



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

TECHNOLOGIE LEPENÍ VE STROJÍRENSTVÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Vladimír Křížek

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Maxim Puchnin, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Křížek** Jméno: **Vladimír** Osobní číslo: **483248**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojírenství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Technologie lepení ve strojírenství

Název bakalářské práce anglicky:

The bonding technology in mechanical engineering

Pokyny pro vypracování:

- Rozbor sledované problematiky
- Experimentální ověření kvality spojů
- Vyhodnocování a diskuze výsledků

Seznam doporučené literatury:

1. PETERKA Jindřich, Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. Vydání první. Praha: SNTL, 1980, 792 s.
2. ČSN EN 15274, Konstrukční lepidla pro všeobecné použití - Požadavky a metody zkoušení. Praha: Český normalizační institut. 2008, 20 s.
3. ČSN EN 10365, Lepidla. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje. Praha: Český normalizační institut. 1992, 8 s.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

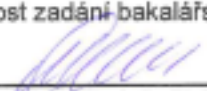
Ing. Maxim Puchnin, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

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


Datum zadání bakalářské práce: **21.04.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15.08.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2022**


Ing. Maxim Puchnin, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

27.4. 2022

Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Maxima Puchnina, Ph.D., a to pouze pomocí podkladů uvedených v seznamu použité literatury v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne:

.....

Podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce, panu Ing. Maximu Puchninovi, Ph. D., za veškerý čas, který mi věnoval a za trpělivost při vedení mé práce.

Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu během celého mého studia.

Anotace

Název diplomové práce:	TECHNOLOGIE LEPENÍ VE STROJÍRENSTVÍ
Autor práce:	Vladimír Křížek
Vedoucí práce:	Ing. Maxim Puchnin, Ph.D.
Akademický rok:	2021/2022
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	70 stránek, 18 tabulek, 54 obrázků
Klíčová slova:	Technologie lepení, předúprava povrchu, destruktivní a nedestruktivní zkoušky, epoxidová lepidla, ocel S235J2C+N

Annotation

Title of the final thesis:	The bonding technology in mechanical engineering
Author:	Vladimír Křížek
Supervisor:	Ing. Maxim Puchnin, Ph.D.
Academic year:	2021/2022
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent:	70 pages, 18 tables, 54 pictures
Keywords:	The bonding technology, pretreatment of the surface, destructive and non-destructive tests, epoxy adhesives, steel S235J2C+N

Obsah

1. Úvod	11
2. Teoretická část.....	12
2.1 Základy teorie lepení.....	12
2.1.1 Adheze a koheze	13
2.1.2 Smáčivost	14
2.2 Rozdělení lepidel.....	15
2.2.1 Chemická kompozice lepidla	16
2.2.2 Funkce lepeného spoje	22
2.2.3 Fyzikální vlastnosti lepidla.....	22
2.2.4 Technologie, materiály nebo prostředí	23
2.3 Úprava povrchu před lepením.....	23
2.4 Konstrukce lepených spojů	25
2.4.1 Namáhání spoje.....	25
2.4.2 Konstrukce lepeného spoje pro ploché adherendy.....	26
2.4.2 Příklady lepených spojů z leteckého a automobilového průmyslu.....	28
2.5 Nanášení lepidel	31
2.5.1 Ruční nanášení.....	31
2.5.2 Stříkání	34
2.5.3 Nanášení lepidla za horka	34
2.6 Kvalita lepených spojů a její kontrola	35
2.7 Zkoušky lepených spojů	35
2.7.1 Nedestruktivní zkoušky	35

2.7.2	Destruktivní zkoušky	37
	Statické	37
	Dynamické	40
2.7	Poruchy lepených spojů dle ČSN EN ISO 10365	41
3.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	43
3.1	Cíle experimentální části	43
3.2	Materiál zkušebních vzorků.....	43
3.2	Lepidlo Bison Epoxy Metal	45
3.3	Lepidlo Loctite EA 3450.....	46
3.4	Lepidlo UHU PLUS ENDFEST 2K-EPOXY.....	47
3.5	Příprava vzorků	47
3.6	Zařízení pro tahovou zkoušku	51
3.7	Zkouška pevnosti ve smyku.....	52
3.7.1	Vzorky lepené lepidlem Bison	52
3.7.2	Vzorky lepené lepidlem Loctite	56
3.7.3	Vzorky slepené lepidlem UHU.....	59
3.7.4	Vzorky se zdrsňným povrchem.....	62
4.	ZÁVĚR	64
	Bibliografie.....	66
	Seznam tabulek.....	68
	Seznam obrázků.....	69

Seznam zkratk

IPA	Isopropylalkohol
PI	Polyimid
PE	Polyethylen
PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
SF	Substrate failure (porucha substrátu)
CSF	Cohesive substrate failure (kohézní porucha substrátu)
DF	Delamination failure (delaminační porucha)
CF	Cohesive failure (kohézní porucha)
SCF	Special cohesive failure (speciální kohézní porucha)
SWCF	Special whitening cohesive failure (porucha vyvolaná odumíráním lepidla)
AF	Adhesive failure (adhézní porucha)
ACFP	Adhesive cohesive failure with peel (kombinace adhézní a kohézní poruchy s odlupem)
COR	Corosive failure (korozní porucha)

Seznam použité symboliky

Φ [°]	rovinný úhel
f [Hz]	frekvence
s [MPa]	směrodatná odchylka
n [-]	počet zkoušených vzorků
x_i [MPa]	hodnota maximálního smykového napětí i -tého vzorku
\bar{x} [MPa]	střední hodnota pro zkoušené vzorky
τ_s [MPa]	smykové napětí
F [N]	síla
S [mm ²]	plocha
a [mm]	délka

1. Úvod

Bakalářská práce se věnuje problematice týkající se technologie lepení, která se využívá prakticky ve všech průmyslových odvětvích. Lepení patří k nerozebíratelnému spojování součástí různých materiálů. Jednou z hlavních výhod lepení je rychlost procesu spojování a poměrně jednoduchá příprava lepeného spoje před samotnou technologií. K nevýhodám je možné zařadit výběr správného lepidla a velikost času potřebného k zaschnutí spoje. Úlohou technologa bude odborné rozhodnutí, jak technologie lepení bude zvolena.

S touto technologií se setkáváme stále více, obzvláště v automobilovém a leteckém průmyslu. To obzvláště z důvodů snížení celkové váhy dílů a zachování vlastností spojovaných materiálů. Dále je tato technologie výhodná při linkové výrobě, jelikož aplikace lepidla je rychlá a jednoduchá a pro jeho nanášení není potřeba vysoce kvalifikovanou osobu. Lepením můžeme spojovat různé materiály, které nemusí být stejné, což je nejspíše největší výhoda lepení.

Cílem bakalářské práce je popsání problematiky technologie lepení a v praktické části vytvoření lepeného spoje pro vybraná epoxidová lepidla s následnou zkouškou pevnosti lepeného spoje ve smyku dle ČSN EN 1465.

2. Teoretická část

2.1 Základy teorie lepení

Lepení znamená pevné spojení dvou materiálů (adherendů) prostřednictvím lepidel (adhesiv). Takto můžeme spojit stejné nebo rozdílné materiály, spoj může být trvalý nebo pomocný. Lepidlo je látka, která je v okamžiku lepení v kapalném skupenství, aby zaplnilo místa definované nerovnosti lepeného povrchu daného materiálu, poté dojde k vytvrzení lepidla a vytvoří se pevný lepený spoj viz obr. 1. [1]

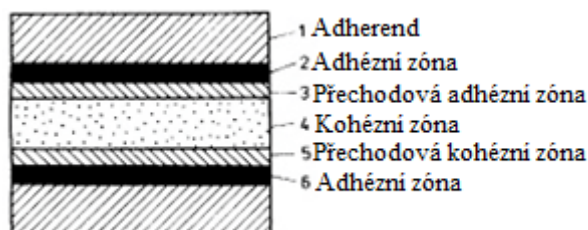
Pevnost lepeného spoje záleží hlavně na těchto fyzikálně chemických vlastnostech:

Adheze – přilnavost lepidla k lepenému povrchu

Koheze – soudržnost lepidla pro daný povrch

Smáčivost povrchu – schopnost lepidla se roztéct po povrchu

Pevnost lepeného materiálu – odolnost vůči jeho rozpojení



Obrázek 1. Struktura lepeného spoje; upraveno z [3]

Lepení nemusí být jen náhradou tradičních metod spojování, ale může doplnit technologie spojování, které jsou z hlediska procesu náročné nebo obtížné. Stejně jako každá technologie má i lepení své výhody a nevýhody.

Výhody lepení:

Možnost spojovat velmi tenké materiály

Lze spojovat stejné nebo různé materiály

Možnost spojení velkých ploch

Možnost spojení za nízké teploty

Lepný spoj zvyšuje pevnost a tlumí vibrace

Spoj nezvyšuje hmotnost

Zvýšená bezpečnost při poruše

Může sloužit jako utěšňovací spoj od vnějšího prostředí

Nevýhody lepení:

Časově náročné

Malá odolnost proti odlupování a vyšším teplotám

Nutná předúprava lepené plochy [1, 2]

2.1.1 Adheze a koheze

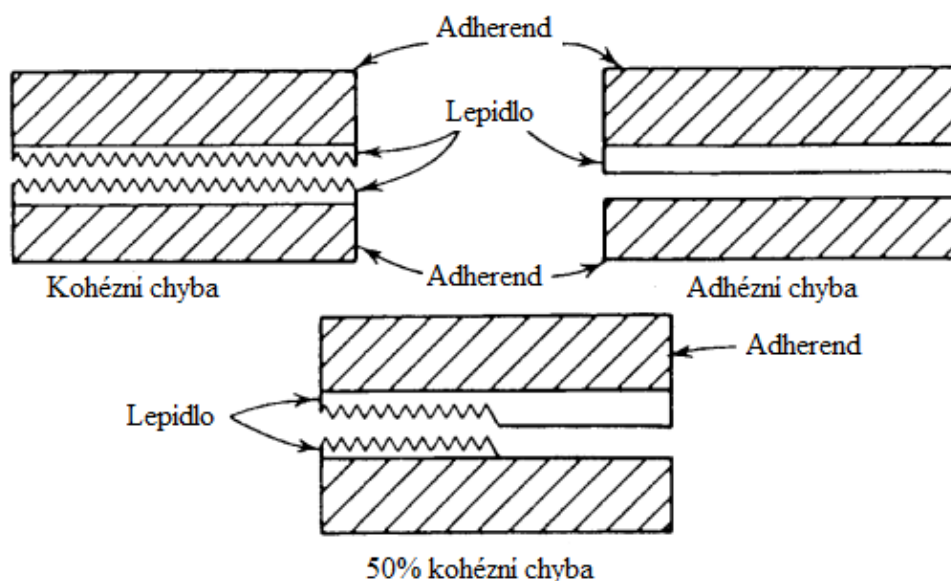
Adheze je základním předpokladem úspěšného lepení a jeho homogenity. Pokud lepidlo dostatečně pevně nepřilne k materiálu, dojde k rozlepení a porušení spoje na rozhraní lepidlo – lepený materiál viz obr. 2 – adhézní chyba. V tomto případě je koheze i vlastní pevnost materiálu vyšší jak adheze. Adhézní síly vznikají pomocí těchto vazeb mezi lepidlem a lepeným povrchem, kde lze rozlišit: mechanickou vazbu a chemickou vazbu.

Mechanická vazba se uplatňuje pouze u členitých či porézních povrchů. Lepidlo zatéká do prohlubní pórů a po vytvrzení vzniká pevný spoj, je důležité, aby lepidlo zateklo všude, pokud se tak nestane spoj není ideální. Mechanická vazba je tudíž hlavně důležitá při lepení materiálů jako jsou keramika a dřevo (nekovové povrchy), ale při lepení leštěných ploch je zanedbatelná. Chemická vazba, někdy také nazývána specifická vazba se uplatňuje u porézních, tak u hladkých povrchů. Teorie této vazby je založena na působení slabých van der Waalsových elektrických přitažlivých silách mezi molekulami lepidla a lepeného povrchu. Vazba je závislá zejména na přímém chemickém působení konkrétního lepidla na povrchu, který se spojuje. Z uvedeného je zřejmé, že se velmi dobře lepí materiály s reaktivním povrchem, např.: oxidované plasty, kovy, přírodní polymery (dřevo, celulóza, papír).

Koheze je soudržnost hmoty lepidla. Pokud je adheze a pevnost materiálu vyšší než koheze, dojde k roztrhnutí spoje ve vrstvě lepidla viz obr. 2 – kohézní chyba.

Pokud dojde k nějaké chybě v procesu lepení, zobrazí se to ve snížení pevnosti lepeného spoje.

[2]



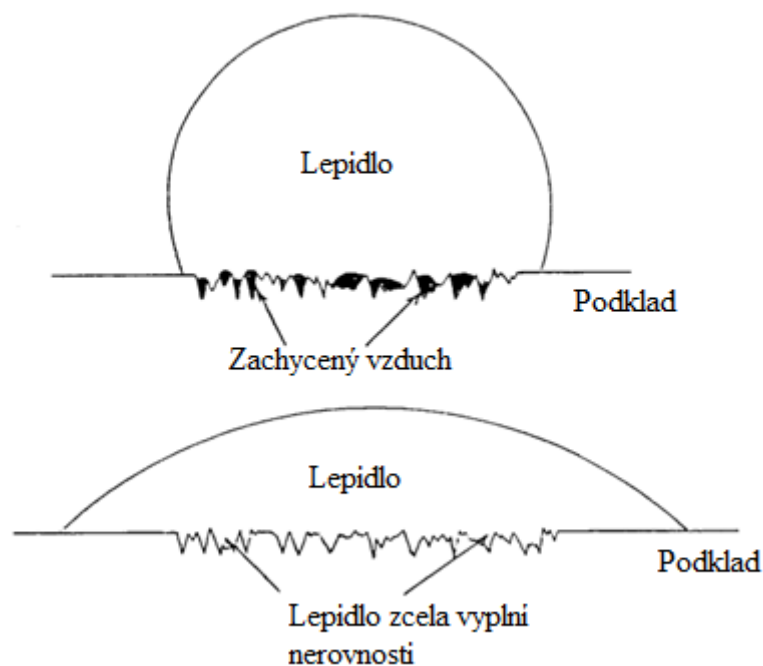
Obrázek 2. Příklady kohézniých a adhezních chyb spoje; upraveno z [4]

2.1.2 Smáčivost

Velmi důležitou vlastností je také smáčivost lepeného povrchu. Smáčivost souvisí s polaritou lepeného povrchu a napětím lepidla s povrchem. Pokud se lepidlo nerozprostře rovnoměrně po celém povrchu nevzniká adhezní vazba. Smáčení se také snižuje znečištěním nebo porušením povrchu viz obr. 3.

