití doby otevřeného sestavení z valné části odstranit nežádoucí zvlhčení podkladu odpařením rozpouštědla.

Od okamžiku, kdy obě lepené plochy byly na sebe přiloženy, až do okamžiku zavedení tlaku, probíhá doba uzavřeného sestavení spoje. Musí být vždy co nejkratší, aby lepidlo neztuhlo ještě před vyvozením tlaku na soubor. Do této doby zpravidla patří jen manipulační čas potřebný k úpravě poloha a k fixaci dílců, dále čas potřebný k přenesení souboru do přípravku či lisu a čas potřebný k vyvození tlaku. V této fázi není již možné kladně ovlivnit jakost spoje, naopak ztuhne-li lepidlo během doby uzavřeného sestavení, je spoj obvykle nesoudržný.

### **2.5.7 Vliv fixace a tlaku**

Důležitý úkonem před vyvozením tlaku na spoj je zajištění (fixace) vzájemné polohy lepených dílců. Fixace je nutná, protože některá lepidla, zejména reaktivní, v první fázi vytvrzování nejprve zřídnou, takže nezajištěné dílce mohou snadno změnit polohu. Polohu posunutých dílců není vždy možné dodatečně upravovat, protože u lepidel s vysokou kohezí se okamžitě strhává nanesený film [4].

Účelem vyvození tlaku na spoj je především stejnoměrné rozvrstvení lepila ve spáře a u poddajných hmot (například u měkkého dřeva) i vyrovnání menších nerovností povrchu, které by vadily souběžnosti spojovacích ploch. Dalším účelem je sledování hladiny lepidla mezi oběma povrchy do doby, dokud lepidlo ve spáře neztuhne.

Tlak musí zásadně působit kolmo na lepené plochy a být přiměřený tlakové pevnosti podkladu a viskozitě lepidla. Například při nalepování laminátů, plechů nebo fólií na hmoty s pěnovou nebo voštinovou strukturou nesmí tlak překročit 0,15 až 0,20 MPa, protože by mohlo dojít buď k zborcení lehčené hmoty, anebo k protlačení její struktury na povrchu krycího materiálu. Naopak při lepení kompaktních materiálů může tlak dosáhnout až 2,0 MPa i více, zejména při zpracování lepidel a pojiv s vysokou konzistencí (například lepidel tavných nebo reaktivních lepících fólií) [4].

Lepidla, která v počáteční fázi reakce nejprve ztrácejí viskozitu, například lepidla epoxidová, mohou být vystavena jen velmi nízkých tlaků v rozmezí 0,02 až 0,1 MPa [4].

Je tedy třeba pracovat vždy tak, aby lepidlo nebylo působením tlaku ze spáry zcela vytlačeno. Krůpějovité vytékání lepidla po celém odvodu spáry je při správném nánosu nejlepším dokladem toho, že se ve spoji vytvořil rovnoměrně rozložený adhezní film. Působení tlaku na spoj je časově vymezenou dobou potřebnou ke ztuhnutí lepidla, někdy včetně doby potřebné k ochlazení souboru na normální teplotu.

### **2.5.8 Tuhnutí lepidla ve spoji**

Má-li se ve spoji vytvořit film lepidla schopný adheze, musí lepidlo přejít z fáze tekuté do fáze tuhé. Způsob jakým se to stane, charakterizuje jednotlivé skupiny lepidel:

- lepidla roztoková a disperzní, která tuhnou následkem vsakování a odtěkní vody, nebo organického rozpouštědla
- lepidla reaktivní, jež tuhnou, nebo se vytvrzují následkem chemické reakce vyvolané ve filmotvorné složce různými vlivy (například zvýšením teploty, přidávkem tvrdidla, kontaktem s kovy)
- lepidla tavná a natavitelná, tuhnoucí po předchozím roztavení ochlazením na normální teplotu

Rychlost tuhnutí lepidel ve spoji podle uváděných zásad může být ovlivněna jak teplotou okolí, tak uměle připraveným teplotním režimem. Rozlišujeme proto:

- Lepení za normální teploty od +15 do +25 °C
- Lepení za tepla od 30 do 100 °C
- Lepení za horka nad 100 °C

Při lepení za normální teploty je třeba zvlášť dobře sledovat spodní teplotní hranici, protože při nižších teplotách, než je doporučeno, rozpouštědlová lepidla jen pomalu vysychají a u reaktivních lepidel se zpomalují, až zastavují reakce vedoucí k vytvrzení. Limitujícími činiteli při stanovení vyšších teplot k urychlenému tuhnutí lepidla jsou

tepelná odolnost a rozdíl tepelné délkové roztažnosti obou adherendů. Tepelnou odolnost jednotlivých druhů lepidel udává zpravidla výrobce. Také je potřeba respektovat, že maximální vytvrzení lepidla neznamena vždy maximální pevnost spoje. Například u močovinoformaldehydových, glutinových a škrobových lepidel může následkem přerušení za zvýšené teploty křehnout film lepidla a snížit se pevnost spoje [4].

Stav filmu ve spoji se nejrychleji prověří zkouškou tuhosti, popřípadě rozpustnosti krůpěje přetoku na okraji spáry.

### **2.5.9 Bezpečnostní opatření**

Z bezpečnostních důvodů pracovníka je vhodné, aby jsi, před začátkem práce s lepidlem, vždy prostudovat bezpečnostní údaje pro použití lepidla a chemikálie, které se používají na očištění povrchu! Je to z bezpečnostního hlediska, protože mnohé mohou být i hořlavé nebo zdraví škodlivé. Při použití chemikálií by se proto mělo pracovat opatrně, postupovat podle návodu k použití a dodržovat bezpečnostní opatření daných výrobcem. Taky je vhodné, mimo jiné z finančního hlediska, před aplikaci lepených spojů ve větším měřítku provést praktické zkoušky odpovídající skutečnému použití [8].

### **2.6 Statická zkouška tahem**

Statická zkouška tahem za teploty okolí je jednou ze základních mechanických zkoušek. Spočívá ve vyvolání jednoosé tahové napjatosti zkušební vzorku. Zkušební tyče se v jejím průběhu upínají do trhacího stroje, který vyvozuje statické, spojitě se zvyšující zatížení až do lomu vzorku. Součástí přístroje je zařízení na regulaci a měření průběhu zatěžující síly a vyvozené deformace a na záznam jejich vzájemné závislosti. Vzniklý tzv. „pracovní diagram“ (diagram napětí – prodloužení, smluvní diagram) potom dává charakteristický průběh pevnosti. Při zkoušení pevnosti kovů, plastů nebo jiných materiálů se zkouška provádí z normovanými zkušebními tyčemi kde známe jejich délku a plochu průřezu. Jestliže se ale zkouší pevnost lepeného spoje, je důležitá pouze plocha lepeného spoje [3].

### 2.6.1 Průběh zkoušky

Po nastavení rozsahu zátěžné síly a upnutí vzorku následuje samotné zatěžování. Vnější statická síla  $F$  vyvodí po zkušební délce tyče zaznamenávanou hodnotu absolutního prodloužení  $\Delta L$ , respektive relativního prodloužení  $\varepsilon = \Delta L/L_0$ , kde  $L_0$  je původní délka před zatěžováním [3].

