

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2010

Pavel Bíža

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Návrh metodiky pro stanovení meze únavy lepených spojů

Pavel Bíža

Bakalářská práce

2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel BÍŽA**
Studijní program: **B3709 Dopravní technologie a spoje**
Studijní obor: **Dopravní prostředky-Silniční vozidla**
Název tématu: **Návrh metodiky pro stanovení meze únavy lepených spojů**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

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

1. Lepené spoje - rozdělení, srovnání s ostatními metodami spojování kovů
2. Lepidla vhodná k lepení kovů
3. Metody stanovení meze únavy materiálů
4. Návrh metodiky, měření, vyhodnocení

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Ptáček, L. a kol.: Nauka o materiálu I.-II. CERM, s.r.o. Brno 1999
Petrie, E.M.: Handbook of Adhesives and Sealants. McGraw-Hill. New York. 2000
Osten M.: Práce s lepidly a tmely. Grada Praha, 1996

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Švanda, Ph.D.

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání bakalářské práce:

26. února 2010

Termín odevzdání bakalářské práce:

31. května 2010

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.

doc. Ing. Miroslav Tesař, CSc.

vedoucí katedry

dne

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 20. 5. 2010

Pavel Bíža

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

ANOTACE

Tato práce se zabývá stanovením vhodné metodiky pro stanovení měření meze únavy lepených spojů. Je zde zhodnoceno lepení a ostatní možnosti spojování. Je zde popsána i stanovení meze únavy obecně.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lepný spoj, Adheze, Koheze, Adherend, Únava

TITLE

Draft methodology for determining the fatigue limit of bonded joints

ANNOTATION

This work deals with determination of appropriate measurement methodology for determining the fatigue strength of glued joints. Work is devote to build bonding and other merger possibilities. It describes the determination of fatigue in general.

KEYWORDS

Glued joints, Adhesion, Cohesion, Adherend, Fatigue

OBSAH

ÚVOD	8
1. Lepené spoje	9
1.1 Rozdělení lepených spojů.....	10
1.1.1 Přeplátovaný spoj	10
1.1.2 Lemový spoj.....	10
1.1.3 Podložený spoj.....	10
1.1.4 Zkosený spoj.....	10
1.1.5 Drážkový spoj.....	11
1.1.6 Vnitřní nebo vnější spojka	11
1.1.7 Příklady umístění lepeného spoje vůči působícím silám	11
1.2 Ostatní metody spojování kovů	12
1.2.1 Svařování.....	12
1.2.2 Pájení.....	12
1.2.3 Nýtování.....	12
2. Druhy a vlastnosti lepidel	13
2.1 Adheze	14
2.2 Koheze	14
2.3 Smáčivost	15
2.4 Výběr lepidla	18
2.4.1 Tepelná odolnost.....	18
2.4.2 Odolnost vůči vodě a vlhkosti	18
2.4.3 Technické předpoklady lepení.....	19
2.4.4 Mechanické vlastnosti.....	19
2.5 Dělení lepidel podle způsobu tuhnutí lepidla ve spoji	20
2.5.1 Lepidla tuhnoucí vlivem vsáknutí a odtěkání rozpouštědel.....	20
2.5.2 Lepidla reaktivní.....	20
2.5.3 Tavná lepidla	20
2.5.4 Lepidla stále lepivá	20
3. Lepidla vhodná k lepení kovů.....	21
3.1 Příprava materiálu.....	23
4. Mez únavy	25
4.1 Historie zkušebních metod na únavu	25
4.2 Současné zkušební metody na únavu.....	27
4.3 Zkušební metody na únavu lepených spojů	28
5. Experimentální část.....	30
5.1 Zkušební zařízení.....	30
5.2 Zkušební vzorek	31
5.3 Použité lepidlo	32
5.4 Výpočet zatížení	33
5.5 Vlastní měření	34
6. Závěr.....	38

ÚVOD

Tato bakalářská práce se bude věnovat lepeným spojům, zkoumání a stanovení jejich meze únavy v praxi. Lepené spoje se používají už dlouhou řadu let, avšak dříve byly využívány spíše jako doplnění spojení. Začaly se využívat hlavně v oblastech, kde nebylo možné použít hodně rozšířené metody spojování, jakými jsou například svařování, nýtování anebo šroubová spojení. Z toho lze tedy vyvodit, že se jednalo o nekovové materiály anebo spojování velmi tlustých materiálů. Lepené spoje jsou šetrné k spojovaným materiálům, protože nevyžadují žádné jejich narušení. U nýtovaných spojů je potřeba v obou materiálech otvor pro nýt. Svařování lze použít jen v oblasti svařitelných materiálů. Lepené spoje jsou výhodné i v oblastech, kde po porušení spoje nedojde k destrukci spojovaných materiálů. To určitě přispívá i levnější opravitelnosti. Avšak proti těmto výhodám je lepený spoj stále velmi málo využíván v praxi. Některá lepidla, která splňují vysoké pevnostní vlastnosti, jsou často velmi nákladná a pro výrobce se nevyplácí. Pro dosažení velké pevnosti spoje je zapotřebí velké lepené plochy. Dalším faktorem při používání lepených spojů je oblast jejich použití v závislosti na okolních podmínkách, jako jsou třeba teplota a vlhkost. Při lepení je také potřeba dodržovat podmínky pro správné vytvrzení a správné spojení lepidla s nanášecí plochou. Lepené spoje je zatím stále oblast, která se rozvíjí s novými složenými lepidly. Lepidla se v dnešním průmyslu používají hlavně pro spojování dvou různých materiálů, jako například lepení skel automobilů. Lepení se využívá dále i pro lékařské účely. Tato bakalářská práce se bude zabývat návrhem metodiky stanovení meze únavy lepeného spoje při zkoušce ohybu za rotace. Dnešní normy stanovují mez únavy lepených spojů jen pro smykové zatížení tahem. Touto bakalářskou prací bych rád dal podnět k tvorbě diplomové práce na stejné téma a v ní i rozšíření a dotáčení této metodiky do konečné podoby.

1. Lepené spoje

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.

Výhody lepených spojů:

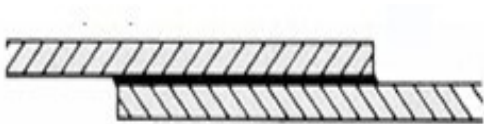
- Spojování za relativně nízkých teplot
- Možnost spojovat materiály bez ohledu na jejich tloušťku
- Spoj je dokonale vodotěsný
- Lepený spoj tlumí vibrace
- Lepený spoj nezvyšuje hmotnost celé konstrukce (není nutná minimální tloušťka spojovaných dílů)
- Spoj může být libovolně barevný nebo průhledný
- Není nutné narušit celistvost spojovaných materiálů
- Odolnost vůči korozi
- Možnost spojovat různé druhy materiálů (různé kovy)

Nevýhody lepených spojů:

- Nižší pevnost spoje vůči jiným spojovacím metodám
- Vysoké požadavky na čistotu lepených spojů
- U většiny lepených spojů je dlouhá doba než dosáhne lepený spoj své maximální pevnosti
- Lepidla mohou nepříznivě reagovat s některými chemikáliemi
- Návrh tvaru lepeného spoje
- Při vytvrzování lepidel může docházet k odpařování zdraví škodlivých látek

1.1 Rozdělení lepených spojů

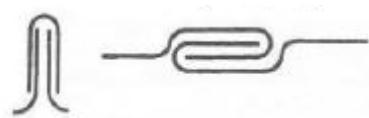
1.1.1 Přeplátovaný spoj



Obr. 1.1 Přeplátovaný spoj

Základní typ lepeného spoje používající se u tenkých materiálů, u kterých je možné zanedbat excentricitu zatíženého spoje.

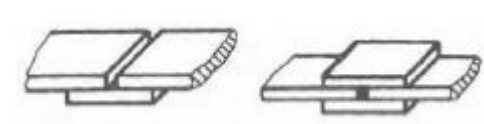
1.1.2 Lemový spoj



Obr. 1.2 Lemový spoj

Vhodný pro spojení tenkých materiálů. Velkou výhodou je velká styková plocha a zajištění polohy lepených částí.

1.1.3 Podložený spoj



Obr. 1.3 Podložený spoj

Podložením spojovaných materiálů je docíleno větší pevnosti spoje.

1.1.4 Zkosený spoj



Obr. 1.4 Zkosený spoj

Zkosením spojovaných ploch dojde ke zvětšení stykové plochy a tím i k zvětšení pevnosti spoje. Vhodné u tlustostěnných materiálů.

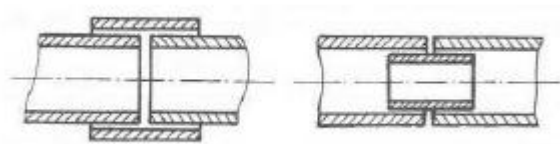
1.1.5 Drážkový spoj



Umožňuje přesné stanovení lepených částí a zabraňuje loupání.