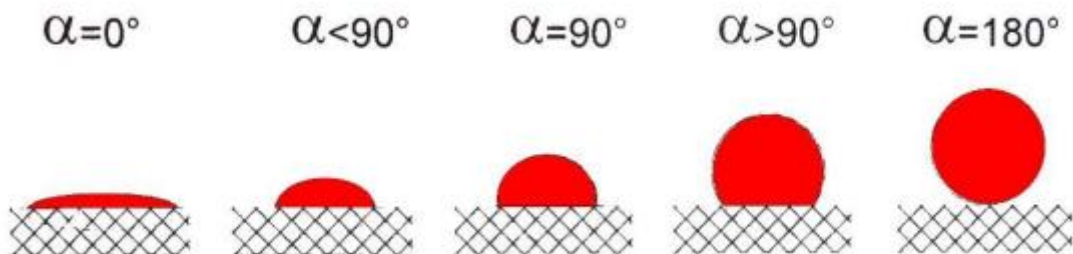
Protože lepidla mají velké množství reakce schopných chemických skupin, jsou molekuly lepidla jednostranně elektricky orientovány, tzn. že jsou polární. Díky tomu u dobře smáčivých povrchů dochází k přitažlivosti, kterou lze přirovnat k magnetické vlastnosti podobné jako u severního a jižního pólu magnetů. Polární povrchy mají například sklo, dřevo, papír. Nepochární povrchy mají plasty či syntetické textilie.

Polarita povrchu je příčinou povrchové energie, vyjadřuje se veličinou povrchové napětí. Čím vyšší je hodnota povrchového napětí, tím je povrch či kapalina polárnější. Je-li povrchové napětí kapaliny nižší než pevného povrchu, dojde k její rozlití. Je-li naopak povrchové napětí kapaliny vyšší, na povrchu se drží kapalina jako kulička viz obr. 4. Aby adheze byla silná, musí dojít ke smáčení.



Obrázek 3. Příkladů špatné (horní) a dobré (spodní) smáčivosti; upraveno z [4]

Pro umožnění lepení nepolárních plastů je nutné povrch upravit tak, aby se stal polárnějším. Proto se některé plasty oxidují, a to je možné ošlehnutím plamenem, působením kyselin, nebo zkorodováním elektrickým jiskrovým výbojem. [2]



Obrázek 4. Smáčivost podle úhlu smáčení [6]

Pevnost lepeného spoje

Je ideální navrhovat lepidlo pro lepení nesoudržných materiálů, jelikož skoro každé lepidlo má pak větší kohezi než lepený materiál. A při roztržení se poruší materiál a ne lepený spoj. [2]

2.2 Rozdělení lepidel

Rozdělení lepidel je složitý problém, který lze řešit z různých hledisek. Díky možnosti výroby lepidla „na zakázku“ je velké množství aspektů pro výběr správného lepidla, výběr se tedy stává velmi složitým procesem. Lepidla můžeme rozdělit například podle jejich chemické

kompozice, toto rozdělení však neřeší, v jakém skupenství lepidla jsou, dalším rozdělením tedy může být podle jejich fyzikálních vlastností. Díky těmto a dalším možným rozdělením dochází k překrývání kategorií. Například ne všechna tekutá lepidla budou mít stejnou chemickou bázi, ne všechna reaktoplastická lepidla musí být tekutá. [7]

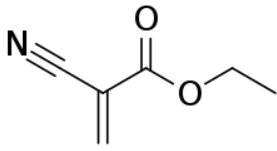
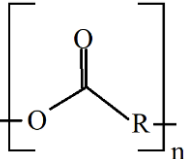
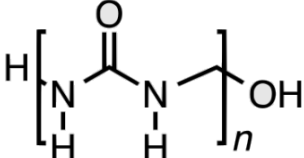
2.2.1 Chemická kompozice lepidla

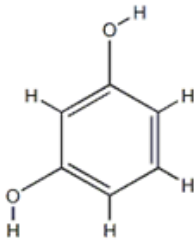
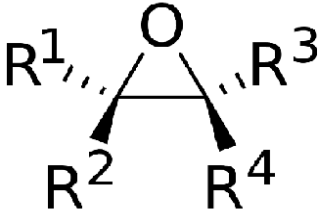
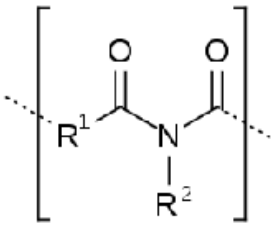
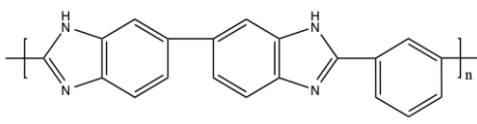
Nejširší forma rozdělení lepidel je podle jejich chemické kompozice označené jako reaktoplasty, termoplasty, elastomery nebo jejich směsi. [4]

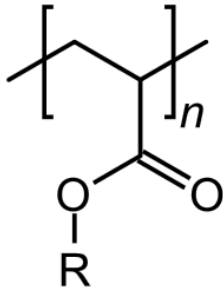
Reaktoplastická lepidla

Tyto materiály není možné, potom co u nich dojde k zesíťování, znovu roztavit. Lepidla však při vyšších teplotách degradují. K zesíťování dochází nejčastěji chemickou reakcí. Používají se u většiny konstrukčních spojů díky jejich vysoké pevnosti, jsou však málo houževnaté Tab.1. [4, 7]

Tabulka 1. Nejčastěji používané reaktoplastická lepidla [9]

Název	Definující část vzorce	Vlastnosti	Využití
Kyanoakryláty		-tvoří pevné spoje mezi mnoha materiály, hlavně mezi plastovými nebo gumovými	-díky jejich rychlému vytvrzování se často prodávají jako vteřinová lepidla
Polyestery		-mají vysokou chemickou a teplotní odolnost	-často se používají k lepení polyesterových substrátů
Močovina-formaldehydy		-nejsou určena pro venkovní použití, nebo pro vysoké teploty -vytvrzují se při teplotách 0 °C až 20 °C, obvykle pod tlakem 0,35 až 0,7 MPa	-nejčastěji se používá v překližce

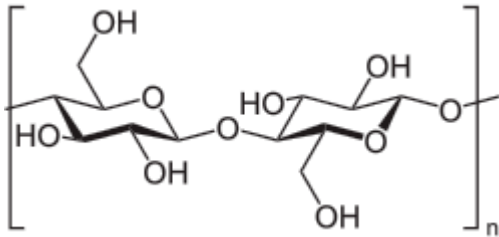
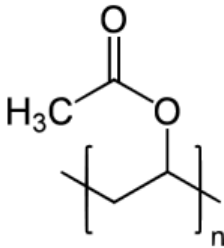
Název	Definující část vzorce	Vlastnosti	Využití
Resorcinol-formaldehydy		-dobře odolávají vodě (i vařící), oleji a dalším mazivům	-skvělé pro vnější použití na dřevo, překližku, plasty, papír
Epoxidová pryskyřice		-z reaktoplastů asi nejpoužívanější jako lepidla, je jich velké množství a mohou být jak tekuté, tak tuhé -mají skvělou kohezi a tvoří pevné spoje s většinou materiálů -mají nízkou pevnost v odlupu	-lepí se s nimi mosaz, hliník, ocel a většina ostatních kovů
Polyimidy (PI)		-odolávají teplotám -196 °C až 260 °C (musí se vytvrzovat při vyšší teplotě než provozní) -vysoká hydrolytická stabilita a odolnost vůči organickým rozpouštědlům	-aplikují se pro své vlastnosti v leteckém průmyslu -často se s nimi lepí titan nebo uhlík
Polybenzimidazoly		-jsou stabilní do 288 °C na krátkou chvíli, pro delší vystavení vysokým teplotám jsou lepší PI -citlivé na vlhkost	-lepí se s nimi titan, nerezová ocel, beryllium -lepí se s nimi voština nadzvukových letadel a raket

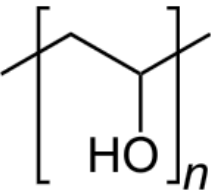
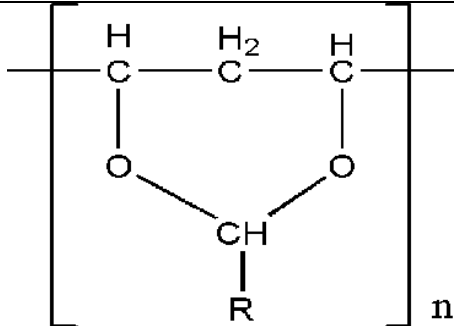
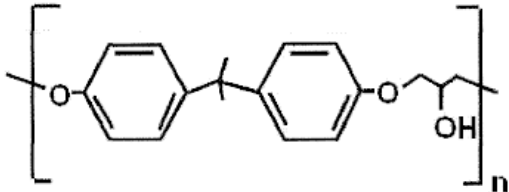
Název	Definující část vzorce	Vlastnosti	Využití
Akrylická lepidla		<ul style="list-style-type: none"> -tolerují mastné povrchy -vysoká pevnost při odlupování -dobrá odolnost vůči okolnímu prostředí 	<ul style="list-style-type: none"> -často se s nimi lepí tkanina, kůže a plasty -nejčastějšími používanými monomery jsou: ethylakrylát, methylakrylát, kyselina methakrylová, kyselina akrylová, akrylamid, akrylonitril

Termoplastická lepidla

Aplikují se po roztavení, které lze opakovat víckrát. Používají se hlavně pro spojení nekovových materiálů Tab.2. Termoplastická pryskyřice může být rozpuštěna ve vodě jako latex nebo emulze, toto jsou lepidla na dřevo, která se nejčastěji vyskytují v domácnostech. [4, 7]

Tabulka 2. Nejčastěji používaná termoplastická lepidla [9]

Název	Definující část vzorce	Vlastnosti	Využití
Estery celulózy		<ul style="list-style-type: none"> -butyrát acetátu celulózy a acetát celulózy-odolný vůči teplotě -nytrát celulózy-voděodolný a hořlavý 	<ul style="list-style-type: none"> -lepí se s nimi kůže, papír a dřevo a někdy sklo
Polyvinylacetáty		<ul style="list-style-type: none"> -nízká cena -vydrží teploty jen do 50 °C -nízká odolnost vůči rozpouštědlům 	<ul style="list-style-type: none"> -vyskytují se jako domácí bílá lepidla (Herkules) -lepí se s nimi izolační tkanina na potrubí v parních a elektrárnách

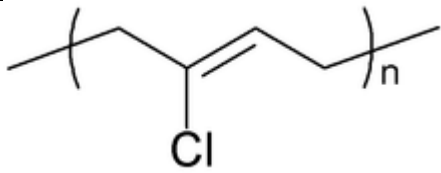
Název	Definující část vzorce	Vlastnosti	Využití
Polyvinylalkoholy		-neodolává vodě, dobře odolává oleji a plísni	-lepí se s nimi korek, kůže a papír
Polyvinylacetal		-vznikají reakcí aldehydu a polyvinylalkoholu	-jsou flexibilní, tudíž se přidávají do ostatních lepidel pro zvýšení odolnosti proti odlupu
Fenoxy		-vydrží dobře počasí a biodegeneraci -odolávají anorganickým kyselinám, alkoholům a alkalickým látkám -vytvrzují se při teplotách 200-305 °C a tlaku až 0,17 MPa	-konstrukční lepidla pro kovy -slepování více vrstev kovů, dřeva nebo plastu -spojování potrubí

Elastomerická lepidla

Elastomerická lepidla v Tab.3, mají jedinečné reologické vlastnosti, proto mají vlastní kategorii. Mohou být jak reaktoplasty tak termoplasty. Jedná se o velmi houževnatá lepidla, nejčastěji se používají pro jejich vysokou flexibilitu a odolnost vůči odlupování. Nevydrží však velkou zátěž ve spoji. Tento druh lepidel se hlavně využívá v tekuté formě. [7]

Tabulka 3. Nejčastěji používané elastomerická lepidla [9]

Název	Definující část vzorce	Vlastnosti	Využití
Přírodní kaučuk	$\left[\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C} \quad \quad \text{CH}_2 \\ \quad \quad \quad \diagdown \quad \diagup \\ \quad \quad \quad \text{C} = \text{C} \\ \quad \quad \quad \diagup \quad \diagdown \\ \text{CH}_2 \quad \quad \quad \text{H} \end{array} \right]_n$	-voděodolný, velmi pružný -křehne stářím	-lepí se s ním hlavně dřevo, tkanina, papír, guma
Butylkaučuk	$\begin{array}{ccccccc} & \text{CH}_3 & & \text{CH}_3 & & \text{CH}_3 & \\ & & & & & & \\ \text{CH}_3 - & \text{C} & - \text{CH}_2 - & \text{C} & - \text{CH}_2 - & \text{C} & \sim \\ & & & & & & \\ & \text{CH}_3 & & \text{CH}_3 & & \text{CH}_3 & \end{array}$	-skvěle stárne -dobrá odolnost proti vodě a chemikáliím, špatná proti olejům	-lepí se s ním kovy (po použití primeru) a guma
Polyisbutylen	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 - \text{C} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	-dobře stárne, nízká teplotní odolnost	-používá se v ostatních lepidlech pro zlepšení flexibility a zvýšení adheze
Nitrilkaučuk	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{CH} - \text{CH}_2 \\ \\ \text{CN} \end{array} \right]_m$	-nejuniverzálnější gumové lepidlo -špatně se s ním však lepí gumové adherendy	-lepí se s ním hlavně vinylové plasty
Styren-butadienový kaučuk	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH} = \text{CH} - \text{CH}_2 \right]_n \left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{HC} \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right]_m$	-špatná pevnostní charakteristika -používá se při teplotách od -40 °C do 71 °C	-ideální pro lepení tkaniny a dřeva
Polyuretan	$\left[\begin{array}{ccccccc} \text{O} & & \text{H} & & \text{O} & & \text{H} \quad \text{H} \\ & & & & & & \quad \\ \text{C} - \text{N} & - \text{C}_6\text{H}_4 - & \text{C} & - \text{C}_6\text{H}_4 - & \text{N} - \text{C} - \text{O} - & \text{C} - \text{C} - \text{O} \\ & & & & & & \quad \\ \text{H} & & \text{H} & & \text{H} & & \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right]_n$	-skvělá pevnost při namáhání smykem od -240 °C do 93 °C	-dobrý pro lepení kovů, guma a plastů

Název	Definující část vzorce	Vlastnosti	Využití
Chloropren		<ul style="list-style-type: none"> -dobře vyplňuje mezery -pro konstrukční použití se mísí s fenolickou pryskyřicí 	<ul style="list-style-type: none"> -nejrozsáhlejší lepidlo používané pro spojování hliníku