V první etapě deformace nárůst zatížení způsobuje prodloužení **elastické** – vratné ( $\Delta L_e$ ) o velikosti přímo úměrné velikosti působící síly. Po překročení určité hodnoty zatěžující síly se zkušební tyč prodlužuje **plasticky** – nevratně ( $\Delta L_p$ ) a celkové prodloužení je tvořeno součtem  $\Delta L = \Delta L_e + \Delta L_p$ . Dalším zvyšováním napětí se urychluje nárůst deformace až po hodnotu zatížení, kdy se rovnoměrná deformace změní v lokální [3].

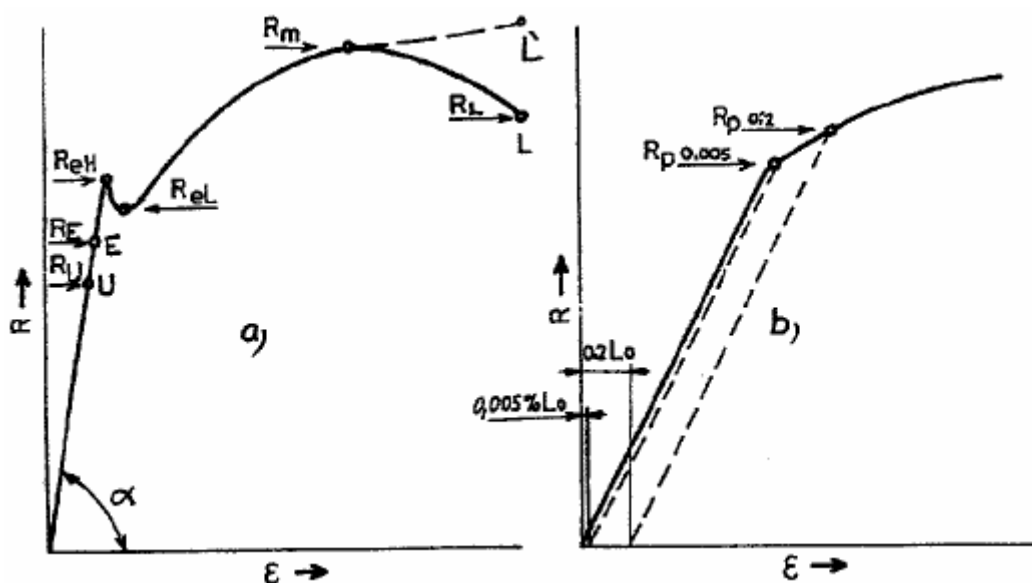
Průběh křivky tahového diagramu, jako odraz deformačního chování zkoušeného materiálu je výrazně ovlivněn řadou vnitřních i vnějších faktorů. Především záleží na tom o jaký materiál se jedná, například kovy s krychlovou, plošně středěnou mřížkou, slitiny s intenzivním zpevňováním nebo platy [3].

Chování materiálů v oblasti plastických deformací a jeho pevností i plastické vlastnosti jsou značně ovlivněny stavem napjatosti. Změnou tvaru, popřípadě velikostí zkušebního tělesa dostáváme jiné rozdělení složek napětí. Vruby a náhle změny tvaru způsobují místní koncentraci napětí a tedy i koncentraci deformace [3].

### 2.6.2 Vyhodnocení zkoušky

Na vyloučení vlivu rozměrů zkušební vzorku na velikost sledovaných veličin se hodnocení mechanických vlastností provádí na závislosti napětí – poměrná deformace. Stanovují se ze závislosti z okamžitých hodnot síly a prodloužení, vztaženým k hodnotám před deformací [3].

Pracovní diagram zkoušky tak znázorňuje průběh odporu zkouškového materiálu proti jeho deformaci a porušení má proto charakteristický tvar pro každý materiál jiný.



Obr. 3.2. Různé typy diagramů tahové zkoušky s vyznačenými mezními hodnotami [3]

### 2.6.3 Pevnostní charakteristiky

Mají především význam pro hodnocení „konstrukčních“ vlastností materiálů a jsou rozhodující pro pevnostní výpočet součástí.

**Mez úměrnosti  $R_U$**  – udává napětí, pro které je relativní prodloužení přímo úměrné napětí podle Hookeova zákona  $R_U = E \cdot \epsilon$ .

Její hodnota tak ohraničuje přímkovou část elastické deformace materiálu. Směrnice přímky diagramu (tangenta úhlu  $\alpha$ ) odpovídá modulu pružnosti  $E$  a může při použití průtahoměru pro záznam se zvětšením řádově několikanásobně vyšším, než u běžných zařízení, sloužit k jeho stanovování [3].

**Mez pružnosti  $R_E$**  – představuje limitní zatížení, které nevyvolá v materiálu teoreticky žádné plastické deformace. Zkušební tyč po odlehčení nabývá původních rozměrů. Jednoznačná fyzikální mez se u polykrystalických látek téměř nevyskytuje. Proto se k reprodukovatelnému zachycení napětí, způsobujícího první plastické deformace, používá smluvní (technická) mez pružnosti  $R_{P0,005}$  jako napětí pro trvalou deformaci zkušební tyče 0,005 % původní měřené délky před ztěžováním. Zjišťování uvedené hodnoty je značně náročné na přesnost měřicích zařízení a zdlouhavé. Jako běžná

hodnota, charakterizující začátek rozvoje trvalé deformace se proto obvykle používá následující materiálová charakteristika [3].

**Mez kluzu v tahu  $R_e$**  – na příklad u měkkých uhlíkových ocelí je možná odečíst přímo z diagramu. Přechod do oblasti výrazných plastických deformací je u těchto materiálů provázen rychlejším nárůstem prodloužení při stagnaci, popřípadě poklesu napětí. Ve zbývajících případech se mez kluzu definuje smluvně jako napětí, které vyvolá určitou hodnotu trvalé deformace, nejčastěji 0,2 % původní měřené délky. **Smluvní mez kluzu** se pak označuje  **$R_{p0,2}$**  [3].

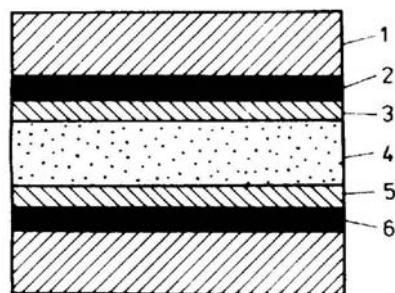
**Mez pevnosti  $R_m$**  – je opět smluvní hodnota napětí, definována jako podíl maximální zatěžující síly a původního průřezu. Je vždy až na vrcholu křivky a odpovídá maximálnímu napětí. Tato hodnota nesmí být překročena, protože po překročení je daný spoj znehodnocený [3].