Obr. 1.5 Drážkový spoj

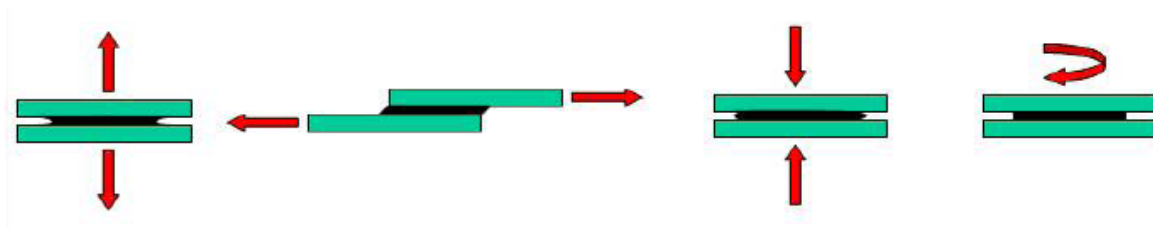
1.1.6 Vnitřní nebo vnější spojka



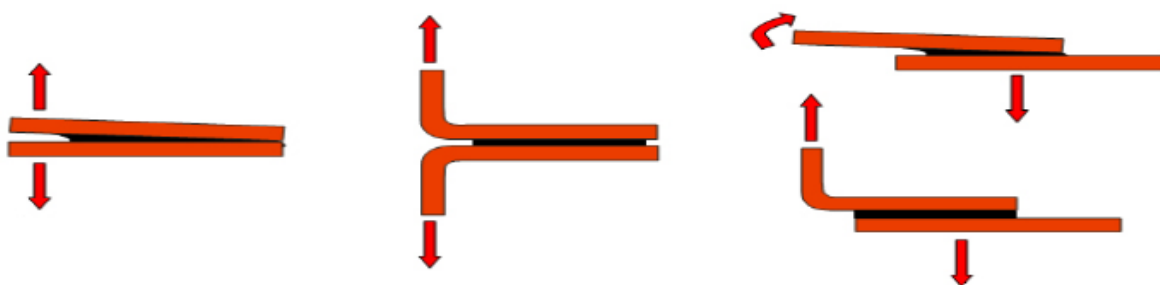
Vhodné pro lepení trubek. Výhodou je zvětšení lepených ploch. Výběr vnitřní/vnější je ovlivněn požadavkem na zachování hladkosti trubky nebo zachování průtoku.

Obr. 1.6 Vnitřní nebo vnější spojka

1.1.7 Příklady umístění lepeného spoje vůči působícím silám



Obr. 1.7 Vhodná konstrukce a umístění lepeného spoje



Obr. 1.8 Nevhodná konstrukce a umístění lepeného spoje

1.2 Ostatní metody spojování kovů

Porovnání lepených spojů s ostatními velmi rozšířenými metodami spojování kovů. U níže popsaných metod spojování kovů se vždy jedná o spoje po elektrické stránce vodivé, pouze lepené spoje jsou nevodivé, protože lepidlo působí jako izolant, ovšem po přidání kovového prachu můžeme docílit i vodivého spoje.

1.2.1 Svařování

Je známo několik druhů svařování, při některých je nutné přidávat mezi spojované materiály roztavený kov (Wolframové elektrody), u jiných probíhá svařování roztavením přímo svařovaných částí materiálu (Odporové svařování). Ovšem vždy dochází k velkému ohřevu spojovaných materiálů a dále i ke změně vlastností a struktury materiálu. Ohřevem materiálu vzniká i vnitřní pnutí a případné deformace. Další nevýhodou je, že svařováním vzniká nerozebíratelný spoj a s tím spojené problémy při opravách. Výhodou svařování je životnost spoje, která je velmi vysoká (záleží na druhu spojovaných materiálů).

1.2.2 Pájení

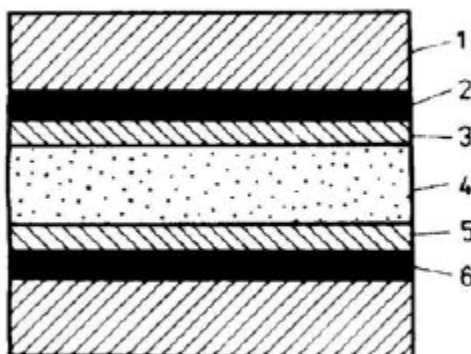
Pájení kovů je technologie spojování kovů za pomoci snadno tavitelných slitin, nejčastěji na bázi Cínu. Pájení je méně pevné než svařování ale je k spojovaným materiálům šetrnější, protože probíhá za menších teplot (350°C) při nichž nedochází k změně struktury kovů. Pájení se používá v slaboproudé technice kde s ohledem na velikost součástek a tím pádem i velikost spojů je příliš malá na svařování.

1.2.3 Nýtování

U nýtování se jedná opět o nerozebíratelný druh spojení. Nýtovaný spoj drží pomocí tření mezi spojovanými materiály. Pokud je nýtování špatně provedeno, jsou nýty namáhány na stříh a mohlo by dojít k porušení spoje. Nýtové spoje mají výhodu ve snadné opravitelnosti (výměna poškozených nýtů). Nevýhodou je nutnost předvrtat otvory pro nýty v spojovaných materiálech.

2. Druhy a vlastnosti lepidel

Lepidla mají své vlastnosti, ze kterých vyplívá i oblast použití různých druhů lepidel. 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.



Obr. 2.1 Struktura lepeného spoje [12]

Jsou to:

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

2.1 Adheze

Adheze je schopnost dvou různých materiálu k sobě přilnout. U lepených spojů je definována jako chemické a fyzikální síly na styčných plochách v nerovnostech a pórech materiálů. Tento jev také popisují Van der Waalsovy síly. 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. Přitažlivá adheze je závislá na dobré smáčivosti lepeného pevného povrchu tekutým lepidlem.

2.2 Koheze

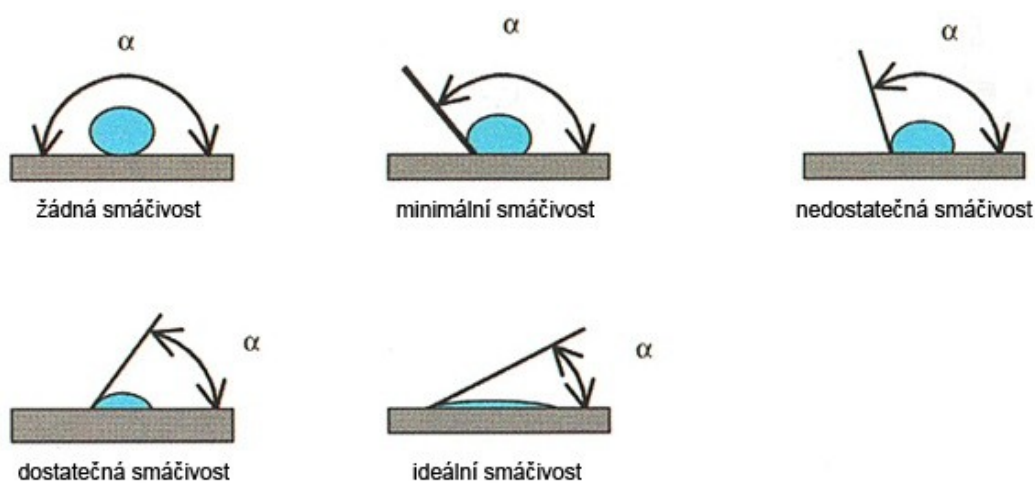
U koheze se jedná o soudržnost materiálu. Koheze je teoreticky definována jako stav, ve kterém jsou částice jednoduché látky drženy pohromadě valenčními a mezimolekulárními silami (Van der Waalsovy síly). Praktický příklad koheze je velmi dobře pozorovatelný na Obr. 2.3.



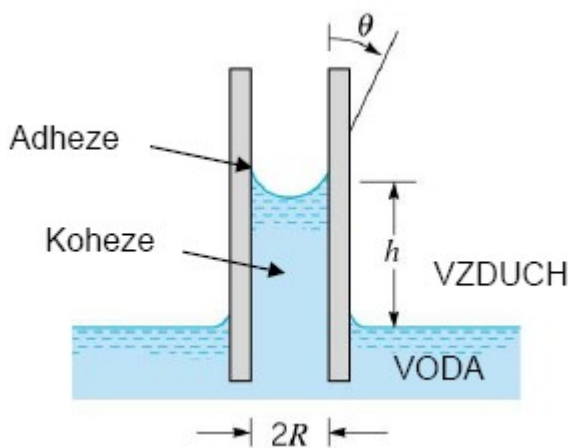
Obr. 2.2 Kapky vody

2.3 Smáčivost

Smáčivost je vlastnost kapaliny přilnout k povrchu pevných látek. Smáčivost je definována kontaktním úhlem, čím je hodnota tohoto úhlu větší, tím je smáčivost horší a tekutina bude na smáčeném povrchu jen velmi těžko ulpívat. 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). Smáčivost lepených povrchů můžeme hodnotit kapkovou metodou.