Polymerní směsi lepidel

Vznikají smícháním reaktoplastů, termoplastů nebo elastomerů do jediného lepidla. Díky tomu lze využít jejich užitečné vlastnosti. Například smícháním pevného reaktoplastu a houževnatého elastomeru se zvýší odolnost proti odlupování a přitom je zachována dobrá pevnost spoje. Jsou dražší, ale vzhledem k tomu, že se používají pro náročné spoje, často cena nehraje žádnou roli. Jejich výhodou je použití ve všech skupenstvích viz Tab.4. [4]

Tabulka 4. Nejčastěji používané polymerní směsi lepidel [9]

Název	Vlastnosti	Využití
Epoxid-fenolické	<ul style="list-style-type: none"> -jsou navrženy pro teploty -60 °C až 260 °C -odolnost proti rázu a odlupování je nízká 	<ul style="list-style-type: none"> -používají se často v armádě -často se s nimi lepí měď
Epoxid-polysulfidy	<ul style="list-style-type: none"> -dobrá odolnost při odlupu a odolné vůči nízkým teplotám 	<ul style="list-style-type: none"> -jsou vhodné na lepení betonu, keramiky a skla
Nitril-fenolické	<ul style="list-style-type: none"> -velmi pevné spoje až do teploty 121 °C -nízká cena -vytvrzování při vysokém tlaku až 1,38 MPa 	<ul style="list-style-type: none"> -často se používají v lepicích pásce -používají se hodně v leteckém průmyslu
Neopren-fenolické	<ul style="list-style-type: none"> -vysoká rázová a únavová odolnost 	<ul style="list-style-type: none"> -používají se na kovy, plasty, keramiku a sklo
Vinyl-fenolické	<ul style="list-style-type: none"> -dobrá voděodolnost -pracovní teplota je -60 °C až 100 °C 	<ul style="list-style-type: none"> -využití jako lepicích folií

Název	Vlastnosti	Využití
Nylon-epoxydy	-pevnost v tahu až 48 MPa -odolnost odlupu 26 265 N/m -křehkost nastává až při teplotě -240 °C	-nejlepší konstrukční lepicí pásky

2.2.2 Funkce lepeného spoje

Tato klasifikace rozděluje lepidla na konstrukční a nekonstrukční. Konstrukční lepidla se používají na spoje, kde dokonce dochází k velkým napětím, proto musí lepidlo mít funkci nerozebíratelného spojení bez deformace lepeného materiálu nebo vzniku poruchy ve spoji. Naopak u nekonstrukčních lepidel není požadováno od spoje velké zatížení. Používají se například pro přichycení konstrukčních prvků spolu, než se použije jiný typ spojovací technologie. Často jsou tyto nekonstrukční lepidla také používány jako tmely na vyplnění mezer a trhlin. [4]

2.2.3 Fyzikální vlastnosti lepidla

Lepidla lze následně dělit i podle formy, v jaké jsou dostupné, jako tekuté, práškové, pastové apod. Jejich forma většinou rozhoduje o tom, jakou technologií se budou aplikovat. [7]

Tekuté lepidla

Nejčastěji se aplikují válečkem, štětcem nebo sprejem. Jejich výhodou je dosažení velmi tenkého nátěru. Můžeme sem zařadit reaktivní monomery, reaktivní prepolymery, roztoková lepidla a disperzní lepidla. [7]

Plastická lepidla

Patří sem tmely, kaučukové patche, pasty apod. Pro natírání se mohou používat vytlačovací pistole. Využíváme je nejčastěji pro vyplňování mezer mezi konstrukčními prvky. [8]

Prášková a granulová lepidla

Nelze je použít v tuhé formě, musí být ohřáty na potřebnou teplotu, která umožní rozetření lepidla rovnoměrně na povrchu lepeného materiálu. [7]

Pásky a fólie

Lepidla jsou nanášena na vrstvě papíru, nylonu, látky, které se tak stávají součástí lepeného spoje a pomáhají v distribuci napěťových stavů. V daném případě už není potřeba přesně určovat tloušťku vrstvy, jelikož je vrstva předem daná. Tyto lepidla se nevyužívají pro

vyplňování prostoru, ale jsou ideální pro lepení velkých ploch. Často se používají v leteckém průmyslu, například při lepení hliníkové voštiny na plechy reaktoplastovou folií. [4]

2.2.4 Technologie, materiály a prostředí

Technologie nanesení lepidla je určující pro členění jednotlivých aplikací. Podle viskozity lepidla se volí následný proces jeho nanesení buď formou nátěru nebo sprejem. Pasty se nanáší pneumatickým natíracím zařízením, stříkačkou nebo vytlačovací pistolí.

Rozdělení může být i podle materiálu, který se bude spojovat lepením: kovy, plasty, keramika a sklo, dřevo.

Také bude záležet na prostředí, kde se lepený spoj nachází, aby mohlo být navrženo optimální lepidlo. Může se jednat o prostředí kyselé, zásadité, atmosférické, s vysokou nebo nízkou teplotou apod. [4, 7]

2.3 Úprava povrchu před lepením

Rozdíl v pevnosti spoje, se zobrazí mezi povrchem bez úpravy a povrchem s vhodně zvolenou úpravou může být až 90 % pevnosti spoje ve smyku. Nevhodná povrchová úprava může znehodnotit lepený spoj, proto je správná příprava nutná pro dosažení optimálního povrchu. Příprava materiálů na lepení se skládá z dělení, obrábění, čištění, odmašťování a lícování lepených dílců. Důvody úpravy jsou: odstranění a prevence vytvoření slabé vrstvy na substrátu, maximalizace interakce molekul lepidla a adherendu, optimalizace adheze, vytvořit mikrostrukturu na povrchu. [1, 9]

Čištění a odmašťování

Před lepením se dá povrchová úprava zjednodušeně rozdělit do dvou stupňů, čištění a odmašťování a vlastní úpravy povrchu adherendu. V některých případech není třeba povrch před lepením upravovat, avšak čištění a odmašťování je pro lepení nutné. Odmašťuje se většinou celý díl, nejen lepené plochy, aby se při manipulaci s konstrukčními prvky mastnota nedostala do lepeného spoje, čím by se následně snížila jeho pevnost. Na čištění a odmašťování se používají hlavně: alkalická odmašťovadla, tamponování rozpouštědly, odmašťování v parách rozpouštědla.

Alkalické odmašťovací lázně obsahují obvykle alkalické soli a mýdla, detergent a povrchově aktivní látky. Lázeň ponorem trvá většinou 5 až 15 minut. Všechny materiály se následně musí důkladně opláchnout, a to buď osprchováním, nebo ponorem. Pokud použité inhibitory zůstanou na povrchu adherendu může dojít ke zhoršení přilnavosti lepidla.

Odmašťování rozpouštědly lze dělat v parách rozpouštědla, nebo tamponováním. Většinou se dává přednost parám před tamponováním, aby nedocházelo k nekvalitnímu odstranění mastnoty, protože by její zbytky zůstaly nepravidelně rozprostřeny na povrchu. [1]

Mechanické úpravy povrchu

Mechanická úprava povrchu je důležitá u znečištěného povrchu, kde tato vrstva nejde odstranit odmaštěním. Musíme tedy povrch brousit, smirkovat, pilovat, otryskávat, nebo okartáčovat drátěným kartáčem. Díky daným úpravám také zvýšíme drsnost povrchu, která je vhodná pro lepení. Vzhledem k tomu, že může dojít k zatlačení cizích částic do materiálu, doporučuje se tato úprava hlavně u nekovů. Otryskávání je nejčastější metodou mechanické úpravy povrchu hlavně tehdy, když se díly nedají mořit Tab. 5. [6]

Tabulka 5. Příklady rozdílného použití povrchové úpravy kovových materiálů [5]

Materiál	Odmašťovadlo	Povrchová úprava materiálů před lepením	Vlastní lepení po povrchové úpravě materiálu do oxidace materiálu
Hliník a jeho slitiny	aceton, IPA (isopropylalkohol), MEK (odmašťovadlo na bázi acetonu a isopropylalkoholu)	Broušení smirkem zrnitosti 320–400 anebo pískování oxidem hlinitým anebo chemické moření (vysoká pevnost).	do 1 hod.
Litina	MEK, aceton, IPA	Broušení smirkem zrnitosti 220–320, úhlová bruska anebo pískování.	do 15 min
Měď	MEK, aceton, IPA	Broušení smirkem zrnitosti 400.	do 15 min
Konstrukční a nerezové oceli	MEK, aceton, IPA	Broušení smirkem zrnitosti 320–400 anebo pískování.	ocel do 1 hod, nerez do 6 hod.
Titan	MEK, aceton, IPA	Broušení smirkem zrnitosti 320–400 anebo pískování.	do 15 min.
Hořčík	MEK, aceton, IPA	Broušení smirkem zrnitosti 320–400.	do 15 min.
Mosaz	MEK, aceton, IPA	Jemným pilníkem zdrsnit povrch.	do 15 min.
Zinek	MEK, aceton, IPA	Broušení smirkem zrnitosti 400.	-
Cín	MEK, aceton, IPA	Broušení smirkem zrnitosti 400.	do 15 min.
Pochromované kovy	MEK, aceton, IPA	Broušení smirkem zrnitosti 400.	-

Materiál	Odmašťovadlo	Povrchová úprava materiálů před lepením	Vlastní lepení po povrchové úpravě materiálu do oxidace materiálu
Poniklované kovy	MEK, aceton, IPA	Vrstvu niklu mechanicky anebo chemicky odstranit	-

Chemická úprava

Odmašťování a následná mechanická úprava povrchu jsou převážně dostatečné pro většinu lepených spojů. Pokud se jedná o dosažení maximální pevnosti a odolnosti na prostředí je chemická nebo elektrolytická předúprava nutná. Při této úpravě je třeba brát zřetel na dobu úpravy, aby nedošlo k vytvoření příliš tenké nebo tlusté vrstvy. [9]

2.4 Konstrukce lepených spojů

Konstrukci je třeba rozdělit na co nejjednodušší části vhodné k lepení. Tudiž se lepení nehodí pro díly, které jsou při montáži vystaveny namáhání, které způsobuje odlupování lepidel. Lepidlo se vybírá podle potřebné pevnosti spoje. Spoje by měly být navrhovány přímo pro technologii lepení, a ne pro jinou metodu spojování, aby následně nedocházelo ke katastrofálním haváriím. Ideální spoj je vytvořený tak, aby v něm při zatížení působila napjatost ve směru, kde je spoj nejvíc odolný. [3]

2.4.1 Namáhání spoje

Při návrhu lepených konstrukcí primárně musíme počítat s těmito druhy namáhání lepených spojů: tlak, tah, smyk, odlupování, štěp viz obr. 5. V praxi většinou dochází k jejich kombinaci.

Tah a tlak

Lepený spoj odolává tlaku nejlépe v porovnání s dalším namáháním, i když může dojít k jeho selhání většinou na krajích lepené plochy.

Smyk

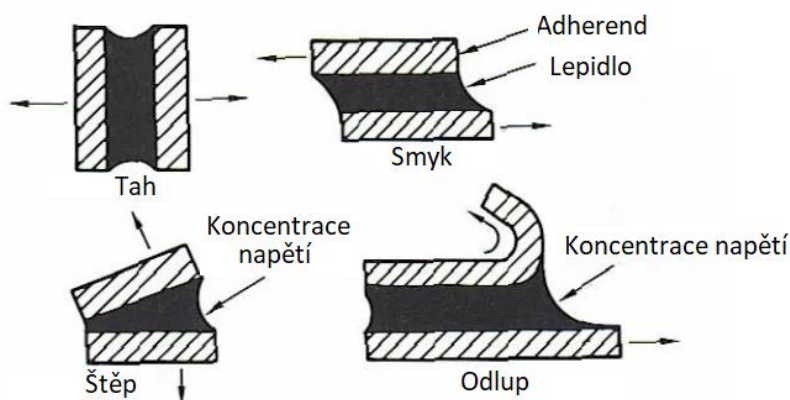
Obvykle se neobjevuje čistý smyk, často je spoj namáhán i v kombinaci s tahem a odlupem. Snažíme se navrhnout spoj tak, aby nedocházelo ke kombinovanému namáhání.

Odlupování

V případě, že je spoj vystavený namáhání, které způsobuje odlupování, je třeba počítat s tím, že takový lepený spoj je vystavený kritickému zatížení, kterému je zapotřebí se vyhnout. Je nutné, aby aspoň jeden nebo oba adherendy byly flexibilní. Pokud zvýšíme houževnatost lepidla zvýšíme tak i odolnost spoje na odlup.

Štěpení

Abychom se poruše způsobené tímto namáháním vyhnuli, je třeba volit velkou lepenou plochu a počítat s větší ekonomickou náročností. [7]

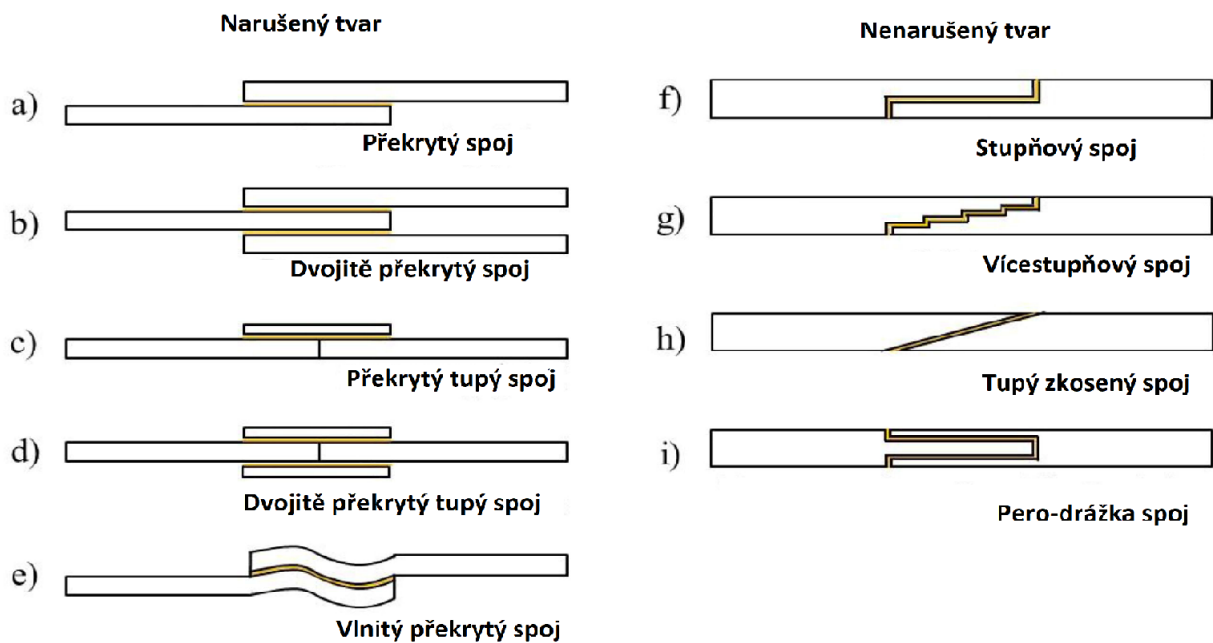


Obrázek 5. Typy namáhání lepených spojů; upraveno z [4]

2.4.2 Konstrukce lepeného spoje pro ploché adherendy

Spoj tupý

Jedná se o nejjednodušší typ spoje, který je však velmi náchylný na ohyb. Při velkém ohybu dochází ke štěpu. Aby se zvýšila jeho odolnost proti porušení, je potřeba ho přeplátovat, nebo přidat pero a drážku, jak znázorňuje obr. 6.

