

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
AGRONOMICKÁ FAKULTA

DIPLOMOVÁ PRÁCE

BRNO 2017

TOMÁŠ HAVRÁNEK

Mendelova univerzita v Brně
Agronomická fakulta
Ústav techniky a automobilové dopravy



**Vizualizace normálového a tečného napětí u lepených
spojů**

Diplomová práce

Vedoucí práce:

doc. Ing. Michal Černý, CSc.

Vypracoval:

Bc. Tomáš Havránek

Brno 2017

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: „Vizualizace normálového a tečného napětí u lepených spojů“ vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl velice rád poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Michalu Černému, CSc. za metodické vedení, ochotně poskytnuté rady, vynaložený čas a cenné připomínky, které mi pomohly v řešení dané problematiky. Dále mé poděkování patří panu Lukáši Tesaříkovi a Jiřímu Havránkovi za pomoc při přípravě vzorků a v neposlední řadě mé rodině, která mě v průběhu celého studia podporovala.

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá lepenými spoji. Teoretická část práce je zaměřena na základní poznatky, výhody a nevýhody lepených spojů. Velká část je věnována teorii lepícího procesu, adhezi, kohezi a smáčivosti lepených ploch. V závěru teoretické části je vypracovaná rešerše z oblasti namáhání lepených spojů a metody, sloužící k hodnocení kvality vytvořených spojů. Praktická část se skládá z přípravy tuhých a elastických zkušebních vzorků. Experimentální testování lepených ploch zkouškou lámavosti, při které byly monitorovány zvukové signály akustické emise charakterizující porušování lepených spojů. Výsledky tohoto experimentu jsou v závěru práce vyhodnoceny.

Klíčová slova: lepení, lepidlo, adheze, koheze, akustická emise

ABSTRACT

This master thesis deal with the glued joint. Teoretical part is focused on basic facts and an advanteges or disadvantages of this technique. A large part is devoted to theory of gluid process, adhesion, cohesion wettability of glued surfaces. Last part of the theoretical part is searches in the field of tension glued joints and methods to quality assessment of made joint. Experimental testing glued surfaces was made as bend test. During testing was monitored the acoustic emissions. The emissions characterize violation of glued joints. Results of this experiment are evaluated in the end of this thesis.

Key words: bonding, adhesive, adhesion, cohesion, acoustic emission

OBSAH

1	ÚVOD.....	9
2	CÍL PRÁCE.....	10
I.	TEORETICKÁ ČÁST.....	11
3	LEPENÝ SPOJ	12
3.1	Historický vývoj technologie lepení.....	12
3.2	Klady a zápory lepených spojů.....	14
4	TEORIE LEPÍCÍHO PROCESU.....	18
4.1	Adheze.....	19
4.1.1	Mechanická teorie adheze	20
4.1.2	Difúzní teorie adheze	20
4.1.3	Chemická teorie adheze.....	21
4.1.4	Molekulová (adsorpční) teorie adheze.....	21
4.1.5	Elektrostatická teorie adheze	22
4.2	Koheze.....	22
4.3	Smáčivost.....	23
5	TECHNOLOGIE LEPENÝCH SPOJŮ.....	26
5.1	Základní konstrukční možnosti	26
5.2	Úprava povrchu lepených ploch.....	29
5.2.1	Fyzikální úkony.....	31
5.2.1.1	Broušení	31
5.2.1.2	Kartáčování	32
5.2.1.3	Otryskávání	32
5.2.2	Chemické úkony	33
5.2.2.1	Odmašťování lepených ploch	33
5.2.2.2	Moření.....	33
5.2.2.3	Primery	34
5.2.2.4	Fosfátování.....	34

6	NAMÁHÁNÍ LEPENÝCH SPOJŮ.....	35
6.1	Rozložení napětí u přeplátovaného spoje	35
6.2	Tahové napětí lepeného spoje	37
6.3	Ohybové napětí v lepeném spoji	38
6.4	Smykové napětí u lepených spojů	39
7	ZKOUŠKY LEPENÝCH SPOJŮ.....	40
7.1	Metody destruktivní	41
7.1.1	Stanovení pevnosti ve smyku dle ČSN EN 1465	41
7.1.2	Zkouška lámavosti lepených spojů	41
7.1.3	Zkouška lepených spojů v odlupování.....	42
7.1.4	Pevnost lepených spojů při namáhání rázem	43
7.2	Metody nedestruktivní	44
7.2.1	Akustická emise (AE)	45
II.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	46
8	METODIKA DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	47
8.1	Výroba vzorků pro měření	48
8.2	Výběr lepidla	51
8.3	Úprava povrchu adherendů	52
8.4	Lepení vzorků	53
8.5	Zkoušení lepených těles	55
8.6	Vyhodnocení zkoušek	57
8.6.1	Ocelové vzorky	57
8.6.2	Vzorky PVC.....	61
9	DISKUZE	65
10	ZÁVĚR.....	67
11	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	69
12	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	71
13	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK.....	73

14 PŘÍLOHY	74
14.1 Technický list k lepidlu Loctite Hysol 9461	74

1 ÚVOD

S rostoucími požadavky na technickou úroveň konstrukcí se zvyšují v poslední době nároky i v oblasti spojování materiálů. Lepení je často jedinou možnou spojovací metodou, která nenarušuje vlastnosti základních materiálů, poskytuje nové kombinační možnosti a umožňuje získat vlastnosti a tvary, které nelze jiným způsobem dosáhnout.

Lepení umožňuje vytvářet spoje jak pevné, tak zároveň pružné. Lepit lze téměř všechny materiály. K tomu, aby lepený spoj plnil svoji funkci a měl požadovanou pevnost, je důležité znát nejen vlastnosti lepidel a lepených materiálů, ale i vhodné způsoby úprav lepených ploch. Nelze však očekávat, že pro vytvoření kvalitního spoje je možné využít každé lepidlo. Proto je k dispozici opravdu široká škála lepidel, ze které je možné vybrat (např. epoxidová, chloroprenová, polyuretanová lepidla a mnoho dalších). Při výběru je možné požádat o více informací rovnou výrobce nebo jsou k dispozici technické listy, kde lze najít pokyny pro použití a další všeobecné informace o lepidlech. Pokud má mít lepený spoj dlouhou životnost, je nutné uvažovat, jakým způsobem budou lepené materiály namáhány.

S rozšířením technologických postupů v poslední době dochází ke kombinaci spojů lepení – svařování, lepení – pájení a lepení – nýtování. Tyto kombinace spojovacích metod se dnes využívá v nejrůznějších odvětvích, nejvíce však v automobilovém, leteckém, vojenském průmyslu a v dalších. Lepení snižuje ekonomické náklady, hmotnost lepených celků a přitom zajišťuje vysokou pevnost a životnost.

Lepení se dnes hojně využívá i v domácím prostředí při individuálních pracích. Metoda totiž nevyžaduje vysoké nároky na vybavení dílny. To ovšem nesnižuje fakt, že i doma lze vytvořit kvalitní a pevný lepený spoj s dlouhou životností.

U každé spojovací metody lze najít nedostatky. Ty najdeme i u technologie lepení. Je důležité dbát na konstrukci celého spoje. Připravené lepidlo není možné neomezeně skladovat. Je nutné zajistit pokud možno ideální podmínky k lepení (okolní teplota a vlhkost vzduchu). Eliminace těchto činitelů může významně zlepšit vlastnosti vytvořeného lepeného spoje. Není – li to možné, je vhodnější pro lepší výsledek využít jinou metodu spojování.

2 CÍL PRÁCE

Cílem diplomové práce je provést experimentální ověření lámavosti lepených spojů podle ČSN 66 8511 na souboru tuhých a elastických vzorků se snímáním emisních událostí při vzniku a šíření defektu (lomu) v lepidle (materiálu) prostřednictvím snímače akustické emise (AE). Dalším úkolem je vyhodnotit vlastnosti použitého lepidla Loctite Hysol 9461 prostřednictvím vzhledu lomu u poškozených tuhých a elastických vzorků. Posledním úkolem je zhodnotit reprezentativní příklady grafických záznamů AE v závislosti na charakteru poruchy lepených spojů.

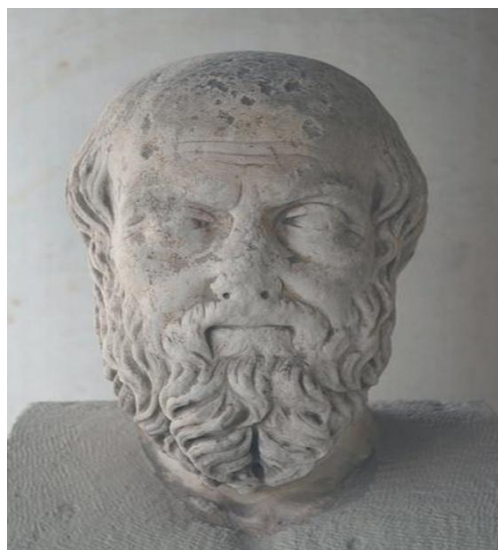
I. TEORETICKÁ ČÁST

3 LEPENÝ SPOJ

Lepidla jsou známá již 6000 let. Až ve 20. století nicméně došlo k výraznému vývoji a rozmachu celé technologie lepení. Dnes již tuto techniku řadíme mezi běžné způsoby spojování různorodých materiálů. Lepením se tedy vytváří pevný nerozebíratelný spoj pomocí přídatného tekutého materiálu, který při tuhnutí přilne adhezí ke spojovaným částem. Díky neustálému vývoji lepidel roste také počet materiálů, které lze slepit. Nejčastěji se lepí dřevo, papír, kovy, keramika, sklo, kůže, termoplasty, pryž, PU pěny, textil, beton nebo stavební keramika. [1]

3.1 Historický vývoj technologie lepení

Spojování kovů a plastů lepením zaznamenalo v posledních dvaceti letech značný rozmach, který způsobil, že je tato metoda řazena mezi takzvané nové techniky spojování, i když je ve skutečnosti velmi stará a první technika lepení se začala využívat již v době kamenné, kde se užívalo březové smoly k výrobě věder z březové kůry, k lepení hrotů šípů, harpun apod. Výrobu lepidel živočišného původu znali již staří Egypťané. Jako pojivo pro zdobení dřevěných rakví pigmenty, se využívala směs křídly a klišu. Sošky, které byly nalezeny v Babylóně, měly oči ze slonoviny zalepeny do očních důlků. Tento tér jako lepidlo držel téměř 6000 let. [3]



Obr. 1 Zalepené oči babylónské sošky [15]

Ve starověku se k lepení používal albumin ze zvířecí krve, dextrin z papyru a glutin, který se získával vařením kostí, kůží a zbytků ryb. Dle Plinia byl hojně využíván také rybí klič. K utěsnění lodí používali Římané dřevěné klíny společně s dehtem a včelím voskem. Také vaječné bílky našly své uplatnění v technologii lepení. Zejména při lepení zlatých fólií na papír. Vaječný bílek byl zjištěn v lepidle, kterým jsou přilepeny staré římské mince k víku dubové skříňky, která byla objevena roku 1886 ve Wroclawi.

Jihoameričtí domorodci patří mezi národy, které zůstaly na nižším stupni kulturního vývoje a používají včelí vosk k lepení per a utěšňování nádob i v dnešní době.

První plantáže surovin pro výrobu kliču byly založeny v Holandsku od roku 1690. Kolem roku 1700 vznikly první továrny na výrobu rybího kliču v Anglii. Asi v roce 1750, byl vydán Británii první patent na výrobu rybího lepidla. Patenty poté byly rychle vydány i pro lepidla vyráběná z přírodního kaučuku, zvířecích kostí, ryb, škrobu, mléčné bílkoviny (kasein). Do roku 1900 vyrostlo mnoho továren vyrábějící lepidlo z uvedených materiálů.

Další milník v oblasti vývoje lepidel i lepení představoval objev nitrace celulosy v letech 1845 až 1846. První továrna na celuloid byla v Americe otevřena v roce 1872. Počátky průmyslového využívání syntetických lepidel se datují až do roku 1912, kdy byl na obuvnické výstavě v Budyšině (Bautzen, Německo) představen propracovaný výrobní postup lepení obuvi.

Velká změna v oblasti výroby lepidel nastala před druhou světovou válkou, kdy se ve velké míře začal rozvíjet průmysl s výrobou plastických hmot. Vše začalo v roce 1910, kdy byl objeven bakelit. Poté se na trhu objevily syntetické pryskyřice, které měly daleko lepší účinky i vlastnosti než do té doby používaná přírodní lepidla. Objev fenolformaldehydové pryskyřice představoval další mezník v historii techniky lepení. Dále ve 20., 30. a 40. letech bylo syntetizováno mnoho nových plastů a pryží. Lepidlo pod názvem Redux začala využívat společnost de Havilland ve Velké Británii při výrobě letounu typu DH – 103 Hornet. Díky lepení duralu na překližku došlo k výraznému snížení množství použitého dřeva na sklápěcích křídlech letounu. Lepení mělo takový úspěch, že bylo použito i u prvního poválečného letounu firmy de Havilland DH – 104 Dove. Firma vyrobila celkem 528 kusů tohoto letounu. [2, 15]

Letecký průmysl v USA začal lepení používat až od roku 1941. Do roku 1943 bylo slepeno felolkaučukovým Cycleweldem 50 000 různých prvků, nejčastěji pro stíhací letouny. Díky letectví se tedy technologie lepení stává jednou z nejvyužívanějších metod pro rychlé, snadné a pevné spojování konstrukčních materiálů. Jsou lepeny stále větší a složitější prvky konstrukce letounů. Díky velkému kvalitativnímu vývoji se lepení začíná využívat i u menších letounů.



Obr. 2 Letoun De Havilland DH – 104 Dove [4]

Od roku 1965 začali techniku lepení využívat všichni světově známí výrobci letounů. Byly vyvinuty zjednodušené postupy lepení. Postupně se tedy technologie začala ve větší míře uplatňovat i do ostatních odvětví průmyslu. Pro příklad lze jmenovat automobilový průmysl, stavebnictví, stavbu lodí, vagónů, měřicí a regulační techniku. Světová produkce výroby lepidel neustále roste. V současnosti jsou lepidla vyráběna přesně podle požadavků odběratele a jen těžko by se dnes hledal obor, kde by se nepoužívala. Navzdory jejich rozsáhlé historii mají stále co nabídnout a mají vysokou perspektivu do budoucna. [3]

3.2 Klady a zápory lepených spojů

Mezi konvenční způsoby spojování materiálů patří nepochybně svařování, pájení, nýtování a šroubové spojování materiálů. Lepení nachází využití především tam, kde nevyhovují nebo nejsou možné klasické způsoby spojení. Svarové spoje nemohou být

jednoduše nahrazeny spoji lepenými. Spíše je třeba jejich společné užití. Vytvořený spoj musí být dostatečně pevný, houževnatý a především nepohyblivý. Lepení se vyznačuje nejen mnoha výhodami, ale také nevýhodami. Konstruktor tedy musí pečlivě posoudit, kterou metodu pro spojení materiálů použije. Musí zkrátka zvážit, zda je lepení vhodnou technologií ve srovnání s jinými metodami spojování materiálů. [1]

Přednosti lepení
Lze spojovat materiály různého druhu a tloušťky (např. kov – pryž)
Žádné nebo minimální tepelné namáhání materiálu
Nedochází k ovlivnění struktury spojovaných materiálů
Vodotěsnost a plynotěsnost spoje
Lepený spoj nezvyšuje hmotnost celé soustavy
Zvýšení celkové tuhosti
Tlumení vibrací, chvění a hluku
V adherendu nejsou žádné koncentrátoři napětí (díry, drážky)
Vysoká pevnost při namáhání ve smyku a rázové pevnosti
Spojování tenkých materiálů (plechů), které nelze svařit ani nýtovat
Spojení materiálů, které mají zcela rozdílné vlastnosti
Snížení výrobních nákladů
Zvýšení bezpečnosti při poruše materiálu (Obr. 3)
U lepeného spoje nedochází k oslabení konstrukcí
Omezení elektrolytické koroze kovových adherendů
Různá estetická úprava spoje (průhledné, barevné)
Rovnoměrnost celkového zatížení (Obr. 4)

Tab. 1 Výhody lepených spojů [1, 3, 6]

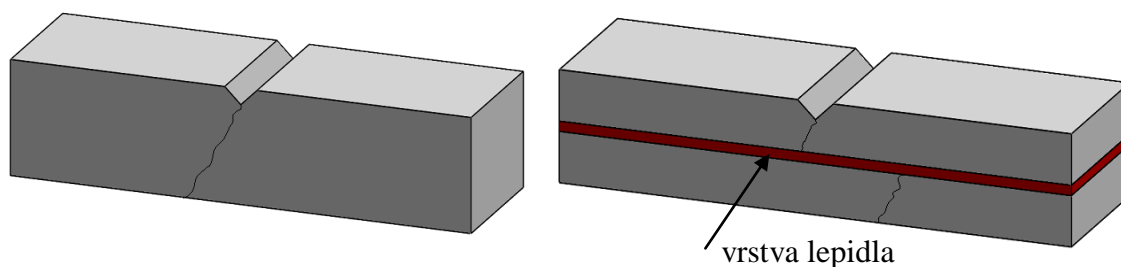
Velkou předností lepených spojů oproti klasickým metodám spojování je celkové zvýšení pevnosti nově vzniklého spoje. Otvory pro šrouby nebo nýty zmenšují průřez spojovaných dílů a vyvolávají poměrně velkou koncentraci místního napětí.

Díky lepidlu lze také vyrovnat a utěsnit velké nerovnosti v materiálu. Pokud vytvořený spoj nebude dostatečně těsný, tak hrozí velké nebezpečí vzniku koroze. Korozní náchylnost je zvýšena zejména u švových svarů, kde vlivem tepelného ovlivnění místa vzniku svaru dochází ke změně struktury adherendů.

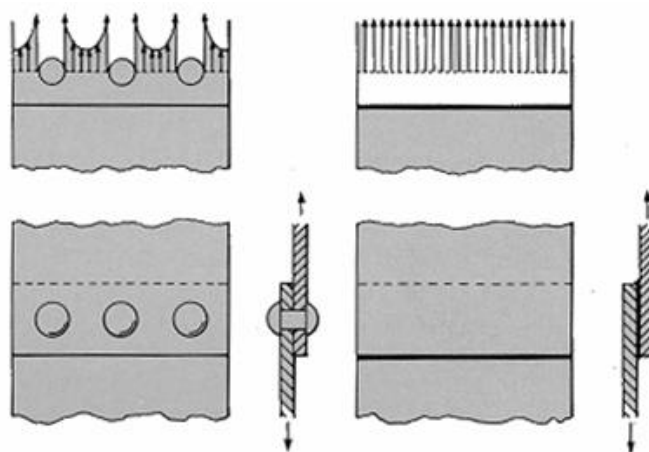
Snížení výrobních nákladů je ovlivněno prvotní úpravou materiálu před samotným lepením. Odpadají časově náročné přípravné práce jako např. vrtání, řezání závitů apod. Vytvrzovací doba lepidla je také nezávislá na délce spoje. [2]

Vytvořená vrstva lepidla dokáže velmi dobře izolovat účinky vzniklého technologického vrubu. Tento fakt zvyšuje bezpečnost i v okamžiku, kdy vznikne defekt v materiálu vlivem obrábění.

Na obrázku 3 lze vypořadovat, že se vzniklý defekt šíří od vrubu pouze k nanesené vrstvě lepidla. Další postup poškození pokračuje na jiném místě, takže druhá část materiálu není prvotním vrubem nijak ovlivněna. U lepených dílů tedy může dojít k výraznému zvýšení vrubové houževnatosti oproti stejnému dílu z jednoho plného materiálu. [3]

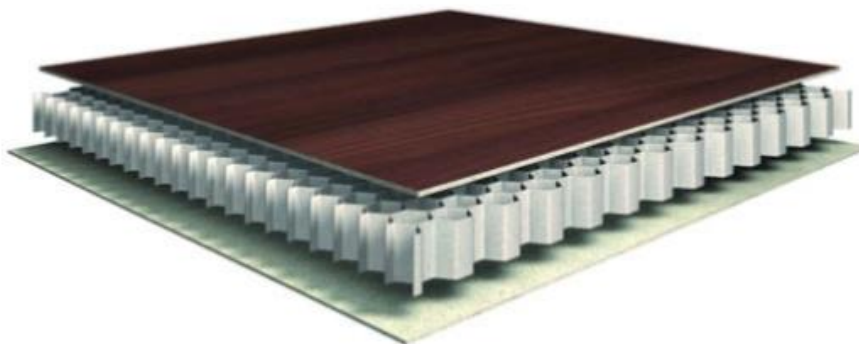


Obr. 3 Účinky vrubu na plný a lepený díl [3]



Obr. 4 Vizualizace napětí u nýtového a lepeného spoje [5]

Technologie lepení v kombinaci s neustálým vývojem lepidel umožnila velký rozvoj odlehčených materiálů. Jednotlivé vrstvy se spojují lepidly, která musí spolehlivě slepit různorodý materiál jádra a pláště. Použití těchto vrstvených (sendvičových) materiálů je v dnešní době velmi mnohostranné. Od trupů lodí, letadel a automobilů, přes konstrukční díly ve stavebnictví, nábytkářství apod. Zkrátka všude tam, kde je třeba vysoká pevnost, ale zároveň co možná nejnížší hmotnost. [12]



Obr. 5 Ukázka voštinové konstrukce materiálu [19]

Nedostatky lepení
Vysoké požadavky na čistotu povrchu lepených ploch (hrubé nečistoty, odmaštění)
Nutná speciální úprava povrchu při spojování materiálů se špatnými adhezními vlastnostmi
Vytvořený spoj je nerozebíratelný (velmi obtížná demontáž lepených spojů)
Citlivost spoje vůči namáhání v odlupování
Omezená odolnost vůči vyšším teplotám
Nejvyšší pevnosti se dosáhne až po určité době
Nevhodnost do dlouhodobě agresivního prostředí
Lepení nelze provádět při nízkých teplotách
Nemožná recyklace
Časově omezená skladovatelnost většiny lepidel

Tab. 2 Nedostatky lepených spojů [1, 3, 6]

Každá technologie pro spojování materiálů má přesně daný technologický postup, který musí být dodržen. U lepení tomu není jinak. Celý postup lepení se skládá z jednotlivých úkonů, které na sebe navazují. Bezpodmínečně nutné je dodržet např. směšovací poměr jednotlivých složek lepidla, použitelnost směsi po smíšení, teplotu při lepení, tlak, dobu vytvrzování a podobně.