### **3. Rozbor vlivu použitého lepidla a materiálů**

Lepení se velmi rozšířilo nejen v průmyslových oborech, ale i při individuálních pracích, neboť lepidla umožňují spojování materiálů bez nároku na vybavení dílny. I když lze některými typy lepidel lepit širokou škálu materiálů nelze je přesto považovat za universální. Universální lepidla neexistují. Jen s určitými druhy lepidel, na konkrétních materiálech a za určitých pracovních podmínek je možné získat spoje s optimálními vlastnostmi v určitém směru.

#### **3.1 Struktura lepeného spoje**

Z hlediska vnitřní struktury lze každý konstrukčně pevný a dostatečně odolný lepený spoj dvou základních materiálů považovat za komplex tří hlavních vrstev a dvou mikrovrstev [6].



*Obr. 3.1. Struktura lepeného spoje [6]*

Jsou to:

- 1, adherend (základní materiál)
- 2, adhezní zóna
- 3, přechodová adhezní zóna
- 4, kohezní zóna
- 5, přechodová kohezní zóna
- 6, adhezní zóna



## 3.2 Základní pojmy adheze a koheze

Adhezi lze definovat jako sílu přilnavosti, tj. mezimolekulární přitažlivé chemické a fyzikální síly na styčných plochách v nerovnostech a pórech spojovaných materiálů, které společně označují jako síly Van der Waalsovy. Van der Waalsovy síly jsou velmi slabé přitažlivé síly, které působí mezi nepolárními molekulami a jsou důsledkem vzniku okamžitého elektrického dipólu. Dosah těchto mezimolekulárních sil je v podstatě nižší než hloubka drsnosti mechanicky opracovaných ploch. Je tedy nutné, aby lepidlo vniklo do těchto povrchových nerovností a smáčelo dokonale obě plochy [4].

Přitažlivá adheze je závislá na dobré snášivosti lepeného pevného povrchu tekutým lepidlem. Snášivost lepeného povrchu tekutým lepidlem z okrajovým úhlem, který svírá okraj kapky lepidla se základním materiálem a tedy s povrchovou energií obou látek [6].

Má-li lepidlo smáčet pevný povrch látky, musí být jeho povrchová energie menší, než je kritická povrchová energie lepené látky. Nejvyšší povrchovou energii z kapalin má voda. Jestliže voda bude smáčet povrch materiálu, lze z toho usoudit, že materiál bude smáčen i jinými kapalinami (lepidly). Snášivost lepených povrchů můžeme hodnotit kapkovou metodou [4].

Koheze je teoreticky definována jako stav, ve kterém jsou částice jednoduché látky drženy pohromadě valenčními a mezimolekulárními silami (van der Waalsovo přitahování) [4].

Látky s tekutými krystaly se vyznačují vysokým stupněm strukturního uspořádání. Epoxidové pryskyřice s tekutými krystaly, jestliže se v tomto stavu vytvrzují (fotochemicky), vykazují zřetelně vyšší kohezní a adhezní pevnost spoje ve srovnání s izotropní strukturou. Za předpokladu, že je to spojeno s vyšším stupněm uspořádání molekul v blízkosti rozhraní mezi spojovaným dílcem a lepidlem, mohlo by to vést k novému rozvoji výzkumu v oblasti adheze [4].

### 3.3 Rozbor nejčastějších příčin poruch lepených spojů

Lepený spoj je velice náročný systém a jeho kvality či poruchovost záleží na mnoha faktorech. Základní poruchy lepených spojů se dělí na adhezní a kohezní. Z praktických zkušeností vyplývá, že při správném použití kvalitních konstrukčních lepidel se spoj obvykle poruší uvnitř vrstvy lepidla – kohezní porucha. Dojde-li k odtržení spoje mezi vrstvou lepidla a lepeným materiálem, jde o adhezní poruchu [5].

*Nízká pevnost, která vyplývá z toho že:*

- jde o nepravý spoj, jehož příčinou je tenká vazbová vrstva. Tyto příčiny jsou v podstatě [5]:
  - nesprávné technologii lepení (tenké vrstvy lepidla, neodmaštění, nesprávné nanášení, nízká teplota při tavných lepidlech a podobně)
  - v nesprávném výběru materiálu (nedostatečné smáčlivosti adherendů, vzájemné nevhodné mechanické vlastnosti, negativní reakce mezi adherendem a lepidlem a podobně)
  
- ve spoji vzniká velká koncentrace napětí, příčinou jsou [5]:
  - lepidla (nevhodný tlak při utvrzování, nesprávná fixace a podobně)
  - materiály, kterými jsou jednotlivé složky spojené, mají skryté chyby (dutiny, praskliny, vnitřní napětí, nevhodné krystalické složení, únava materiálu, nedostatečné vytvrzení lepidla, materiál s nízkou základní pevností pro dané namáhání)
  - nerovnost lepené vrstvy, kterou může zapříčinit špatná fixace při vytvrzování, špatné nanášení, vysoká viskozita lepidla, nerovnoměrná zrnitost plniva a podobně)
  - nesprávná konstrukce spoje, nerovnoměrný poměr plochy spoje k tloušťce vrstvy lepidla, nevhodný typ stroje pro dané namáhání a podobně)
  
- nevhodná tloušťka vrstva lepidla způsobená vysokou nebo velmi nízkou viskozitou lepidla

*Nízká odolnost složek spoje proti prostředí [5]:*

- tj. ztráta pevnosti vlivem podmínek mimo spoj. Její příčinou je většinou proniknutí agresivních látek do lepeného spoje, nevhodný výběr materiálu spoje pro dané prostředí, vlivy způsobující stárnutí, nedokonalá nebo žádná povrchová úprava spoje, rozpustnost, koroze, nízká tepelná odolnost složek spoje, křehnutí za nízkých teplot a podobně.

*Nízká životnost, tj. ztráta pevnosti působením příčin ve spoji [5]:*

- tyto chyby ve spoji vznikají zejména při technologii lepení, nezreagované zbytky tvrdidel vyvolají korozi adherendů nebo migrace z povrchu lepidla zapříčiní vznik tenké vrstvy již v hotovém spoji
- vlivy vyvolané nevhodným výběrem materiálu
- některé parametry dynamického namáhání (vysoká frekvence kmitů, rezonance, nerovnoměrnost) vyvolávají předčasnou únavu spoje a jeho destrukci

*Chyby vzhled (jsou především důležité, když lepení je součástí procesu dokončení výrobku) [5]:*

- přetečení vytvrzeného lepidla (nevyhnutelnost dalšího poracování)
- nevhodná barva lepidla proti ostatním materiálům (tento faktor se může někdy výhodně využít)

*Funkční nedostatky, tj. chyby spoje, které ovlivňují funkčnost výrobku [5]:*

- elektroizolační vlastnosti lepidla (tam, kde nemá narušit vodivost)
- snížení průtoku, zejména ve spojených potrubích
- nevhodné umístění spoje v celkové konstrukci

*Jiné nedostatky* [5]:

- citlivost na náhlé změny teploty, zejména když se lep substráty s vysokými rozdíly v tepelné roztažnosti
- složitá oprava poškozeného spoje nebo jeho části
- nedostatky lidského faktoru