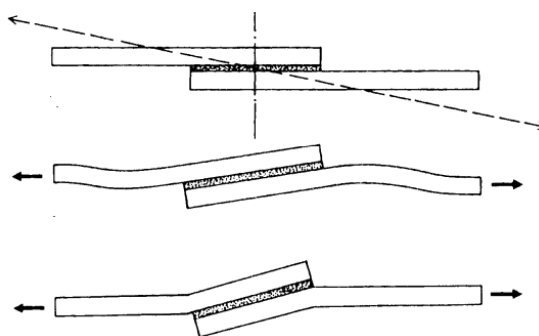


Obrázek 6. Příklady konstrukčního provedení spojů; upraveno z [11]

Z uvedeného je patrné, že je nejvýhodnější spoj s jednoduchou geometrií lepicí plochy.

Překrývaný spoj

Tento typ spoje patří k nejrozšířenějším lepeným spojům, protože se snadno vyrábí. Je zde nebezpečí, že může docházet k ohybu materiálu a vzniku kombinovaného namáhání smykového plus může dojít k odlupování jako na obr. 7.



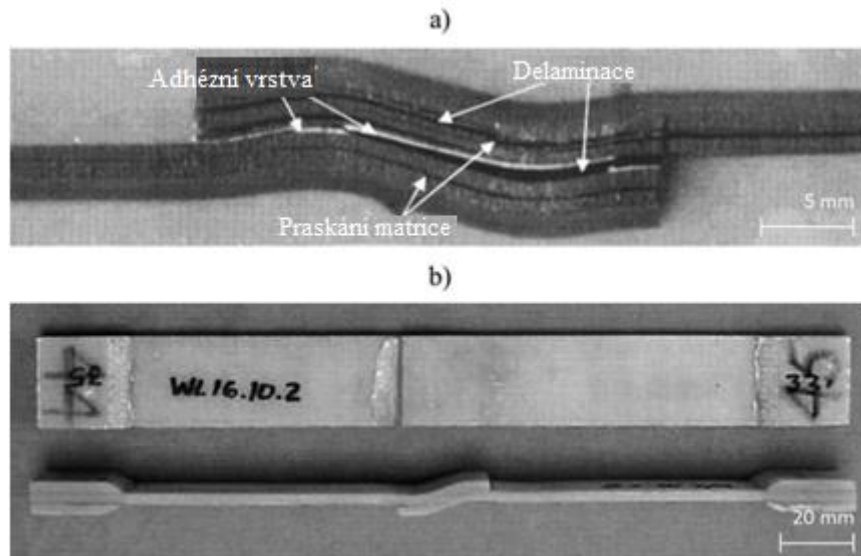
Obrázek 7. Deformace způsobené zatížením; upraveno z [4]

Aby k těmto deformacím nedocházelo musíme změnit konstrukci spoje, např. zúžit okraje adherendu. [4]

Vlnitý překrývaný spoj

Snaha stále zdokonalovat i tyto jednoduché spoje vedla k vytvoření vlnitého spoje na obr. 8. Tímto spojem prochází smykové zatížení rovnoměrněji než u jiných. Maximální zátěž tohoto

spoje vzrostla až o 41 % oproti jednoduchému překrývanému spoji. Vzhledem k tomu, že tento tvar má nedokonalosti, není vhodný pro letectví, jelikož není zcela aerodynamický. [11]



Obrázek 8. Vlnitý překrývaný spoj; upraveno z [11]

Šikmé a stupňovité spoje

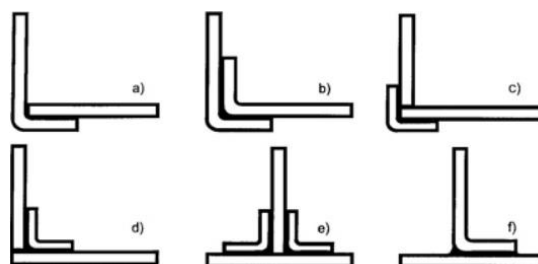
V daném případě není přidána žádná nežádoucí váha, obě části jsou v jedné linii. Šikmý spoj dobře distribuuje napětí, avšak více stupňový spoj odolává lépe poškození. [11]

Pero-drážka spoje

Jsou dobrou alternativou oproti tradičnímu překrytému spoji. Vyskytují se však problémy při jeho výrobě. [11]

Koutové spoje

Dalším příkladem jednoduchých lepených spojů jsou koutové spoje na obr. 9. Lepená plocha by měla být co největší, tupé spoje i zde hůř snáší větší zatížení oproti L a T spojům. [4]

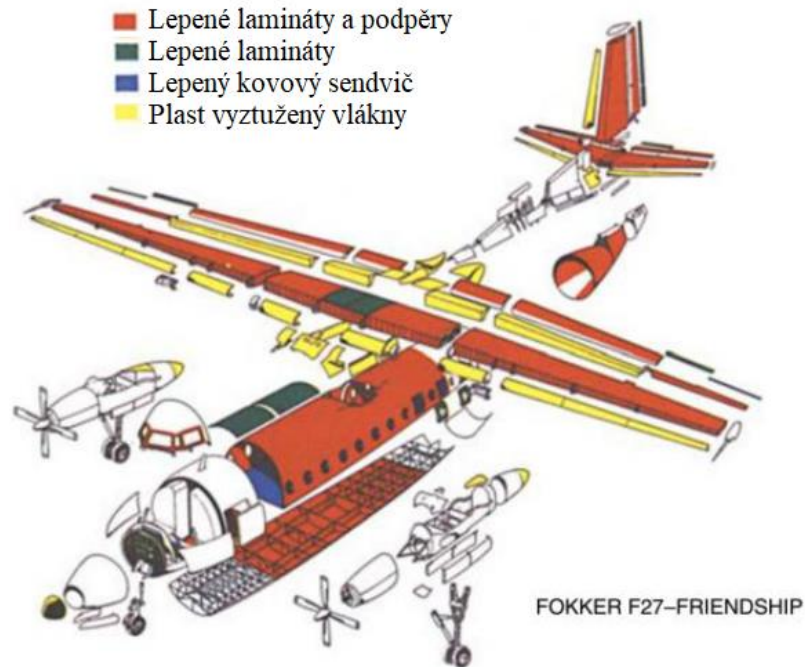


Obrázek 9. Příklady konstrukčního provedení koutových spojů [5]

2.4.2 Příklady lepených spojů z leteckého a automobilového průmyslu

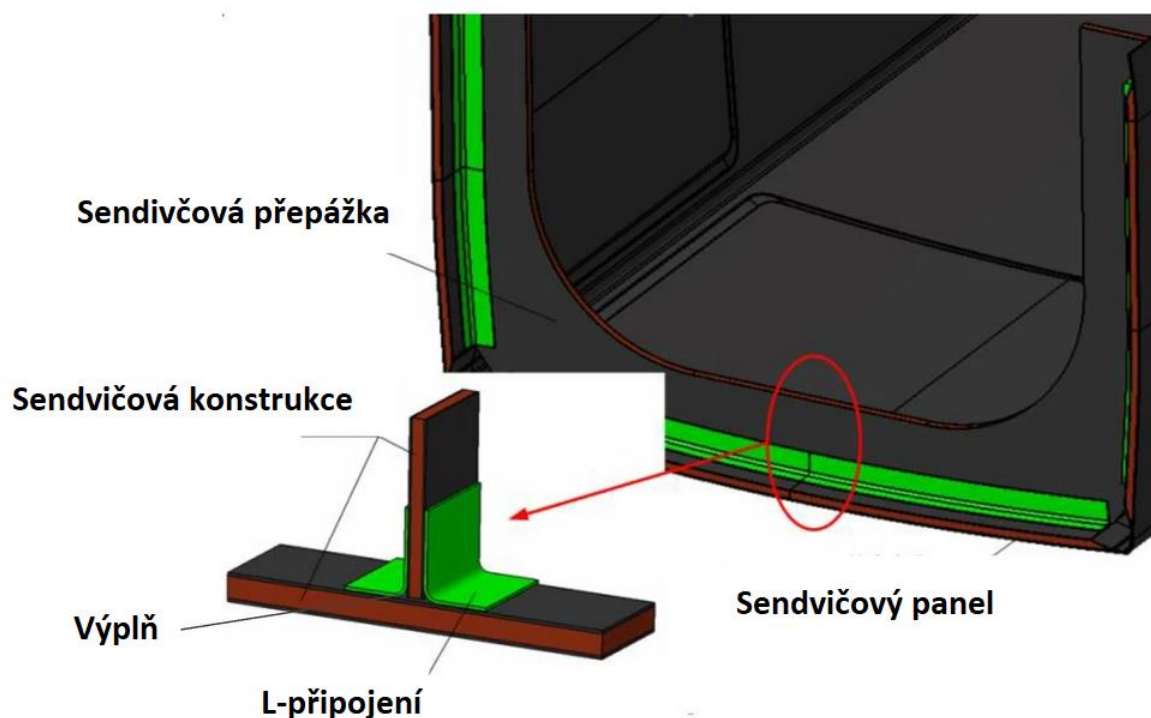
Jednou z nejrychleji rostoucích uplatnění lepidel je v leteckém průmyslu. Z důvodu poruch materiálu kolem nýtů a šroubů vyvolaných únavovým zatížením při letu, se jeví lepení jako

vhodnější. Na příklad lepené části na letadle Fokker F27-Freindship, které bylo uvedeno na trh v 50. letech 20. století a je stále ve službě (viz obr. 10), uvádí velké množství lepených spojů. [9]



Obrázek 10. Mnoho letadlových částí je lepeno vysoce výkonnými lepidly [10]

Sendvičové konstrukce T-spojů se používají v leteckém průmyslu stále více, hlavně z důvodu potřeby snížení váhy viz obr. 11. Tyto konstrukce jsou však náchylné na poškození soustředěným zatížením. Snižováním váhy a potřebou splnit požadavky na pevnost se stále posouvá optimalizace daných spojů. [12]

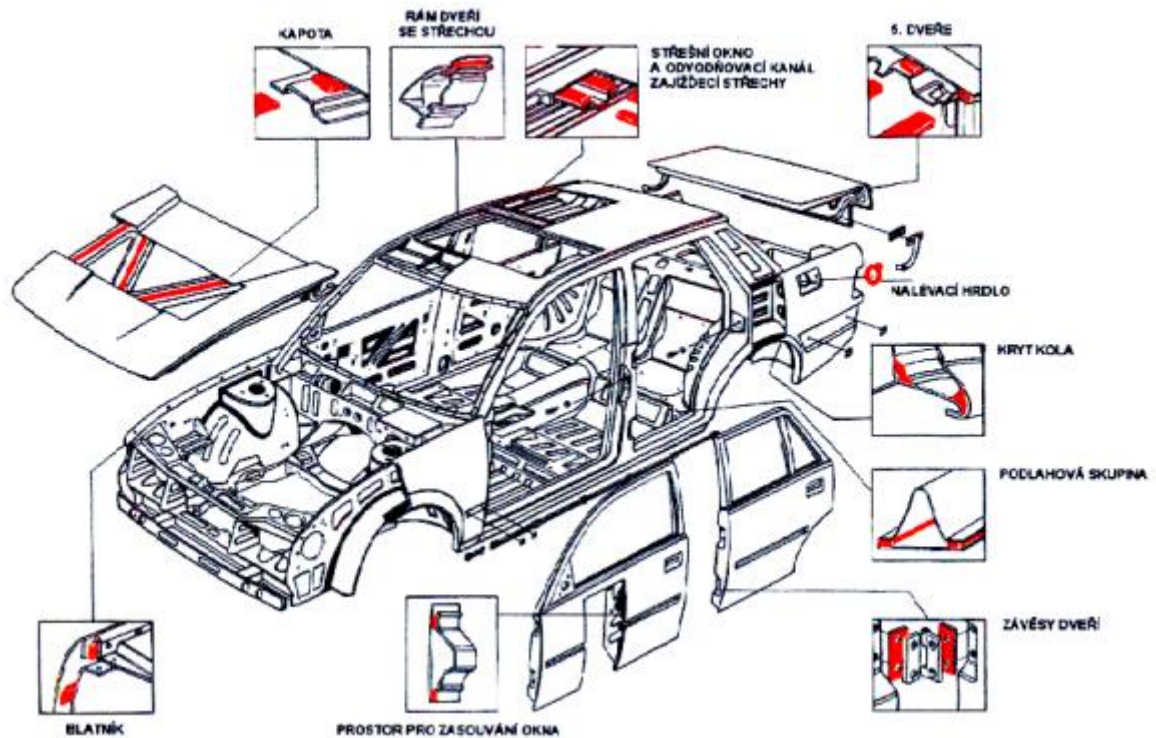


Obrázek 11. Konstrukční tvar typického sendvičového T-spoje letadla s voštinovým jádrem; upraveno z [12]

Další rychle rostoucí průmysl s uplatněním lepených spojů je průmysl automobilový. Na nových automobilech se může nacházet až 25 kg lepidla a tmelu. Obdobně jako u letadel se i zde používá technologie lepení, z důvodů snížení váhy a odstranění vad materiálu způsobených svařováním, nebo jiné spojovací technologie viz Obr, 12, Tab. 6. [14]

Tabulka 6. Báze lepidel, charakter lepeného spoje, aplikace [14]