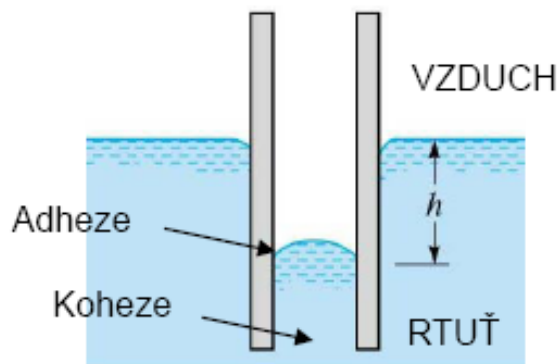
Obr. 2.3 Smáčivost lepidel [4]



Obr. 2.4 Smáčivý povrch [8]

Adheze > Koheze

- smáčivý (hydrofilní) povrch
- kapalina vystupuje v kapiláře do výšky h

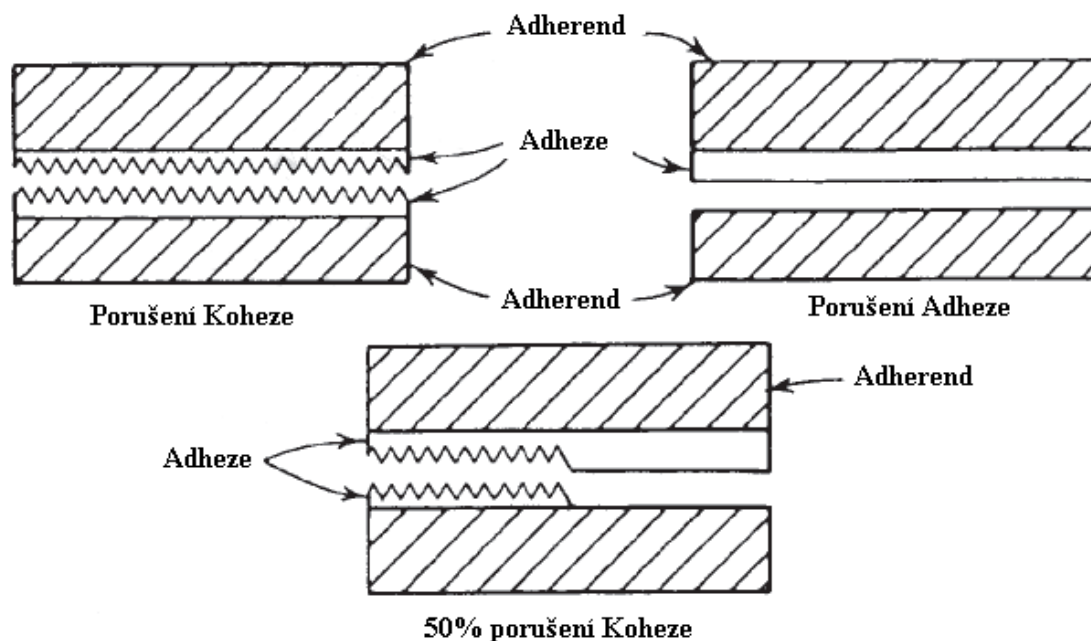


Obr. 2.5 Nesmáčivý povrch [8]

Koheze > Adheze

- nesmáčivý (hydrofobní) povrch
- kapalina zůstává v kapiláře o výšce h níže, než je hladina okolní kapaliny

Je-li adheze lepeného spoje větší než koheze spojovaných materiálů, dojde při mechanickém namáhání k porušení materiálu mimo lepený spoj. Je-li naopak koheze lepeného materiálu větší než adheze lepeného spoje, dojde při mechanickém namáhání k destrukci lepeného spoje. Porušením lepených spojů se zabývá norma ČSN ISO 10365 [11] viz příloha A.



Obr. 2.6 Příklad porušení koheze a adheze [11]

Pro vznik soudržného spoje je potřeba, aby lepený materiál a lepidlo prošly těmito fázemi:

- Lepidlo musí být nanášeno nebo přeneseno na obě stykové plochy a musí je v tekutém stavu smáčet
- Musí být dány podmínky k tomu, aby ve spáře vytvořil stejnoměrný film lepidla
- Film lepidla musí ve spáře ztuhnout a vázat povrchy obou dílů

2.4 Výběr lepidla

K dosažení optimálních výsledků při lepení je třeba si uvědomit, že neexistuje lepidlo, které by lepilo všechny materiály. Některé materiály lze lepit jen po speciální úpravě povrchu. Prvním ukazatelem při výběru lepidla je znalost složení, struktury a propustnosti plynů u obou lepených dílců. Jejich složení určuje druh lepidla z hlediska adheze k oběma povrchům. Struktura a propustnost plynů je podmínkou při výběru lepidla z hlediska jeho složení a způsobu tuhnutí. [1]

Důležitým hlediskem při výběru 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 vlivům povětrnosti, případně další požadavky. Ne vždy je možné vyhovět všem nárokům současně, a proto je třeba uvážit, které jsou z hlediska funkce nejdůležitější a volit kompromisní řešení. [1]

2.4.1 Tepelná odolnost

Tepelně odolné spoje poskytuje vedle anorganických pojiv a silikonových pryskyřic většina termoreaktivních pryskyřic, zejména typy vytvrzené za vyšší teploty. Z běžného sortimentu k tepelně odolným patří lepidla fenolická, polyuretanová a epoxidová. Tepelnou odolnost lepidel zvyšují i přísady minerálních plniv a kovových prachů. [1]

2.4.2 Odolnost vůči vodě a vlhkosti

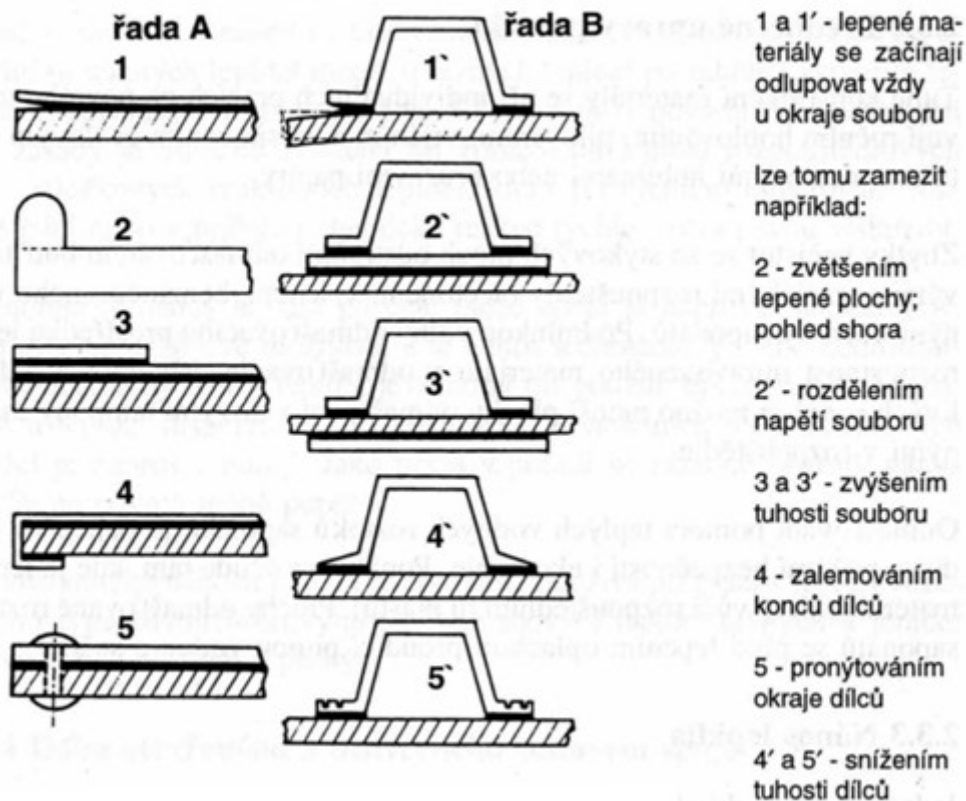
Vysloveně neodolná vůči vlhkosti jsou lepidla škrobová, dextrinová, glutinová, lepidla na bázi karboxymethylcelulózy a polyvinylalkoholu. Dobrou odolností vůči vlhkosti a vodě se po vytvrzení vyznačují lepidla fenolická, polyuretanová, epoxidová i samovulkanizační lepidla kaučuková. Z oblasti disperzních lepidel to jsou lepidla polyakrylátová. [1]

2.4.3 Technické předpoklady lepení

Volba lepidla závisí i na době, po kterou chceme lepený spoj používat. Některá lepidla tuhnou pomalu delší dobu. Velmi rychle tuhnoucí lepidla nevyhovují tam, kde je zapotřebí delší dotyk doby k sestavení [1]

2.4.4 Mechanické vlastnosti

Ve své funkci může být lepený spoj zatěžován buď staticky, například jen vlastní hmotností dílce, nebo dynamicky, například chvěním, opakovanými rázy, kroucením. Staticky může být spoj namáhán ve smyku, v tahu a odlupování. Lepidla nejméně odolávají namáhání v odlupování, a proto se při konstrukci spoje snažíme tomuto namáhání vyhnout. Dynamickému namáhání nejlépe odolávají spoje z epoxidových lepidel. [1]



Obr. 2.7 Zajištění lepených spojů proti odlupování [1]

2.5 Dělení lepidel podle způsobu tuhnutí lepidla ve spoji

2.5.1 Lepidla tuhnoucí vlivem vsáknutí a odtěkání rozpouštědel

Tato lepidla obsahují 20 až 60% přírodní nebo syntetické filmové látky rozpouštěné nebo dispergované ve vodě nebo rozpouštěné v organických rozpouštědlech. Mohou být přímo aplikovaná jen tehdy, je-li jeden ze spojovaných materiálů propustných pro plyny (vodní páru nebo páry rozpouštědla).

2.5.2 Lepidla reaktivní

Tuhnou vlivem chemických změn v průběhu vytvrzování. Podle úpravy, v jaké se prodávají, rozlišujeme lepidla jednosložková a vícesložková. Jednosložková reaktivní lepidla vytvrzují chemickou reakcí vyvolanou vnějšími vlivy (teplotou, vzdušnou vlhkostí, stykem s kovy aj.). U reaktivních vícesložkových lepidel jsou jednotlivé složky lepidla dodávány odděleně a směšují se těsně před použitím. Spoje provedené reaktivními lepidly se obecně vyznačují dobrou tepelnou odolností, odolností vůči rozpouštědlům, vodě a povětrnosti.

2.5.3 Tavná lepidla

Výchozí surovinou těchto lepidel jsou termoplasty různě modifikované, které se nanášejí na spojovaný materiál ve formě taveniny, vždy jednostranně. Maximální pevnosti spoje se dosahuje na rozdíl od předchozích typů lepidel bezprostředně po tom, kdy film lepidla ve spoji ztuhl ochlazením. Film lepidla se po ochlazení téměř nesmršťuje a dobře vyrovnává pnutí mezi spojovanými díly.