Před samotným procesem lepení musí být provedena úprava lepených ploch. Tato operace je většinou nutná a pro konečnou pevnost spoje rozhodující. Její komplikovanost závisí na druhu adherendu i na požadovaných vlastnostech lepeného souboru. Jsou to nároky na mechanickou pevnost, tepelnou odolnost, chemickou stálost, vodovzdornost spoje, odolnost vůči povětrnostním vlivům a 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. [2]

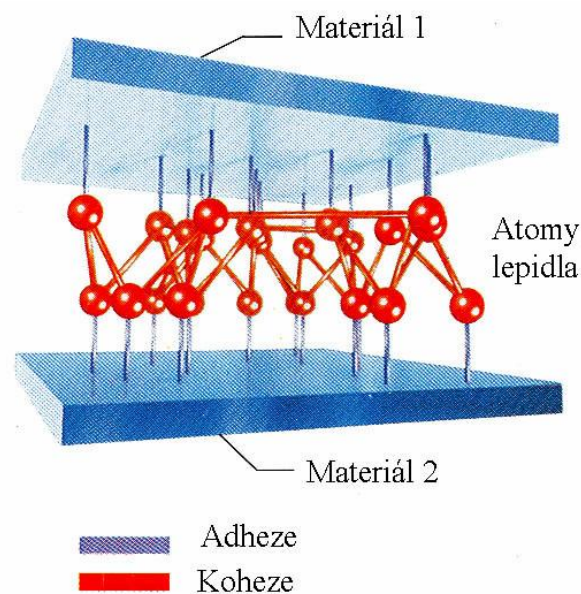
4 TEORIE LEPÍČÍHO PROCESU

Při přiblížení dvou materiálů na molekulární vzdálenost což je méně než $3 \cdot 10^{-8}$ m, by již nebylo potřebné využívat nejrůznější technologie pro spojování materiálů. Díky vzájemné přitažlivosti by se totiž materiály spojily samy. Toto prohlášení je však pouze teoretické a prakticky ho nelze uskutečnit, protože by musely být spojované plochy absolutně rovné, souběžné a čisté.

Díky lepší přilnavosti mezi povrchy pevné a tekuté látky se ke spojování součástí (materiálů) využívá lepidel (adheziv). Samotné lepidlo musí lepený povrch dostatečně smáčet a za určených podmínek musí mít schopnost přejít do pevného stavu. Kapalná látka (lepidlo) se také snadno přizpůsobí všem nerovnostem povrchu a dokáže odstranit většinu pohlcených par a plynů z mikropórů povrchu. [2]

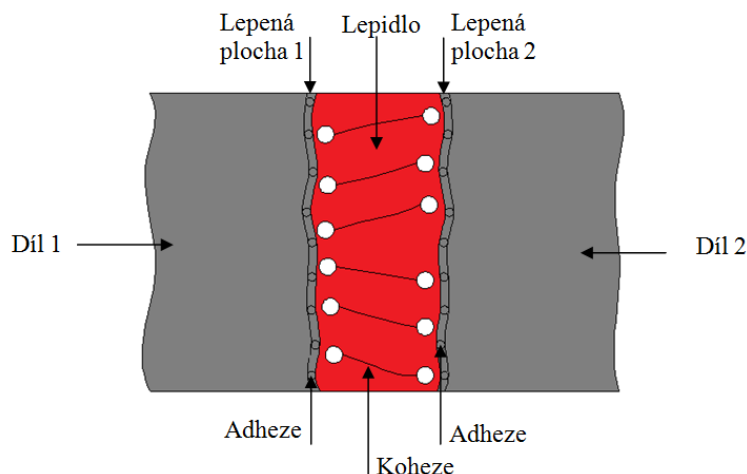
Pevnost lepeného spoje závisí především na třech parametrech:

- Přilnavosti lepidla k lepenému povrchu (adhezi)
- Soudržnosti filmu lepidla neboli vnitřní pevností lepidla (kohezi)
- Smáčivosti lepeného povrchu [12]



Obr. 6 Kontakt atomů lepidla se spojovaným materiálem [13]

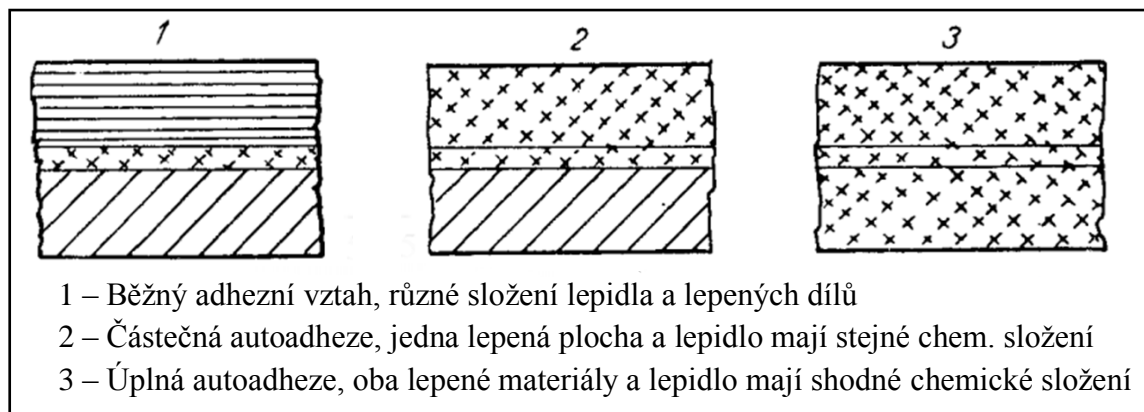
Atomy jsou základní částí všech materiálů a fází. Při dotyku povrchů různorodých materiálů dochází ke vzájemnému kontaktu atomů. Ty na sebe působí vazbami (obr. 7). Vazby vznikající při lepení materiálů ovlivňují velikost přitažlivých sil a tím i velikost adheze.



Obr. 7 Adherend při kontaktu s lepidlem [17]

4.1 Adheze

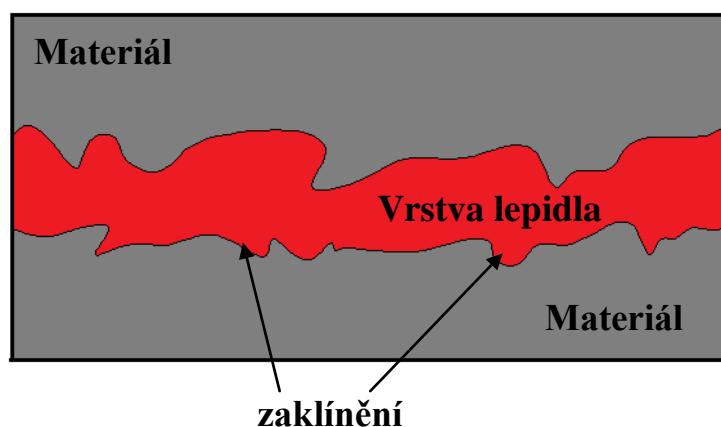
Adheze, česky přilnavost, je souhrn chemických a fyzikálních sil, kterými se navzájem poutají částice povrchu přiblížených materiálů (lepeného materiálu a lepidla). Dotykem povrchů různorodých materiálů dochází ke vzájemnému kontaktu jednotlivých atomů. Ty na sebe působí vazbami. Velikost přitažlivých sil a tím i velikost adheze ovlivňují vzniklé vazby. Na základě složení lepených materiálů a lepidel mohou nastat různé formy adheze. Autoadheze jednostranná nebo oboustranná nastává v okamžik, kdy má spojovaný materiál a lepidlo stejné složení. [1]



Obr. 8 Vztah mezi adhezí a lepeným materiálem [3]

4.1.1 Mechanická teorie adheze

Každý materiál má povrch tvořen přirozenou strukturou (kapiláry, trhlinky, póry). Ta je vytvořena při výrobě, dokončovacích operacích nebo montáži. U přírodních materiálů je tvořena také během růstu. Povrch materiálu je tvořen soustavou vrcholů a prohlubní, které lze souhrnně označit jako drsnost povrchu materiálu. Různé způsoby opracování mají zásadní vliv na tvar a velikost těchto povrchových nerovností. Mechanická teorie adheze předpokládá dokonalé proniknutí kapalného adheziva do trhlinek a prohlubní adherendu, kde po zatuhnutí (zaklínění) lepidla dojde k vytvoření prolnutého systému. Pevnost vytvořeného spoje je závislá na počtu prolnutí lepidla do nerovností v materiálu. Tato teorie je dnes v praxi využívána ojediněle a ve specifických případech, jako např. adheze pryžových směsí k textilním vláknům nebo výroba překližek. [2]



Obr. 9 Mechanická vazba (zámek) lepidla s povrchem [5]

4.1.2 Difúzní teorie adheze

Podstatou difúzní teorie je fakt, že některé látky (např. polymery) mohou mezi sebou navzájem difundovat napříč rozhraním. Za zakladatele je považován S. S. Vojutskij. Pevnost spoje je závislá především na:

- době kontaktu lepidla s adherendem
- teplotě lepení
- charakteru (kompatibilitě) adherendů a adheziv
- molekulární hmotnosti polymerů [3]

4.1.3 Chemická teorie adheze

Teorie založena na působení kovalentních vazeb mezi molekulami lepidla a lepeného materiálu. Lze ji uplatňovat jak pro porézní i zcela hladké povrchy materiálů. K vytvoření kvalitního a pevného spoje, který nebude vykazovat adhezivní ale kohezivní lom musí proběhnout chemická reakce mezi adhezivem a adherendem za vzniku kovalentní vazby přes rozhraní. Kvalitně lze slepit materiály, které mají reaktivní povrch, popřípadě povrch chemicky upravený. Oba atomy, které se vazby účastní, mají společnou dvojici elektronů čili elektronový pár, k němuž každý atom přispívá jedním elektronem. Tím dojde ke společnému sdílení elektronového páru, které odpovídá jednoduché kovalentní vazbě. Kovy a oxidované plasty, povrchy přírodních polymerů (dřevo, papír, celulóza) se velmi dobře lepí s volnými chemickými skupinami oxy-, hydroxy-, karbonyl-, karboxymethyl-, amino- (-O, -OH, -CO, -COCH₃, -NH₂) a jinými. Pro správné lepení je důležité vybrat vhodné lepidlo. V tomto případě musí lepidlo obsahovat volné skupiny, schopné reakce s povrchem lepeného materiálu. Vysoce reaktivní jsou lepidla skupiny např. epoxy-, hydroxy-, karboxy-, isokyanáto- a další. Chemické vazby v některých případech skutečně vznikají, obecně však lepení probíhá při termodynamických podmínkách, které vznik chemických vazeb obvykle nepodporují. Zvýšení pevnosti ve spoji tedy po průběhu reakce nelze garantovat. [6]

4.1.4 Molekulová (adsorpční) teorie adheze

V dnešní době nejvíce přijímaná teorie, která vychází z analogie jevu smáčení, adsorpce a adheze. Základem adheze je vzájemné působení molekul adherendu a adheziva, a proto je bezpodmínečně nutné, aby oba druhy molekul měly polární funkční skupiny schopné vzájemného působení. Adhezivní spoje vznikají ve dvou fázích. První fáze zahrnuje přemístění molekul lepidla k povrchu lepeného materiálu. V druhé fázi dojde k působení mezimolekulárních sil na styčných plochách, které se označují jako síly Van der Waalsovy. Po dosažení adsorpční rovnováhy přestávají síly mezi lepidlem a materiálem působit. Dosah těchto sil je ovšem podstatně nižší než hloubka drsnosti mechanicky opracovaných ploch. Lepidlo musí tedy tyto povrchové nerovnosti co nejvíce vyplnit a zajistit dokonalé smáčení povrchu adherendu. [6]

4.1.5 Elektrostatická teorie adheze

Základem pro vznik adheze ve spoji je dotyk dvou rozličných substancí a vznik dvojvrstvy. Spoj se poté stává kondenzátorem, u kterého se rozdílně nabitě desky přitahují. Pokud materiály oddělíme, tak je třeba potenciálový rozdíl vybit nebo vyzářit jako elektronová emise. Souvislost mezi pevností spoje a velikostí povrchového elektrostatického náboje nebyla i při podrobnějším zkoumání prokázána. [3]

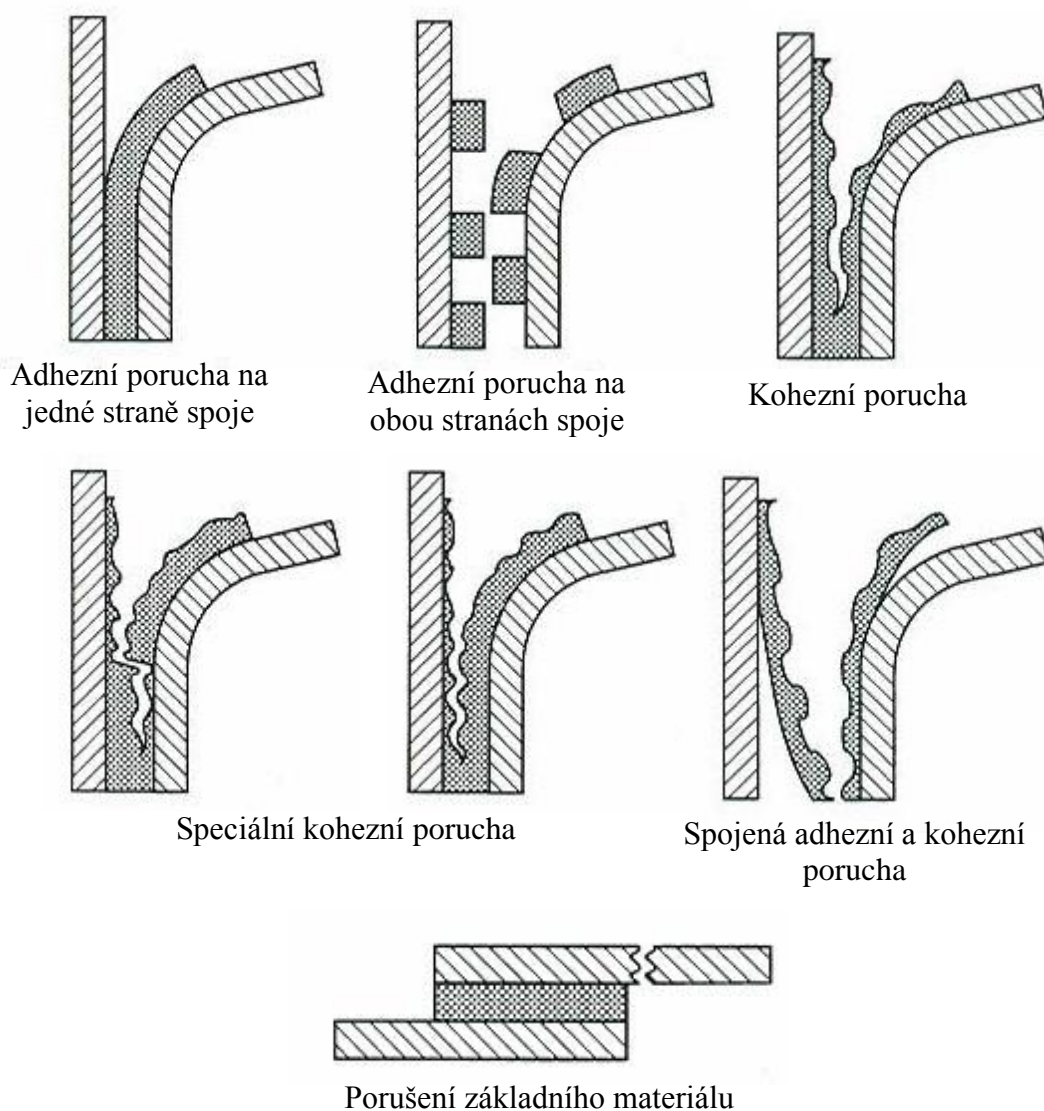
4.2 Koheze

Kohezi se označuje souhrn sil, kterými se poutají částice téhož materiálu, například vrstvy lepidla. Jde tedy o vlastní pevnost (soudržnost) vrstvy lepidla. Velikost koheze popisuje tzv. kohezní energie. Ta je definovaná jako velikost energie, která je potřebná k odtržení jedné částice od ostatních. S pojmem koheze je možné se častěji setkat u lineárních řetězců molekul plastů. Vysokou kohezní pevností se vyznačují reaktoplasty, u kterých vznikají různé druhy vazeb. U termoplastů je tato soudržnost o poznání nižší.

Kovy vykazují vyšší kohezní pevnost oproti plastům. Kohezi dále ovlivňují materiálové a teplotní parametry dané látky. S rostoucí teplotou, kterou způsobuje především pohyb molekul materiálu, kohezní pevnost klesá. Při přechodu adheziva z tekuté fáze do vytvrzeného stavu soudržnost roste.

Kohezní pevnost je dána také charakterem samotného lepidla. Jednosložkové lepidla jsou zpravidla termoplasty (měknou se zvyšující se teplotou). Dvousložkové epoxidy jsou lepidla s velmi vysokou kohezí. Velmi nízkou kohezí mají naopak měkké akryláty (lepidla na samolepící etikety).

V případech, kdy není možné zajistit optimální velikost adhezních sil v závislosti na povrchové úpravě povrchu před lepení, může mít kohezní pevnost klíčový vliv na soudržnost vrstvy lepidla. Na obrázku 10 jsou znázorněny možné poruchy lepených spojů. [1]

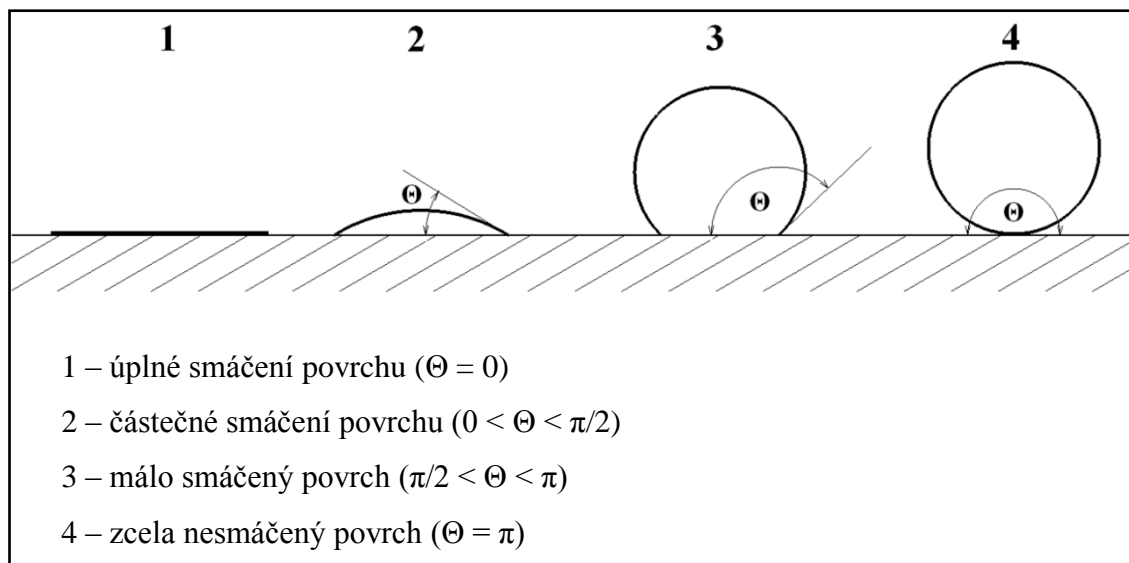


Obr. 10 Adhezní a kohezní poruchy lepených spojů [17]

4.3 Smáčivost

Definuje se jako schopnost kapaliny přilnout a udržovat kontakt s povrchem pevných látek. Stupeň smáčení je určen projevem adhezních a kohezních sil, což jsou přitažlivé a odpudivé síly mezi částicemi povrchových vrstev dvou stýkajících se látek. Pokud lepidlo špatně smáčí povrch adherendu, tak může dojít k ulpívání bublin vzduchu zejména na fázovém rozhraní. Díky tomu poté vznikají tzv. slabé vazebné vrstvy mezi lepidlem a adherendem. Tyto slabé vrstvy snižují samotnou pevnost lepeného spoje

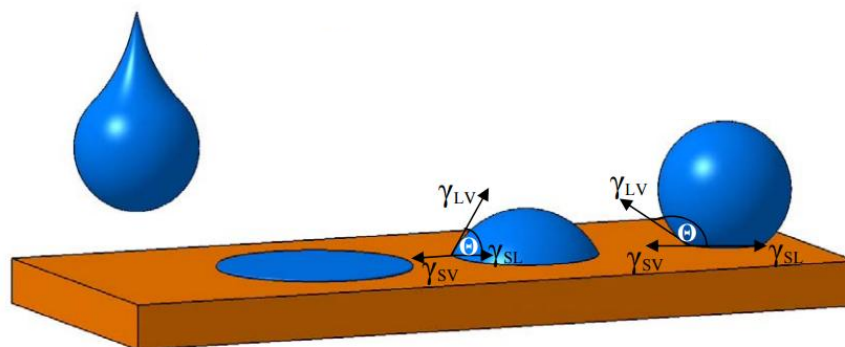
a následně mohou vést až k defektu mezi některou vazebnou vrstvou. U kvalitně vytvořeného spoje nastane lom při jeho destrukci mimo vazebné vrstvy. Jestliže je hodnota kontaktního úhlu smáčení blízko nule, tak dokáže kapalina povrch pevné látky smáčet nejlépe. [5]



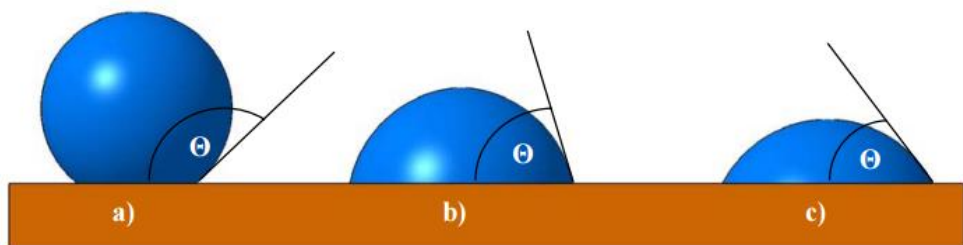
Obr. 11 Smáčivost povrchu kapalinou [3]

K dobrému smáčení napomáhá nízká viskozita lepidel, přiměřený tlak při spojování a co nejdelší doba kontaktu adheziva (lepidla) v tekutém stavu s povrchem adherendu.