### 3.4 Pevnost lepených spojů

Nosnost a v některých případech i deformace lepených konstrukcí závisí od mechanických vlastností slepu a napěťovo-deformačního stavu lepeného spoje. Napěťovo-deformační stav lepených spojů je obvykle nerovnoměrný a lom spoje začíná v zóně, ve které napětí dosahují pro daný spoj kritické hodnoty. Z tohoto důvodu experimentální hodnocení pevnosti slepu ve většině případů vede k určení lomového namáhání lepeného spoje anebo určení „střední pevnosti“ tím, že se lomové namáhání dělí lepenou plochou. [6]

Standartní vzorec pro stanovení smykové pevnosti v tahu:

$$t_b = F_{\max}/A \text{ (MPa)} \quad (3.4.1.)$$

$$A=b.l \quad (3.4.2.)$$

b = šířka přeplátovaného spoje

l = délka přeplátovaného spoje

Pevnost v odlupování je daná vztahem:

$$s_{wa} = F_A/b \text{ (N.mm}^{-1}\text{)} \quad (3.4.3.)$$

dělíme ji na počáteční (absolutní) pevnost  $s_{wa}$  a střední pevnost  $s_{ws}$ , která je dána vztahem

$$s_{ws} = F_S/b \text{ (N.mm}^{-1}\text{)} \quad (3.4.4.)$$

kde  $F_A$  je maximální síla,  $F_S$  je průměrná síla,  $b$  je šířka lepeného spoje

Dle teorie lepení lepené spoje nejméně odolávají namáhání v odlupování a ohybovému namáhání. V případě konstrukčních spojů je důležité se vyvarovat ohybovému namáhání. Ve všeobecnosti se doporučuje při lepení volit tenké vrstvy lepidla, které vykazují kvalitnější pevnostní vlastnosti. Lepené spoje dosahují vysokých pevností ve smyku, tahu (tlaku) a dynamickému (cyklickému) namáhání (v případě nízkocyklové a vysokocyklové únavy materiálů překonávají lepené spoje svarové spoje), které jsou úspěšně již dlouhá léta aplikována v lepených konstrukčních spojih zejména v leteckém průmyslu. [6]

Výsledná pevnost spoje je ovlivňována mnoha faktory. Při výpočtu je třeba zohlednit nejen velikost zatížení silou nebo momentem, ale i další vlivy, kterými se při výpočtu jiných typů spojení obvykle nezabýváme. Více či méně výrazně je pevnost spojení ovlivněna například tloušťkou vrstvy lepidla, drsností lepeného povrchu nebo pečlivostí přípravy povrchu před lepením. Pevnost spojení závisí nejen na velikosti lepené plochy, ale i na jejím tvaru. Neméně důležitým požadavkem, a to již ve fázi návrhu spoje, je správný výběr typu lepeného spoje a optimálního lepidla. Při lepení je samozřejmým požadavkem nutnost dodržení technologického postupu předepsaného výrobcem použitého lepidla [6].

## 3.5 Rozdělení lepidel

### 3.5.1 Rozdělení lepidel podle principu tuhnutí ve spoji

- lepidla tuhnoucí vsáknutím a odpařením rozpouštědel ve spoji (fyzikálně tuhnoucí):
  - rozpouštědlová lepidla disperzní (Lepidla na vodní bázi, tedy disperzní lepidla jsou primárně určena k lepení dřeva, balsy, papíru a nebo textilu. Disperze většinou vůbec nepáchnou a jdou výborně ředit vodou. Patrně nejznámějším zástupcem je tuzemský Herkules.)

- rozpouštědlová lepidla roztočová
  - tavná lepidla
  - lepidla stále lepivá
- lepidla reaktivní:
- lepidla tuhnoucí vlivem vlhkosti prostředí
  - lepidla tuhnoucí kontaktem s kovy bez přístupu vzduchu (anaerobní lepidla)
  - lepidla tuhnoucí po přidání tvrdidel
  - lepidla tuhnoucí zvýšenou teplotou

### 3.5.2 Rozdělení lepidel dle chemické báze

- lepidla na přírodní bázi:
- lepidla anorganického a minerálního původu (např. vodní sklo, asfaltová lepidla, fosfátová lepidla, silikátová lepidla, metalická lepidla, keramická lepidla aj.)
  - lepidla organického původu (např. glutinová lepidla, kaseinová lepidla, albuminová lepidla, škrobová lepidla, dextrinová lepidla aj.)
- lepidla na syntetické bázi (např. epoxidová lepidla, polyuretanová lepidla, akrylátová lepidla, silikony aj.)

Při rozhodování o typu lepeného spoje je třeba kromě ekonomického hlediska zvážit technické přednosti, ale i nedostatky technologie lepení ve srovnání s tradičními způsoby spojování (např. svařováním, pájením, nýtováním či šroubováním) [6].

Mezi výhody lepení patří možnost dosáhnout vysoké pevnosti spojů, zejména při namáhání ve smyku a rázu. Spoje mohou být vodotěsné, plynotěsné, elektricky vodivé nebo elektricky, tepelně, příp. i zvukově izolující, dále tlumí vibrace v konstrukci a zvyšují tuhost i vzpěrovou pevnost souboru, správně navržený lepený spoj zabraňuje vzniku elektrolytické koroze kovových adherendů. Z nevýhod to je nerozebíratelnost

spojení, citlivost na namáhání v odlupování, časově omezená životnost většiny typů lepidel, omezená odolnost proti vyšším teplotám nebo vysoké požadavky na rovinnost a čistotu povrchu lepených dílů [6].

V případech, kdy máme kovový povrch a lepidlo k němu má malou adhezní pevnost, tak se povrch kovového adherendu opatří speciálním nátěrem, který má příslušnou sílu mezi adherendem a adhezivem zvýšit. Tento základní nátěr se nanáší například kataforézou.

### **3.6 Kataforéza**

Kataforéza je ekologický způsob lakování patřící k nejehospodárnějším způsobům lakování ocelových, pozinkovaných a hliníkových výrobků. Při kataforéze se používají kationické nátěrové hmoty na bázi epoxidů popř. akrylátů (ve vodě rozpustné) s velmi nízkým obsahem organických rozpouštědel (okolo 2 %) obsahující částice laku ve formě polymerních kationů [7].

Při lakování je výrobek ponořen do lakovací lázně a zapojen jako katoda. Umístěním stejnosměrného napětí mezi výrobek a protielektrodu (anodu) se vytvoří elektrické pole, které usměrní pohyb polykationtů směrem ke katodě. Na povrchu výrobku se vylučují hydroxylové ionty. S narůstající tloušťkou povlaku roste odpor vrstvy a tím klesá rychlost vylučování. Vylučování pokračuje přednostně na místech s doposud malou tloušťkou vrstvy (v místech stíněných, v dutinách apod.) [7].

Tím dochází k tvorbě velmi rovnoměrného povlaku na celém povrchu včetně těžko přístupných míst. Po dosažení určité tloušťky povlaku na celém povrchu se další vylučování zastaví. Tloušťka závisí především na velikosti použitého napětí, běžně se pohybuje mezi 15 a 30  $\mu\text{m}$ , při extrémních požadavcích až okolo 45  $\mu\text{m}$  (tzv. silnovrstvá kataforéza). Elektricky vyloučená vrstva pevně lne k podkladu, přebytečný lak se opláchne. Vyloučený povlak je nutno vypálit při teplotách okolo 160 až 180°C, kdy dochází k polymeraci a povlak získává konečné vlastnosti [7].