Druh lepeného spoje	Příklady	Používaná lepidla	Požadované vlastnosti lepeného spoje
drážkové přírubové lepení	kapota	např. epoxidové pryskyřice	pevnost, tuhost, chování při nárazu, ochrana před štěrbinovou korozí
výztuhové lepení	dveře, kapota	např. polyuretany, PVC, synt. kaučuky	neohebnost torze, nesmí se deformovat vzhledový díl
lepení nosné struktury	sloupky, profily, přírubové švy	epoxidová pryskyřice	pevnost, tuhost, chování při nárazu
těsné lepení	hrdlo nádrže, utěsnění švu	např. syntetické kaučuky, PVC	těsnost, odolnost vůči korozi
přímé zasklívání	přední, zadní a pevné boční tabule	např. polyuretany	tuhost karoserie, těsnost nepropustnost



Obrázek 12. Použití lepidel ve stavbě karoserie [14]

2.5 Nanášení lepidel

Podmínkou je vytvoření dostatečně tlusté lepicí vrstvy potřebné pro dosažení dobrého spoje. Obvykle je to vrstva o souvislé tloušťce, bodový nános je méně častý. [8]

2.5.1 Ruční nanášení

Mohou se používat následující prostředky:

Štětce

Jednoduchá metoda, která vyžaduje, aby lepidlo bylo tekuté. Štětec by měl být s jemným tužším vlasem, aby se dala nanést tenká vrstva. Výhodou je možnost používat štětce na malých plochách a různých tvarech konstrukce, protože vlas zatlačí lepidlo do všech záhybů lepeného povrchu. Nevýhody jsou možné nerovnoměrnosti v tloušťce nátěru a nutnost často čistit štětec. Štětec nemusí být pouze v lidských rukách, ale může být například uchycen na kolaborativní robotu, jako na obr. 13. [8]

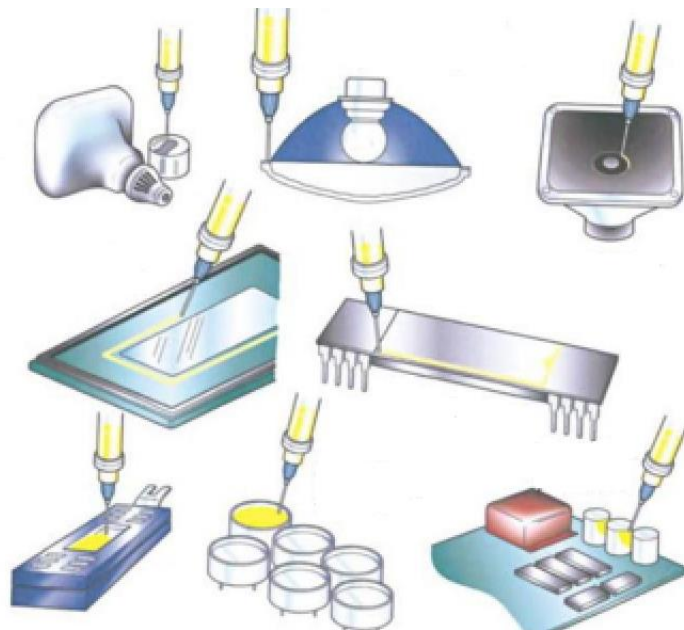


Obrázek 13. Štětec upevněný na robotovi [13]

Z uvedeného příkladu vyplývá, že lepicí proces může být časově krácený.

Stříkačka a jehla

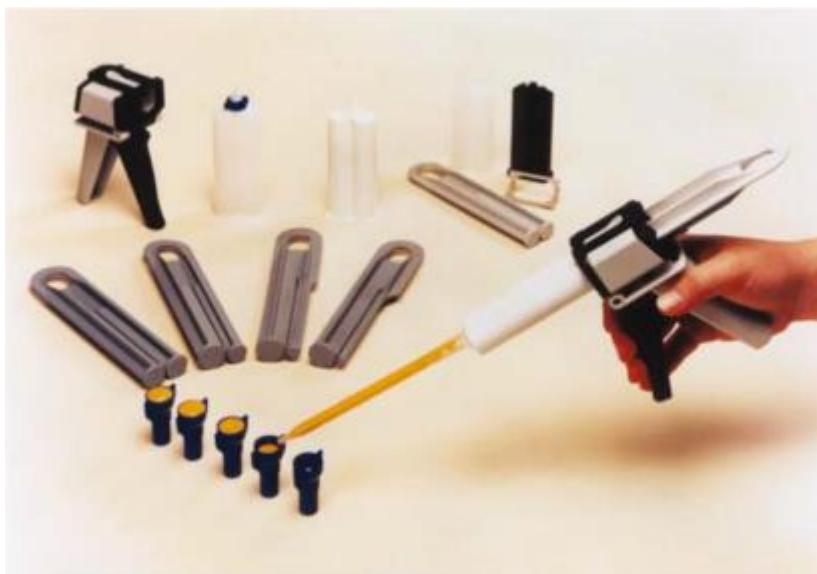
Ideální pro lepení malých částí, je možnost nanést méně jak miligram lepidla na 1 mm^2 . Může být jak v ruce dělníka, tak na stroji a aplikované automaticky viz obr. 14. [10]



Obrázek 14. Příklad aplikace pomocí injekční stříkačky [10]

Vytlačovací pistole

Nejčastěji se používají pro tmely, ale i lepidla. Spodní část pistole je píst, který tlačí na náplň, tak, že zmáčknutím spouště píst vytlačí lepidlo ven viz obr. 15. Výhodou je hlavně jednoduchost a nízká cena, jen oproti jiným metodám nanášení je to pomalý proces. [10]



Obrázek 15. Vytlačovací pistole [10]

Vymačkávací láhev

Nejčastěji je používána v domácnostech, ale pro její jednoduchost a nízkou váhu je jednoduché ji použít všude tam kde je to potřeba, například i na lince pro slepení šroubového spoje viz obr. 16. [10]



Obrázek 16. Loxeal Engineering Adhesives [foto autora]

2.5.2 Stříkání

Tato rozšířená metoda, je výhodná díky rovnoměrnému nástřiku lepidla na velké a ploché povrchy. Na stříkání se dají použít vzduchové nebo bez vzduchové pistole. Jedná se jak o manuální viz obr. 17, tak automatické nanášení. Výhodou je rychlá a jednoduchá aplikace na velké plochy. Jelikož při používání může vznikat aerosol je potřeba použít chráněný prostor. [10]



Obrázek 17. Ruční stříkání [10]

2.5.3 Nanášení lepidla za horka

Nanášení lepidla natavováním

Tuhé lepidlo se nanáší na lepený povrch po průchodu tavnou komorou. V praxi se používá tavná pistole, diskový kotouč nebo válec viz obr. 18. [8]



Obrázek 18. Válec pro aplikaci nataveného lepidla [10]

Fluidizační nanášení

Používají se prášková tavná lepidla. Princip spočívá v ponoření přehřátého dílu do oblaku prášku ve fluidizační vaně. Na dílu se přilepí vrstva lepidla a po vyndání musí dojít okamžitě ke slepování adherendů. [8]

2.6 Kvalita lepených spojů a její kontrola

Pro dobrý lepený spoj je potřeba: správná volba konstrukce spoje, správná volba lepidla, dobře připravený lepený povrch, dobré vytvrnutí lepidla. Pro vytvoření pevného spoje je nutné dodržet předepsaný tlak na oba adherendy a zafixování spoje do doby, než dojde k vytvrzení lepící vrstvy. Vytvrzení lepidla je změna kapalného skupenství na pevné, za určitý čas. Kontrola kvality spoje spadá pod nedestruktivní zkoušky. Dají se i analyzovat porušené spoje. [8]

Nejdříve je potřeba zkontrolovat, komplexně celou konstrukci a následně spoj samotný. Je nutné vyloučit, zda lepené materiály nemají vady chemické nebo fyzické. Kontrola povrchu, který musí být bez zbytků vody nebo jiných složek, snižujících adhézní proces. Dále je potřeba zhodnotit lepící proces jako takový, zda je vrstva lepidla správně tlustá a zda proběhlo správné vytvrzení. [4]

2.7 Zkoušky lepených spojů

Zkoušky se provádí destruktivní a nedestruktivní. Nedestruktivní mohou být jak vizuální, tak pomocí složitých analytických zařízení. [4]

2.7.1 Nedestruktivní zkoušky

Obvykle jsou mnohem ekonomičtější než destruktivní zkoušky, každý kus může být zkontrolován. Nejpoužívanější jednoduché kontroly jsou vizuální i s použitím lupy a pomocí zvuku. Pokročilejší jsou zkoušky ultrazvukem nebo radiografická kontrola. Nejobtížněji se hledají závady související s vytvrzováním nebo povrchovou úpravou. Proto těmto procesům musí být věnována velká pozornost. [4]

Vizuální zkouška

Trénované oko může najít nečekané množství chybných spojů inspekcí lepidla kolem lepené plochy i když substrát není průhledný. [4]

Zvukový test

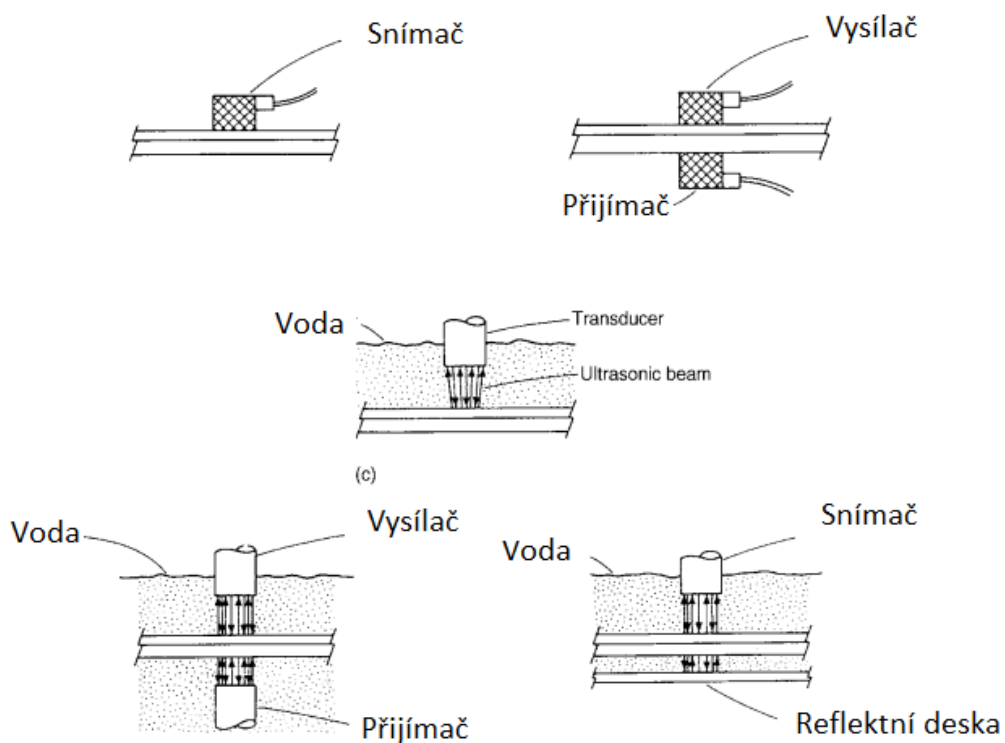
Byl jedním z prvních nedestruktivních testů, které se používali na hodnocení kvality lepeného spoje. Funguje tak, že se klepe mincí nebo malým kladívkem a rozdíly v tónu poukazují na nesrovnalosti lepeného spoje. Ostré a jasné tóny znamenají přítomnost lepidla, matné znamenají prázdné nebo nepřilnuté místo. Zkouška velmi závisí na zkušenostech pracovníka. [4]

Průkazní zkouška

Pokud je požadována vysoká spolehlivost je třeba provést zkušební test. Měl by simulovat skutečné provozní podmínky. Průkazní zkouška by měla být navržena, tak aby se jednalo o nedestruktivní zkoušku. [4]

Ultrazvuková kontrola

V současné době oblíbenou nedestruktivní technikou kontroly lepeného spoje je ultrazvuková kontrola. Tato kontrola funguje na princip vysílání ultrazvukových signálů skrz konstrukci spoje. Pokud je ve spoji vzduchová dutina, špatně vytvrzená část spoje, nebo místo kam vůbec nezateklo lepidlo, tak to tato zkouška zjistí. Na obr. 19 vidíme různé způsoby ultrazvukové kontroly. Může se jednat o kontaktní pulzní echo, kdy ultrazvukový signál je vysílán a přijímán jednou jednotkou. Kontaktem prostřednictvím přenosu mezi vysílací jednotkou na jedné straně spoje a přijímací jednotkou na druhé straně spoje. Další z rozšířených metod je metoda ponoření, kdy je sestava ponořena do nádrže s vodou, kde voda slouží jako vazební mechanismus pro ultrazvukový signál. [4]



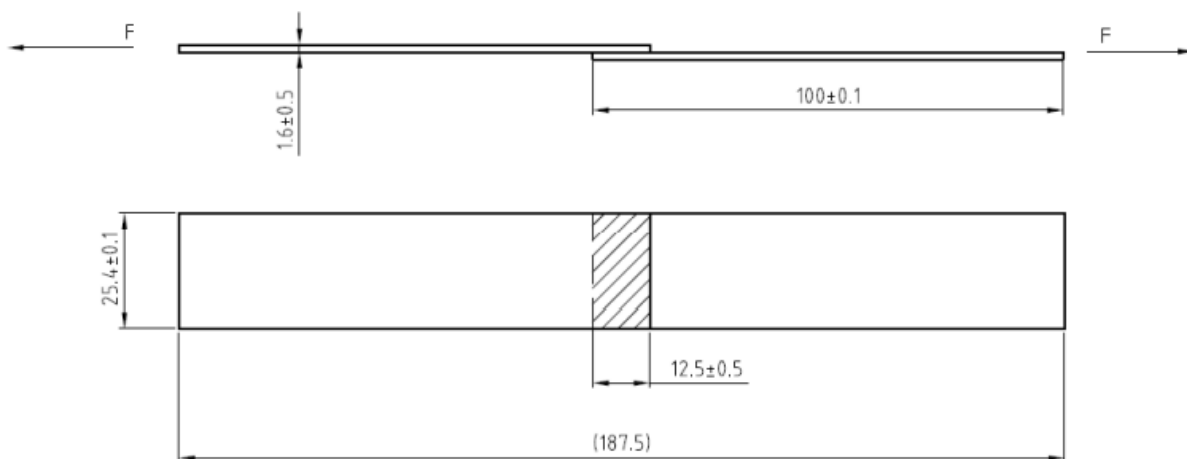
Obrázek 19. Příklady ultrazvukových zařízení pro kontrolu spoje [4]