Smáčivost povrchů se zjišťuje pomocí tzv. testu smáčivosti. Ten spočívá v nanesení kapky kapaliny o daném průměru na povrch adherendu. Poté je nutné změřit povrchový úhel a následně vyhodnotit smáčivost povrchu. Pracovním médiem pro zjištění smáčivosti je obyčejná voda. Výsledky mohou být ovšem ovlivněny tvrdostí vody a v některých případech ani voda destilovaná nemusí zaručit objektivní výsledky. [5]



Obr. 12 Chování kapaliny na pevném tělese [13]



- a) špatné smáčení
 b) částečné smáčení – hladný povrch
 c) dobré smáčení – drsný povrch

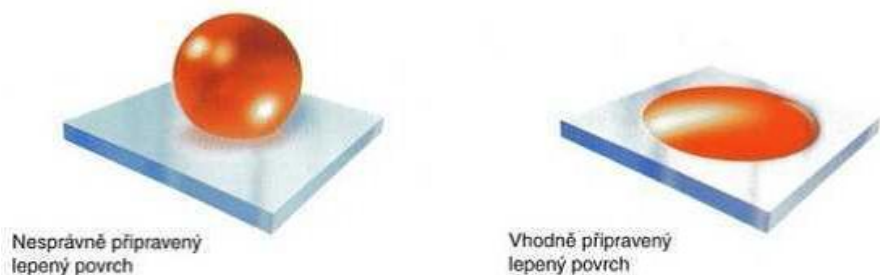
Obr. 13 Druhy smáčecích úhlů [13]

Ke smáčení pevného povrchu materiálu dochází pouze v případě, když je povrchová energie lepidla γ_K stejná nebo optimálně menší, než je kritická povrchová energie γ_S lepené látky. Z toho plyne, že kovové materiály lze lepit snadno. Umělé hmoty mají poměry energie často kritické. Po vhodné úpravě povrchu je možné povrchovou energii příznivě ovlivnit tak, že je slepení možné.

Kapaliny [$\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$]		Pevné látky [$\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$]		Plast [$\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$]	
Voda	72,6	Hliník	1200	Silikon	24
Toluen	27,4	Měď	1850	PVC	36
Metanol	22,6	Nikl	2450	Polyetylen	33
Aceton	23,9	Chrom	2400	Polypropylen	29

Tab. 3 Hodnoty povrchové energie γ_E u vybraných materiálů [3]

Z tabulky 3 je patrné, že povrchy kovových materiálů disponují velmi vysokou volnou povrchovou energií. Ta je v kombinaci s nízkou povrchovou energií lepidla nutnou podmínkou pro vytvoření spoje s dobrou adhezní pevností. Plastické hmoty mají hodnoty povrchové energie blízké hodnotám kapalin. [3]



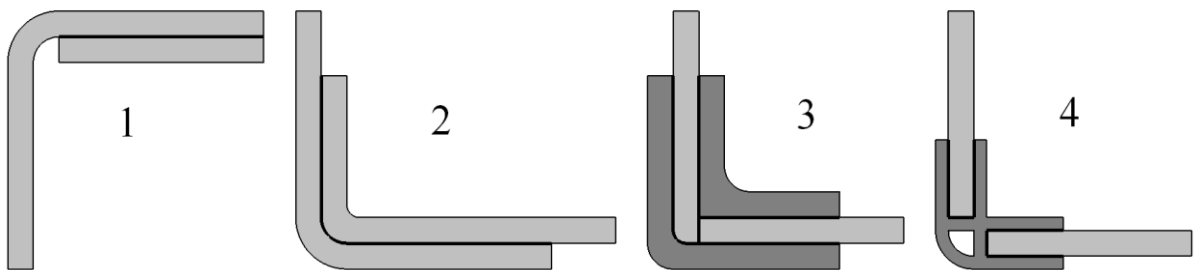
Obr. 14 Test smáčivosti povrchu [13]

5 TECHNOLOGIE LEPENÝCH SPOJŮ

5.1 Základní konstrukční možnosti

Aby lepený spoj zachoval svoji dlouhodobou spolehlivost a trvanlivost, je nutné přizpůsobit celou konstrukci tak, aby:

- Mechanické namáhání bylo rozloženo rovnoměrně a nesoustředilo se pouze v místě spoje.
- Spoj byl zatěžován převážně namáháním v tahu nebo ve smyku a minimálně namáhán v odlupování a kroucení, které je pro lepený spoj nejméně příznivé.
- Plocha spoje byla dostatečně velká a napětí bylo v celém lepeném spoji rovnoměrně rozložené.
- Lepené materiály měly (v místě spoje) stejné nebo alespoň podobné koeficienty teplotní roztažnosti. [6]



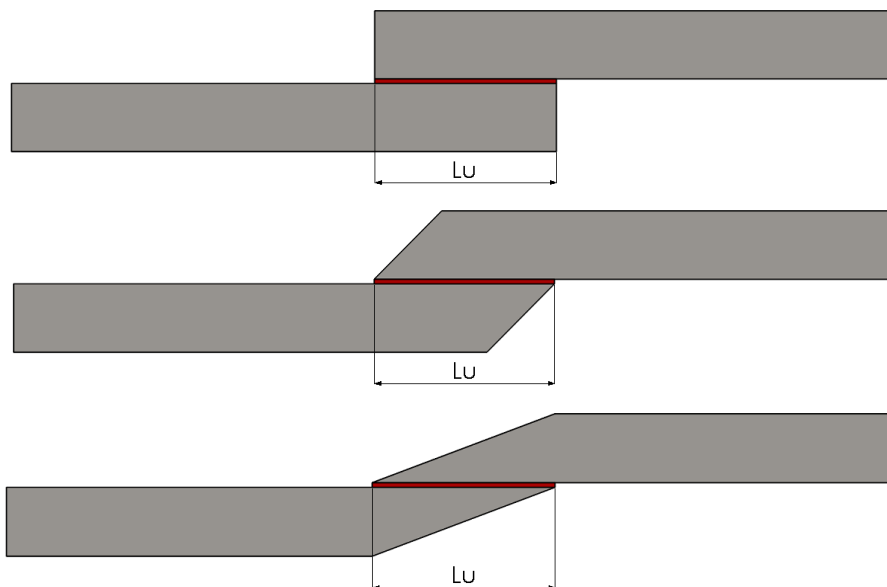
1, 2 – jednostranně přeplátovaný spoj; 3 – spoj se dvěma příložkami; 4 – násuvný spoj

Obr. 15 Příklady konstrukčního provedení koutových spojů [6]

Z hlediska výrobní technologie lepeného spoje je nutné dbát i na to, aby dotykové plochy lepených materiálů byly co nejméně členité. Další úpravy po slepení nejsou žádoucí. Lepení celé sestavy by mělo probíhat vždy v jedné operaci, aby nevznikaly dlouhé časové prodlevy. Již hotové spoje by neměly být dodatečně zatěžovány vyšší teplotou a tlakem.

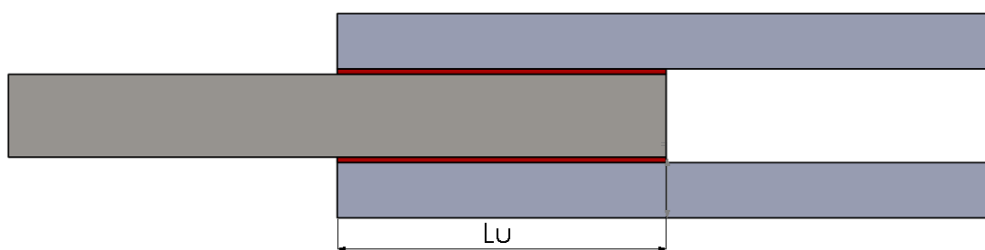
Lepenou soustavu je nutné rozdělit na části, které budou co nejjednodušší a k následnému lepení vhodné. Pokud tuto skutečnost není možné zaručit, tak je na místě spoj tvarově přizpůsobit nebo dodatečně zpevnit. Tím dojde k rozložení napětí na celou lepenou plochu. [2]

Jednostranně přeplátované spoje je vhodné využít v případech, kdy je tloušťka adherendu mnohem menší než ostatní rozměry. Takto vytvořený spoj je příhodný pro tuhé materiály, které jsou namáhané v tahu, tlaku nebo ve smyku. Při lepení elastických materiálů se toto spojení nedoporučuje. Při zatěžování je ovlivněna elasticita celého spoje.



Obr. 16 Způsoby provedení jednostranně přeplátovaného spoje [6]

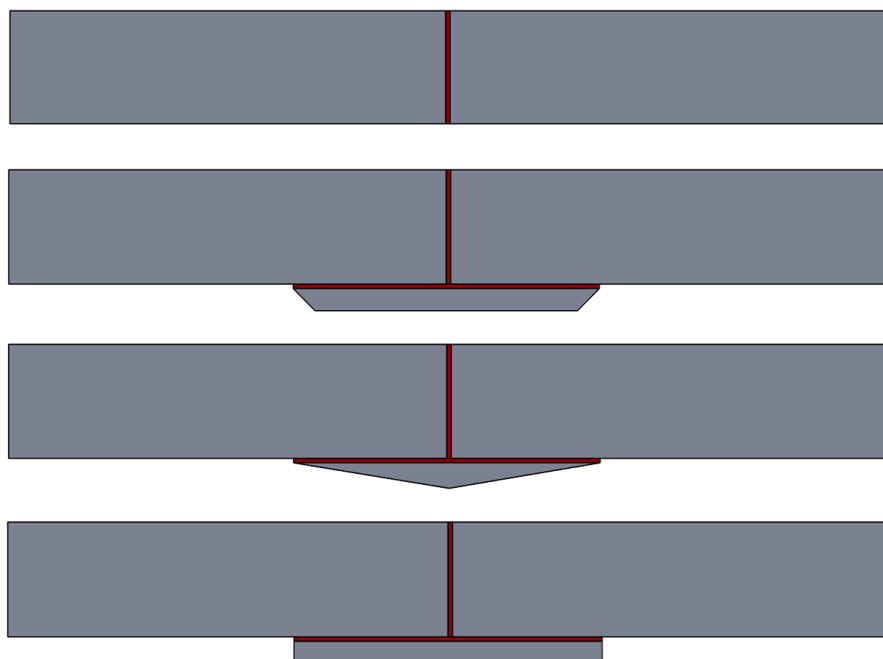
Oboustranně přeplátovaný spoj je vhodné použít u adherendů s tloušťkou větší jak 30 mm. Pevnost spoje je více ovlivněna účinky odlupovacích sil. Přeplátováním lze tomuto negativnímu působení předejít.



Obr. 17 Oboustranně přeplátovaný spoj [6]

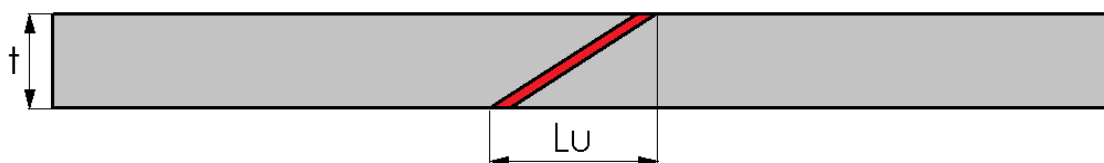
Při dostatečně velké ploše lepení je doporučeno použít spoj tupý. Je vhodný pro namáhání v tahu i tlaku. Pro ohybové namáhání se toto konstrukční uspořádání nehodí. Šířka lepeným materiálů by měla být v rozmezí od 30 – 50 mm. Pro zmírnění

odlupovacích sil je možné spoj zesílit podložením. Lze využít pro lepení tuhých i elastických materiálů. [2]



Obr. 18 Tupé spoje a jejich modifikace [6]

Pokud bude zkonstruovaný spoj namáhán tahovou i ohybovou silou, tak je vhodné využít zkosený tupý spoj. Ten je opět použitelný pro tuhé i elastické materiály a představuje určitou konstrukční modifikaci.



Obr. 19 Tupý spoj s úkosem [6]

Při konstrukci tupých spojů s úkosem je vhodné dodržovat poměr rozměrů:

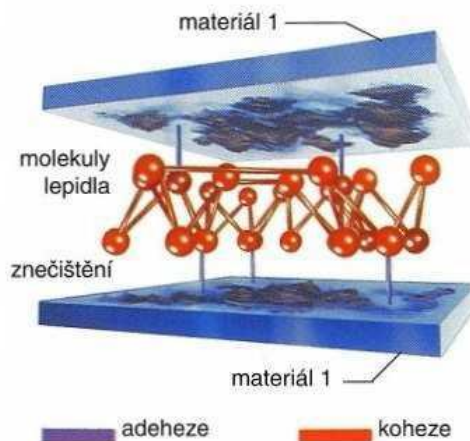
$$t : Lu = 1 : 15,6$$

kde: t – tloušťka adherendu [mm]

Lu – délka přeplátování spoje [mm] [3]

5.2 Úprava povrchu lepených ploch

Aby bylo dosaženo optimální pevnosti spoje, je nutné zajistit nejlepší (dokonalý) styk lepidla s povrchem lepeného materiálu (obr. 20). To znamená zvýšit adhezi (přilnavost) mezi adhezivem a adherendem. Pokud je povrch znehodnocen (znečištěn) korozí, starými laky, zbytky předchozích lepidel, mastnotou, vosky, prachem, plísněmi nebo je potřísněný oleji, dehtem, naftou či jinými kapalinami, tak nelze očekávat uspokojivé výsledky. Na znečištění jsou velmi citlivé zejména spoje hladkých a neporézních materiálů, například kovy, sklo a porcelán. Plochy pro lepení se čistí odlišně podle druhu materiálu. Způsoby předběžných úprav vedoucí ke zbavování všech nečistot z povrchu, odstranění koroze a vnitřního pnutí je možné v zásadě rozdělit na fyzikální a chemické operace. [4]



Obr. 20 Znečištěný povrch lepených materiálů [13]

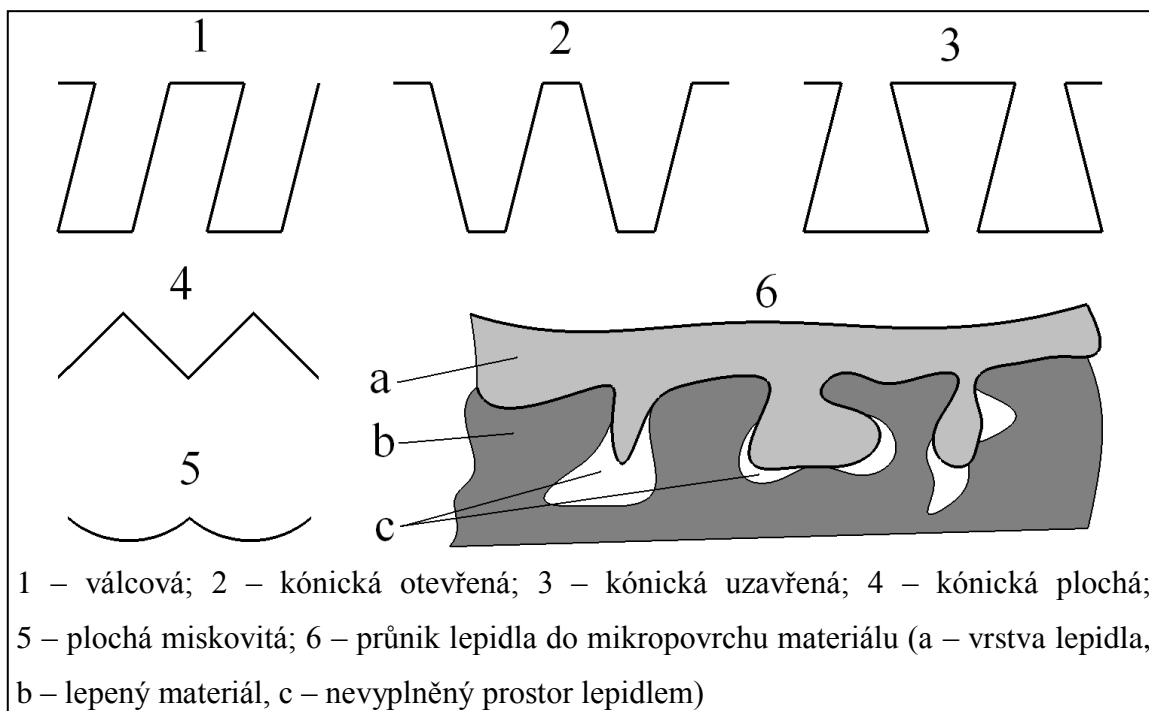
Geometrie povrchu

U lepených ploch rozlišujeme tři základní druhy povrchů:

1. Povrch viditelný je určený konstrukčními rozměry spoje.
2. Mikropovrch (teoreticky možná styková plocha včetně všech nerovností a porů).
3. Účinný povrch, který je součástí mikropovrchu a je smáčen lepidlem.

Pro vytvoření souvislého a stejnoměrného filmu lepidla je nutné, aby byly obě plochy lepených adherendů maximálně souběžné. Do jaké míry pokryje lepidlo

mikropovrch adherendu je záležitostí jeho konzistence, čistoty povrchu a tvaru povrchových nerovností. Tvary a velikosti povrchových nerovností jsou dány jednak přirozenou strukturou materiálů (póry), zpracováním ve výrobě (válcování, vytlačování, protlačování) nebo způsobem dodatečné úpravy povrchu (broušení, leštění apod.) [12]



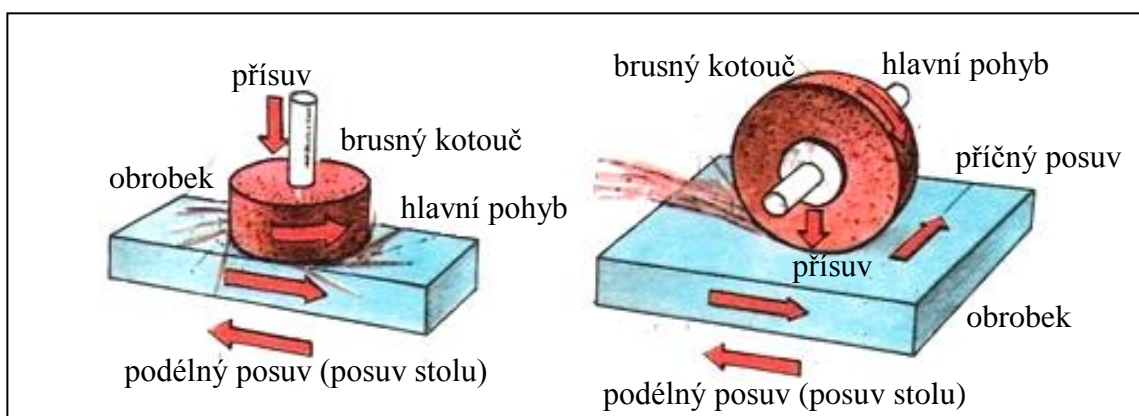
Obr. 21 Znamé tvary nerovností mikropovrchu [6]

Nerovnosti typu 1 a 3 jsou typické pro velmi hrubě zdrsňené povrchy. Z pohledu smáčení nejsou vhodné, protože lepidlo nedostatečně vyplní prohlubně a není schopné vytlačit plyn. Plochá kónická nerovnost (typ 4) je příznivá. Plyn je při správné viskozitě lepidla z nerovnosti vytlačen. U ploch leštěných je možné se setkat s miskovitou nerovností (typ 5). Pro tuhé materiály je výhodné plochy hladce a ostře opracovat. Až přílišné zdrsňení nebo naopak leštění nevede ke vzniku soudržného spoje. Tvar nerovností je také třeba volit s ohledem na druh budoucího zatěžování spoje. Hluboké prohlubně o malém průměru nejsou vhodné při smykovém zatěžování. U zatěžování v tahu je vztah mezi tvarem povrchu a pevností spoje příznivější. Neupravený povrch může být upravený vhodným zdrsňením. Optimální zdrsňení povrchu R_a bývá uváděno v rozmezí od 1 do 6 μm . V dnešní době je na trhu celá řada brusných materiálů a prostředků. Je zapotřebí ovšem zvolit správnou zrnitost pro daný adherend. [6]

5.2.1 Fyzikální úkony

5.2.1.1 Broušení

Základní operace pro rychlé odstranění nežádoucích hrubých nečistot, barvy, rzi i nežádoucích oxidů z povrchu kovů, kde pouhé odmaštění nestačí. Broušení také zaručí požadovanou drsnost povrchu lepených ploch. Průměrná aritmetická úchylka profilu broušené plochy R_a bývá řádově desítky μm . Mezi nejběžněji používané brusné materiály patří korund, karbidy křemíku, diamant, kubický nitrid boru a celá řada dalších tvrdých látek. Před samotným broušením se doporučuje povrch odmastit. Tato operace musí následovat i po samotném mechanickém opracování.



Obr. 22 Rovinné broušení materiálu (čelem/obvodem kotouče) [11]

Přípravu povrchu adherendu před slepením je možné provádět ručním broušením. V dnešní době existuje celá řada různých systémů, pomocí kterých lze materiály poměrně jednoduše zdrsnit. Ručním broušením lze odstraňovat ostříny a otřepy, odstraňovat hrubé nečistoty a rez, zjemňovat povrch po obrábění atd. Vlivem různého přitlaku na ruční nástroje není možné zajistit konstantní drsnost povrchu na celé ploše materiálu. Stopy po nástroji se tedy v závislosti na přitlaku mohou měnit.