2.5.4 Lepidla stále lepivá

Ve spoji nemění svou konzistenci, zůstávají stále vláčná a lepivá a jsou označována jako lepidla se samolepícím efektem. Jsou vždy ve spojení s vhodným nosičem a spoj vzniká pouhým přitlačením lepící vrstvy k podkladu. Jsou známa v podobě samolepících pásků, štítků a tapet a slouží k rychlému a na pevnost spoje nenáročnějšímu spojování. Měkký přilnavý film umožňuje dočasné spojování se špatnými adhezními vlastnostmi.

3. Lepidla vhodná k lepení kovů

Lepení kovů je proces spojování materiálů (adherendů), při kterém se dosahuje trvalého spojení stejných, popřípadě různých materiálů prostřednictvím lepidel (adhezi). Lepidlo na kovy je možné definovat jako látku schopnou vytvořit pevné o trvalé spojení mezi dvěma kovovými materiály. Uvedená schopnost závisí od adheze k povrchům lepených materiálů a od koheze samotného lepidla.

Při výběru lepidla pro lepení kovů musíme vycházet z toho, že jde o materiály zcela nepropustné. Z tohoto důvodu přicházejí v úvahu jen taková lepidla, tmely a metody lepení, které zaručují, že se v průběhu lepení neuvolní těkavé látky, které by snižovaly kohezi a adhezi filmu lepidla. Z tohoto důvodu nelze použít roztoková a disperzní lepidla. Výjimkou jsou kontaktní lepidla na bázi chloroprenového a polyuretanového kaučuku, tato lepidla se nanesou na obě lepené plochy, nechají se zavadnout a až jsou na dotek téměř nelepivá, přitlačí se k sobě silným tlakem. [7]

Pro běžné lepení kovů se používají lepidla reaktivní. V současné době se používají především epoxidová reaktivní lepidla, která se velmi dobře hodí jak pro havarijní opravy a renovační technologie, tak i pro konstruování. Epoxidová lepidla se vyrábí jako jednosložková, dvousložková a vícesložková. V běžné praxi se používají zejména epoxidová lepidla dvousložková neplněná, vhodná pro konstrukční spoje a epoxidová lepidla plněná práškovými plnivými, vhodná zejména pro havarijní opravy a renovační technologie. [7]

Pro lepení a opravy malých ploch se používají epoxidová lepidla rychlá, která dosahují manipulační pevnosti po 2 až 10 minutách, pro konstrukční spoje a renovační technologie se používají epoxidová lepidla s dobou zpracovatelnosti 30 minut až 3 hodiny a manipulační pevnosti je dosaženo po 5 až 6 hodinách, funkční pevnosti je obvykle dosaženo po 24 hodinách. Teplotní odolnost epoxidových lepidel neplněných je od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, plněných od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$. [7]

Při výběru epoxidového lepidla k lepení kovů je pro nás důležitý údaj o pevnosti (smyková pevnost v tahu). Pevnost lepidel pro domácí použití bývá kolem 13–15 MPa. Lepidla s pevností nad 20 MPa jsou označována jako vysokopevnostní. S těmito hodnotami lze počítat u oceli a chemicky upravených hliníkových slitin. U barevných kovů a jejich slitin jsou pevnosti výrazně nižší. [7]

Další skupinou lepidel pro lepení kovů jsou dvousložková reaktivní polyuretanová lepidla. Jsou zpracovatelná i za nízkých teplot, lepené spoje jsou pevné, pružné a odolné dynamickému namáhání. Odolávají povětrnostním vlivům, vodě a průmyslovým médiím. Smyková pevnost v tahu je cca 16 MPa a teplotní odolnost do 100 °C. [7]

Velmi moderní pro konstrukční lepení kovů jsou dvousložková lepidla na bázi methakrylátových esterů, která vykazují vysokou smykovou pevnost v tahu až 24 MPa, vysokou rázovou pevnost, tepelnou (od -50 °C až do +150 °C) a chemickou odolnost. Tato lepidla vykazují excelentní pevnosti při lepení oceli, chromu a hliníku a také jsou výborná pro kombinální lepení zejména s plasty. [7]

Vždy je nutné dodržet minimální délku přeplátování, rovnoměrné rozdělení sil a vyloučení sil namáhajících spoj v odlupování. Není-li možné takovým vlivům zamezit, je nutné zajistit spoj proti odlupování zesílením namáhaného místa, nebo kombinovat lepení s nýtováním, šroubováním či svařováním. Spoje lepené a šroubované (nýtované) jsou zárukou nejvyšších hodnot při únavové pevnosti a dobře zajišťují spoj při odlupování. [7]

3.1 Příprava materiálu

Povrchová úprava kovů je z hlediska dosažitelnosti pevnosti spoje velmi důležitá. Příprava materiálů na lepení se skládá z dělení, obrábění, čištění, odmašťování a slícování lepených dílců. Cílem přípravy povrchu je dosáhnout maximální adheze a zabránit podoxidování lepidla. Navrhuje se dle druhu a stavu lepeného materiálu, druhu použitého lepidla, provozních požadavků a životnosti spoje, únosnosti výrobních nákladů apod. Pouhé obnažení kovu a odmaštění může zajistit jen asi 50 až 60% z maxima hodnot dosažitelných stejným druhem lepidla na aktivovaném povrchu. Při individuálních pracích se s tím zpravidla spokojujeme a povrch pouze zbavujeme korozních zplodin a mastnot. Povrch kovu čistíme například ocelovou vlnou, drátěným kartáčem nebo brusným papírem. Na železné kovy se používá brusný papír zrnitosti 100 až 120, na hliník, olovo a mosaz papír jemnějšího zrna. [7]

Na mechanické úpravy povrchu navazuje odmašťování. Na odmašťování se používají: alkalická odmašťovadla, tamponování rozpouštědly a odmašťování v párách rozpouštědla. Vhodná odmašťovadla jsou např. IPA (isopropylalkohol), technický aceton, 2-butanon (MEK – metyletylketon), perchloretylen. Nevhodná jsou laková rozpouštědla a benzin. Poměrně často se používá moření materiálů v různých kyselinách (hliník a jeho slitiny). V domácích podmínkách lze vystačit s mořením v 20 % roztoku hydroxidu sodného (NaOH). V případě moření se obvykle dosahuje vyšší pevnosti spoju než při mechanické úpravě povrchu. [7]

Z hlediska kvality lepených spojů je důležitá také drsnost povrchu lepených ploch. V domácí dílně vystačíme s ocelovým kartáčem a smirkovým plátnem se zrnitostí 100 až 120, v průmyslových aplikacích – viz Tab. 3.1.

Materiál	Odmašťovadlo	Povrchová úprava materiálu před lepením	Vlastní lepení po povrchové úpravě materiálu do oxidace materiálu
Hliník a jeho slitiny	MEK, aceton	Broušení smirkem zrnitosti 320–400 anebo pískování oxidem hlinitým anebo chemické moření (vysoká pevnost).	do 1 hod.
Litina	MEK, aceton	Broušení smirkem zrnitosti 220–320, uhlová bruska anebo pískování.	do 15 min.
Měď	MEK, aceton	Broušení smirkem zrnitosti 400.	do 15 min.
Konstrukční a nerezové oceli	MEK, aceton	Broušení smirkem zrnitosti 320–400 anebo pískování.	ocel do 1 hod. nerez do 6 hod.
Titan	MEK, aceton	Broušení smirkem zrnitosti 320–400 anebo pískování.	do 15 min.
Hořík	MEK, aceton	Jemným pilníkem zdrsňit povrch.	do 15 min.
Mosaz	MEK, aceton	Broušení smirkem zrnitosti 320–400.	do 15 min.
Zinek	MEK, aceton	Broušení smirkem zrnitosti 400.	-
Cín	MEK, aceton	Broušení smirkem zrnitosti 400.	do 15 min.
Pochromované kovy	MEK, aceton	Broušení smirkem zrnitosti 400.	-
Poniklované kovy	MEK, aceton	Vrstvu niklu mechanicky anebo chemicky odstranit.	-

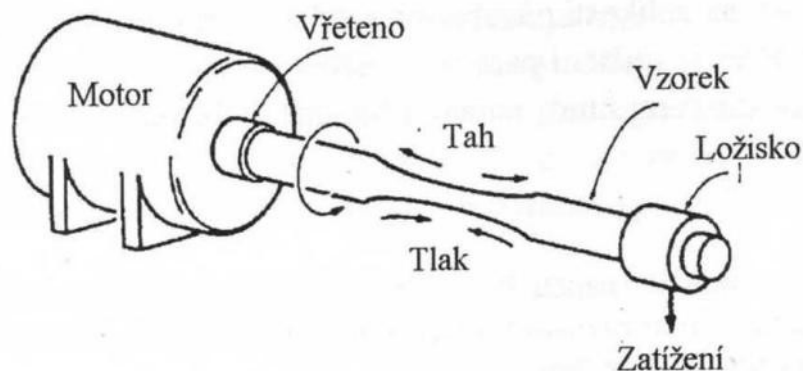
Tab. 3.1 Povrchové úpravy kovových materiálů před lepením [7]

4. Mez únavy

Součásti konstrukci jsou často namáhány opakovaným zatěžováním, které nazýváme cyklické zatěžování. Cyklické zatěžování může vést k mikroskopickému poškození materiálu. Pokud je cyklické napětí menší než mez pevnosti daného materiálu, poškození se kumuluje a s pokračováním cyklického napětí dojde k rozvoji trhliny, případně poškození, které vede k lomu materiálu. Tento proces kumulace, který vede k lomu, se nazývá únava.