Vzhledem k náročnosti změny odstínu se používá kataforéza především k základování, kde vrchní povlak je možné vytvořit práškovým nebo mokrým lakováním. Použití této kombinace dochází ke značnému prodloužení životnosti výrobku a lakované vrstvy [7].

### **3.6.1 Hlavní oblasti použití kataforézního základování**

- automobilový průmysl (karosérie, odnímatelné díly)
- motocykly, bicykly
- domácí spotřebiče (pračky, ledničky)
- elektrické přístroje
- radiátory
- klimatizační zařízení, ventilátory
- traktory, zemědělské a stavební stroje
- kovový nábytek (skladovací police)
- stavební komponenty



## **4. Laboratorní testy - Vliv doby vytvrzování lepidla na pevnost lepených spojů**

Při spojování materiálů nýtováním, svařováním nebo pájením lze vytvořený spoj plně zatěžovat ihned (u nýtování), či velmi brzy po jeho zhotovení (u svařování nebo pájení). Při použití technologie lepení lze však spoj plně zatěžovat až po určité době. Délka této doby závisí především na typu použitého lepidla (jiná je pro tavná lepidla, jiná pro lepidla epoxidová či kyanakrylátová apod.) a bývá uvedena v návodu pro použití konkrétního lepidla. A právě tímto problémem se také zabývá praktická část této bakalářské práce. Cílem bylo zjistit, jaký vliv má na pevnost lepeného spoje doba vytvrzení lepidla. Tato praktická část byla dělaná pro firmu Iveco Czech Republic, a. s. a bylo při ní použito lepidlo které se skutečně při konstrukci autobusů používá.

### **4.1 Příprava a provedení**

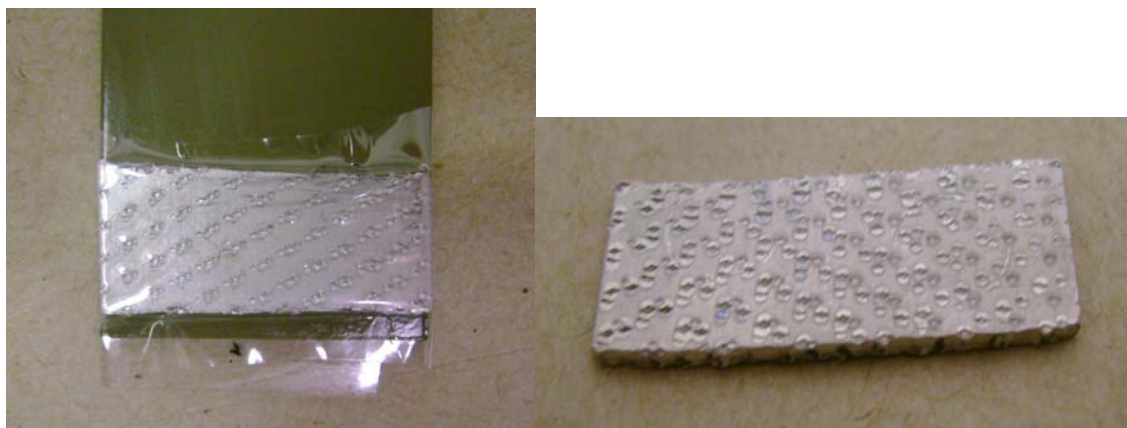
Zkoušky byly provedeny na zkušebních tělesech dodaných firmou Iveco Czech Republic, a.s. Jednalo se o ocelové plechy o rozměrech 25x100x1 milimetrů. Plechy byly opatřeny kataforézou, kterou výrobce používá také přímo ve výrobě autobusů.



***Obr. 4.1. Zkušební těleso***

Pro zjištění závislosti pevnosti lepených spojů na době vytvrzování bylo použito vybrané jednosložkové polyuretanového lepidlo typu *BETASEAL 1001*. Podstatou zkoušky pevnosti lepených spojů ve smyku, při zatěžování v tahu, je namáhání zkušebního spoje ve smyku tahem ve směru podélné osy až do porušení vzorku. Protože plechy neleží ve stejné rovině, je při zkoušce současně zahrnuto i namáhání ohybovým

momentem vzniklým přesazením obou plechů, což lépe odpovídá skutečnému zatížení spoje v provozu. Aby ale toto přesazení nebylo příliš velké, jsou na oba konce zkušebních vzorků připevněny distanční podložky, které toto přesazení částečně eliminují. Podložky jsou pro snadnou manipulovatelnost se vzorkem před upnutím do čelistí zkušebního stroje připevněny lepicí páskou, a to vždy na stranu na které je i lepený spoj.



***Obr. 4.2. Distanční podložka***

Časové intervaly vytvrzení lepeného spoje byly určeny tak, aby časové rozdíly tuhnutí byly nejdříve poměrně malé, protože se předpokládalo že by i pár hodin mohlo znamenat znatelné zpevnění lepeného spoje, ale se vzrůstající dobou byly tyto intervaly prodlužovány. Konečný počet těchto intervalů byl nakonec devět. Jednalo se o 3, 6, 12, 18, 24, 36, 48, 72 a 130 hodin. Pro každý interval se zhotovilo pět zkušebních tělísek, na kterých potom byla zkoušena pevnost spoje. Nutnost minimálního počtu pěti kusů je daná tím, že na každém lepeném spoji, i za úplně stejných podmínek, naměříme hodnoty s určitými odchylkami. Proto je potom z naměřených hodnot více vzorků vypočtena průměrná střední hodnota a také směrodatná odchylka. Tyto hodnoty jsou naprosto dostačující a v určitých případech i přesnější.

Před samotným nánosem lepidla bylo potřeba ještě chemicky očistit povrch zkušebních tělísek. Tuto nezbytnou chemickou přípravu byla zajištěna speciálním aktivátorem typu Sika 1.000 ML, který opět dodala firma Iveco Czech Republic, a. s., protože i toto je jeden z jejích obvyklých používaných přípravků ve skutečné konstrukci vozidel.

Všechny tyto kroky praktické části lepeného spoje byly provedeny především proto, aby podmínky lepení, byly co nejvíce přiblíženy skutečným podmínkám při konstrukci.

Při nánosu lepidla je nezbytné, aby se lepidlo nanoslo na celou plochu a v dostatečné vrstvě, aby se předešlo výskytu vzduchových bublinek v lepeném spoji.



***Obr. 4.3. Nanesené lepidlo na zkušební těleso***

Po nanesení lepidla musíme spojit obě části k sobě. Je nutné aby vrstva lepidla byla po celé ploše rovnoměrně prostřená a stejně silná. V tomto případě je lepší když je lepidla více a potom jej vytlačíme ven, než aby ho tam bylo málo.