2.7.2 Destruktivní zkoušky

Statické

Zkouška pevnosti ve smyku podle ČSN EN 1465

Podstatou zkoušky je namáhání spoje statickým tahem ve směru podélné osy, dokud nedojde k porušení vzorku viz obr. 20. Měří se doba, kdy dojde k porušení spoje. Tato zkouška je nejčastěji používána, hlavně díky jednoduchému sestavení spoje. U této zkoušky může docházet k částečnému odlupování, tudíž je zde možnost relativně odlišných výsledků. Zkouška je prováděna na trhacím stroji, jako například na obr. 21. [1]



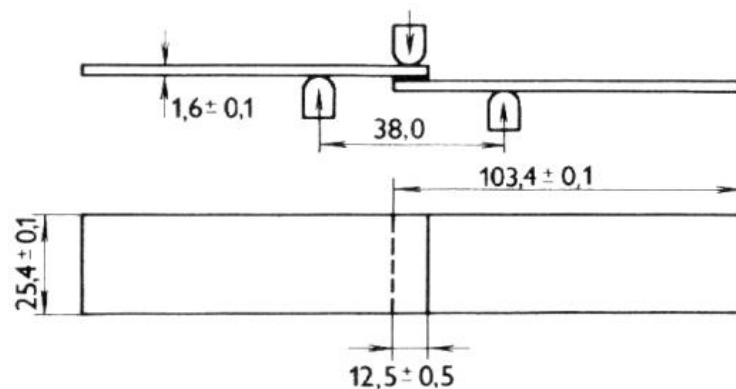
Obrázek 20. Vzorek pro zkoušení pevnosti ve smyku podle ČSN EN 1465 (66 8510) [15]



Obrázek 21. Trhací stroj [16]

Zkouška lámavosti podle ČSN 66 8511

U této zkoušky je namáhán zkušební spoj na zlomení statickým ohybem viz obr. 22. Může být provedena na stroji z obr. 23. Tato norma je již zrušená, avšak bez náhrady. [1]



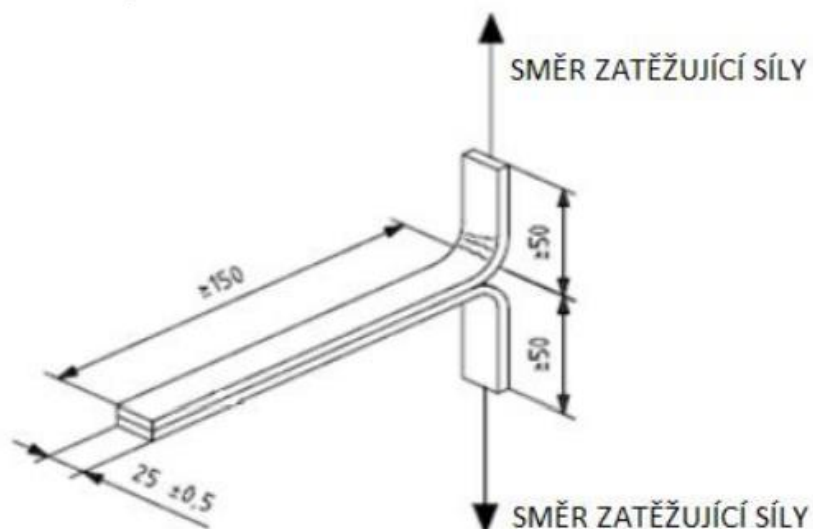
Obrázek 22. Vzorek pro zkoušení lámavosti podle ČSN 66 8511 [1]



Obrázek 23. Modelová řada univerzálních zkušebních zařízení zwickLine (Z0.5, Z2.5, Z5.0) [16]

T-zkouška pevnosti v odlupování podle ČSN EN ISO 11339

Zde namáháme zkušební spoj odlupováním statickým tahem ve směru kolmém na lepenou plochu viz obr. 24. Jelikož lepené spoje jsou známy špatnou odolností na odlupování jsou tyto zkoušky velmi důležité. A to i přes snahu navržení spoje, kde dochází k co nejmenšímu namáhání odlupováním. Tuto zkoušku nejčastěji používáme pro flexibilní adhérendy a lepidla. Zkoušku provádíme na zařízení z obr. 25. [1]



Obrázek 24. Vzorek pro T-zkoušku v odlupování [1]



Obrázek 25. 90°zkouška odlupování na zařízení zwickiLine [16]

Dynamické

Zkouška rázové pevnosti podle ČSN 66 8512

Zkouší se namáhání spoje ve smyku rázovým tlakem ve směru podélné osy až do porušení vzorku. U této zkoušky, známé jako Charpyho, pro vytvoření rázu použijeme kladivo viz obr. 26. Tato zkouška je potřeba protože lepidla, jako většina polymerních materiálů, jsou citlivé na vysoké náhlé síly. Pro tyto zkoušky jsou nejvhodnější tlusté vrstvy lepidla, síla potřebná na roztržení spoje roste s tloušťkou vrstvy lepidla. Norma ČSN 66 8512 je zrušena bez náhrady v EN. [1]



Obrázek 26. Rázová zkouška [17]


Zkouška na únavu lepených spojů podle ČSN EN ISO 9664




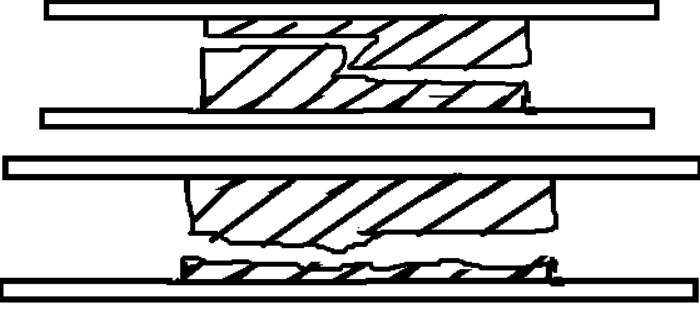

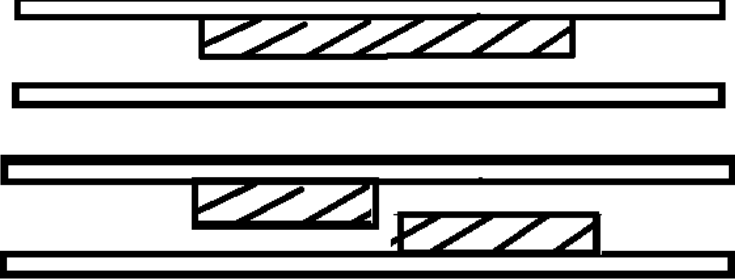
Zkouší se únavová pevnost ve smyku tahem při míjivém cyklickém zatěžování, při kterém se žádný ze série pěti kusů vzorků neporuší po $2 \cdot 10^7$ cyklech. Zkouší se na vzorcích podle obr. 20, jiné jsou však tloušťka (2 mm) a přeplátování (10 mm). Kmitočet se většinou používá v hodnotě 43,3 Hz. [1]

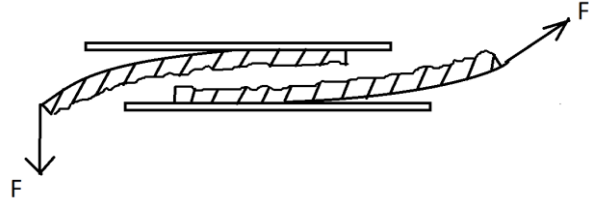
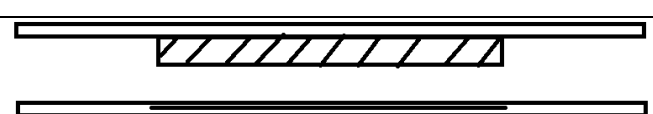
2.7 Poruchy lepených spojů dle ČSN EN ISO 10365

Výsledky zkoušek se posuzují podle poruchy lepeného spoje, ke které došlo viz Tab. 7. V případě kombinace více poruch je možné psát výsledek jako procentuální vyjádření, např. AF (50 %) + CF (50 %). [21]

Tabulka 7. Označení typů porušení dle ČSN ISO 10365 [21]

Místo porušení	Typ porušení	Označení poruchy
Adherend	 <p>Porušení jednoho nebo obou adherendů (porucha substrátu).</p>	SF

Místo porušení	Typ porušení	Označení poruchy
Adherend	 <p data-bbox="507 501 1177 537">Porušení adherendu (Kohezivní porucha substrátu).</p>	CSF
Adherend	 <p data-bbox="715 734 973 770">Porucha delaminací</p>	DF
Lepidlo	 <p data-bbox="730 963 954 999">Kohézní porucha</p>	CF
Lepidlo	 <p data-bbox="670 1357 1015 1393">Speciální kohézní porucha</p>	SCF
Lepidlo	 <p data-bbox="507 1554 1177 1590">Porucha vyvolaná odumíráním lepidla pod napětím</p>	SWCF
Lepidlo	 <p data-bbox="730 1935 954 1971">Adhézní porucha</p>	AF

Místo porušení	Typ porušení	Označení poruchy
Lepidlo	 <p>Kombinace adhézní a kohézní poruchy s odlupováním</p>	ACFP
Korozní rozhraní	 <p>Odlepování v důsledku koroze spojované plochy</p>	COR

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

3.1 Cíle experimentální části

Cílem experimentu je ověření vybraných lepidel na upravených površích kovového materiálu. Po vytvoření pevného spojení dvou plechů pomocí technologie lepení a následné zkoušce v laboratorních podmínkách následuje ověření mechanických vlastností spoje. Výsledky zkoušek spojů lepených třemi různými lepidly budou porovnány a vyhodnoceny. Části závěru experimentu bude zhodnocení, zda zdrsnění povrchu smirkovým papírem zvýší pevnost spoje.

3.2 Materiál zkušebních vzorků

Pro vzorky byl zvolen materiál S235J2C+N podle normy EN 10025-2. Tento plech se vyrábí technologií válcováním za studena, pro kterou je tato ocel vhodná. Tento plech je obzvláště využíváný pro ohýbání. Minimální mez kluzu je 235 MPa, pevnost v tahu je 360 až 510 MPa. Další vlastnosti lze najít v tabulkách Tab. 8 a Tab. 9. [23]

Tabulka 8. Vlastnosti materiálu [22]

Vlastnosti	Hodnoty
Hustota	7,8-7,9 g/cm ³
Modul pružnosti	200-215 GPa
Modul pružnosti ve smyku	82 GPa

Vlastnosti	Hodnoty
Prodloužení	21-26 %
Pevnost v tahu	360-510 MPa
Mez kluzu	235-235 MPa

Tabulka 9. Chemické složení [22]

Chemické složení				
C	Cu	Mn	P	S
0,17 %	0,55 %	1,4 %	0,03 %	0,025 %

Plech byly nařezány laserem od společnosti Trumpf (viz obr. 28), na délku 100 mm, šířku 25 mm a tloušťka je 2 mm viz obr. 27. V normách je uvedena ideální tloušťka plechu 1,6 mm, z důvodu dostupnosti je zde použit plech o tloušťce 2 mm, což je stále přijatelné, jelikož v normě je uvedeno rozmezí $1,6 \pm 0,5$ mm. [15]



Obrázek 27. Plech pro vzorky [foto autora]



Obrázek 28. Trumpf True laser 3030 [foto autora]

3.2 Lepidlo Bison Epoxy Metal

Bylo použito epoxidové dvousložkové lepidlo na bázi epoxidové pryskyřice viz obr. 29. Je ideální pro spojování kovových konstrukcí, které musí odolávat extrémním podmínkám. Lze s ním lepit kovy (ocel, hliník, železo) v kombinaci se dřevem, kamenem, betonem a různými syntetickými materiály. Není vhodný pro lepení polyethylenu (PE), polypropylenu (PP) a silikonovou pryž.

Konečná pevnost spoje může být až 22MPa. Tepelná odolnost lepidla je od -60 °C do 100 °C.

K vytvrzení dochází po 24 h, možnost manipulace již po 10 h. [18]



Obrázek 29. Lepidlo Bison Epoxy Metal [foto autora]

3.3 Lepidlo Loctite EA 3450

Dalším lepidlem bylo epoxidové dvousložkové lepidlo viz obr. 30. Lepidlo je určeno pro spojování kovových konstrukcí. Výborná odolnost proti prostředí viz Tab. 10. Po týdenním vytvrzení odolnost ve smyku až 21 MPa (ocel). [19]

Tabulka 10. Odolnost vůči chemikáliím [19]

Prostředí	°C	% z počáteční pevnosti			
		100 h	1000 h	3000 h	5000 h
Motorový olej	87	130	130	130	130
Bezolovnatý benzin	22	110	95	95	95
Aceton	22	90	95	95	95
Isopropanol	22	105	95	95	95
Ethanol	22	95	90	90	90
Voda	22	110	95	85	75
Voda	60	80	40	40	40
Voda	90	35	35	35	35



Obrázek 30. Lepidlo Loctite EA 3450

3.4 Lepidlo UHU PLUS ENDFEST 2K-EPOXY

Epoxidové lepidlo UHU viz obr. 31 je vhodné pro lepení kovů, dřevotřísky, termosetů, tvrdého PVC, laminátů, keramiky, porcelánu skla, betonu, kamene, gumy. Nevhodné pro lepení PP, PE, teflonu a silikonu.

Tepelná odolnost mezi od -40 °C do 100°C, pracovní teploty by neměly překročit 200°C. [20]



Obrázek 31. Lepidlo UHU PLUS ENDFEST 2K-EPOXY [foto autora]

3.5 Příprava vzorků

Vzorky byly připraveny v laboratorních podmínkách. Lepený povrch plechu byl odmaštěn acetonem, pro jehož nanesení byly použity papírové tampony viz obr. 32. Následně byla naměřena vzdálenost 12,5 mm od hrany plechu a fixou nakreslena čárka. Tím byla připravena plocha pro lepení. Lepidlo bylo namícháno v hliníkové misce za použití dřevěné špachtle z obr. 33. Poté bylo nanášeno na lepenou plochu, pomocí špachtle byla vytvořena rovnoměrná vrstva lepidla po celém lepeném povrchu viz obr. 34.