4.1 Historie zkušebních metod na únavu

Při studiu havárií náprav železničních vozidel v polovině minulého století inženýr Gustav Wöhler sestavil zařízení pro únavové zkoušky. Princip zatěžování -ohyb za rotace- je ukázán na obr. 4.1. Zkušební těleso kruhového tvaru je uchyceno na jednom konci na hřídeli motoru a na druhém konci je ložisko, na které působí síla. Na začátku zatěžování je v horní části vzorku tahové napětí a spodní části napětí tlakové. [2]

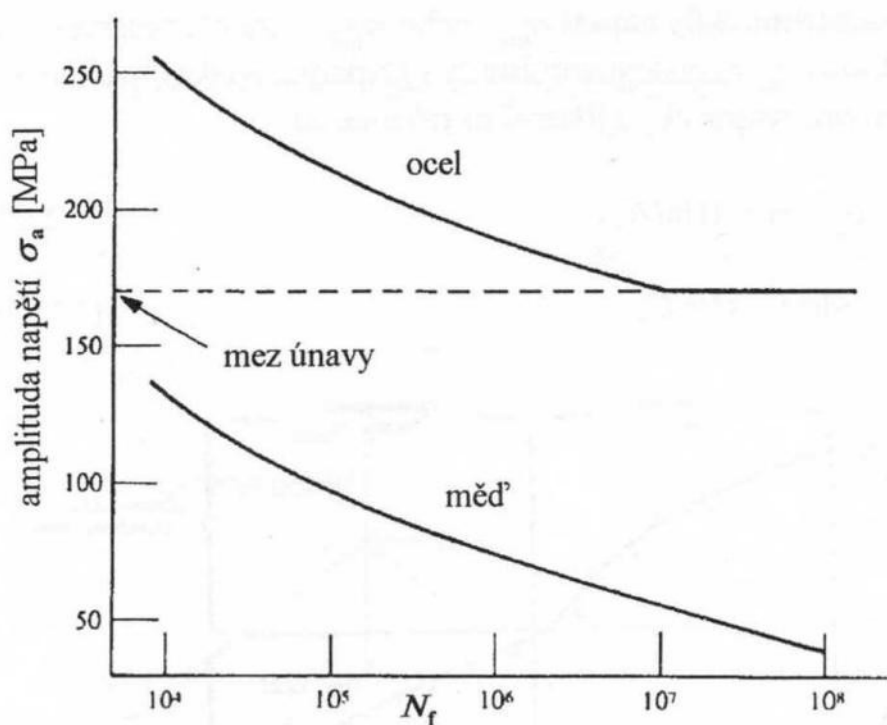


Obr. 4.1 Schéma únavové zkoušky, ohyb za rotace [2]

Při pootočení vzorku o 90° , místa kde působilo tahové a tlakové napětí jsou nyní nezatížena. Při pootočení o 180° místo zatížené původně tahovým napětím je zatíženo napětím tlakovým a obráceně. Tímto způsobem napětí v každém bodě měrné části vzorku se cyklicky mění od maximální hodnoty tahového napětí σ_{\max} přes nulovou hodnotu na maximální hodnotu tlakového napětí σ_{\min} . [2]

Po určitém počtu cyklů může, v závislosti na velikosti působícího napětí, dojít k lomu. Cílem únavových zkoušek hladkých zkušebních těles je zjištění parametrů křivky únavové životnosti materiálu. Únavová křivka životnosti je závislost amplitudy napětí, případně deformace na počtu cyklů do porušení.

V první polovině 20. století postačovala pro inženýrské výpočty znalost meze únavy. Mez únavy je největší amplituda napětí při cyklickém zatěžování, při které má zkušební těleso nekonečnou životnost. Prvním materiálem, na němž se tyto experimenty prováděly byla ocel, tj. materiál, který skutečně takovouto povahu má.



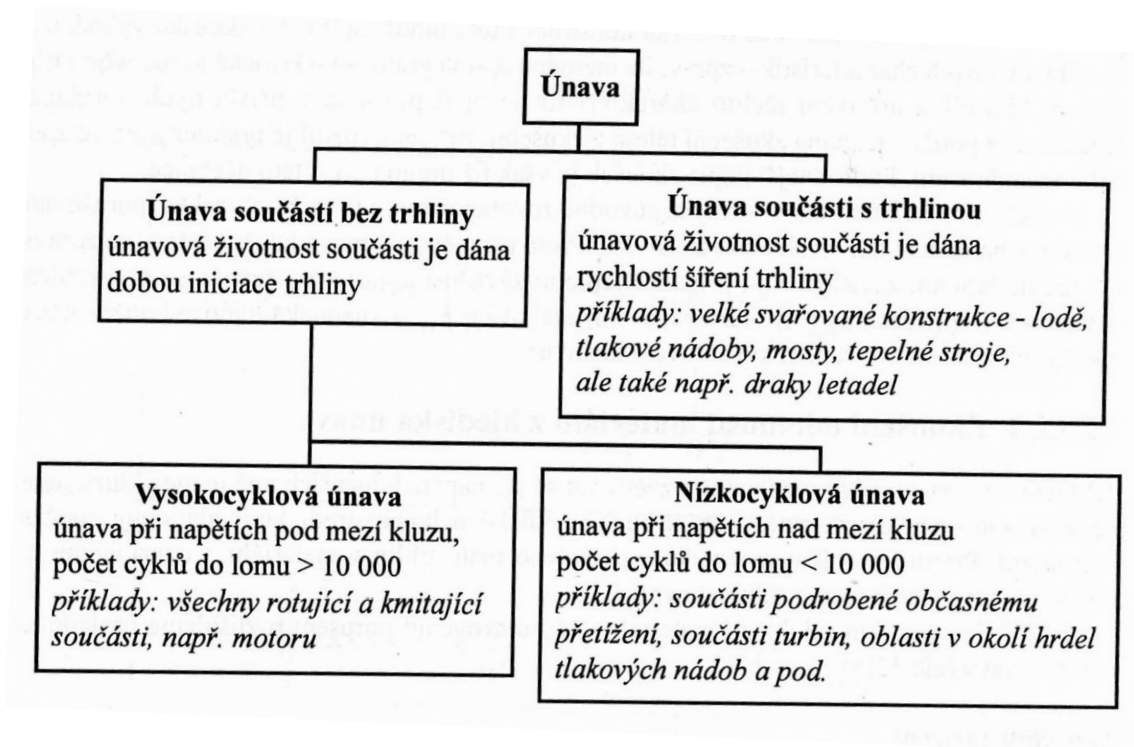
Obr. 4.2 Závislost amplitudy napětí na počtu cyklů do porušení [2]

Jak se ukázalo na Obr. 4.2 u hliníkových slitin, mědi a dalších kovů takováto prahová hodnota se nevyskytuje.

4.2 Současné zkušební metody na únavu

Moderní únavové zkušební stroje můžeme rozdělit do dvou skupin. Rezonanční a servohydraulické. Rezonanční stroje dokáží během zkoušky udržet konstantní parametry zatěžování a jsou vhodné pro studium vysokocyklové únavy a stanovení zákonitostí šíření únavové trhliny. Servohydraulické zkušební stroje jsou v podstatě univerzálními zkušebními stroji, které jsou vybaveny snímači deformace, a lze na nich provádět cyklické zatěžování, jak při konstantním rozkmitu napětí, tak i konstantním rozkmitu plastické deformace. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně i provozním nákladům jsou tyto stroje využívány především pro studium nízkocyklové únavy. [2]

Tvar zkušebních těles a způsob namáhání se volí podle účelu zkoušek. Tah-tlak, ohyb, krut se volí pro zjišťování křivek životnosti v oblasti vysokocyklové únavy hladkých zkušebních těles. Ohyb, tah zkušebních těles s vrubem, u kterých je známý výraz pro součinitel intenzity napětí pro zjištění zákonitostí šíření únavové trhliny. [2]

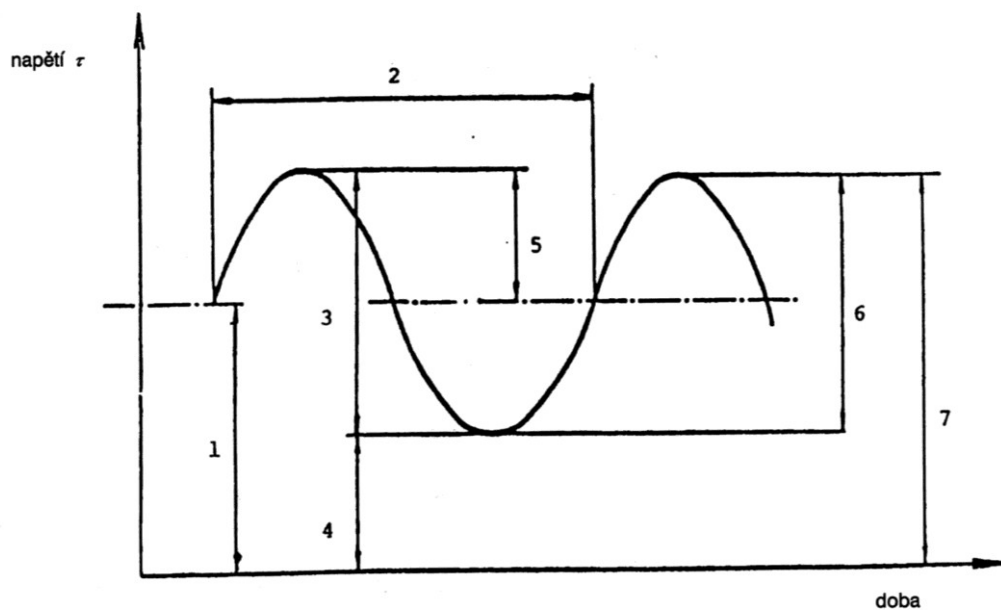


Obr. 4.3 Dělení únavy podle zákonitosti šíření trhliny [2]

4.3 Zkušební metody na únavu lepených spojů

Lepené spoje jsou v dnešní době zkoušeny na únavu pouze zatěžováním ve smyku tahem. Zkoušky se řídí podle normy ČSN EN ISO 9664 [10]. Tato norma předepisuje metodu stanovení meze únavy lepidel ve smyku při tahovém namáhání na standardních zkušebních tělesech za předepsaných podmínek. Jejím cílem je charakterizace konstrukčních lepidel na daném kovovém adherendu s definovanou úpravou.