***Obr. 4.4. Spojení obou zkušebních tělíekí a následné vytlačení zbytkového lepidla***

Po zaschnutí lepidla je potřeba přebytečné vytlačené lepidlo odstranit. Je to nutné, aby se při zkoušce neprojevovalo do výsledků pevnosti, protože jeho plocha je těžko změřitelná a při výpočtu je třeba znát přesnou plochu lepeného spoje.



*Obr. 4.5. Spoj s ořezaným přebytečným lepidlem*

## 4.2 Měřicí přístroj

Zkouška byla provedena na Ústavu polymerních materiálů na Fakultě chemicko-technologické Univerzity Pardubice v laboratoři pro zkoušení pevnosti materiálu v tahu. Zkušební trhací přístroj je typu MTS 4/M.



*Obr. 4.6. Zkušební trhací přístroj MTS 4/M*

Tento přístroj má dvě pracovní (trhací) hlavy. Jedna je určena pro slabší materiály jako textilie, filmy a podobně, protože její maximální zatěžovací síla je maximálně 10 kN. Druhá je pro zkoušení pevnějších materiálů jako jsou třeba polymery, tato posuvná trhací hlava pracuje do maximální hodnoty až 20 kN.



*Obr. 4.7. Trhací hlavice pracující až do hodnoty 20 kN*

Každá hlava je opatřena upínacími čelistmi pro uchycení zkoušeného materiálu, kde se upínací síla vyvodí potřebným utažením v závitu. Dotykové plochy čelistí jsou účelně zdrsňeny pro lepší lpění ke zkoušenému materiálu.

## **5. Vyhodnocení experimentů**

I když byla prováděna zkouška až do přetržení, tak ve skutečnosti docházelo k přetržení jen zřídka a spíše jenom částečně, a k celkovému přetržení za celou dobu nedošlo. Spíše, než k přetržení, došlo k odloupení lepidla od materiálu, což ovšem znamenalo špatnou adhezivní pevnost, která se zde mohla vyskytnout například špatnou chemickou úpravou povrchu zkoušeného vzorku materiálu, nebo přítomnosti vzduchové bublinky ve spoji lepidla. Tyto případy se naštěstí nevyskytovaly často, ale jenom výjimečně a tyto vzorky byly po objevení následně z celkového měření vyjmuty a do konečného hodnocení se neuvažovaly. Důvod proč nedocházelo k celkovému přetržení je ten, že se jednalo o pružný materiál s vysokou tažností (lepidlo polyuretanové) a toto lepidlo je velice homogenní. Při měření je lepený spoj deformován tahem, ale po přerušení zatěžující síly a uvolnění z tahových čelistí, po provedení zkoušky, se spoj opět vrátí do původního tvaru a často ani nelze pouhým okem rozpoznat, že tento spoj už byl znehodnocen tím, že byl zatěžován silou hodnoty svoji meze pevnosti.



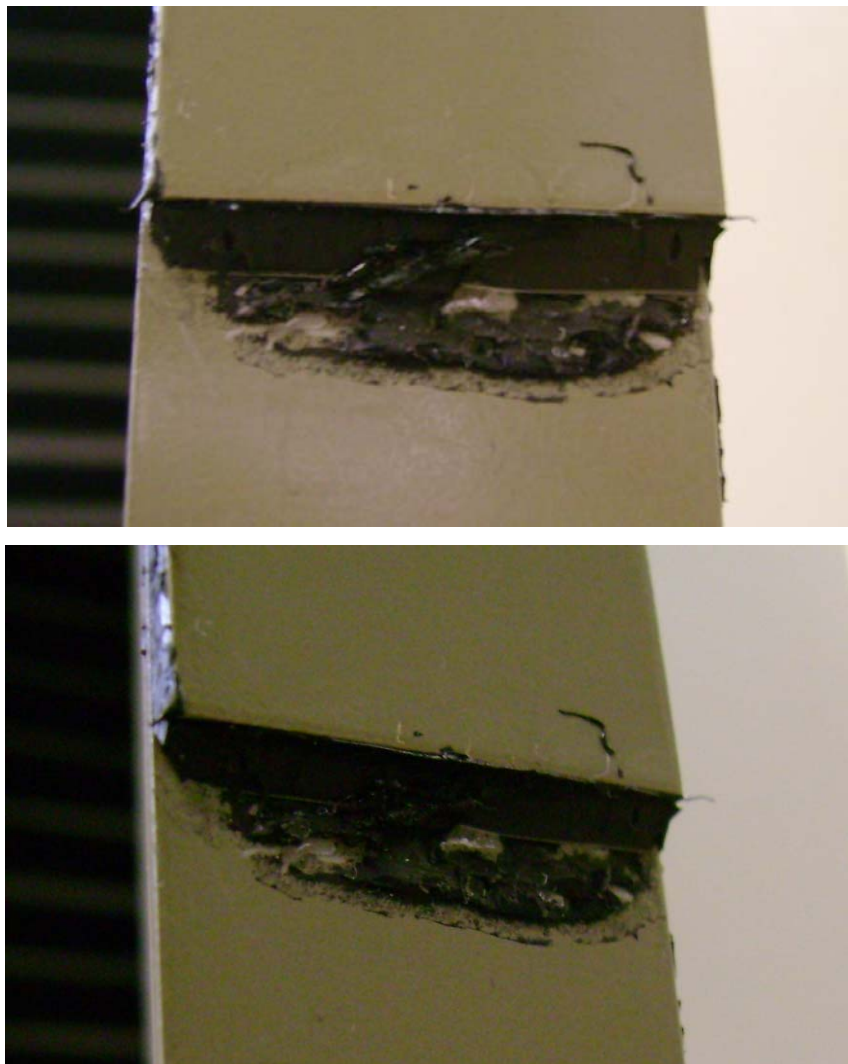
*Obr. 5.1 Spoj po přetržení se opět vrátil do původního stavu*

Kdyby se tato zkouška prováděla například s lepidlem epoxidovým, k přetržení by jistě došlo, neboť toto lepidlo není tak homogenní jako polyuretanové, ale křehčí.

Měřicí přístroj sice zaznamenával hodnotu přetržení, kromě pro nás hlavní hodnoty meze pevnosti, ale o skutečné přetržení se nejednalo. V případě že se touto metodou zkoušejí poměrně houževnaté materiály, jako jsou polyuretany nebo plasty, vyhodnotí



(ze strmého poklesu zatěžující síly) řídicí jednotka jako hodnotu pro přetržení z programu, jedná se o určitý procentuální pokles z naměřené maximální hodnoty meze pevnosti. Je to proto, že u těchto materiálů by ke skutečnému přetržení mohlo dojít až po velice dlouhé době, nebo také nikdy. To by bylo velice časově náročné a hlavně zbytečné, protože v tomto případě mluvíme o velmi malé hodnotě, která je vůči hodnoty meze pevnosti zanedbatelná a v praxi by daný spoj, po překročení meze pevnosti, byl klasifikován jako nedostatečný a v konstrukci by se s ním nemohlo počítat protože by byl již poškozený a tudíž nebezpečný.