Hlavní nevýhody ručního broušení:

- Proměnlivá kvalita výsledků
- Nemožnost zpracovat velmi malé otvory
- Drahý proces, hygiena a bezpečnost při práci [1]



Obr. 23 Ruční broušení a brusný materiál [20]

5.2.1.2 Kartáčování

Další využívaná metoda pro základní abrazivní přípravy povrchu. Díky relativní pružnosti kartáčů je opracovaný povrch méně drsný. Opět je důležité, aby byl povrch předem odmaštěn. Tlak, který je vyvíjen kartáčem na upravovaný povrch je nižší než u broušení nebo tryskání. Kartáče by měly být vždy nastaveny kolmo k povrchu. [11]

5.2.1.3 Otryskávání

Mechanické opracování povrchu pomocí nejrůznějších, obvykle tvrdých materiálů proudem jemných částic (abrazivní částice). Nejčastěji se jako abrazivum využívá křemičitý písek, ocelový nebo litinový granulát, korund, sekaný ocelový drát atd. Upravovaný povrch se otryskává tak dlouho, dokud se nejeví jako stejnorodý. Železný nebo ocelový materiál se nedá používat pro úpravu povrchu hliníku, mědi, korozivzdorné oceli a titanu, protože by mohl nastartovat korozi. [1]



Obr. 24 Tryskání ocelové konstrukce [16]

5.2.2 Chemické úkony

5.2.2.1 Odmašťování lepených ploch

Pokud chceme vytvořit kvalitní spoj, tak je zapotřebí z lepených ploch odstranit olej, tuky, prach a další nežádoucí nečistoty. Nejčastěji se využívá technický aceton, metyletylketon, toluen nebo trichlóretylén. Z ekologického hlediska je vhodné využít etylalkohol (líh), který patří mezi nejpříjemnější rozpouštědla. Při odmašťování velkých výrobních sérií a rozměrných dílců je vhodné velmi znečištěné díly nejprve mechanicky očistit, aby nedošlo k rychlé kontaminaci lázně. [1]

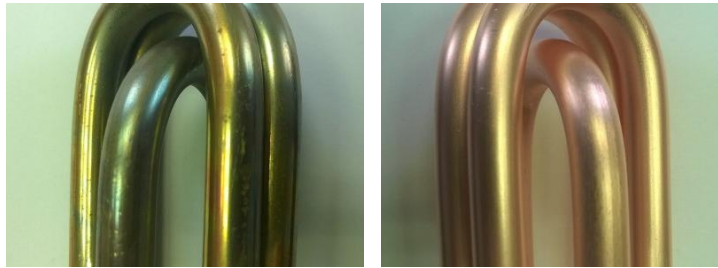
5.2.2.2 Moření

Moření se v závislosti na materiálu provádí buď v kyselých nebo silně zásaditých chemikáliích. Nejčastěji se využívají roztoky kyselin (sírové, chlorovodíkové, fluorovodíkové, fosforečné, dusičné), roztoky alkálií (hydroxidy). Mořením se z povrchu materiálu odstraňují sloučeniny a nečistoty vzniklé oxidací. Jedná se především o okuje, rez nebo oxidové vrstvy vytvářené vlivem okolního prostředí i vlivem mechanického, tepelného a chemického zpracování. Při moření dochází k leptání povrchu a vytváří se dutinky pro zachycení lepidla. Do mořící lázně se obvykle přidávají inhibitory a povrchově aktivní látky, které zrovnoměňují proces úpravy, zabraňují přemoření základního kovu a mohou velmi významně snížit množství emisí z mořící lázně. Nejčastěji se upravují povrchy kovů. Plasty se tímto způsobem ošetřují ve výjimečných případech. Nejčastěji při lepení obtížně lepitelných materiálů (např. polyolefinů, fluoroplastů). Moření se dnes řadí mezi ekonomicky nákladné úpravy povrchu. [5]

Správný postup při moření bez ohledu na druhu mořícího prostředku by měl probíhat podle následujících kroků:

1. Odstranění hrubých mechanických nečistot a odmaštění.
2. Aplikace mořícího prostředku.
3. Působení mořícího roztoku (doba je závislá na druhu základního materiálu, míře znečištění a na použitém mořícím prostředku).

4. Oplach vodou o tlaku minimálně 12 MPa (tlak je důležitý pro dokonalé odstranění roztoku a nečistot z hůře přístupných míst). [11]



Obr. 25 Materiál po ošetření mořením (vlevo před/vpravo po moření) [16]

5.2.2.3 Primery

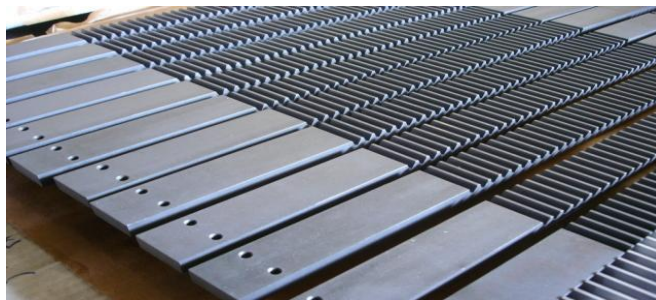
Jedná se o základní nátěr povrchu materiálu, který zvyšuje adhezi mezi lepeným materiálem a lepidlem. Nanáší se nejčastěji nástřikem nebo pomocí štětce na očištěný povrch a poté musí následovat předepsaná doba odvětrání, při kterém dojde k odpaření rozpouštědel. Na povrchu tak zůstanou pouze aktivní látky. [11]

5.2.2.4 Fosfátování

Fosfátování je chemický proces povrchové technologie, při němž se na povrchu železa, oceli a také zinku, hliníku a jejich slitin vytváří anorganická vrstva z roztoků kyseliny fosforečné a rozpustných solí této kyseliny - fosforečnanů. Vyloučené krystalové povlaky jsou porézní, a tudíž velmi nasákavé. Nejrozšířenější je použití fosfatizačních prostředků na bázi zinku.

Fosfátové povlaky:

- Zlepšují protikorozní odolnost
- Zvyšují přilnavost lepidel, nátěrů [11]



Obr. 26 Fosfátový povlak na ocelových výrobcích [16]

6 NÁMÁHÁNÍ LEPENÝCH SPOJŮ

Podle způsobu zatížení působícího na lepený spoj můžeme napětí rozčlenit následovně:

- Normálové – vzniká působením síly ve směru kolmém na lepenou plochu.
- Tečné – vzniká působením tahové síly v rovnoběžném směru s vrstvou lepidla.
- Ohybové – kombinace napětí působících ve směru kolmém a rovnoběžném na lepenou plochu nebo vzniká působením ohybového momentu.

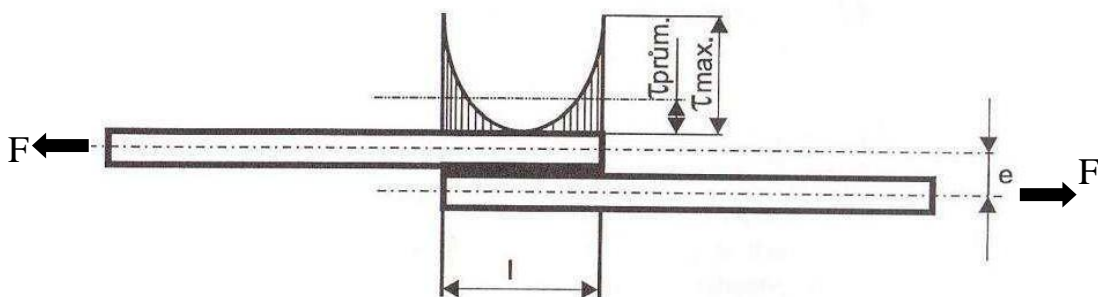
Důležitým kritériem pro výpočty lepených spojů je průběh a velikost napětí ve spoji. Každý lepený spoj by měl být navržen tak, aby napětí ve spoji bylo rozloženo co nejrovnoměrněji. [3]

6.1 Rozložení napětí u přeplátovaného spoje

Rozložení napětí je vhodné vysvětlit u jednoduše přeplátovaného spoje. Tento lepený spoj je nejběžnější a často používaný. Nerovnoměrné rozložení napětí je způsobeno několika činiteli.

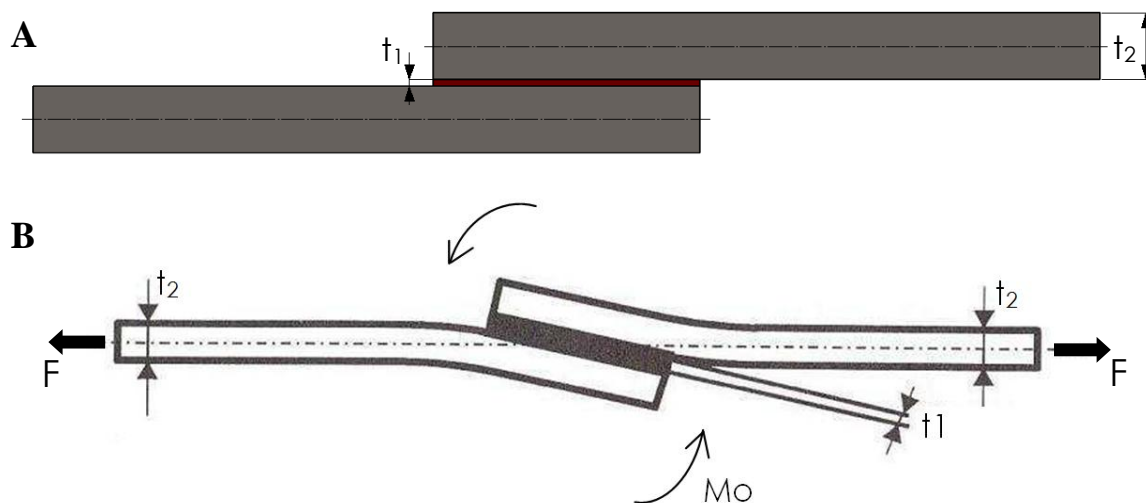
První má svůj původ ve vytvrzování lepidla. Při tomto jevu dochází ke smršťování adheziva. Určitá část tohoto jevu proběhne ještě před ztuhnutím lepidla a rozložení napětí tedy nijak neovlivní. Podstatná část smrštění ovšem nastane po úplném ztuhnutí lepidla a v jeho důsledku vzniká v nezatíženém lepeném spoji zbytkové napětí.

Po zatížení spoje dojde v důsledku nerovnoměrné deformace, neideálně tuhého materiálu, k rozdílné deformaci lepidla. Na obou koncích přeplátování je napětí nejvyšší. [3]



Obr. 27 Rozložení napětí u přeplátovaného spoje [2]

Na obrázku 27 je vidět přibližně hyperbolický průběh napětí po celé délce přeplátování s charakteristickými špičkami u jeho konců. Spoj je také namáhán ohybovým momentem v důsledku nesymetricky působících sil. Normálové napětí vyvolává vznik odlupovacích sil na koncích lepeného spoje. U delších přeplátování způsobuje deformaci okrajů adherendů a také snižuje výslednou pevnost celého spoje.



A – nezatížený spoj, B – zatížený spoj

Obr. 28 Deformace spoje ohybovým momentem [2]

Ohybový moment lze vyjádřit vztahem:

$$M_o = \frac{F \cdot (t_1 + t_2)}{2} \quad [Nm] \quad (6.1)$$

kde: F – síla, zatěžující spoj [N]

t_1 – tloušťka vrstvy lepidla [mm]

t_2 – tloušťka materiálu [mm]

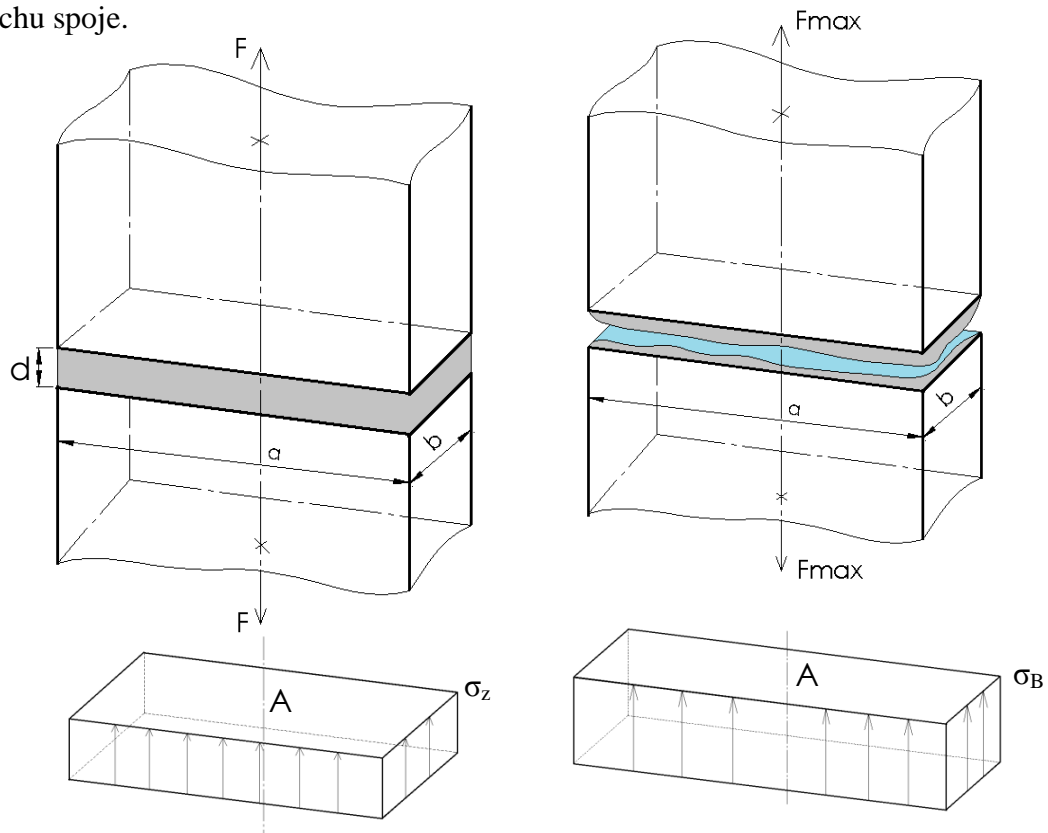
Konečná tloušťka vrstvy lepidla a adherendu ovlivňuje velikost ohybového momentu. Tuhost lepených materiálů je obvykle mnohem vyšší než pevnost lepidel. Při zvýšení tloušťky adherendu je ohybový moment vlivem mechanických vlastností redukován. Lepidlo je v tom případě méně namáháno než u tenčích materiálů, a lom nastane až při vyšším zatížení. [3]

Doporučená tloušťka vrstvy lepidla v závislosti na druhu a vlastnostech je od 0,05 mm do 0,4 mm. Problém nastává u lepidel s nízkou viskozitou. Ta zabraňuje vytvoření dostatečně tenké vrstvy bez poruch povrchu. Pokud je pro lepení

využito kapalné lepidlo, případně lepidlo s vyšší viskozitou, tak je tato nedokonalost odstraněna. [1]

6.2 Tahové napětí lepeného spoje

Napětí vznikající ve spoji při zatížení silou, která působí ve směru kolmém na plochu spoje.



Obr. 29 Velikost a průběh tahového napětí [3]

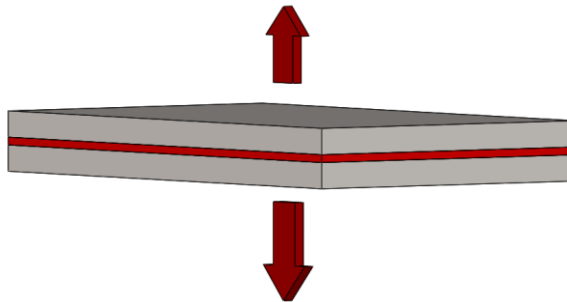
Pokud působí síla F přímo v těžišti plochy spoje, tak bude vzniklé napětí σ_t čistě tahové. Velikost a průběh napětí σ_t závisí na velikosti síly F a na ploše spoje S . (Obr. 29)

Napětí ve spoji se počítá podle:

$$\sigma_t = \frac{F}{a \cdot b} \text{ [MPa]} \quad (6.2)$$

Pokud bude síla F vzrůstat, tak v okamžiku dosažení F_{\max} dojde ke vzniku defektu a následnému porušení lepeného spoje. Napětí, které vzniklo ve spoji pak bude:

$$\sigma_{tmax} = \frac{F_{max}}{a \cdot b} \text{ [MPa]} \quad (6.3)$$



Obr. 30 Tahové namáhání materiálu [13]

6.3 Ohybové napětí v lepeném spoji

Napětí vznikající při zatížení spoje ohybovým momentem, který působí ve směru kolmém na plochu spoje. Pokud bude ohybový moment M_o působit přímo v těžišti spoje, tak vzniklé napětí σ_o bude čistě ohybové. Velikost a průběh napětí σ_o je závislé na velikosti ohybového momentu a ploše S . (Obr. 31) [3]

Ohybové napětí ve spoji se počítá podle:

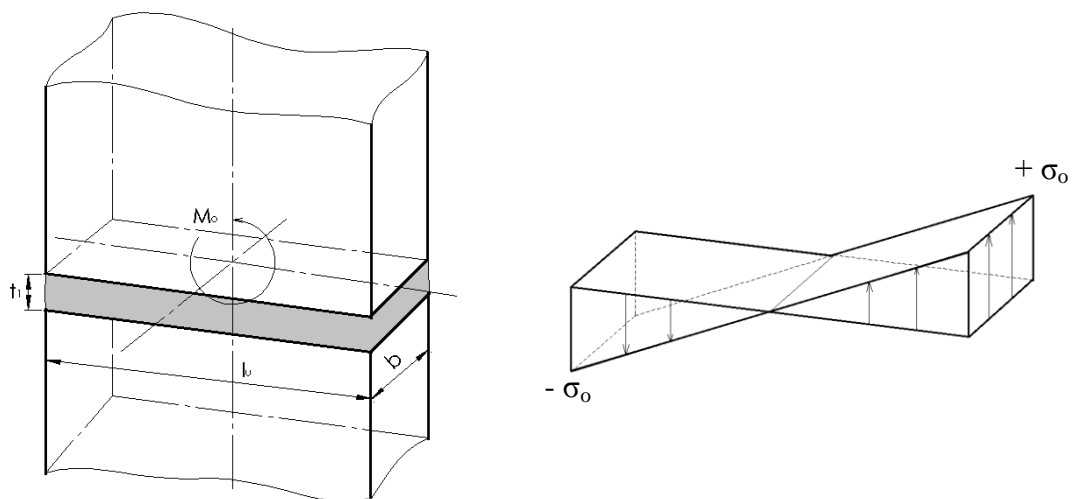
$$\sigma_o = \frac{M_o}{W} \text{ [MPa]} \quad (6.4)$$

Průřezový modul se pro kruhový průřez počítá:

$$W_o = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (6.5)$$

Průřezový modul pro obdélníkový průřez:

$$W_{\blacksquare} = \frac{b \cdot l_u^2}{6}; W_{\blacksquare} = \frac{l_u \cdot b^2}{6} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (6.6)$$

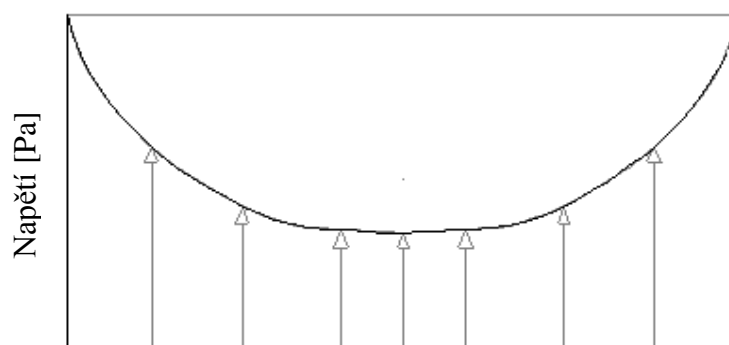


Obr. 31 Průběh a velikost ohybového napětí spoje [3]

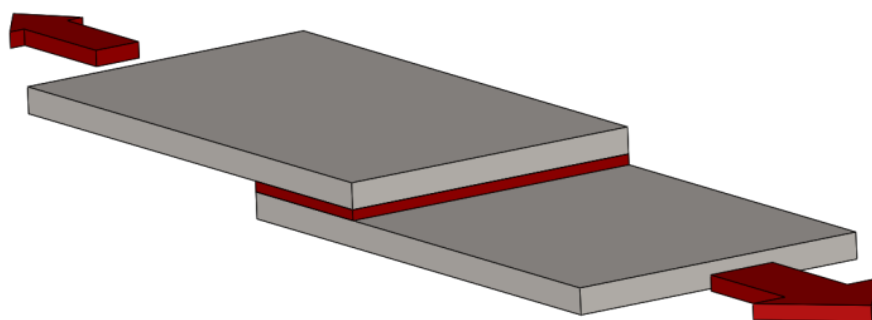
6.4 Smykové napětí u lepených spojů

Při působení rovnoběžné (paralelní) síly s plochou spoje nevzniká tahové normálové napětí, ale tečné. Smykové napětí ve spoji lze vypočítat ze vztahu:

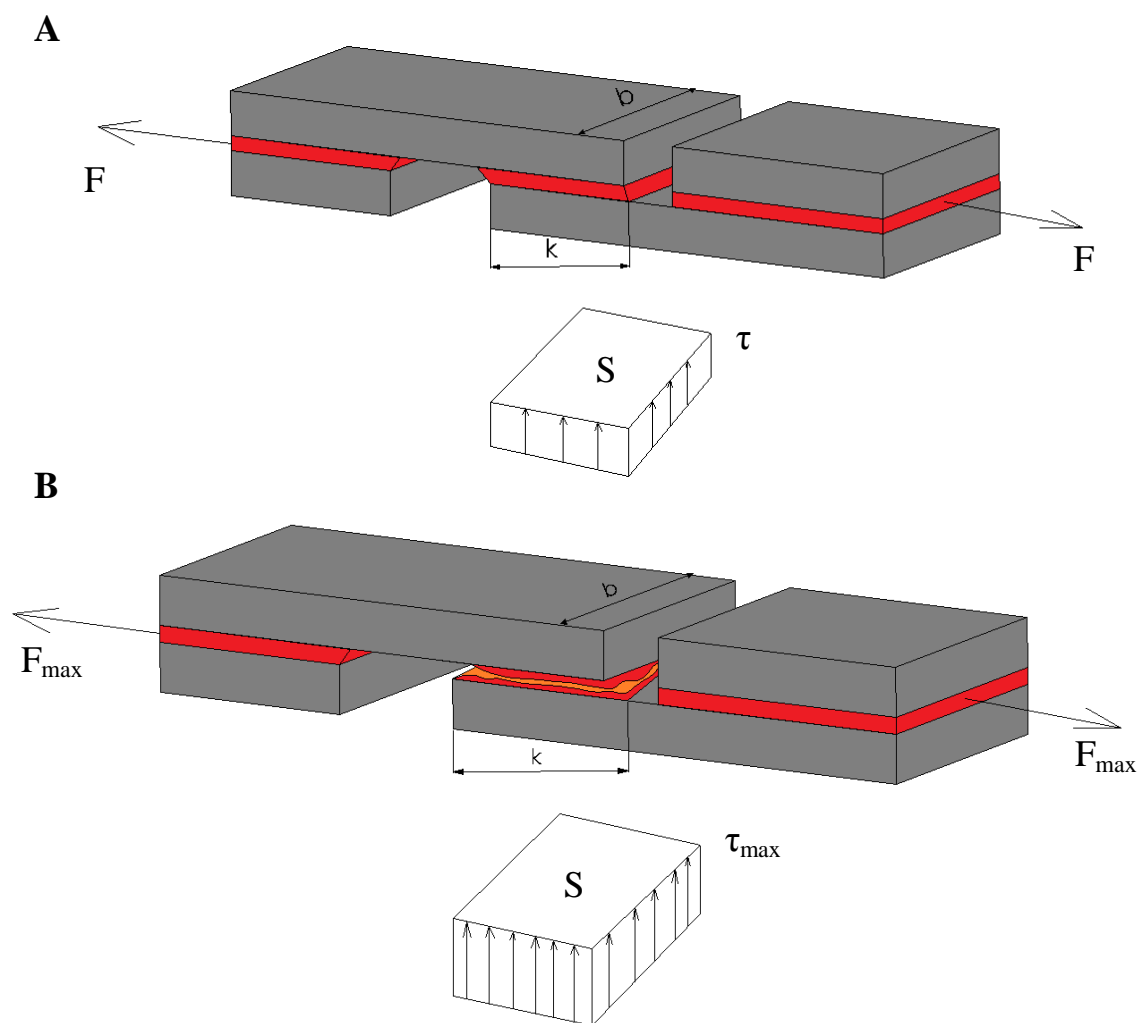
$$\tau = \frac{F}{k \cdot b} \quad [MPa] \quad (6.7)$$



Umístění ve spoji



Obr. 32 Vizualizace napětí u přeplátovaného spoje [3, 13]



A – smykové napětí, B – napětí v okamžiku porušení spoje

Obr. 33 Průběh napětí u přeplátovaného spoje [3]

7 ZKOUŠKY LEPENÝCH SPOJŮ

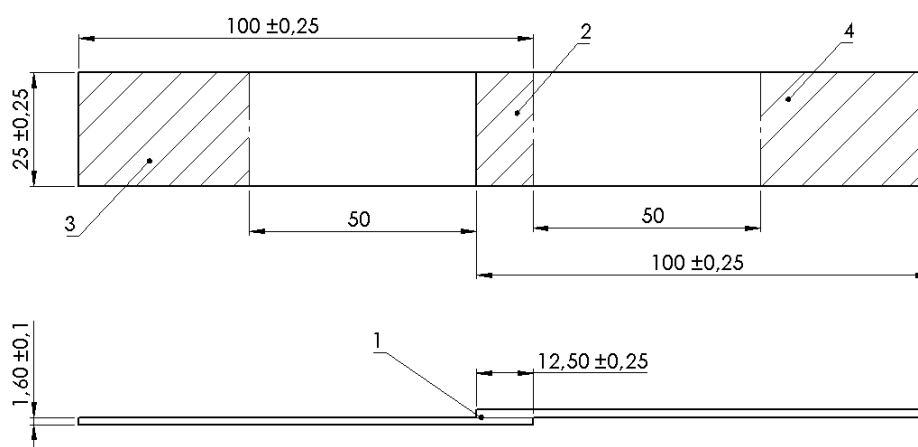
K porovnávání a vyhodnocování kvality lepených spojů a parametrů lepidel slouží celá řada různých zkoušek. Primárním úkolem je zvolit vhodný postup (metodu) a určit kritéria hodnocení. Každý typ lepeného spoje totiž v praxi plní rozdílné funkce. Abychom tedy zvolili správnou zkoušku, pomocí které budeme parametry spoje hodnotit, tak je nutné rozlišit, jakým způsobem je spoj zatěžován.

Z množství metod navržených k hodnocení lepených spojů se převážně používají metody destruktivní, spočívající v hodnocení pevnosti spoje namáhaného ve smyku, v tahu, v odlupování a rázu. [12]

7.1 Metody destruktivní

7.1.1 Stanovení pevnosti ve smyku dle ČSN EN 1465

Podstatou zkoušky je namáhání zkušební spoje ve smyku statickým tahem ve směru podélné osy až do porušení vzorku.



1 – vrstva lepidla, 2 – plocha smyku, 3 a 4 – plochy pro čelisti zkušební přístroje

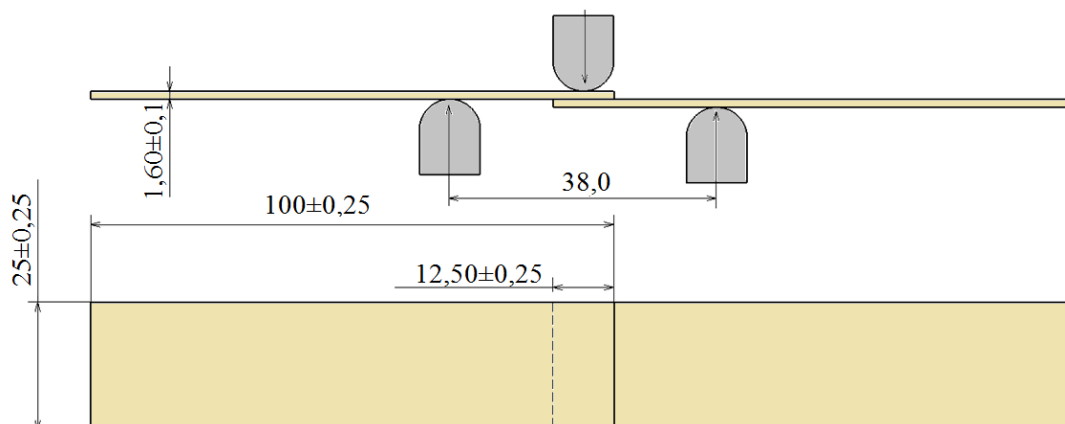
Obr. 34 Standardní vzorek dle normy ČSN EN 1465 [7]

Výsledkem zkoušky je síla nebo napětí zjištěné při poruše spoje, a pokud není uvedeno jinak, tělesa musí vyhovovat tvarem, rozměry a uspořádáním dle obrázku 34. Pevnost ve smyku se udává v MPa. [7]

7.1.2 Zkouška lámavosti lepených spojů

Zkušební vzorek je podroben silám, snažící se o jeho zlomení statickým ohybem kolmo na podélnou osu a plochu spoje. Dochází k pozvolnému narušení soudržnosti spoje při zatížení konstantně se zvyšující silou, která vyvolá defekt zkoušeného spoje.

Zkouška je doporučena především pro hodnocení spojů tvrdých materiálů, například kovu s kovy a pro kombinaci kovu s plastickými hmotami. Provádí se za normálních i zvýšených teplot podle ČSN 66 8511 (zkouška lámavosti lepených spojů). Tvar a rozměry zkušební vzorku jsou totožné s přípravou vzorků pro zkoušky pevnosti ve smyku ČSN EN 1465. [9]

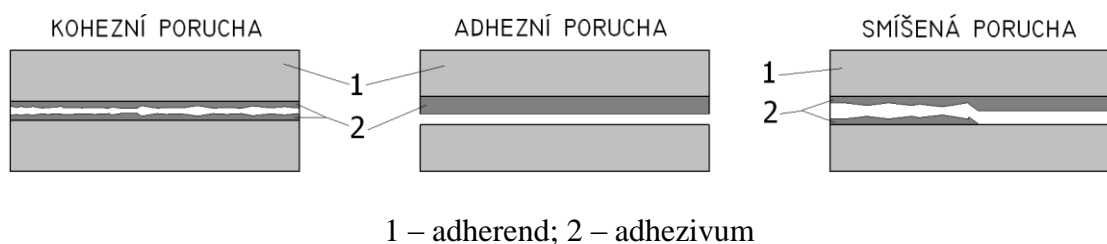


Obr. 35 Standardní zkušební vzorek pro zkoušku lámavosti dle ČSN 66 8511 [9]

7.1.3 Zkouška lepených spojů v odlupování

Podstatou zkoušky je namáhání zkušební spoje odlupováním statickým tahem ve směru kolmém na lepenou plochu. Vyhodnocení se provádí podle ČSN 66 8516 (pevnost lepených spojů v odlupování podle Wintera). Zkouška se provádí za předpokladu, že je alespoň jeden ze spojovaných materiálů ohebný.

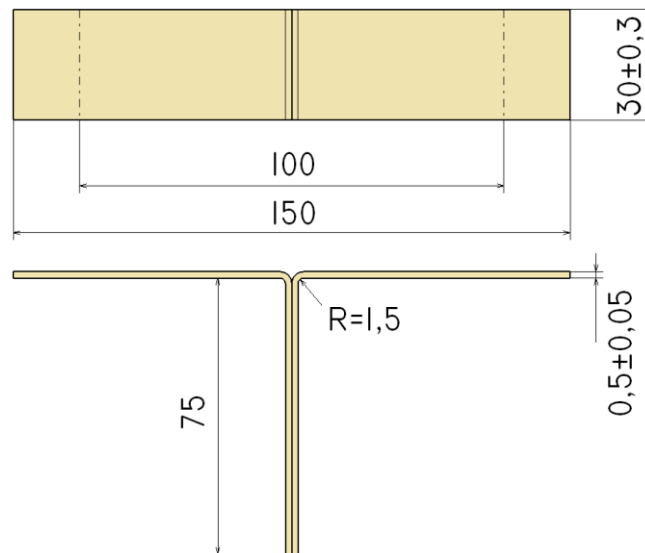
Pevnost spojů v odlupování se běžně zkouší například u roztokových lepidel nebo disperzních lepidel určených k lepení ohebných materiálů na ohebné i pevné podklady. Výstupem z měření jsou příslušné číselné hodnoty a také vzhled lomu, který je u hodnocení lepidel neméně důležitý. Na obrázku 37 je zobrazeno zkušební těleso pro zkoušku. [10]



1 – adherend; 2 – adhezivum

Obr. 36 Běžné poruchy lepeného spoje [2]

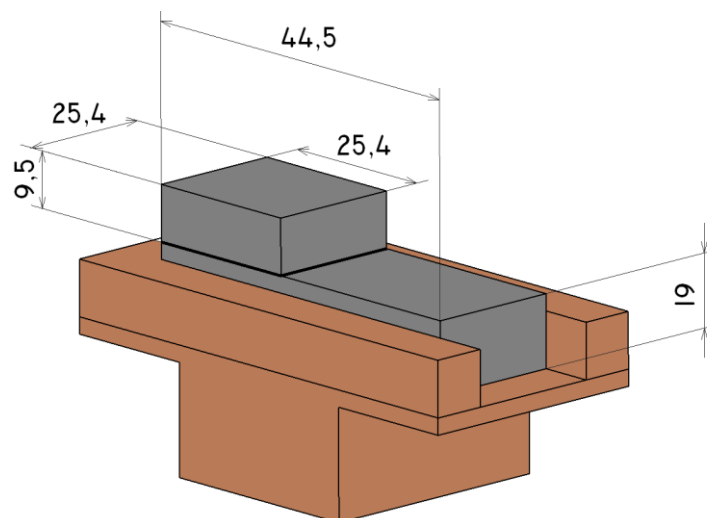
Pevností v odlupování se rozumí síla v $[\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}]$ šířky vzorku, která je potřebná k odtržení dvou slepených ploch.



Obr. 37 Zkušební těleso pro zkoušku pevnosti v odlupování podle ČSN 66 8516 [10]

7.1.4 Pevnost lepených spojů při namáhání rázem

Rázovou pevností spoje se rozumí nejmenší síla potřebná k porušení lepeného spoje rázem. Při zkoušce je zkušební spoj namáhán ve smyku rázovým tlakem až do porušení vzorku. Rázová pevnost spoje se udává v $[\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}]$. Vyhodnocení zkoušky probíhá podle normy ČSN 66 8512 (rázová pevnost lepených spojů). [8]



Obr. 38 Zkušební těleso pro zkoušku rázové pevnosti podle ČSN 66 8512 [8]

7.2 Metody nedestruktivní

V dnešní době se nedestruktivní kontrola materiálu (NDT) stala běžným a velmi významným prvkem kontroly a řízení kvality ve všech směrech průmyslové činnosti. Metody nedestruktivního testování dokážou výrobcům včas a přesně odhalit skryté vady z výroby, které i při současných špičkových technologiích nelze nikdy vyloučit.

Běžně využívané NDT metody pracují s cílem vhodného nasvícení a tím zviditelnění přítomnosti defektu v materiálu konstrukce, vytvářeném spoji atd. Typicky se přítomnost defektu projeví změnou intenzity toku záření, změnou toku vířivých proudů, změnou magnetického toku v materiálu, v šíření a odrazech ultrazvukových vln, ve zviditelnění defektu penetrační kapalinou nebo magnetickým práškem. Tyto metody tedy podají obraz o přítomnosti, orientaci, velikosti a geometrii defektů.

V oblasti lepených spojů umožňují ověřit jakost lepených ploch bez jejich poškození. Lze odhalit například špatně slepená místa, oblast s nedostatečnou vrstvou nebo bez nánosu vrstvy lepidla, bublinky, trhlinky či puchýře. NDT metody lze rozčlenit následovně:

- Akustická defektoskopie – Těleso vydává po rozkmitání v místě vady zvuk jiné amplitudy, vlnové délky a zvukového spektra než v místech bez defektu.
- Defektoskopie ultrazvukem – Zkoušený vzorek se umístí mezi generátor a přijímač UZ vln (průchodová metoda). Zvukové kmity musí mít frekvenci větší než 20 kHz a vlnovou délku 1,6 až $0,3 \cdot 10^{-6}$ m. V prostředí nedestruktivního zkoušení se využívá frekvence až 30 MHz.
- Radiologické zkoušky – Metoda založena na prozařování materiálů, spojů a odlitků pronikavým zářením. Zkouška prozařování rentgenovým a gama zářením je založena na schopnosti krátkovlnného záření pronikat materiálem, na jeho zeslabení absorpcí v materiálu a na jeho působení na citlivou vrstvu fotografického filmu. Zeslabení intenzity záření závisí na hustotě zkoušeného materiálu a jeho tloušťce. V místě vady je hustota materiálu nižší, takže intenzita záření je v místě vady zeslabována méně než v okolí. Na film umístěný na opačné straně tedy dopadne záření o větší intenzitě. [18, 22]

7.2.1 Akustická emise (AE)

Akustická emise je fyzikální jev, při kterém v určitých lokalitách materiálu dochází v důsledku dynamických procesů vyvolaných vnějšími nebo vnitřními silami k uvolňování části materiálem nahromaděné elastické energie (např. při vzniku a šíření trhlinky). Uvolněná energie se v přilehlém okolí transformuje na napěťový impuls, který se šíří materiálem ve formě přechodových elastických vln. Složka vlnění kolmá k povrchu materiálu pak může být detekována piezoelektrickými snímači akustické emise. Akustický signál je po zesílení přiveden na vstup měřicího systému, kde je opětovněm zesílení vyhodnocován. Metoda akustická emise doplňuje ostatní NDT metody. Principiálně podává odlišné informace oproti ostatním NDT metodám.

Signál AE má buď charakter spojitého šumu, kdy jeho amplituda po delší dobu neklesá pod určitou prahovou úroveň, nebo je nespojitá a signál má charakter časově oddělených pulsů - emisních událostí. Zdrojem spojitě AE jsou mikromechanismy v procesu plastické deformace materiálu, technologické šumy při provozu zařízení, resp. vlnění emitované při úniku média z tlakových systémů. Zdrojem nespojitě AE jsou především procesy probíhající při vzniku a rozvoji trhlin a korozní jevy, spojené s impulsním uvolňováním elastické energie. [18]



Obr. 39 Hardware diagnostického systému DAKEL – XEDO [autor]

II. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

8 METODIKA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Experimentální část diplomové práce je rozdělena do několika kroků, které na sebe navazují:

1. Výroba vzorků ze zvolených materiálů podle tvarových a rozměrových požadavků normy ČSN 66 8511.
2. Volba vhodného lepidla pro slepení vzorků.
3. Úprava povrchu zkušebních vzorků brusným materiálem o zvolené zrnitosti.
4. Odstranění hrubších nečistot z povrchu vzorků, následné odmaštění organickým rozpouštědlem Aceton.
5. Slepení dvou stejných vzorků zvoleným lepidlem dle požadavků normy ČSN 66 8511 (vytvoření zkušebních těles pro namáhání).
6. Vytvrzení lepidla při konstantních podmínkách po dobu 24 hodin.
7. Umístění piezoelektrického snímače pro monitorování vln akustické emise na zkušební těleso.
8. Namáhání lepených spojů na zlomení statickým ohybem až do okamžiku jejich porušení a při tomto procesu byly snímány signály akustické emise.
9. Vizuální zkoumání porušených těles a posouzení charakteru poruchy lepeného spoje.
10. Vyhodnocení obrazových záznamů AE v závislosti na charakteru poruchy lepených spojů, diskuze výsledků a stanovení závěrů.



Obr. 40 Materiál a pomůcky pro lepení [autor]

8.1 Výroba vzorků pro měření

Před samotným měřením bylo nutné vyrobit zkušební vzorky. Příprava, rozměry i postup zpracování jsou totožné s přípravou vzorků pro zkoušky pevnosti ve smyku při zatěžování v tahu ČSN EN 1465. Při volbě materiálů jsem nebyl nijak omezen.

Pro výrobu tuhých vzorků jsem zvolil běžně dostupný a rozšířený materiál. Nelegovanou ocel ČSN 11 373 obvyklé jakosti. Bývá součástí konstrukcí a strojů namáhaných staticky a mírně dynamicky. Je vhodná pro méně namáhaná svařovaná potrubí, odbočnice a různé výrobky běžného použití. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4 a 5.

C	Mn	Si	P	S	N	Al
max. 0,170			max. 0,045	max. 0,045	max. 0,007	

Tab. 4 Chemické složení (rozbor tavby) v % [14]

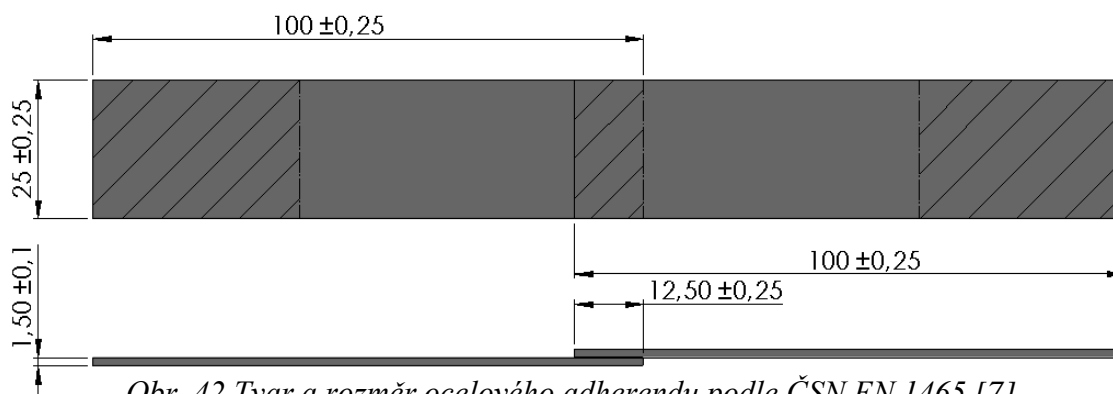
Mechanické vlastnosti	Provedení	
	tepelně nezpracované	normalizačně žíhané
Pevnost v tahu R_m [MPa]	min. 370	min. 350
Mez kluzu R_e [MPa]	min. 250	min. 220
Tažnost A_{10} [%]	min. 7	min. 20

Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 11373 [14]

Kvůli zajištění rozměrové přesnosti jsem nechal vzorky vypálit na laserovém řezacím stroji Nukon NF PRO 315 2kW. Tato možnost mi ušetřila spoustu času a energie, protože v prostředí domácí dílny bych tabuli plechu dělil na požadované rozměry velmi obtížně. Rozměry a tvar adherendu jsou zobrazeny na obrázku 42.



Obr. 41 Laserový řezací stroj Nukon NF PRO 315 [23]

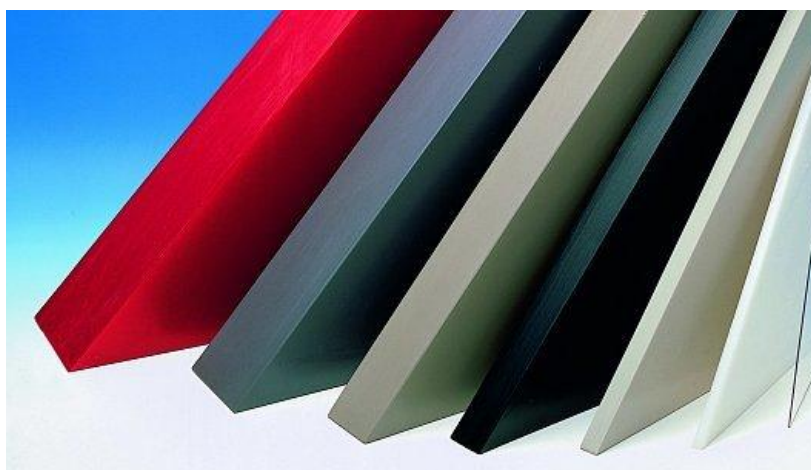


Obr. 42 Tvar a rozměr ocelového adherendu podle ČSN EN 1465 [7]

Pro výrobu elastických vzorků jsem vybral běžně využívaný plastový materiál polyvinylchlorid. PVC je velice pevný a houževnatý materiál. Dobře se obrábí a svařuje. Je odolný vůči plísním, vlhku i chemikáliím. Nachází své uplatnění ve stavebnictví, technickém či elektrotechnickém průmyslu.