Zkušební těleso je cyklicky zatěžováno takovým způsobem, který může být považován za superpozici pulzujícího napětí v tahu na statické napětí, které je středním napětím. Počet cyklů při porušení zkušební tělesa se stanoví při daných τ_m a τ_a . Tyto hodnoty se použijí k sestrojení únavových křivek, což potom dovoluje odhad oblasti spolehlivosti, vztahující se k únavové odolnosti slepu.



- 1 - střední napětí kmitu τ_m
- 2 - perioda (doba) kmitu
- 3 - rozkmit napětí $2 \tau_a$
- 4 - minimální napětí kmitu τ_{min}

- 5 - amplituda napětí τ_a
- 6 - $\Delta \tau = \tau_{max} - \tau_{min}$
- 7 - maximální napětí kmitu τ_{max}

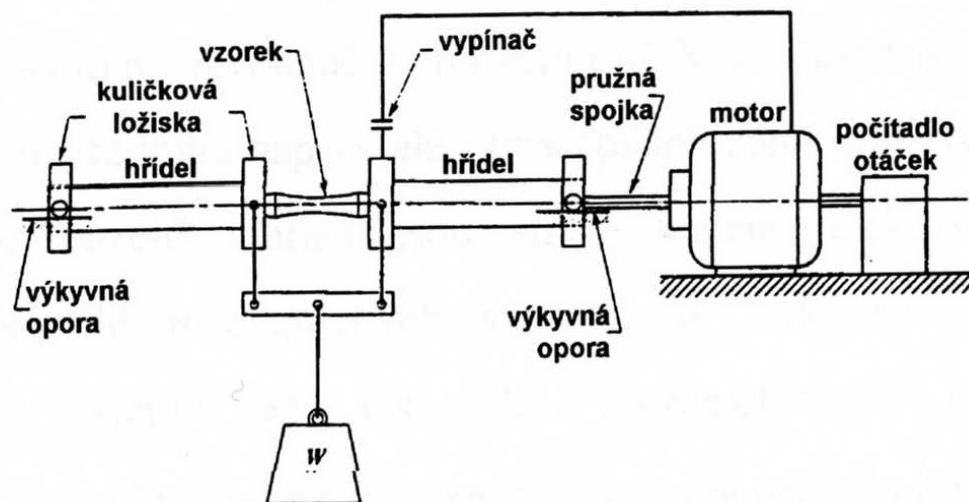
Obr. 4.4 Únavový cyklus [10]

Zkušebním zařízením je únavový zkušební přístroj, schopný vyvíjet sinusové únavové napětí tak, aby se maximální zatížení pohybovalo v rozmezí 10% - 80% rozsahu stupnice. Zkušební frekvence a typ zařízení mohou ovlivnit výsledek zkoušky. Pokud není určeno jinak, frekvence musí být 30Hz. Maximální frekvence musí být 60Hz, protože při vyšší frekvenci by mohlo dojít k nadměrnému zahřátí slevu. Přístroj musí být vybaven samovyrovnávacím zařízením k uchycení zkušebního tělesa. Toto zařízení musí být konstruováno tak, aby se různé díly pohybovaly souose se zkušebním tělesem v době namáhání. Tak je dosaženo shodnosti hlavní osy zkušebního tělesa se směrem působení síly a s osou symetrie zkušebního zařízení.

5. Experimentální část

5.1 Zkušební zařízení

Zkušebním zařízením byl stroj ROTOFLEX značky NU pro měření únavy, vyroben v Moskvě roku 1953, který má motor který se otáčí rychlostí 2830 ot/min(47,16 ot/s). Jedná se o přístroj využívající princip ohyb za rotace ve variaci čtyřbodového ohybu.



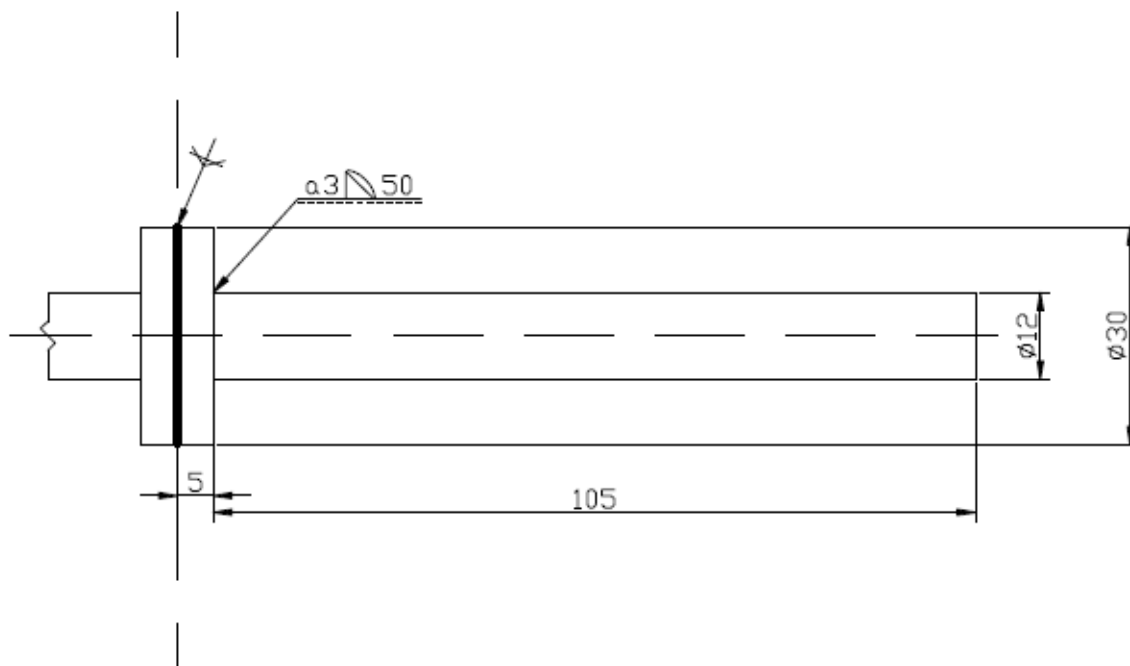
Obr. 5.1 Zkušební zařízení [9]



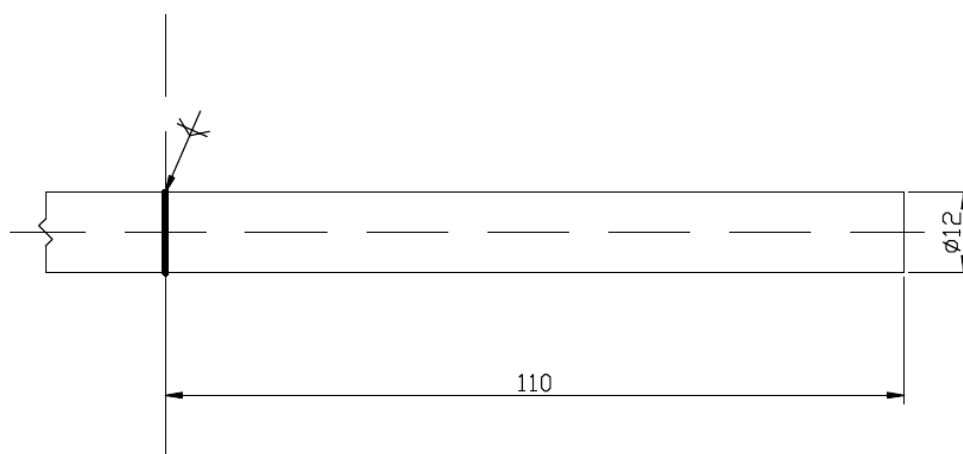
Obr. 5.2 ROTOFLEX

5.2 Zkušební vzorek

Zkušební vzorek byl svařen z dvou dílů a následně slepeny vždy 2 tyto díly k sobě. Vzorek je rotační a symetrický (s odchylkou ve svárech) kolem dělicí roviny lepidla. Souosost při lepení byla zajištěna přípravkem (viz příloha D).



Obr. 5.3 Zkušební vzorek A náskres



Obr. 5.4 Zkušební vzorek B náskres

5.3 Použité lepidlo

Jedná se o lepidlo **3M™ Scotch-Weld EPX Adhesive DP490**. DP490 je dvousložkové epoxidové lepidlo. Je určeno pro vysokopevnostní a houževnaté spojení.

Fyzikální vlastnosti:

	Základ	Akcelerátor
Mix poměr	100	50
Barva	Černá	Krémově bílá
Pracovní životnost	1,5 hodiny minimálně při 23 ° C	
Čas do manipulace	4 až 6 hodin při teplotě 23 ° C	
Čas do plné pevnosti	7dní	
Skladovatelnost	15 měsíců od data expedice z 3M při skladování v původním obalu při teplotě 21 ° C (70 ° F) a relativní vlhkosti 50 %.	