Obrázek 32. Odmašťování povrchu [foto autora]

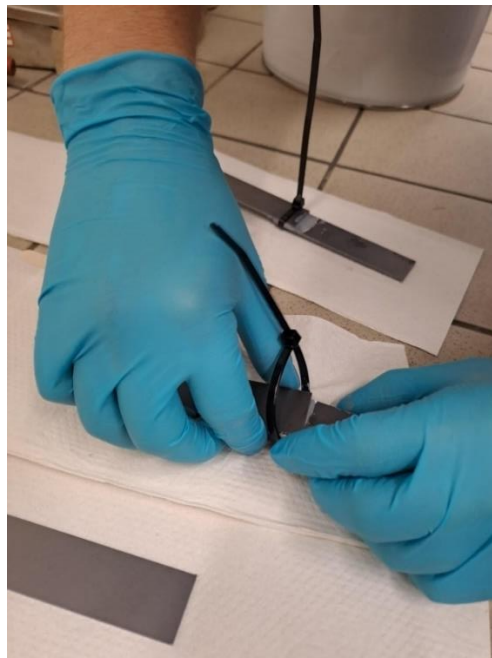


Obrázek 33. Namíchané lepidlo Loctite [foto autora]



Obrázek 34. Nanášení lepidla na vzorek [foto autora]

Po nanesení lepidla byl druhý plech přitisknut k prvnímu a spoj byl stažen elektrickářskou páskou pro zachování dostatečného tlaku viz obr. 35. Takto bylo připraveno pro každé lepidlo 7 vzorků. Nejrychleji tvrdnoucím bylo lepidlo Loctite, které mělo tendenci ztvrdnout před jeho nanesením na poslední vzorek. Všechny vzorky byly popsány fixou a uloženy do digestoře pro vytvrzení viz obr. 36. Po vytvrzení byly pásky odstříženy, lepidlo k nim nepřilnulo, šly tudíž dobře odstranit, což lze vidět na obr. 37.



Obrázek 35. Stažení plechů k sobě [foto autora]

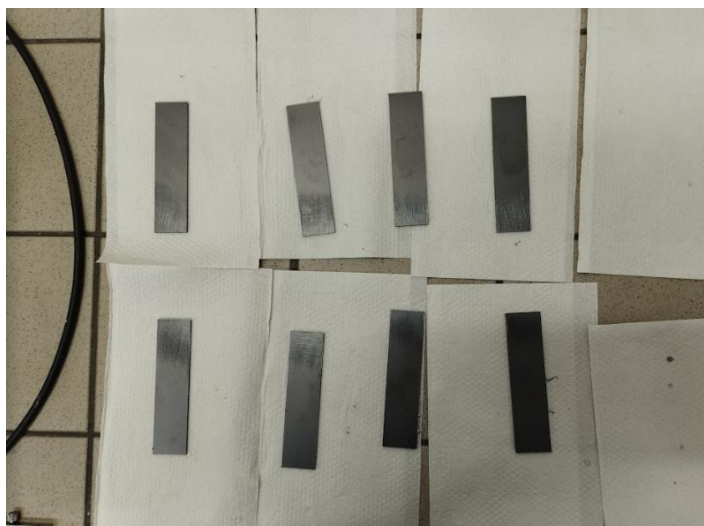


Obrázek 36. Vytvrzování vzorků v digestoři [foto autora]



Obrázek 37. Spoj po vytvrzení [foto autora]

Dále byly připraveny 4ks vzorků, kde byl povrch zdrsňen smirkovým papírem před odmaštěním viz obr. 38. Následně byly 2 vzorky se zdrsňeným povrchem lepeny za použití lepidla Loctite a zbylé 2 za použití lepidla Bison.



Obrázek 38. Vzorky se zdrsňným povrchem [foto autora]

3.6 Zařízení pro tahovou zkoušku

Pro tahovou zkoušku byl použit hydraulický zatěžovací stroj INOVA ZUZ 200 viz obr. 39. Základní funkcí daného stroje je zatěžování zkušebních vzorků různých délek a je vhodný pro konvenční zkoušky pevnosti v tahu a tlaku a únavové zkoušky pro různé průběhy cyklických zatížení. Jeho maximální dynamické zatížení je +/-160 kN, maximální statické zatížení je +/-200 kN a maximální výška pracovního prostoru je 1350 mm. Tento stroj byl zvolen z důvodu nesymetrických vzorků, z důvodu přepřátovaného spoje. Výhodou bylo, že tento stroj měl i kleštiny pro nesymetrické vzorky. [24]



Obrázek 39. Zatěžovací stroj INOVA ZUZ 200 [foto autora]

3.7 Zkouška pevnosti ve smyku

Na vzorcích byla provedena zkouška pevnosti ve smyku dle ČSN EN 1465. Vzorky byly zatěžovány statickým tahem na zařízení INOVA ZUZ 200. Posuv byl zvolen 1 mm/min. Vzorky bylo potřeba upnout tak aby nedocházelo k jinému napětí než smykovému. Tak se stalo za použití kleštin pro nesymetrické vzorky.

Data získaná ze zkušebního zařízení jsou posuv a aktuální síla. Z tohoto důvodu je potřeba dopočítat napětí podle vzorce:

$$\tau_s = \frac{F_{ti}}{S_{Lepené plochy}} [MPa]$$

kde:

τ_s [MPa] – smykové napětí v místě lepeného spoje

F_{ti} [N] – maximální síla naměřená při zatěžování i-tého vzorku

$S_{Lepené plochy}$ [mm²] – kontaktní plocha naneseného lepidla

Je třeba určit obsah lepené plochy. Jelikož se jedná o obdélník o rozměrech 12,5 mm (přeplátování) a 25 mm (šířka vzorků) kde bylo lepidlo nanášeno rovnoměrně a všechny vzorky mají stejnou plochu, která se vypočítá podle vzorce:

$$S_{Lepené plochy} = a * b = 12,5 * 25 = 312,5 \text{ mm}^2$$

kde:

$S_{Lepené plochy}$ [mm²] – kontaktní plocha naneseného lepidla

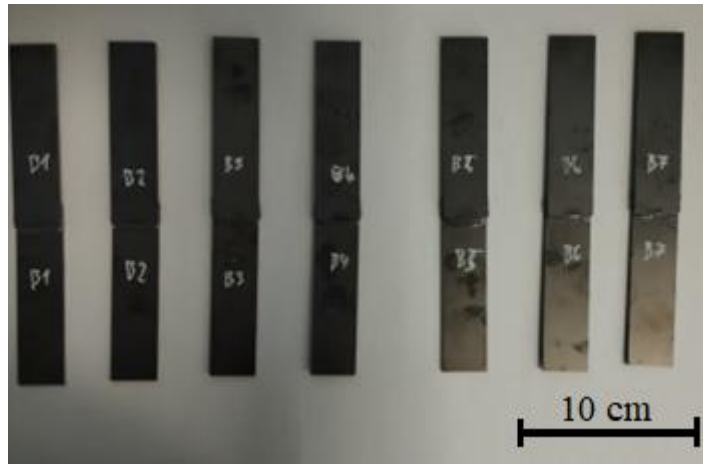
a [mm] – délka přeplátování

b [mm] – šířka vzorku

3.7.1 Vzorky lepené lepidlem Bison

Vzorky se upnuly do správně nastavených kleštin a následně zatěžovány do poruchy spoje.

V Tab. 11 jsou uvedené naměřené výsledky všech 7 vzorků z obr. 40.



Obrázek 40. Vzorky B1-B7 před přetrhnutím [foto autora]

Tabulka 11. Naměřené a vypočtené hodnoty pro lepidlo Bison

Číslo vzorku	Maximální síla do porušení spoje [kN]	Vypočtené smykové napětí [MPa]
B1	5,42	17,34
B2	5,64	18,05
B3	6,06	19,39
B4	6,14	19,65
B5	5,87	18,78
B6	6,10	19,52
B7	7,99	25,57

Nejvyšší dosažené smykové napětí je 25,57 MPa a nejmenší 17,34 MPa, což je velký rozdíl. Střední hodnota vyšla 19,76 MPa, tudíž odchylka největšího napětí od střední hodnoty činí 29,4 % a nejmenšího napětí od střední hodnoty 12,22 %. Směrodatná odchylka vychází 2,498 MPa. Směrodatná odchylka se vypočítá podle:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

kde:

s [MPa] – směrodatná odchylka

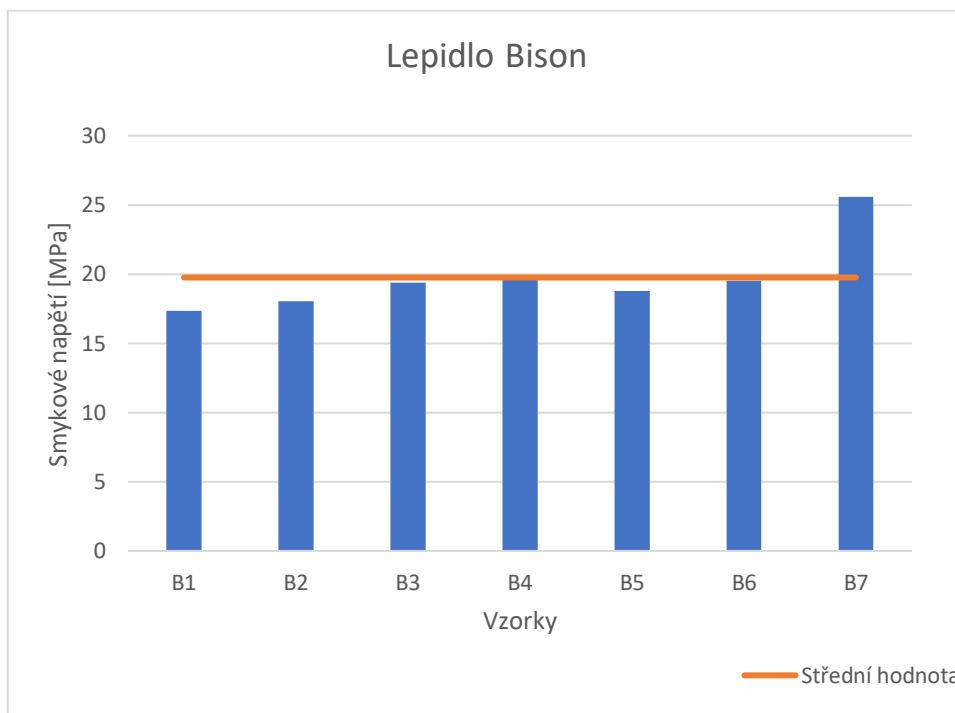
n [-] – počet zkoušených vzorků

x_i [MPa] – hodnota maximálního smykového napětí i -tého vzorku

\bar{x} [MPa] – střední hodnota pro zkoušené vzorky

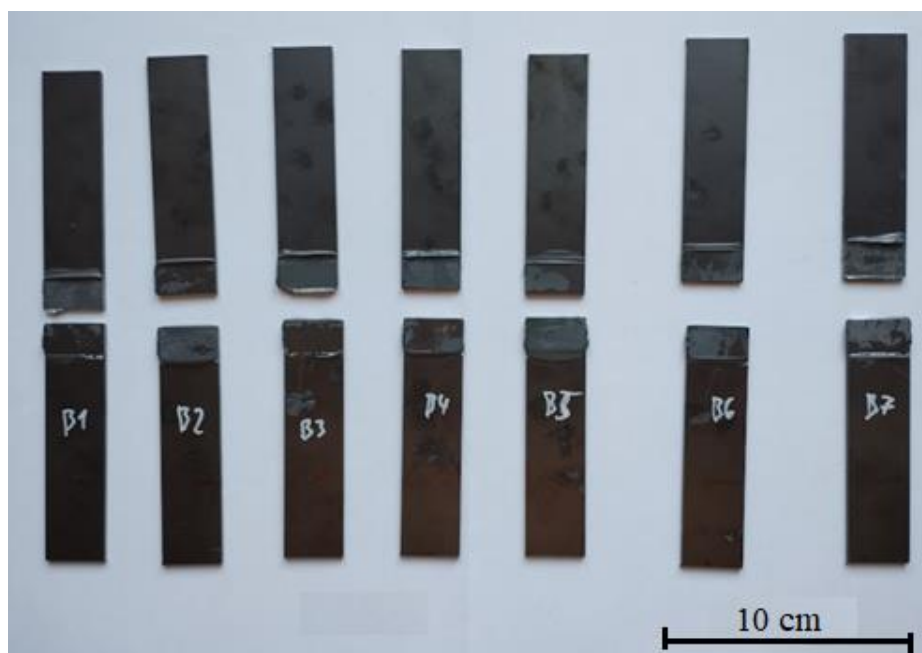
Příklad výpočtu:

$$s = \sqrt{\frac{1}{7} * ((17,34 - 19,76)^2 + \dots + (25,57 - 19,76)^2)} = 2,498 \text{ MPa}$$



Obrázek 41. Porovnání smykového napětí vzorků B1-B7

V grafu na obr. 41 vidíme smyková napětí vzorků ve sloupcích a oranžová přímka je střední hodnota.



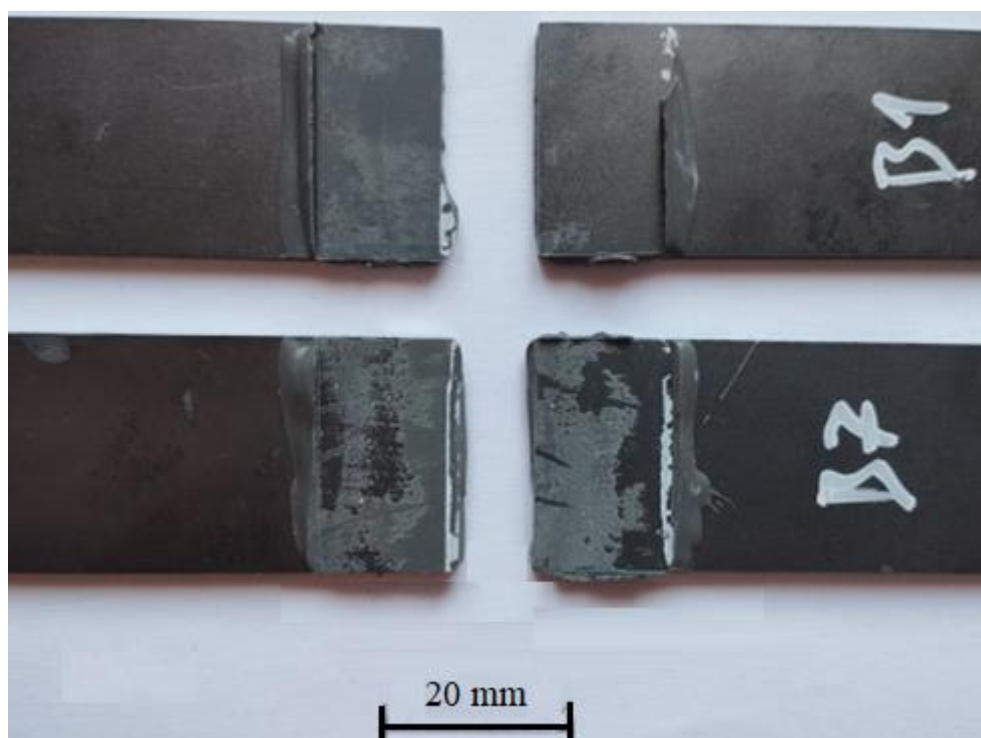
Obrázek 42. Vzorky B1-B7 po přetrhnutí [foto autora]

Jak lze vidět na obr. 42, k přetrhnutí docházelo pouze ve spoji a adherend zůstal neporušen.