*Obr 5.2. Tažení spoje během zkoušky*

Během zkoušky byly slyšet prasknutí, které znamenaly přetržení lepidla a většinou (zvláště ke konci) i viditelné poklesy na grafu v průběhu zatěžující síly působící na dané zkušební těleso.



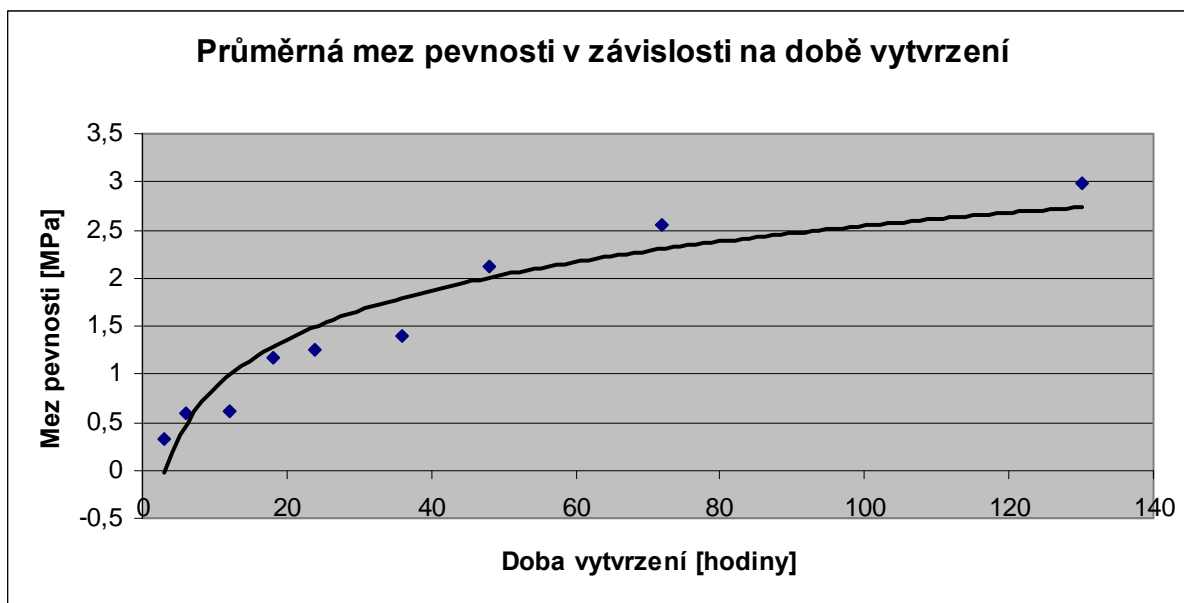
**Obr. 5.3 Přetrhávání lepidla během zkoušky**

Závislost pevnosti lepeného spoje na době vytvrzování zkoušeného lepidla je patrná na přiloženém grafu. Naměřené hodnoty byly pro větší názornost proloženy logaritmickou regresí, aby vznikl orientační přehled o pevnosti spoje i ostatních dob vytvrzování. Z této křivky je názorně vidět že průběh není lineární a po celou dobu rozhodně není konstantní. Na grafu vidíme, že ze začátku vytvrzování spoj poměrně rychle vytvrzuje a tím zvyšuje svou pevnost, ale se vzrůstajícím časem se už pevnost nezvyšuje tak prudce jako ze začátku, ale pomaleji. Z je grafu taky zřejmé, že lepený spoj při použití našeho konkrétního lepidla není zcela zaschlý na maximální pevnost ani po 72 hodinách, což jsou 3 dny. Je to zřejmé z toho, že vzorky schnoucí 130 (5 dní) vykazují ještě větší pevnost v tahu a to konkrétně o 0,4 MPa. S určitou pravděpodobností se může také předpokládat že pevnost by se ještě o určitou hodnotu, s ještě dále vzrůstající dobou vytvrzení, stále zvyšovala. Ale tato hodnota by už ovšem nebyla nijak závratně vysoká, ale spíše by se pohybovala v setinách, maximálně desetínách MPa. Je to opět zřejmé z grafu, protože proložená křivka již začínala dostávat lineární průběh, který je takřka rovnoběžný s vodorovnou osou doby vytvrzení.

Doba vytvrzení [Hod.]	3	6	12	18	24	36	48	72	130
Mez pevnosti [MPa]	0,33	0,59	0,61	1,18	1,26	1,39	2,12	2,56	2.99

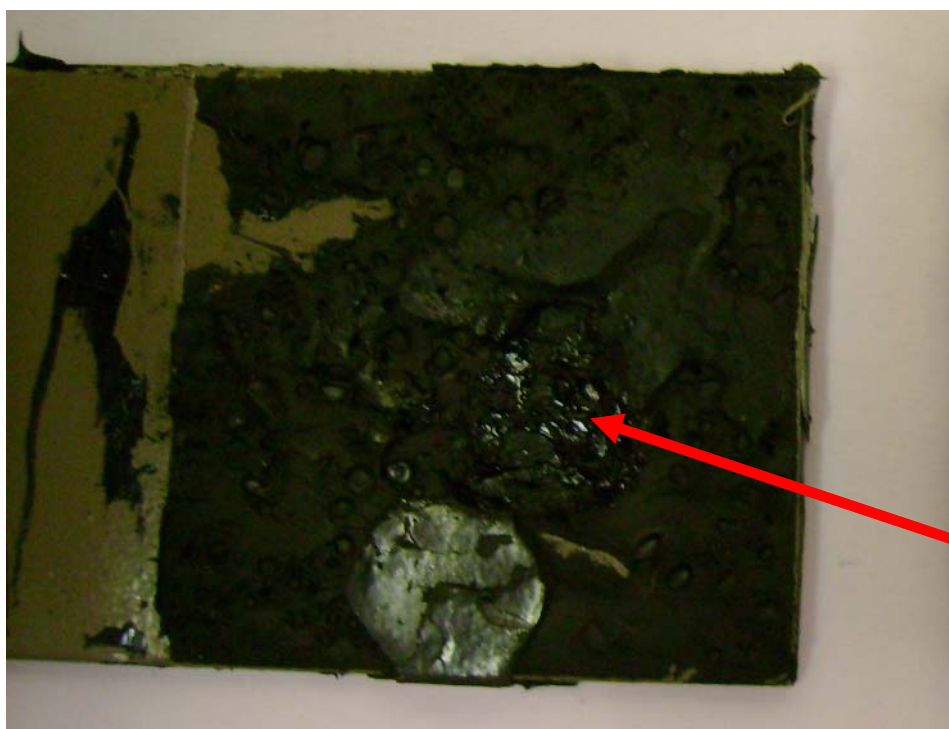
**Tab. 5.1 Výsledné hodnoty meze pevnosti**





*Obr. 5.4. Výsledky tahových zkoušek pro lepidlo BETASEAL 1001*

Další důkaz toho, že lepený spoj nebyl ani po několika dnech zcela vytvrzen, je fakt, že po násilném roztržení zkušebních plíšků od sebe, nebylo lepidlo ve spoji pevné ale stále čerstvé.