Tab. 5.1 Fyzikální vlastnosti lepidla

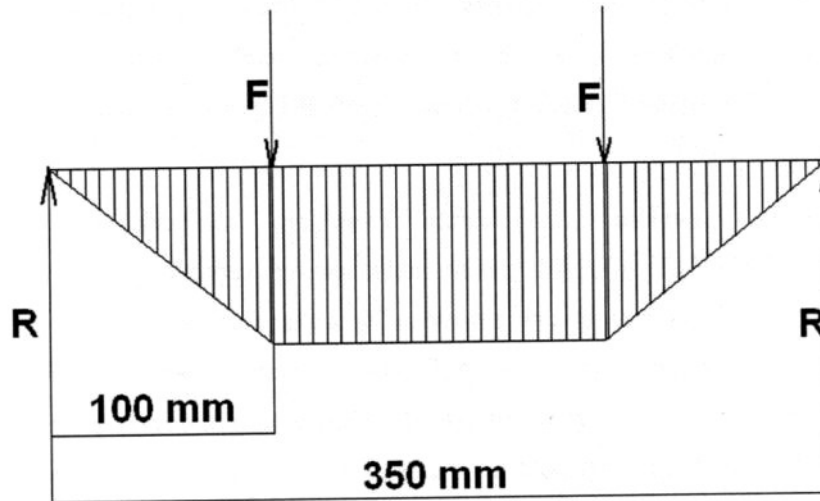
Teplota [° C]	Pevnost ve smyku [N/mm ²]
-55	31,6
23	28,7
80	12,7
120	3,2
150	1,7

Tab. 5.2 Charakteristika lepidla



Obr. 5.5 Použité lepidlo

5.4 Výpočet zatížení



Obr. 5.6 Schéma zatížení [9]

$$a = 100\text{mm}$$

$m_z = 10\text{kg}$hmotnost závaží

$m_t = 2,44\text{kg}$hmotnost zavěšené tyče

$$m = m_z + m_t = 12,44\text{kg}$$

$$F = m \times g = 12,44 \times 9,81 = 122,036 \text{ N}$$

$$M_o = \frac{1}{2} F \times a = 6101,82 \text{ Nmm}$$

$$\sigma = \frac{32 \times M_o}{\pi \times d^3} = \frac{32 \times 6101,82}{\pi \times 30^3} = 2,302 \text{ MPa}$$

Vypočítané hodnoty závaží pro různé meze pevnosti.

Vzorek A:

30mm průměr					
σ [MPa]	50	40	30	20	10
Mo [N/mm]	132468,8	105975	79481,25	52987,5	26493,75
F [N]	2649,375	2119,5	1589,625	1059,75	529,875
m [kg]	270,0688	216,055	162,0413	108,0275	54,01376
mz [kg]	267,6288	213,615	159,6013	105,5875	51,57376

Tab. 5.3 Vzorek A

Vzorek B:

12mm průměr					
σ [MPa]	50	40	30	20	10
Mo [N/mm]	8478	6782,4	5086,8	3391,2	1695,6
F [N]	169,56	135,648	101,736	67,824	33,912
m [kg]	17,2844	13,82752	10,37064	6,913761	3,456881
mz [kg]	14,8444	11,38752	7,930642	4,473761	1,016881

Tab. 5.3 Vzorek B

5.5 Vlastní měření

Pro měření na ROTOFLEXU jsem vycházel z diplomové práce Jana Koudelky [9] ze které jsou převzaty údaje o hmotnosti tyče apod.

Jelikož není nikde stanovena únavová mez pevnosti, bylo potřeba experimentovat se zatížením vzorku. Měření začínalo se vzorky A. Zátěž byla stanovena na 10kg. S touto zátěží bylo natočeno 159500 otáček. Poté byla zátěž zvětšena na 25kg a bylo natočeno 285200 otáček a druhý den ještě 517500 otáček. Tímto se celkový počet otáček přiblížil hodnotě 1 000 000 otáček, a tedy bylo měření zastaveno. Dále došlo k zvýšení zátěže na 45kg a po 136400 otáčkách došlo prasknutí vzorku ve sváru. Z toho lze upozornit na možnou úpravu metodiky. Vhodnější by byl vzorek bez sváru, neboť provařením kovového materiálu dojde k změně jeho vlastností.

Po prasknutí prvního vzorku došlo k upnutí druhého vzorku, opět typu A. Po 183100 otáčkách došlo k prasknutí vzorku v lepeném spoji.



Obr. 5.7 Prasklý vzorek A



Obr. 5.8 Prasklý vzorek A, pohled na stykovou plochu



Obr. 5.9 Detail porušení lepeného spoje

Na Obr. 5.8 lze pozorovat kohezní porušení lepeného spoje, které nastalo na většině celkové plochy. Je zde ovšem i patrné adhezní porušení. To by mohlo být způsobeno nedostatečnou přilnavostí lepidla ke kovovému povrchu. Ovšem zde je patrné, že nějaký vliv zde zřejmě mělo spojení dvou částí kovového materiálu. 12mm tyčka a 30mm mezikružší jsou v lepeném spoji viditelně odděleny. Je tedy možné, že únavový lom byl tímto přechodem urychlen.

V levé spodní části jsou viditelné bublinky a jiná struktura lepeného spoje, zde zřejmě došlo k jinému tvrdnutí lepidla.

Měření dále probíhalo na vzorku B. Tento vzorek má menší průměr stykové plochy a tedy je potřeba menší hodnota závaží, aby bylo dosaženo stejné hodnoty pevnosti. Ovšem při vycházení z diplomové práce J. Koudelky[9] bylo zjištěno, že hmotnost zatížení vzorku není pouze hmotností tyče a hmotností závaží, ale je nutné započítat i hmotnost mechanismu, na kterém je tyč uchycena. Hmotnost ložisek a upínacího mechanismu, ve kterém je vzorek uchycen, není určitě zanedbatelná. Pro měření kde je důležité, aby přesnost v zátěži bylo 0,5kg jsou tyto nepřesnosti podstatné. Dále pak zajištění souososti lepených ploch je velice důležité a zřejmě přípravek, kterým byla souosost zajištěna, nebyl dostačující. Při roztočení vzorku B bylo zřejmé lehké vyosení a tudíž i vibrace vzorku. Všechny tyto faktory zřejmě ovlivnily měření. Vzorek B po upevnění a roztočení praskl téměř okamžitě.



Obr. 5.10 Prasklý vzorek B, pohled na stykovou plochu

Opět je zde viditelné kohezní porušení lepeného spoje. Lehký oděr lepeného spoje byl způsoben dotáčením prasklého vzorku po prasknutí lepeného spoje, než došlo k úplnému zastavení.

6. Závěr

Cílem této práce bylo najít metodiku pro stanovení meze únavy lepených spojů. Ověřit její použitelnost v praxi a pokusit se odstranit všechny nežádoucí faktory zasahující do měření.

Použití ROTOFLEXU se zdá být vhodným přístrojem pro tuto metodiku. Problém byl v návrhu vzorků. Pro průměry 30mm je nutná zátěž příliš velká a dochází ovlivnění samotné meze únavy lepidla ostatními únavovými mezemi. Ruční svár není vždy dokonalý. Místy dojde k špatnému provaření materiálů a tudíž pevnost takového spojení je dosti malá. Při přílišném provaření dojde k změně vlastností materiálu a může dojít k jeho porušení dříve, než lepený spoj dosáhne své únavové meze pevnosti.

Bylo by tedy vhodné použití strojního svařování. Ovšem to je v mnoha podmínkách nesplnitelné a často i příliš nákladné. Mnohem lepší řešení se nabízí při použití vzorku z jednoho kusu materiálu. Pro upnutí do ROTOFLEXU je nutné dosáhnout vhodného průměru, v našem případě 12mm. Ovšem potřebujeme dosáhnout většího průměru stykových ploch. Při malých stykových plochách je rozdíl v závaží poměrně velmi malý. Navíc zatížení vzorku nezáleží na závaží ale i na celém mechanismu, na kterém je závaží zavěšeno.

Tento mechanismus má nějakou svou váhu, která je obtížně změřitelná, neboť je celým mechanismus součástí skříňového podstavce ROTOFLEXU. Změřena byla hmotnost tyče, na kterou se zavěšuje závaží, získali jsme tedy část hmotnosti mechanismu. Zvětšíme-li styčné plochy, musíme i zvětšit hmotnost, kterou tyto plochy zatížíme. Pokud se budeme pohybovat v zátěžích desítek kg, poměrné ovlivnění nezměřenou hmotnostní mechanismu se o dost sníží. Tedy je potřeba zvětšit lepené plochy.

Ideální by zřejmě bylo vysoustružit z jednoho kusu materiálu tyčku o průměru 12mm na jedné straně a průměru 20mm-30mm na druhé straně se zaobleným přechodem mezi těmito dvěma průměry.

Je vhodné použít kovový materiál, který má vysokou únavovou pevnost, o hodně větší než měřené lepidlo. Toto je velmi těžce určitelné, zvláště když se nikde únavová pevnost lepidel neurčuje.

Z důvodu prasknutí pouze jednoho vzorku v rámci použitelných hodnot je velmi těžké odvozovat závěry a charakteristice lepidla. Při zatížení 45kg a použitém průměru 30mm je spočítaná mez únavy $\sigma = 8.77$ MPa při 136400 otáčkách. Ovšem i to bylo ovlivněno změnou zátěže při předchozím měření s 25kg zátěží. Kdybych měl odhadnout skutečný počet cyklů do prasknutí s použitím zátěže 45kg jednalo by se zřejmě o 300000-500000 otáček. Nedalo se to bohužel ověřit neboť vzorek nevydržel tento počet otáček a praskl ve sváru.








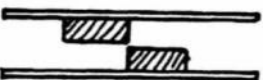
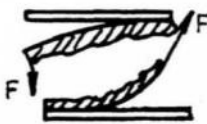
Je nutné stanovit experimentální formou mez pevnosti pro různé druhy lepidel a k nim poté určit kovové materiály pro příští měření. Toto všechno je velmi časově náročné a myslím si, že by se na toto téma dala zpracovat diplomová práce, která by základy položené v této práci dotáhla do dokonalosti.