Nabídka PVC materiálů je dnes velice pestrá. Firmy nabízí široký sortiment, ve kterém je třeba se zorientovat. Běžně lze zakoupit:

- Standardní plné PVC desky
- Odlehčené komůrkové PVC desky
- PVC fólie [24]

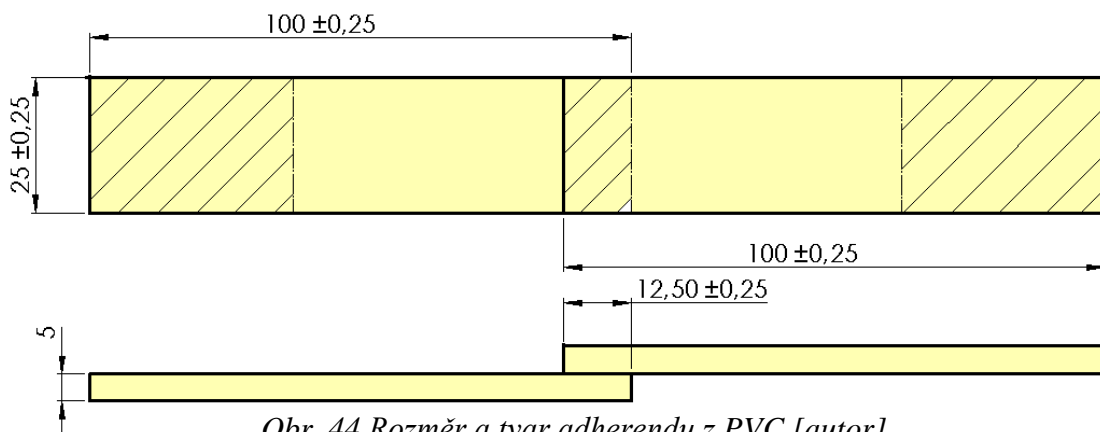


Obr. 43 PVC tvrzené desky v různých barevných odstínech [24]

Zvolil jsem plnou PVC desku, která byla pro naše potřeby nejlepší volba. Rozměry vzorků se nezměnily. Pouze bylo nutné upravit tloušťku PVC. Po domluvě s vedoucím

diplomové práce jsem vybral desku s tloušťkou 5 mm. Pokud bych zvolil tloušťku pouze 1,5 mm, tak by při zatížení materiál okamžitě praskl.

Úprava materiálu na požadovaný rozměr se jevil jako největší problém. Firmy používají pouze velkoformátové pily. Řezat PVC v domácím prostředí se také nejevilo jako nejlepší řešení. PVC jsem nakonec nechal upravit na požadované rozměry nařezáním vodním paprskem na stroji OMAX 80X. Tato moderní technologie umí dělit a obrábět prakticky jakýkoliv materiál, který nepoškodí přímý kontakt s vodou. Pro PVC tedy ideální volba, jak vyrobit kvalitně a rychle vzorky podle zadaných rozměrů. Výsledek byl opravdu dobrý a pásy z PVC byly dokonale přesné. Rozměry a tvar PVC adherendu jsou zobrazeny na obrázku 44.



Obr. 44 Rozměr a tvar adherendu z PVC [autor]



Obr. 45 Stroj OMAX 80X pro obrábění vodním paprskem [23]

8.2 Výběr lepidla

V dnešní době je k dispozici velké množství dostupných lepidel. Výběr vhodného typu lepidla je z pohledu pevnosti lepeného spoje klíčový faktor. Moje volba byla ovlivněna materiály, které jsem lepil. Musel jsem zvolit lepidlo vhodné pro lepení kovů i termoplastů. Po doporučení výrobce a dle poznatků z předešlých prací jsem vybral velmi kvalitní dvousložkový epoxid Loctite Hysol 9461. Houževnatý charakter tohoto lepidla jej činí velmi vhodným pro lepení všech typů ocelí, hliníku, mědi, konstrukčních termoplastů (PA, PC, PVC, ABS), laminátu a keramiky. Doporučená velikost spáry (vrstvy lepidla) je podle výrobce Loctite od 0,05 mm do 0,5 mm. Maximální vrstva lepidla je až 3 mm. Popis a vlastnosti použitého lepidla jsou uvedeny v tabulce 6. K lepidlu bylo nutné zakoupit kartušový adaptér, který zajišťuje vytlačení obou složek lepidla v poměru 1:1. Dále statický mixér pro dokonalé smísení pryskyřice s tvrdidlem. Po výstupu je lepidlo připraveno k aplikaci.



POPIS PRODUKTU

Hysol[®] 9461[™] má následující vlastnosti:

Technologie	Epoxid
Chemický typ (Pryskyřice)	Epoxid
Chemický typ (Tvrdidlo)	Amin
Vzhled (Pryskyřice)	Bílá matná pasta
Vzhled (Tvrdidlo)	Černá neprůhledná pasta
Vzhled (Smíchaný)	Šedá pasta
Složky	Dvě složky - pryskyřice a tvrdidlo
Viskozita	Tixotropní
Mísicí poměr objemový pryskyřice : tvrdidlo	1 : 1
Mísicí poměr hmotnostní pryskyřice : tvrdidlo	100 : 100
Vytvrzení	Po zamíchání při pokojové teplotě
Aplikace	Lepení
Maximální spára	3.0 mm
Zvláštní výhoda	<ul style="list-style-type: none">• Vynikající pevnost v loupání• Vynikající pevnost v tahu• Odolnost vůči rázům a únavě• Odolnost proti propadání• Snadné míchání a dávkování

Tab. 6 Popis lepidla Loctite Hysol 9461[21]



Obr. 46 Lepidlo Loctite Hysol 9461, kartušový adaptér a mixér [autor]

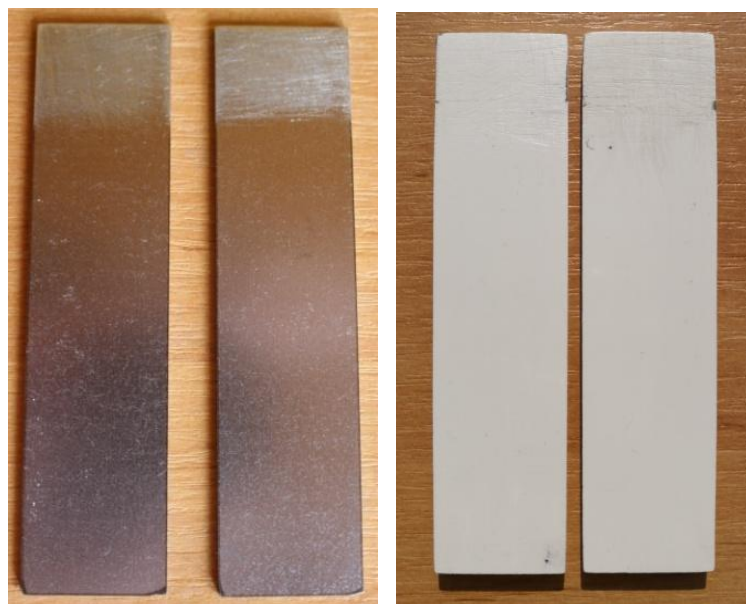
8.3 Úprava povrchu adherendů

K dosažení ideální pevnosti lepeného spoje je nutné upravit povrch všech lepených ploch. Prvním krokem tedy bylo odmaštění všech vzorků Acetonem. Tím se odstranily prvotní nečistoty a mastnota z výroby před zdrsněním povrchu adherendů.



Obr. 47 Odmaštění vzorků (vlevo čistý/vpravo znečištěný povrch) [autor]

V dalším kroku byl povrch ocelových vzorků upraven smirkovým papírem o zrnitosti 80, ve dvou navzájem kolmých směrech broušení. Upravená plocha se rovná délce přeplátování dvou vzorků. Vzorky PVC bylo nutné zdrsňit více. Proto jsem využil brusný papír zrnitosti 60. Nakonec bylo nutné všechny vzorky znovu odmastit. Opět jsem využil Aceton. Upravené vzorky po zdrsňení a odmaštění jsou zobrazeny na obrázku 48.



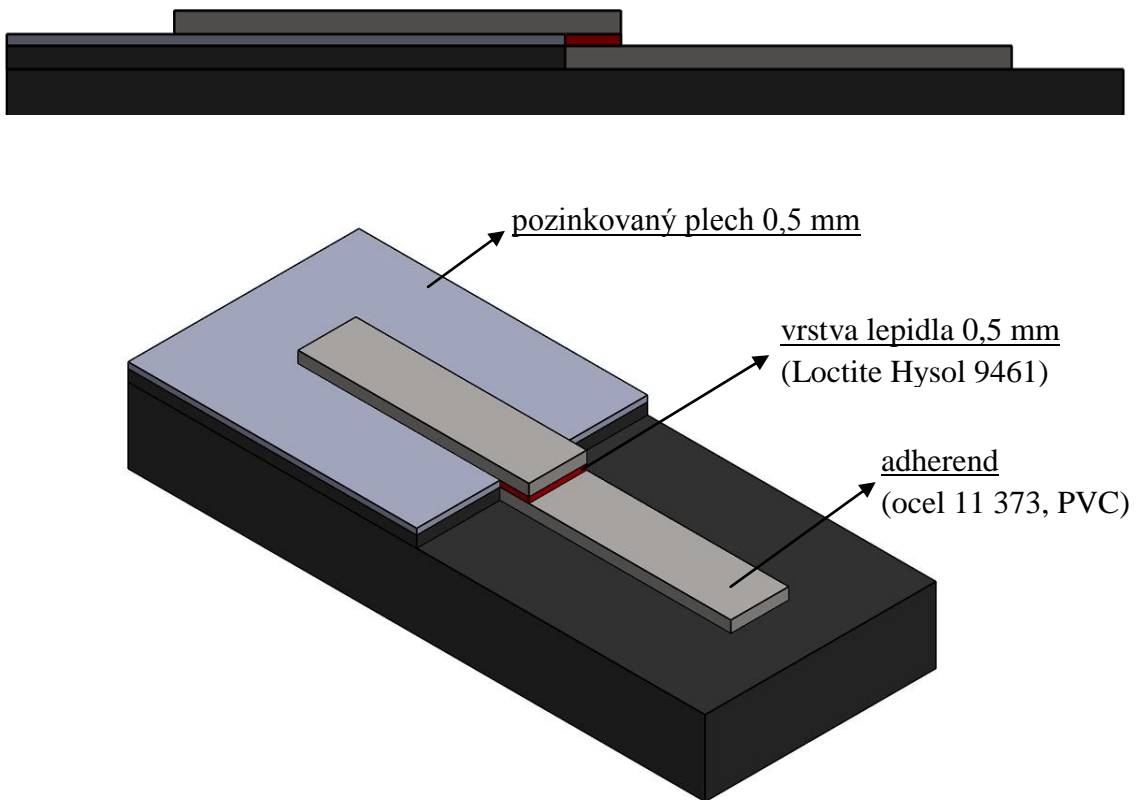
Obr. 48 Zdrsňené a odmaštěné vzorky oceli a PVC [autor]

8.4 Lepení vzorků

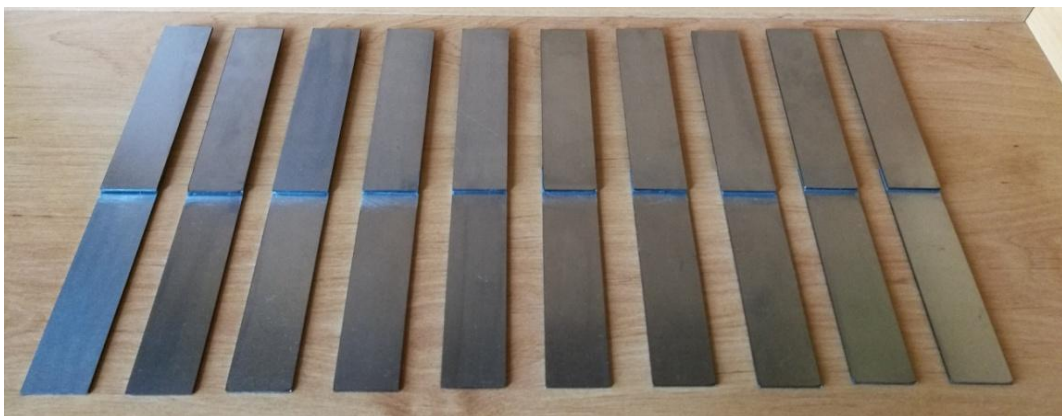
Vytvoření zkušebních těles (slepení dvou vzorků k sobě) následovalo po důkladném odmaštění Acetonem. Lepidlo bylo dokonale promícháno ve statickém mixéru v předepsaném směšovací poměru 1:1. Výsledkem byla šedá pasta, jak uvádí technický list lepidla. Připravené lepidlo bylo poté ihned rovnoměrně nanášeno na obě lepené plochy z důvodu zajištění maximální pevnosti spoje. Poté byly součásti ihned spojeny a pevně zafixovány. Na základě doporučení výrobce jsem stanovil tloušťku vrstvy lepidla pro všechny adhérendy 0,5 mm. K zajištění konstantní tloušťky vrstvy lepidla jsem použil pozinkovaný plech o síle právě 0,5 mm. Tím došlo k vymezení mezery mezi lepenými materiály a vrstva lepidla byla vždy stejná.

Po slepení byl přetok nevytvrzeného lepidla ihned opatrně otřen pomocí vatové tyčinky namočené v Acetonu. Zkušební tělesa zůstala zafixována po dobu 24 hodin, kdy

došlo k úplnému vytvrzení lepidla při pokojové teplotě. Stejný postup následoval při výrobě zkušebních vzorků z PVC.



Obr. 49 Zajištění konstantní tloušťky lepidla [autor]



Obr. 50 Zkušební tělesa z oceli 11 373 [autor]



Obr. 51 Zkušební tělesa z PVC [autor]

8.5 Zkoušení lepených těles

Zkoušení lepených spojů dle ČSN 66 8511 spočívá v namáhání jednoduše přeplátovaných vzorků na zlomení statickým ohybem. Směr zatěžující síly musí být kolmý na podélnou osu vzorku a plochu slepu.

Před samotným zkoušením bylo zapotřebí na měřená tělesa umístit piezoelektrický snímač AE. K zabezpečení dobrého akustického přenosu byl snímač na lepené vzorky přilepen pomocí speciálního lepidla. U vzorků z oceli byl snímač AE nalepen vždy na materiál. U PVC vzorků jsme s umístěním snímače laborovali. V prvním případě byl snímač umístěn na ocelový váleček, kterým byl posléze spoj zatěžován. V druhém případě byl snímač umístěn také na materiál. Všechny možnosti umístění senzoru AE jsou zobrazeny na obrázcích 52 až 55.



Obr. 52 Vzorky z oceli před měřením, snímač AE umístěný na materiálu [autor]



Obr. 53 Vzorek z PVC, snímač AE umístěný na válečku [autor]



Obr. 54 Umístění snímače AE na PVC vzorek [autor]



Obr. 55 Vzorek z PVC, snímač AE umístěný na materiálu [autor]

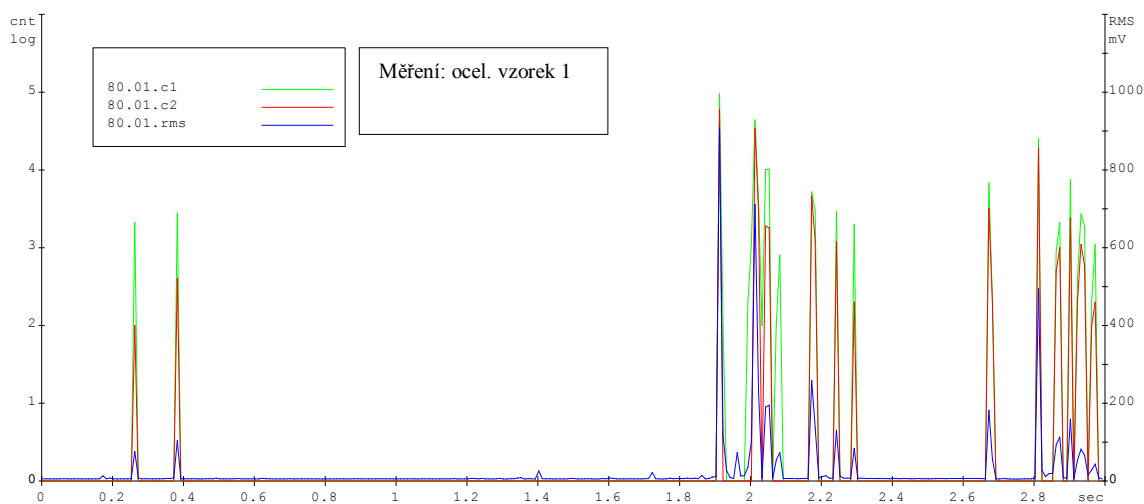
8.6 Vyhodnocení zkoušek

U porušených tuhých a elastických vzorků byl po vizuální kontrole určen charakteristický vzhled lomu lepidla a také posouzena porucha lepeného spoje. Pomocí NDT metody AE byly indikovány akustické signály vznikající ve spoji v průběhu zatěžování, až do okamžiku než nastala destrukce spoje. Reprezentativní příklady porušených lepených spojů společně s obrázky monitoringu AE jsou zobrazeny v následujícím obrazovém materiálu.

8.6.1 Ocelové vzorky



Obr. 56a Poškozený ocelový vzorek 1 [autor]

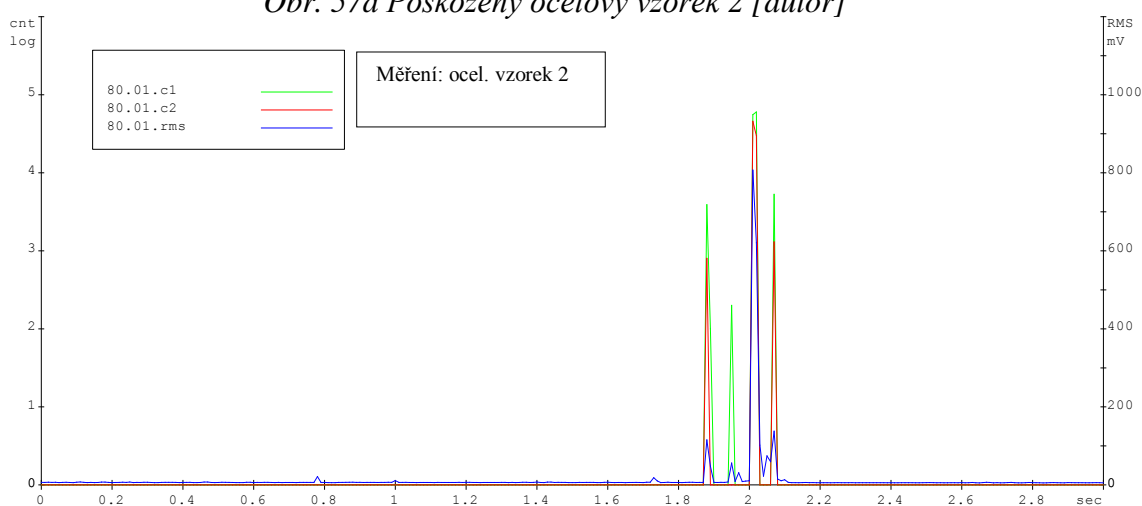


Obr. 56b Monitoring akustické emise ocelového vzorku 1 [autor]

Na obrázku 56a. je vidět typická adhezní porucha na obou stranách lepeného vzorku. Na obrázku 56b. je zobrazena vizualizace akustické emise, která byla zaznamenávána při zatěžování spoje. Modrá křivka RMS nejlépe indikuje akustické signály vznikající v namáhaném vzorku. Z obrázku lze vyčíst, že mikrotrhlina byla indikována po cca. 1,8 vteřině od zahájení zatěžování. V tomto místě vznikla významná emisní událost, která charakterizuje poškození lepeného spoje. Akustické signály přístroj začal zaznamenávat již po cca. 0,2 vteřině. Vlivem zvyšujícího se zatížení docházelo k průhybu a pohybu po podporách. Z konfrontace lomové plochy a záznamu AE je patrná iniciace i postupné adhezně – kohezní porušení spoje.



Obr. 57a Poškozený ocelový vzorek 2 [autor]

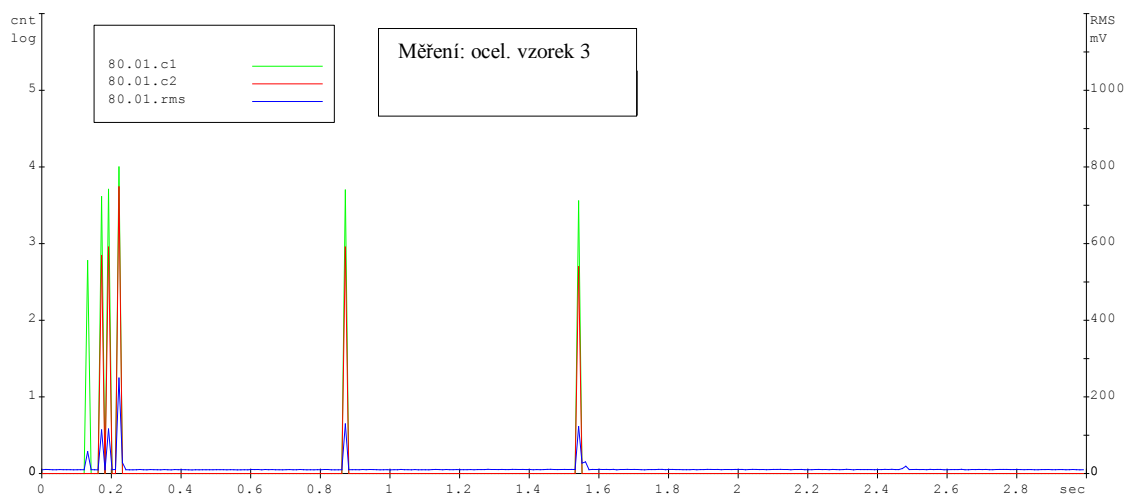


Obr. 57b Monitoring akustické emise ocelového vzorku 2 [autor]

Na obrázku 57a. je vidět adhezně – kohezní (smíšená) porucha lepeného spoje. Adheze lepeného materiálu a lepidla je tedy vyšší než u ocelového vzorku 1. Tuto skutečnost dokládá obrázek 57b. Na něm je možné pozorovat významnější emisní událost po cca. 2 vteřinách od začátku zatěžování. Vyšší soudržnost mezi materiálem a lepidlem znamená také vyšší pevnost celého lepeného souboru. Vyšší pevnost spoje se také projevila na větším průhybu ocelových adherendů.