*Obr.5.5. Lepená plocha po přetržení po vytvrzení 130 hodin*

Z naměřených výsledků je patrné, že lepidlo potřebuje k dosažení maximální pevnosti spoje určitou dobu pro vytvrzení. Výrobci předepisují dobu, po které dosáhne spoj maximální pevnosti, ale například u polyuretanových lepidel by čekání na maximální pevnost bylo několik dní, což by v konstrukci autobusů ve výrobní praxi mohlo být zdouhavé a náročné jak časově, finančně tak i se skladováním, neboť by musely tyto spoje někde schnout. Teprve po této době lze spoj zatížit maximálním provozním napětím. Ovšem je-li spoj zatěžován pouze silou, která je daleko menší, než je mez pevnosti, tak nemusíme lepené spoje zatěžovat, ani jistit proti posunutí pomocí lepicích přípravků, protože lepené spoje dosahují určité dostatečné pevnosti a to již po poměrně krátké době, této pevnost se říká manipulační pevnost a při této pevnosti již můžeme s určitým omezením manipulovat. Ovšem než se této hodnoty dosáhne, je nezbytně důležité zajistit, aby spoj zůstal bez pohybu.

Report Date: 10.04.2008		Univerzita Pardubice Čs. Legií 565 532 10 Pardubice T 040 603 6111 F 040 6037068		Test Date: 10.04.2008 Operator ID: MIREK				
vzorek: IVECO 48		zk ÚPM 23						
Method: pevnost ve smyku-plechy								
Data path: C:\TW300\DATA								
Sample Inputs:								
Material								
Výrobce								
Teplota								
šířka mm	tloušťka mm	delka mm	mez pevnosti N	mez pevnosti MPa	prodí.při max %	nap.při poruš. MPa	prodí.při poruš %	modul MPa
1	25.24	26.93	1089.80	1.60	6.61	1.28	6.86	*****
2	25.23	25.82	1315.40	2.02	6.57	1.62	7.40	*****
3	25.40	26.44	1453.80	2.16	6.28	1.73	6.65	*****
4	25.16	26.67	1686.00	2.51	6.66	2.01	7.15	*****
5	25.35	25.88	1513.60	2.31	6.09	1.85	6.64	*****
Mean	25.28	26.35	1411.72	2.12	6.44	1.70	6.94	0.00
Min	25.16	25.82	1089.80	1.60	6.09	1.28	6.64	0.00
Max	25.40	26.93	1686.00	2.51	6.66	2.01	7.40	0.00
Stdv	0.10	0.49	223.77	0.34	0.25	0.27	0.33	0.00
%Cov	0.38	1.85	15.85	16.13	3.81	16.10	4.77	0.00

Obr. 5.6 Vyfocený pracovní protokol z měření zkušebních vzorků po 72 hodinách vytvrzení

Vysvětlivky: 1-5 jedná se o 5 vzorků  
 Mean – Průměrná hodnota z naměřených hodnot  
 Stdv – směrodatná odchylka  
 Min, Max – minimální a maximální naměřené hodnoty

## Závěr

Lepení je složitý proces, při kterém se prostřednictvím lepidel jedná o spojování materiálů, při kterém se dosahuje trvalé spojení stejných, případně různých materiálů. Lepidlo je látka schopná vytvořit pevné a trvalé spojení mezi dvěma materiály. Uvedená schopnost závisí od adheze k povrchům lepených materiálů a od koheze samotného lepidla. Pevnost samotného spoje tedy závisí na dvou faktorech a to době vytvrzení a úpravě lepených ploch.

Proto je asi nejdůležitějším krokem před samotným lepením součástí povrchová úprava adherendů, protože se na jeho povrchu nacházejí různé vrstvy, které brání dokonalému smáčení povrchu lepidla a tím slepení materiálů. Špatnými úpravami lepeného povrchu se několika násobně sníží pevnost lepeného spoje než jaký by mohl skutečně být. Upravování povrchu se provádí několika způsoby, v první řadě se jedná o mechanické úpravy a poté ještě o úpravy chemické.

Předložená práce pojednává o možnostech využití lepidel a lepených spojů pro konstrukci motorových vozidel. Je zde podán stručný souhrn z oblasti lepení, základní terminologie, konstrukční předpoklady pro správný lepený spoj, metody pro volbu vhodného lepidla a spoje a různé technologické vlivy působící na lepený spoj. Pro získání představy o jeho použití jsou zde i příklady praktických aplikací lepených spojů na autobusech.

Součástí práce je praktické provedení testů pro určení doby vytvrzování jednosložkových polyuretanových lepidel využívaných ve výrobě karosérií autobusů. Cílem provedených zkoušek bylo zjistit závislost pevnosti lepeného spoje na době vytvrzování lepidla. Na základě výsledků lze konstatovat, že spoje slepené zkoušeným lepidlem dosahují maximální pevnosti až po 130 hodinách vytvrzování za normálních podmínek. Jejich výhodou však je, že již po poměrně krátké době mají dostatečnou pevnost pro případnou manipulaci.

Z výsledků je zřejmé, že lepidlo typu *BETASEAL 1001* je velice houževnaté a lehké a tím pádem má v konstrukci určité výhody oproti jiným (mechanickým) druhům spojování jako je svažování nebo nýtování. Jedná se zejména o místa jako lepení skel, bočního oplechování nebo například podlah interiérů, kde lepidlo, díky své houževnatosti, vytváří výborný tlumící element, což má mimo jiné i příznivý vliv na pohodlí cestujících.

## **Seznam použité literatury**

- [1] PETRIE, E. M.: Handbook of Adhesives and Sealants. McGraw-Hill, New York USA, 2000, ISBN 0-07-049888-1
- [2] PTÁČEK, L. a kol.: Nauka o materiálu I.-II. CERM, Brno 1999, ISBN 80-7204-193-2
- [3] SCHMIDOVÁ, E: *Nauka o materiálu - návody do cvičení* (výukové materiály zpracované v elektronické podobě)
- [4] OSTEN, M: *Práce s lepidly a tmely*, SNTL Praha, 1982. 283 s.
- [5] HOLÝ, L: *lepené spoje a jejich aplikace v konstrukci vozidel*, Pardubice 2006. 54 s. Bakalářská práce, Univerzita Pardubice, Dopavní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Doc. Dr. Ing. Libor Beneš
- [6] Lepidla - tmely [online]. [cit. 2008-03-31]  
Dostupný na WWW: <<http://www.oblibene.cz/lepidla/?cap=4852>>.
- [7] Kataforeza [online]. [cit. 2008-05-05]  
Dostupný na WWW: <[http://www.salum.cz/cz\\_products\\_kataforeza.htm](http://www.salum.cz/cz_products_kataforeza.htm)>
- [8] Lepení plastových materiálů [online]. [cit. 2008-04-27]  
Dostupný na WWW: <<http://www.tribon.cz/plasty/-lepeni.htm#srovnani>>
- [9] Vliv tloušťky vrstvy lepidla na pevnost lepeného spoje [online]. [cit. 2008-04-27]  
Dostupný na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-tloustky-vrstvy-lepidla-na-pevnost-lepeneho-spoje>>