Seznam použité literatury

- [1] OSTEN, M: *Práce s lepidly a tmely*, Grada Publishing Praha, 1996. 136 s.
- [2] PTÁČEK, L. a kol.: *Nauka o materiálu I.-II.*, CERM, Brno 2001, ISBN 80-7204-193-2
- [3] FOLTA, Jiří. *Hodnocení pevnosti lepených spojů v konstrukci autobusů*. 2008. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Švanda, Ph.D. .
- [4] *Lepení* [online]. [2010] [cit. 2010-07-08]. Dostupný z WWW: <www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/spt/lepeni.pdf>.
- [5] *Spojování kovových materiálů* [online]. [2010] [cit. 2010-08-08]. Dostupný z WWW: <http://jhamernik.sweb.cz/Spojovani_kovu.htm>.
- [6] *Pájení kovů* [online]. [2010] [cit. 2010-08-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.zivotnistyl.cz/clanky/hobby/25/pajeni-kovu.html>>.
- [7] *Lepení kovů* [online]. [2010] [cit. 2010-10-08]. Dostupný z WWW: <<http://www.uhu.cz/lepeni-kovu>>.
- [8] *Vlastnosti tekutin* [online]. [2010] [cit. 2010-10-08]. Dostupný z WWW: <http://www.vscht.cz/uchi/ped/hydoteplo/szz2010/szz.vlastnosti_tekutin.pdf>.
- [9] Koudelka, Jan Bc. *Testování vlivu vnitřních vad na únavovou pevnost hliníkových slitin*. 2009. 65 s. Vedoucí bakalářské práce Doc. Ing. Schmidová Eva, Ph.D. .
- [10] ČSN EN ISO 9664. *Lepidla – Zkušební metody na únavu konstrukčních lepidel zatěžovaných ve smyku tahem*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [11] ČSN ISO 10365. *Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. Praha: Český normalizační institut, 1995.
- [12] PETRIE, E. M.: *Handbook of Adhesives and Sealants*. McGraw-Hill, New York USA, 2000, ISBN 0-07-049888-1
- [13] *Lepidla - tmely* [online]. [cit. 2010-10-08] Dostupný na WWW: <<http://www.oblibene.cz/lepidla/?cap=4852>>.

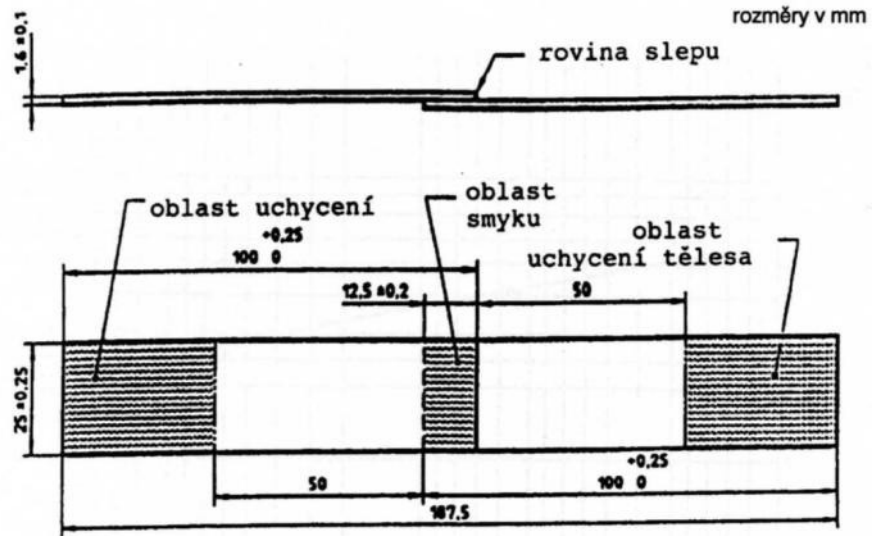
PŘÍLOHY

Příloha A: Tabulka označení typů porušení [11]

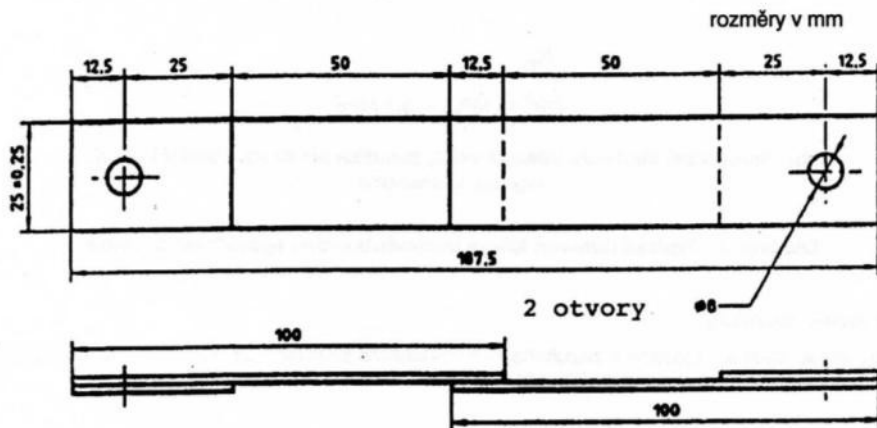
	Typy porušení	Označení
Substrát	 Porušení jednoho nebo obou adherendů	SF
	 Porušení jednoho adherendu	CSF
	 Porušení delaminační	DF
Lepidlo	Typy kohezního porušení	
	 Kohezní porušení	CF
	 Speciální kohezní porušení	SCF
		
Lepidlo	  Adhezní porušení	AF
	 Adhezní a kohezní porušení	ACFP

Příloha B: Tvary a rozměry zkušebních těles [10]

ČSN EN ISO 9664



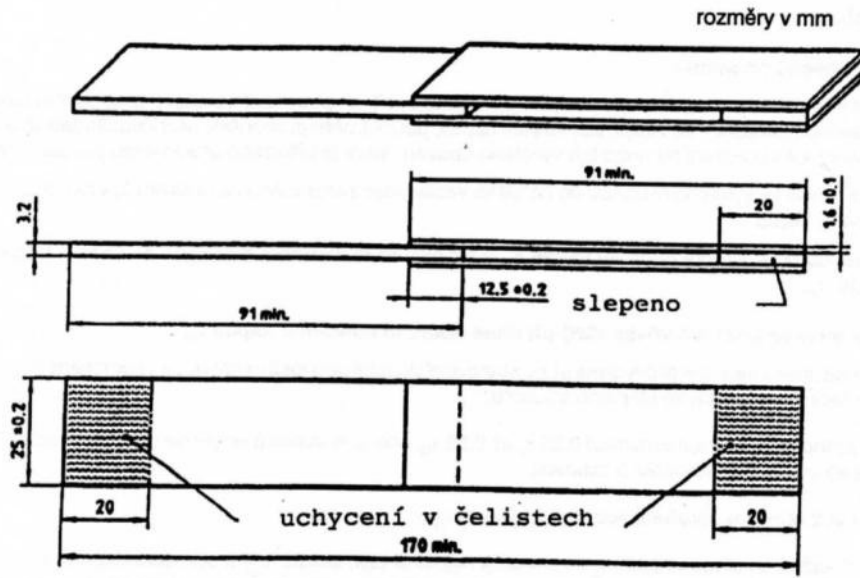
3a) - Uchycení ocelového tělesa v čelistech



3b) - Uchycení ocelového tělesa pomocí trnu

Příloha C: Tvary a rozměry zkušebních těles, zkušební panely [10]

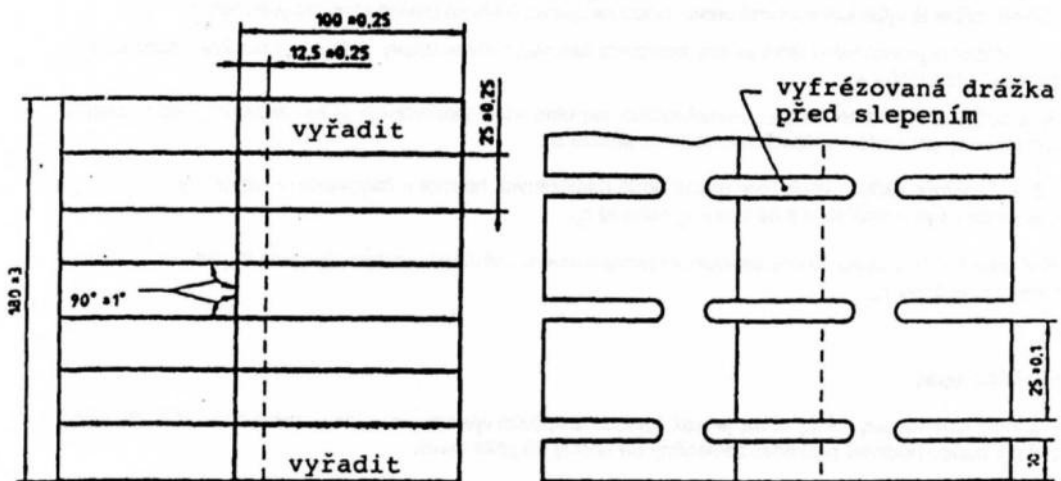
ČSN EN ISO 9664



3c) - Hliníková tělesa s dvojitým přeplátováním

Obrázek 3 - Tvar a rozměry zkušebních těles

rozměry v mm



4a) - Typický zkušební panel pro ocel

4b) - Typický zkušební panel pro hliník s dvojitým přelepem

Obrázek 4 - Zkušební panely

Příloha D: Přípravek pro lepení k zajištění souososti