Obr. 58a Poškozený ocelový vzorek 3 [autor]

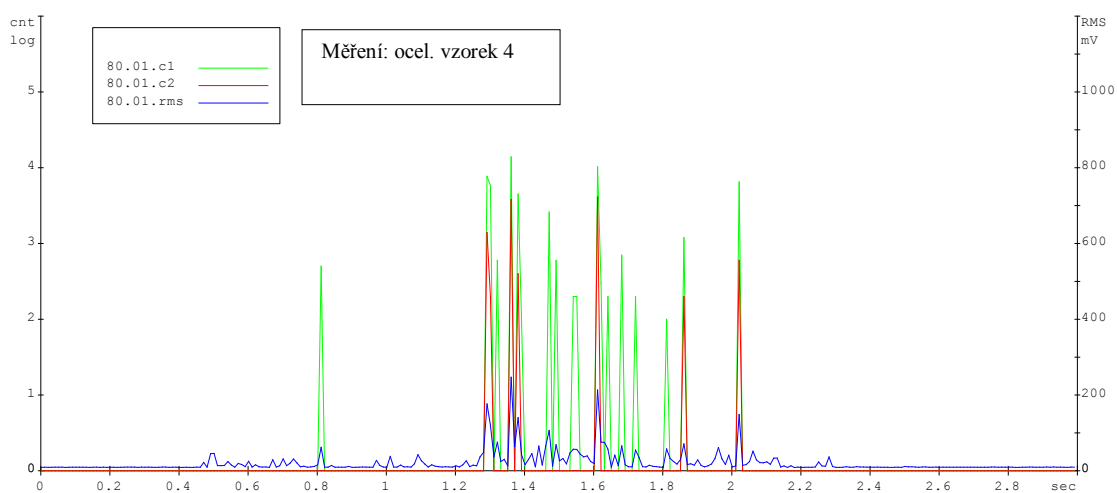


Obr. 58b Monitoring akustické emise ocelového vzorku 3 [autor]

Na obrázku 58a. je zobrazena úplná adhezní porucha na jedné straně spoje. Ta je způsobena nedostatečnou adhezí mezi základním materiálem a lepidlem. Malá část lepidla zůstala zachycena na horním vzorku. Únosnost spoje to však nijak nezmění. Z obrázku 58b. lze vypožorovat, že významná akustická událost nastala velmi brzy, již po 0,2 vteřinách od začátku zatížení. Spoj vykazoval velmi malou únosnost a došlo k rychlému poškození. Nastal spontánní rychlý lom, který lze označit za křehký.



Obr. 59a Poškozený ocelový vzorek 4 [autor]



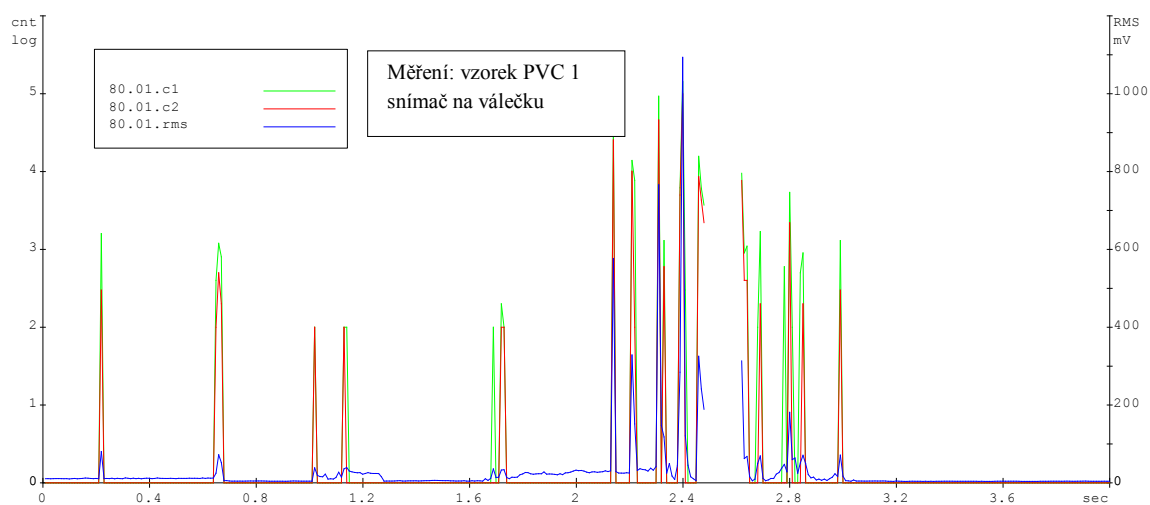
Obr. 59b Monitoring akustické emise ocelového vzorku 4 [autor]

Na obrázku 59a. je zobrazena adhezní porucha lepeného spoje. Oproti vzorku 3 lze z obrázku 59b. vypočítat vyšší únosnost spoje. Poměrně významná akustická událost je indikována v čase po cca. 1,2 vteřinách. Do této doby docházelo pouze k ohybu materiálu. Na záznamu AE je patrné prorůstání trhliny.

8.6.2 Vzorky PVC



Obr. 60a Poškozený PVC vzorek 1 [autor]

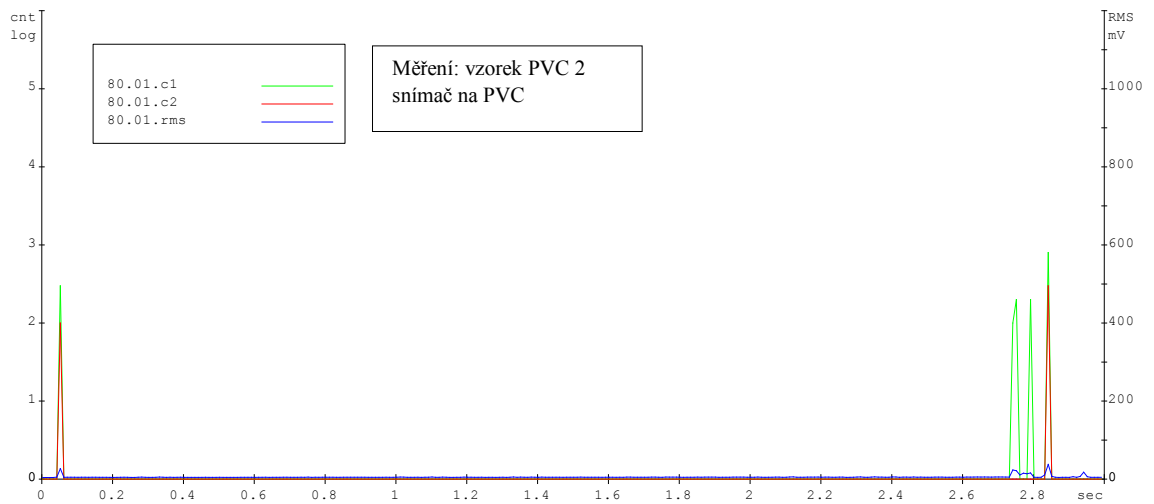


Obr. 60b Monitoring akustické emise PVC vzorek 1 [autor]

Zkoušení všech těles z PVC vypadalo velmi podobně. Při zvyšování zatížení došlo k velmi rychlému prasknutí lepeného spoje. Únosnost vzorků z PVC byla malá. První příznačný příklad je na obrázku 60a. Charakterizuje ryze adhezní poruchu na jedné straně lepeného spoje. Přílnavost mezi lepidlem a materiálem byla nízká. Pro snímání akustické emise byl v tomto případě snímač nalepen na váleček, kterým byl spoj zatížen. Z obrázku 60b. je patrné, že byla zaznamenána celá řada akustických signálů (parazitující vlivy). Kdy došlo ke skutečnému poškození spoje je složité usuzovat. Významnější emisní událost je patrná v čase od cca. 1,6 vteřiny. Událost v čase 2,8 vteřiny od začátku již charakterizuje pouze náraz kovového válečku na stůl zkušebního zařízení.



Obr. 61a Poškozený PVC vzorek 2 [autor]

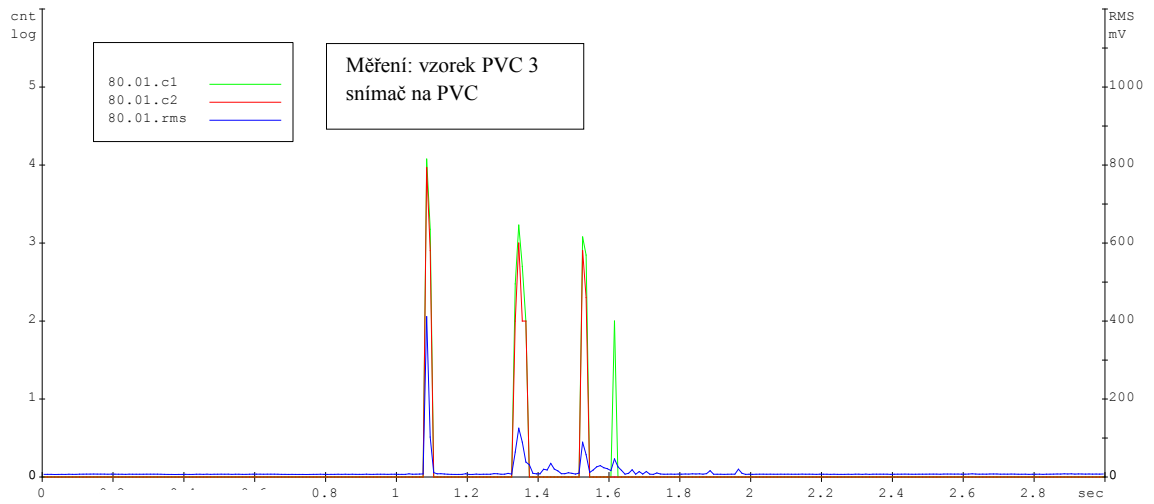


Obr. 61b Monitoring akustické emise PVC vzorek 2 [autor]

Druhý typický příklad opět vykazuje čistě adhezní poruchu lepeného spoje. Senzor AE byl pro zajímavost umístěn na PVC materiál. Z grafu je patrné, že v průběhu zatěžování bylo zaznamenáno minimum akustických signálů.

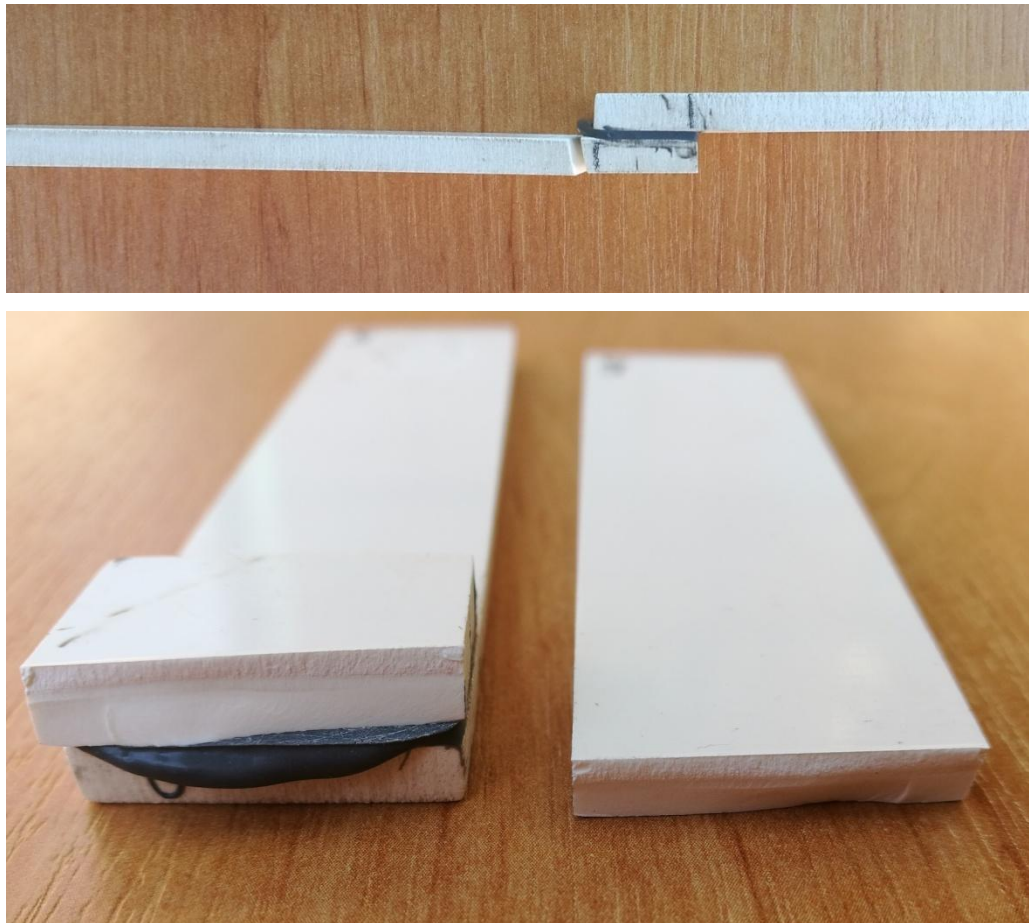


Obr. 62a Poškozený PVC vzorek 3 [autor]



Obr. 62b Monitoring akustické emise PVC vzorek 3 [autor]

Třetí reprezentativní příklad ukazuje deformaci základního materiálu mimo lepený spoj. Z obrázku 62b. je patrné, že významnější emisní událost je detekována v čase cca. 1,1 sekundy od spuštění zatěžování.



Obr. 63 Detail poruchy PVC vzorku 3 [autor]

9 DISKUZE

První skupina experimentů, která popisuje degradaci lepeného spoje na souboru tuhých ocelových vzorků podle ČSN 66 8511, dokumentuje charakter porušení v návaznosti na záznamu akustické emise (AE). Typický vzhled je determinován souborem překmitů na nastavené hladině událostí (1. a 2. kanálu) i spolu s tendencí nárůstu RMS (její hodnoty obr. 56b.). Potvrzuje závěry vizuálního rozboru lomových ploch i to, že se jedná o smíšený adhezně – kohezní lom. Pohyb trhliny i její iniciace je dána přípravou kotvícího profilu (křížné broušení, odmaštění). V místech zvýšené adheze přechází trhlina do vrstvy lepidla. Celý proces se odehrává řádově ve zlomcích sekund (cca. $> 0,05$ s – iniciace, $> 0,1$ s – pohyb trhliny) dle záznamu AE. V časovém sledu jsou zobrazeny i parazitující události (pohyb vzorku během ohybu, tření po oporách apod.). Ze zápisu je zřejmé, že je nezbytné umístit snímač AE na vzorky, nikoliv na opory (tření) a použít kvalitního uchycení (lepidlo Loctite), aby v důsledku rázu po zlomení nedošlo ke ztrátě kontaktu vzorku se snímačem. Při velkých hodnotách pevnosti spoje a elastické deformaci plechu lze vidět i souběžné porušení spoje s průhybem vzorku (delší registrace AE – cca. 0,2 s a nižší hodnoty RMS). Celkově nelze na základě AE postup trhliny v lepidle označit jako kontinuální, ale spontánní v několika úsecích (max. 3). Jedinou výjimkou je porušení při větší deformaci podkladu, kdy se v záznamu AE objeví i pohyb povrchu vzorku po oporách (tření). Umístění snímačů vyhovuje jen na vzorcích.

Obdobně lze zcela přesné závěry učinit i u PVC vzorků, při umístění snímače na opěrný váleček (obr. 53). Na obrázku 60b. je snímáný záznam zašuměn pohybem po oporách. Nelze jednoznačně stanovit okamžik iniciace trhliny ani její charakter pohybu. Z obrázku je také patrné ohýbání vzorku (tření do cca 2,385 s a poté náhlé porušení spoje v rámci odloupení). Jde pravděpodobně o problematickou adhezi lepidla u PVC. Velký úhel smáčivosti je dán samotným materiálem PVC a nelze ho významně ovlivnit ani změnou kotvícího profilu (hrubé broušení) ani dalším odstraněním mastných kyselin z povrchu. Pokud je snímač AE umístěn na vzorky (horní nebo dolní pás PVC – obr. 61a. a 62a.) jsou oba záznamy odlišné jen parazitními vlivy (tření). Na obrázku 62a. se navíc projevil vrub, který inicioval trhlinu v páse PVC před porušením lepeného spoje.

To dokazuje, že i když PVC není kvalitně slepitelný materiál ani tak kvalitním epoxidovým lepidlem (Loctite Hysol 9461), je pevnost spoje těsně pod hranicí pevnosti zkušebního tělesa s vrubem. I zde jde o nízkoenergetické porušení (RMS do 420 mV).

10 ZÁVĚR

Předkládaná diplomová práce s názvem Vizualizace normálového a tečného napětí u lepených spojů je rozdělena do dvou částí. Teoretická kompilace obsahuje teoretický popis lepení, lepených spojů a jejich nejrozšířenější zkoušení. Poznatky pramení z nejnovějších literárních údajů, které se problematikou lepení zabývají. Tato část směřuje práci do oblasti lámání vzorků s nízkou poddajností (ocelových) i vzorků elastických (PVC) prezentujících typické konstrukční materiály, dnes velmi často využívané. Rešeršní část práce představuje kvalitní výchozí bod pro řešení experimentální části práce.

Vlastní praktická část diplomové práce je členěna na již vzpomínaný detailnější výběr zmíněných konstrukčních materiálů (ocel, PVC) a je uvedena přípravou zkušebních vzorků. Příprava zkušebních těles zahrnuje detailní technologický postup vytvoření kompaktní vrstvy u lepeného spoje a reflektuje doporučení norem. Bylo vytvořeno jednocelové lepící zařízení pro dosažení konstantní tloušťky vrstvy lepidla. K vytvoření kotvícího profilu byly aplikovány dokázané, v současné době nejúčinnější postupy. Velká pozornost byla věnována rovněž odstranění zbytkových mastných kyselin z povrchu vzorků jak ocelových, tak hlavně PVC. Samotné měření probíhalo na ÚTAD AF Mendelovy univerzity v Brně s použitím zkušebního zařízení z oblasti akustické emise. Získané výsledky jsou zobrazeny jako typické záznamy jednotlivých porušení, které jsou následně diskutovány v kapitole 9., s ohledem na jednotlivé podkladové materiály lepených spojů.

Aplikace akustické emise průkazně dokazuje charakteristický pohyb trhliny v lepeném spoji při zkoušce lámáním (ČSN 66 8511). Je zřejmé, že pomocí této moderní NDT metody lze v záznamu sledovat pohyb trhliny v lepeném spoji a v kombinaci s rozborem lomových ploch lze přiřadit jednotlivé adhezně – kohezní chování k průběžnému zatěžování spoje.

Metodika je určena především pro hodnocení celkové pevnosti (výška hodnoty RMS cca. 500 – 900 mV u oceli a 400 – 600 mV u PVC), byla potvrzena v celém rozsahu a vychází ze statického hodnocení naměřeného souboru dosažených výsledků, a byly pouze vedlejším produktem předložené práce. V práci jsou uvedeny typické záznamy akustické emise v návaznosti na vzhledu lomové plochy poškozeného lepeného spoje.

Z uvedeného je zřejmé, že NDT metoda akustické emise je vhodná pro popis degradace lepených spojů namáhaných v různých módech zatížení. Po ověření jednotlivých typů lepidel je uplatnitelná přímo v technické praxi.

11 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] POKORNÝ, Jiří. Lepení a tmelení v dílně i domácnosti: [dřevo, kovy, plasty, sklo, další materiály a výrobky]. Praha: Grada, 2000. 104 s. ISBN 80-7169-857-1.
- [2] OSTEN, Miloš. Práce s lepidly a tmely. Praha: Grada, 1996. 129 s. ISBN 80-7169-338-3.
- [3] PETERKA, Jindřich. Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. Praha: SNTL, 1980. 788 s.
- [4] Letounu De Havilland 104 Dove. [online]. [cit. 2017-01-18]. Dostupné z: <https://www.planespotters.net>
- [5] VÁLEK, V. CHRÁST, V. Technologie lepení kovů v opravárenství. Disertační práce. MZLU v Brně, 2006. 99 s.
- [6] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. BUDYNAS a Miloš VLK. Konstruování strojních součástí. Brno: VUTIUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [7] ČSN EN 1465 Lepidla – Stanovení smykové pevnosti v tahu tuhých adherendů na přeplátovaných tělesech.
- [8] ČSN 66 8512 – Zkoušky lepených spojů (kov s kovem). Rázová pevnost lepených spojů.
- [9] ČSN 66 8511 – Zkouška lámavosti lepených spojů.
- [10] ČSN 66 8516 – Zkoušky lepených spojů (kov s kovem). Stanovení pevnosti lepených spojů v odlupování metodou podle Wintera.
- [11] HRDLIČKOVÁ, D. Strojírenská technologie III. Praha: SNTL, 1982. 167 s.
- [12] PŘÍVRATSKÝ, Petr. Zkoušky životnosti konstrukčních lepidel. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, 2014. 62 s.

- [13] KOLEKTIV AUTORŮ. *Loctite, Worlwide Design Handbook*. 2. vyd. Mainz: Erasmusdruck GmbH, 1998. 452 s. ISBN 0-9645590-0-5.
- [14] Složení a mechanické vlastnosti oceli 11 373. [online]. [cit. 2017-02-5]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz>
- [15] The Adhesive and Sealant Council, Inc. [online]. 2009. [cit. 2017-01-25]. History of Bonding. Dostupné z: <http://adhesives.org/AdhesivesSealants/HistoryofBonding.asp>
- [16] Předúprava povrchu materiálů. [online]. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <http://www.ars.cz>, <http://www.rosma.cz>
- [17] PETRIE, E. M. *Handbook of Adhesives and Sealants*. McGraw-Hill, New York USA, 2007. 1077 s. ISBN 978-0-07-147916-5.
- [18] FILÍPEK, J. ČERNÝ, M. Monitoring akustické emise při mechanické a korozní degradaci. *Technická diagnostika*. 2011. s. 22. ISSN 1210-311X.
- [19] Voštinová konstrukce. [online]. [cit. 2017-01-10]. Dostupné z: <http://postele-na-miru.cz/postele-na-miru/vyroba-posteli-z-vostiny.html>
- [20] Ruční broušení. [online]. [cit. 2017-01-25]. Dostupné z: <https://www.estav.cz>
- [21] Loctite – výrobce lepidel. [online]. [cit. 2017-02-1]. Dostupné z: <http://www.loctite.cz>
- [22] DOSTÁL, P. ČERNÝ, M. KUMBÁR, V. Využití statických nástrojů pro monitoring akustické emise. In *Quality and reliability of technical systems*. 1. vyd. Nitra: SPU v Nitře, 2012. s. 208 – 214. ISBN 978-80-552-0798-8.
- [23] Stroje pro dělení materiálu. [online]. [cit. 2017-02-5]. Dostupné z: <http://www.rimatec.cz>
- [24] PVC desky v různých odstínech. [online]. [cit. 2017-02-5]. Dostupné z: <http://www.plastpartner.cz>

12 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Zalepené oči babylónské sošky [15]</i>	12
<i>Obr. 2 Letoun De Havilland DH – 104 Dove [4]</i>	14
<i>Obr. 3 Účinky vrubu na plný a lepený díl [3]</i>	16
<i>Obr. 4 Vizualizace napětí u nýtového a lepeného spoje [5]</i>	16
<i>Obr. 5 Ukázka voštinové konstrukce materiálu [19]</i>	17
<i>Obr. 6 Kontakt atomů lepidla se spojovaným materiálem [13]</i>	18
<i>Obr. 7 Adherend při kontaktu s lepidlem [17]</i>	19
<i>Obr. 8 Vztah mezi adhezí a lepeným materiálem [3]</i>	19
<i>Obr. 9 Mechanická vazba (zámek) lepidla s povrchem [5]</i>	20
<i>Obr. 10 Adhezni a kohezni poruchy lepených spojů [17]</i>	23
<i>Obr. 11 Smáčivost povrchu kapalinou [3]</i>	24
<i>Obr. 12 Chování kapaliny na pevném tělese [13]</i>	24
<i>Obr. 13 Druhy smáčecích úhlů [13]</i>	25
<i>Obr. 14 Test smáčivosti povrchu [13]</i>	25
<i>Obr. 15 Příklady konstrukčního provedení koutových spojů [6]</i>	26
<i>Obr. 16 Způsoby provedení jednostranně přeplátovaného spoje [6]</i>	27
<i>Obr. 17 Oboustranně přeplátovaný spoj [6]</i>	27
<i>Obr. 18 Tupé spoje a jejich modifikace [6]</i>	28
<i>Obr. 19 Tupý spoj s úkošem [6]</i>	28
<i>Obr. 20 Znečištěný povrch lepených materiálů [13]</i>	29
<i>Obr. 22 Rovinné broušení materiálu (čelem/obvodem kotouče) [11]</i>	31
<i>Obr. 23 Ruční broušení a brusný materiál [20]</i>	32
<i>Obr. 24 Tryskání ocelové konstrukce [16]</i>	32
<i>Obr. 25 Materiál po ošetření mořením (vlevo před/vpravo po moření) [16]</i>	34
<i>Obr. 26 Fosfátový povlak na ocelových výrobcích [16]</i>	34
<i>Obr. 27 Rozložení napětí u přeplátovaného spoje [2]</i>	35
<i>Obr. 28 Deformace spoje ohybovým momentem [2]</i>	36
<i>Obr. 29 Velikost a průběh tahového napětí [3]</i>	37
<i>Obr. 30 Tahové namáhání materiálu [13]</i>	38
<i>Obr. 31 Průběh a velikost ohybového napětí spoje [3]</i>	39

<i>Obr. 32 Vizualizace napětí u přeplátovaného spoje [3, 13]</i>	39
<i>Obr. 33 Průběh napětí u přeplátovaného spoje [3]</i>	40
<i>Obr. 34 Standardní vzorek dle normy ČSN EN 1465 [7]</i>	41
<i>Obr. 35 Standardní zkušební vzorek pro zkoušku lámavosti dle ČSN 66 8511 [9]</i>	42
<i>Obr. 36 Běžné poruchy lepeného spoje [2]</i>	42
<i>Obr. 37 Zkušební těleso pro zkoušku pevnosti v odlupování podle ČSN 66 8516 [10]</i> .	43
<i>Obr. 38 Zkušební těleso pro zkoušku rázové pevnosti podle ČSN 66 8512 [8]</i>	43
<i>Obr. 39 Hardware diagnostického systému DAKEL – XEDO [autor]</i>	45
<i>Obr. 40 Materiál a pomůcky pro lepení [autor]</i>	47
<i>Obr. 41 Laserový řezací stroj Nukon NF PRO 315 [23]</i>	48
<i>Obr. 42 Tvar a rozměr ocelového adherendu podle ČSN EN 1465 [7]</i>	49
<i>Obr. 43 PVC tvrzené desky v různých barevných odstínech [24]</i>	49
<i>Obr. 44 Rozměr a tvar adherendu z PVC [autor]</i>	50
<i>Obr. 45 Stroj OMAX 80X pro obrábění vodním paprskem [23]</i>	50
<i>Obr. 46 Lepidlo Loctite Hysol 9461, kartušový adaptér a mixér [autor]</i>	52
<i>Obr. 47 Odmaštění vzorků (vlevo čistý/vpravo znečištěný povrch) [autor]</i>	52
<i>Obr. 48 Zdrsněné a odmaštěné vzorky oceli a PVC [autor]</i>	53
<i>Obr. 49 Zajištění konstantní tloušťky lepidla [autor]</i>	54
<i>Obr. 50 Zkušební tělesa z oceli 11 373 [autor]</i>	54
<i>Obr. 51 Zkušební tělesa z PVC [autor]</i>	55
<i>Obr. 52 Vzorky z oceli před měřením, snímač AE umístěný na materiálu [autor]</i>	55
<i>Obr. 54 Umístění snímače AE na PVC vzorek [autor]</i>	56
<i>Obr. 55 Vzorek z PVC, snímač AE umístěný na materiálu [autor]</i>	56
<i>Obr. 56a Poškozený ocelový vzorek 1 [autor]</i>	57
<i>Obr. 56b Monitoring akustické emise ocelového vzorku 1 [autor]</i>	57
<i>Obr. 57a Poškozený ocelový vzorek 2 [autor]</i>	58
<i>Obr. 57b Monitoring akustické emise ocelového vzorku 2 [autor]</i>	58
<i>Obr. 58a Poškozený ocelový vzorek 3 [autor]</i>	59
<i>Obr. 58b Monitoring akustické emise ocelového vzorku 3 [autor]</i>	59
<i>Obr. 59a Poškozený ocelový vzorek 4 [autor]</i>	60
<i>Obr. 59b Monitoring akustické emise ocelového vzorku 4 [autor]</i>	60
<i>Obr. 60a Poškozený PVC vzorek 1 [autor]</i>	61

<i>Obr. 60b Monitoring akustické emise PVC vzorek 1 [autor]</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 61a Poškozený PVC vzorek 2 [autor]</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 61b Monitoring akustické emise PVC vzorek 2 [autor]</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 62a Poškozený PVC vzorek 3 [autor]</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 62b Monitoring akustické emise PVC vzorek 3 [autor]</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 63 Detail poruchy PVC vzorku 3 [autor]</i>	<i>64</i>

13 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

<i>Tab. 1 Výhody lepených spojů [1, 3, 6].....</i>	<i>15</i>
<i>Tab. 2 Nedostatky lepených spojů [1, 3, 6].....</i>	<i>17</i>
<i>Tab. 3 Hodnoty povrchové energie γ_E u vybraných materiálů [3].....</i>	<i>25</i>
<i>Tab. 4 Chemické složení (rozbor tavby) v % [14].....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli ČSN 11373 [14].....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 6 Popis lepidla Loctite Hysol 9461 [21].....</i>	<i>51</i>

14 PŘÍLOHY

14.1 Technický list k lepidlu Loctite Hysol 9461

Hysol[®]

Hysol[®] 9461[™]

května 2006

POPIS PRODUKTU

Hysol[®] 9461[™] má následující vlastnosti:

Technologie	Epoxid
Chemický typ (Pryskyřice)	Epoxid
Chemický typ (Tvrdivlo)	Amin
Vzhled (Pryskyřice)	Bílá matná pasta
Vzhled (Tvrdivlo)	Černá neprůhledná pasta
Vzhled (Smíchaný)	Šedá pasta
Složky	Dvě složky - pryskyřice a tvrdidlo
Viskozita	Tixotropní
Mísicí poměr objemový pryskyřice : tvrdidlo	1 : 1
Mísicí poměr hmotnostní pryskyřice : tvrdidlo	100 : 100
Vytvrzení	Po zamíchání při pokojové teplotě
Aplikace	Lepení
Maximální spára	3.0 mm
Zvláštní výhoda	<ul style="list-style-type: none"> • Vynikající pevnost v loupání • Vynikající pevnost v tahu • Odolnost vůči rázům a únavě • Odolnost proti propadání • Snadné míchání a dávkování

Hysol[®] 9461[™] je dvousložkové, tixotropní epoxidové lepidlo vyrobené tak, aby bylo snadno použitelné a mělo dobře vyvážené vlastnosti. Tento produkt spojuje vynikající pevnost v loupání i ve smyku a je vyráběn ve formě hladké pasty, která je nestékavá a snadno se dávkuje. Má střední dobu zpracovatelnosti a pokud je třeba, lze jeho vytvrzení urychlit ohřevem. Houževnatý charakter tohoto lepidla jej činí velmi vhodným pro lepení různorodých materiálů včetně kovů, konstrukčních termoplastů i termosetů a součástí tažených z plechů.

TYPICKÉ VLASTNOSTI NEVYTVRZENÉHO MATERIÁLU

Vlastnosti pryskyřice

Měrná hmotnost při teplotě 25 °C	1,35
Viskozita, DIN 54453, mPa·s (cP):	
Smyková rychlost 10 s ⁻¹	85 980
Smyková rychlost 50 s ⁻¹	38 570
Tixotropní index	2,8
Bod vzplanutí - viz Bezpečnostní list	

Vlastnosti tvrdidla

Měrná hmotnost při teplotě 25 °C	1,31
Viskozita, DIN 54453, mPa·s (cP):	
Smyková rychlost 10 s ⁻¹	59 530
Smyková rychlost 50 s ⁻¹	42 860
Tixotropní index	2
Bod vzplanutí - viz Bezpečnostní list	

Vlastnosti smíchaného produktu

Doba zpracovatelnosti při teplotě 22 °C, minut:	
100 g hmoty	40

TYPICKÉ VLASTNOSTI PŘI VYTVRZOVÁNÍ

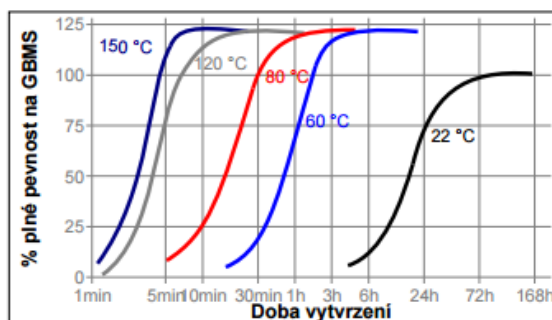
Doba fixace

Doba fixace je definovaná jako čas potřebný k získání pevnosti ve smyku 0.1 N/mm².

Doba fixace, smícháno, při teplotě 22 °C, minut 240

Rychlost vytvrzení dle času a teploty

Hysol[®] 9461[™] dosahuje manipulační pevnosti během 4 až 5 hodin při pokojové teplotě (poznámka: tento čas se může lišit v závislosti na tvaru lepeného spoje a konkrétní teploty okolí). Zvýšením teploty při vytvrzování můžeme proces vytvrzení urychlit. Graf níže ukazuje závislost pevnosti ve smyku na čase na zkušebních vzorcích z otryskané oceli při různých teplotách, zkoušeno v souladu s ISO 4587.



TYPICKÉ VLASTNOSTI VYTVRZENÉHO MATERIÁLU

Vytvrzeno po dobu 7 dní při teplotě 22 °C, 1.2 mm silné vzorky

Fyzikální vlastnosti:

Tvrdość Shore, ISO 868, Tvrdoměr typu D	80
Prodloužení, ISO 527-2, %	3,5
Pevnost v tahu, ISO 527-2	N/mm ² 30 (psi) (4 400)
Modul pevnosti v tahu, ISO 527-2	N/mm ² 2 757 (psi) (400 000)

TYPICKÉ VLASTNOSTI VYTVRZENÉHO MATERIÁLU

Adhezní vlastnosti

Vytvrzeno po dobu 7 dní při teplotě 22 °C

Pevnost ve smyku, ISO 4587:

Nízkouhlikatá ocel (otryskaná)	N/mm ² 25 (psi) (3 600)
Hliník (obroušený)	N/mm ² 21 (psi) (3 100)
(brusný papír SiC, hrubost A166, třída P400A)	N/mm ² 21 (psi) (3 100)
Hliník (leptaný pomocí síranu železnatého)	N/mm ² 19 (psi) (2 800)
Nerezová ocel	N/mm ² 16 (psi) (2 300)
Ocel s galvanickou úpravou (Žárově zinkovaná)	N/mm ² 16 (psi) (2 300)

Mosaz	N/mm ²	11
	(psi)	(1 600)
Chromátovaný pozink	N/mm ²	16
	(psi)	(2 300)
Polykarbonát	N/mm ²	6,5
	(psi)	(940)
ABS	N/mm ²	6,2
	(psi)	(900)
Sklolaminát (Matrice z polyesterové pryskyřice)	N/mm ²	5
	(psi)	(720)
Skleněnými vlákny vyztužený epoxid	N/mm ²	13
	(psi)	(1 900)
180° Pevnost v loupání, ISO 8510-2: Nízkouhlikatá ocel (otryskaná)	N/mm	10
	(lb/in)	(57,1)

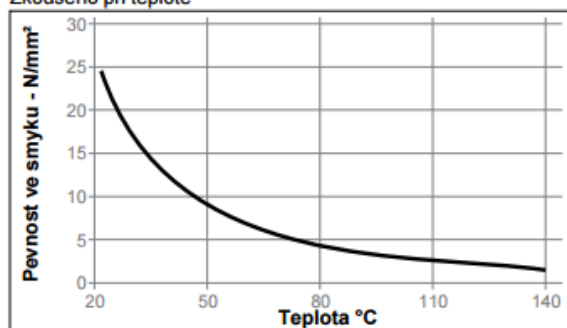
Odolnost vůči rázům IZOD, ISO 9653 J/m² :
Nízkouhlikatá ocel (otryskaná) 8,3

TYPICKÁ ODOLNOST VŮČI PROSTŘEDÍ

Vytvrzeno po dobu 7 dní při teplotě 22 °C

Pevnost ve smyku, ISO 4587:
Nízkouhlikatá ocel (otryskaná)

Pevnost za tepla
Zkoušeno při teplotě



Stárnutí za tepla

Stárnutí při uvedené teplotě a zkoušeno při 22°C.

Teplota	% původní pevnosti		
	500 h	1 000 h	3 000 h
50 °C	110	105	105
80 °C	115	125	120
100 °C	110	100	100
120 °C	125	125	125
150 °C	135	125	120

Odolnost proti chemikáliím a rozpouštědlům

Stárnutí za uvedených podmínek a zkoušeno při teplotě 22 °C.

Prostředí	°C	% původní pevnosti		
		500 h	1000 h	3000 h
Motorový olej	22	100	95	100
Bezolovnatý benzín	22	75	70	60
50/50 % Voda/glykol	87	75	75	95
4% hydroxid sodný ve vodě	22	85	80	80
98% RV	40	85	70	70
Voda	60	85	75	75
Voda	90	85	80	55
Aceton	22	65	35	35
Kyselina octová, 10%	22	75	65	50
7.5% roztok soli ve vodě	22	80	80	80

VŠEOBECNÉ INFORMACE

Tento produkt se nedoporučuje používat v čistě kyslíkových nebo na kyslík bohatých systémech a neměl by se používat k těsnění chlóru či jiných silně oxidačních materiálů.

Informace pro bezpečné zacházení s tímto produktem najdete v Bezpečnostním listě (BL).

Tam, kde se používají vodní roztoky pro čištění povrchů před lepením, je důležité zkontrolovat kompatibilitu mycího roztoku a produktu. V některých případech mohou vodní roztoky nepříznivě ovlivnit vytvrzování a vlastnosti produktu.

Pokyny pro použití

- Pro co nejlepší výsledky lepení by měly být lepené povrchy čisté, suché a odmaštěné. Při vysokopevnostním konstrukčním lepení může speciální ošetření povrchu zvýšit pevnost a trvanlivost lepeného spoje.
- Před použitím je potřeba pryskyřici a tvrdidlo řádně promíchat. Produkt může být nanášen přímo z dvojkartuší přes dodaný statický mixer. V tomto případě vytlačte prvních 3 až 5 cm do odpadu. Při použití většího balení produktu řádně smíchejte obě složky v přesném poměru dle objemu nebo hmotnosti, jak je uvedeno v Popisu produktu. Při ručním míchání si odvažte nebo objemově odměřte požadované množství pryskyřice a tvrdidla a usilovně je promíchejte. Míchejte ještě asi 15 sec. po té, co získáte stejnou barvu produktu.
- Doporučujeme nemíchat najednou větší množství produktu než 4 kg z důvodu vzniku nežádoucího tepla a přehřátí při reakci obou složek. Mícháním menšího množství zabráníte nežádoucímu zahřívání produktu.
- Po rozmíchání naneste produkt tak rychle, jak je to možné, na jeden z lepených povrchů. Pro získání maximální pevnosti spoje rozetřete produkt rovnoměrně na oba povrchy. Součásti by měly být spojeny ihned po nanesení rozmíchaného lepidla.
- Informace o době zpracovatelnosti najdete v části - Typické vlastnosti nevytvrzeného materiálu. Vyšší teplota a menší množství zpracovávaného produktu zkracují dobu zpracovatelnosti.

6. Zabraňte možnému pohybu sestavených součástí během vytvrzování produktu. Lepený spoj by měl být ponechán v klidu, dokud nezíská plnou pevnost dřívě, než budou součásti uvedeny do provozu.
7. Přetok nevytvrzeného produktu může být otřen pomocí organických rozpouštědel (např. Acetonem).
8. Po použití, dřívě než lepidlo vytvrdne, vyčistěte míchací a nanášecí zařízení pomocí horké mýdlové vody.

Neslouží pro materiálové specifikace

Technické údaje zde uvedené jsou pouze informativní. Potřebujete-li pomoc nebo radu ve věci technických podmínek tohoto produktu, obraťte se prosím na Vaše místní oddělení kvality.

Skladování

Produkt skladujte v neotevřených originálních nádobách na suchém místě. Informace o skladování produktu jsou uvedeny na etiketě nádob.

Optimální podmínky skladování: 8 °C až 21 °C. Skladování pod 8 °C nebo nad 28 °C může nepříznivě ovlivnit vlastnosti produktu.

Materiál odebraný z nádoby může být během používání kontaminován. Proto jej nikdy nevracejte do originálního obalu. Společnost Henkel nemůže nést odpovědnost za produkt, který byl kontaminován nebo skladován za podmínek jiných, než výše uvedených. Pokud jsou potřebné další informace, kontaktujte Vaše místní technické nebo zákaznické oddělení Henkel Loctite.

Převody

°C x 1.8) + 32 = °F
 kV/mm x 25.4 = V/mil
 mm / 25.4 = inches
 N x 0.225 = lb
 N/mm x 5.71 = lb/in
 N/mm² x 145 = psi
 MPa x 145 = psi
 N·m x 8.851 = lb·in
 N·m x 0.738 = lb·ft
 N·mm x 0.142 = oz·in
 mPa·s = cP

Poznámka

Veškeré údaje zde uvedené slouží pouze pro informaci a jsou považovány za hodnověrné. Nemůžeme přebírat zodpovědnost za výsledky dosažené jinými laboratořemi, nad jejichž postupy nemáme kontrolu. Je plně na zodpovědnosti uživatele posoudit vhodnost jakéhokoli zde uvedeného postupu pro vlastní účely a je také na jeho zodpovědnosti, zda přijme vhodná preventivní opatření pro ochranu majetku a osob proti všem rizikům, která mohou být spojena s používáním produktů a manipulací s nimi.

V tomto duchu se společnost Henkel zvláště zřiká přímých i vyplývajících záruk, včetně záruk obchodovatelnosti a vhodnosti pro daný účel, vznikajících z prodeje nebo používání jejich produktů. Společnost Henkel zvláště odmítá jakoukoli zodpovědnost za následné nebo náhodné škody jakéhokoli druhu, včetně náhrady škod.

Tato diskuze o různých postupech a složeních neznamená, že tyto nejsou patentovány společností Henkel nebo jinými subjekty. Každému budoucímu uživateli doporučujeme, aby si před sériovým použitím otestoval, zda je pro něj navrhovaná aplikace vhodná. Tento produkt může být zahrnut v patentech USA nebo jiných zemí.

Ochranná známka

pokud není uvedeno jinak, všechny ochranné známky v tomto dokumentu jsou ochranné známky společnosti Henkel ve Spojených státech a kdekoli jinde. ® značí ochrannou známku zaregistrovanou na Úřadě obchodního vlastnictví Spojených států amerických (U.S. Patent and Trademark Office).

Reference 1.0