Tabulka 12. Poruchy spoje pro vzorky lepené lepidlem Bison

Číslo vzorku	Porušení spoje
B1	AF (95 %) + CF (5 %)
B2	AF (92 %) + CF (8 %)
B3	AF (96 %) + CF (4 %)
B4	AF (75 %) + CF (25 %)
B5	AF (60 %) + CF (40 %)
B6	AF (35 %) + CF (65 %)
B7	AF (20 %) + CF (80 %)

Podle Tab. 12 je nejčastější poruchou spoje adhézní porucha.



Obrázek 43. Porušení spoje B1 a B7 [foto autora]

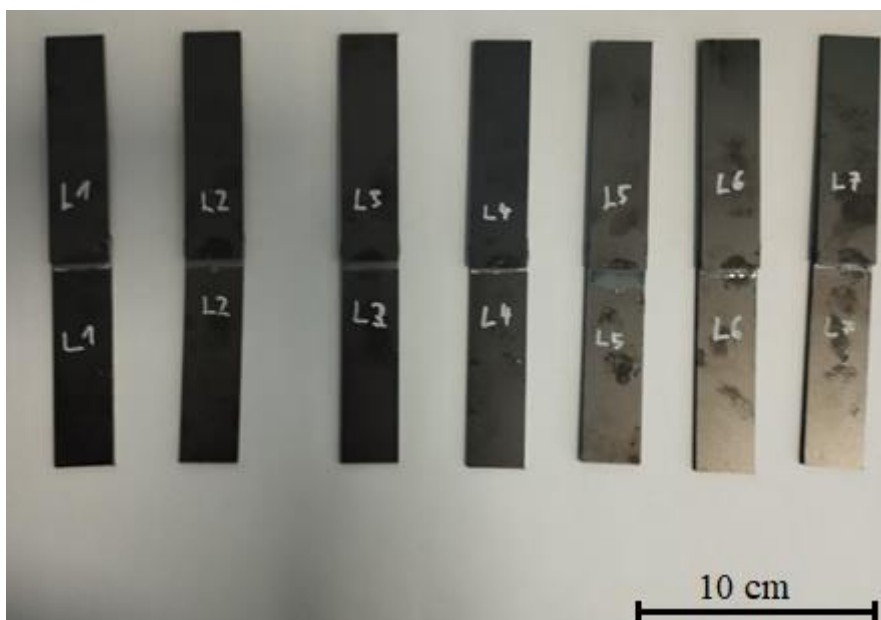
Na obr. 43 je vidět rozdíl mezi nejslabším spojem (B1) a nejsilnějším spojem (B7). U spoje B7 je adheze mnohem lepší, díky čemuž on dosáhl smykového napětí 25,57 MPa.

3.7.2 Vzorky lepené lepidlem Loctite

Po upnutí vzorků do kleštin (viz obr. 44), byly vzorky zatěžovány posuvem 1 mm/min. V Tab. 13 jsou uvedené vypočtené a naměřené výsledky vzorků obr. 45.



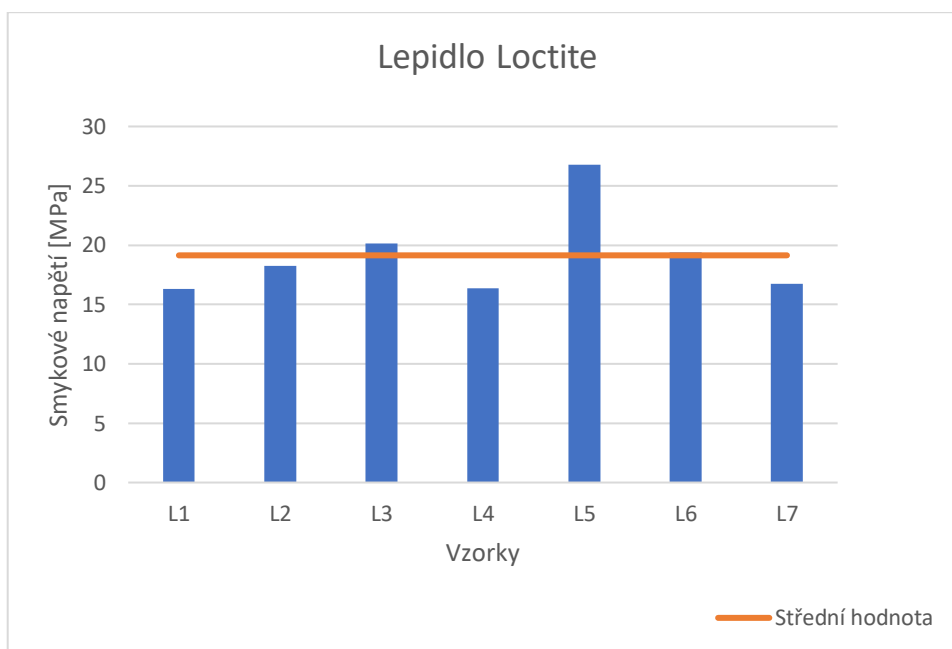
Obrázek 44. Zatěžovací stroj se vzorkem [foto autora]



Obrázek 45. Vzorky L1-L7 před přetrhnutím [foto autora]

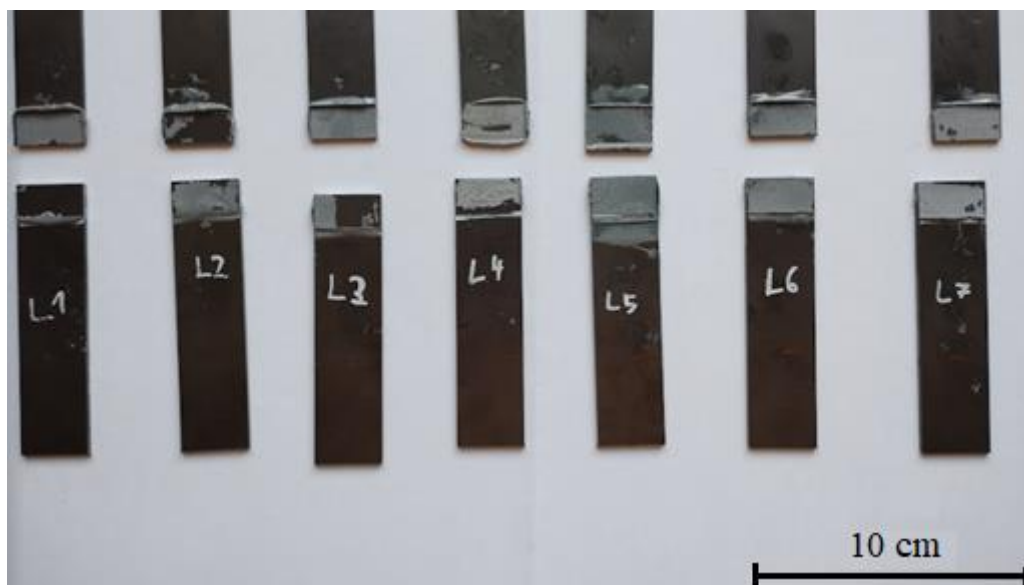
Tabulka 13. Naměřené a vypočtené hodnoty pro lepidlo Loctite

Číslo vzorku	Maximální síla do porušení spoje [kN]	Vypočtené smykové napětí [MPa]
L1	5,09	16,29
L2	5,71	18,27
L3	6,30	20,16
L4	5,12	16,38
L5	8,37	26,78
L6	6,05	19,36
L7	5,23	16,74



Obrázek 46. Porovnání smykových napětí vzorků L1-L7

Nejvyšší dosažené smykové napětí je 26,78 MPa a nejmenší 16,29 MPa a to u vzorků L5 a L1. Na obr. 48 lze vidět, že u vzorku L1 nedošlo k dobré adhezi. Střední hodnota vyšla 19,14 MPa, tudíž odchylka největšího napětí od střední hodnoty činí 39,9 % a nejmenšího napětí od střední hodnoty 14,9 %. Směrodatná odchylka vychází 3,417 MPa. Další vzorky s nízkými napětími byly vzorky L7 a L4, kde nejspíš nedošlo k ideálnímu vytvrzení, jelikož nebylo slyšet „lupnutí“ při přetržení spoje při zkoušce. K porušení dochází pouze v lepeném spoji, materiál adherendu zůstal neporušený viz obr. 47.

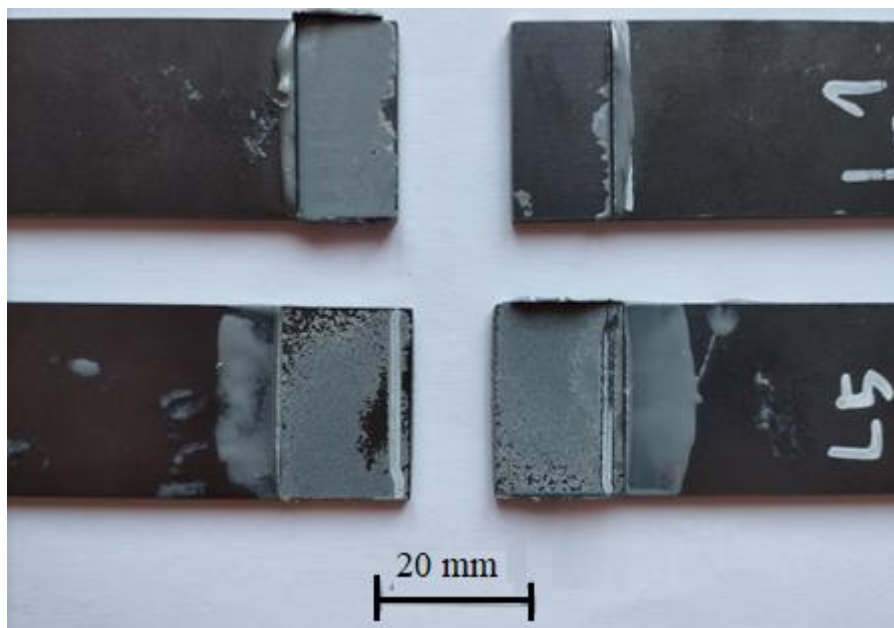


Obrázek 47. Vzorky L1-L7 po přetrhnutí [foto autora]

Tabulka 14. Poruchy spoje pro vzorky lepené lepidlem Loctite

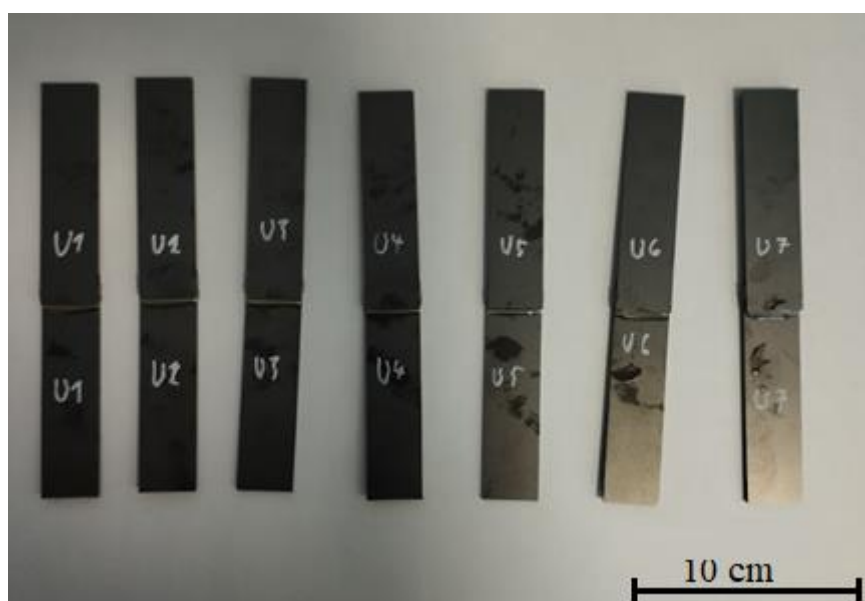
Číslo vzorku	Porušení spoje
L1	AF (96 %) + CF (4 %)
L2	AF (92 %) + CF (8 %)
L3	AF (60 %) + CF (40 %)
L4	AF (20 %) + CF (20 %)
L5	AF (10 %) + CF (90 %)
L6	AF (5 %) + CF (95 %)
L7	AF (10 %) + CF (90 %)

Nejčastější poruchou je kohézní porucha, jak jde vidět v Tab. 14.



Obrázek 48. Porušení spoje L1 a L5 [foto autora]

3.7.3 Vzorky slepené lepidlem UHU

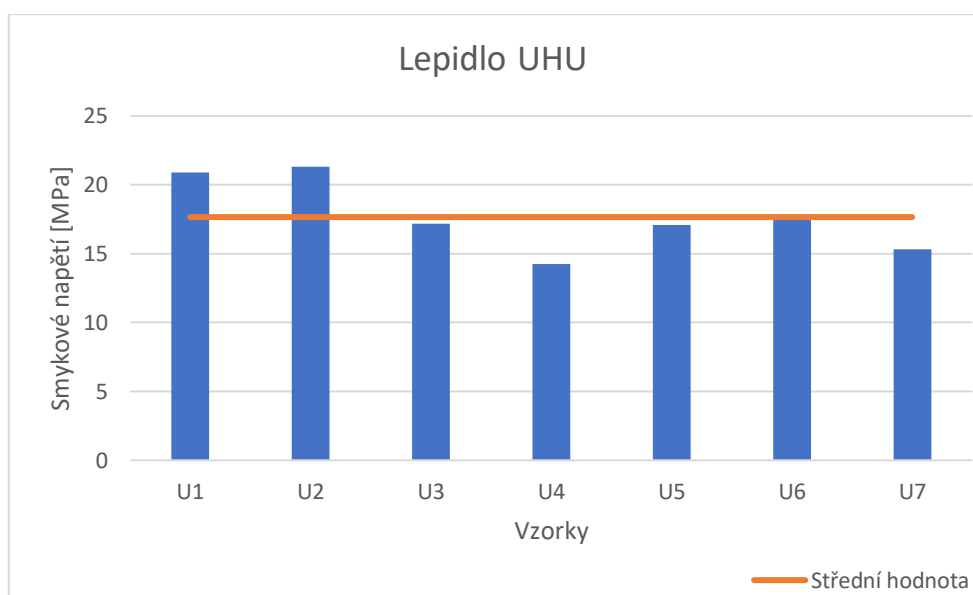


Obrázek 49. Vzorky U1-U7 před přetrhnutím [foto autora]

Vzorky obr. 49 byly postupně upínány do kleštin zatěžovacího stroje a stejně jako vzorky lepené lepidly Bison a Loctite zatěžovány posuvem 1 mm/min.

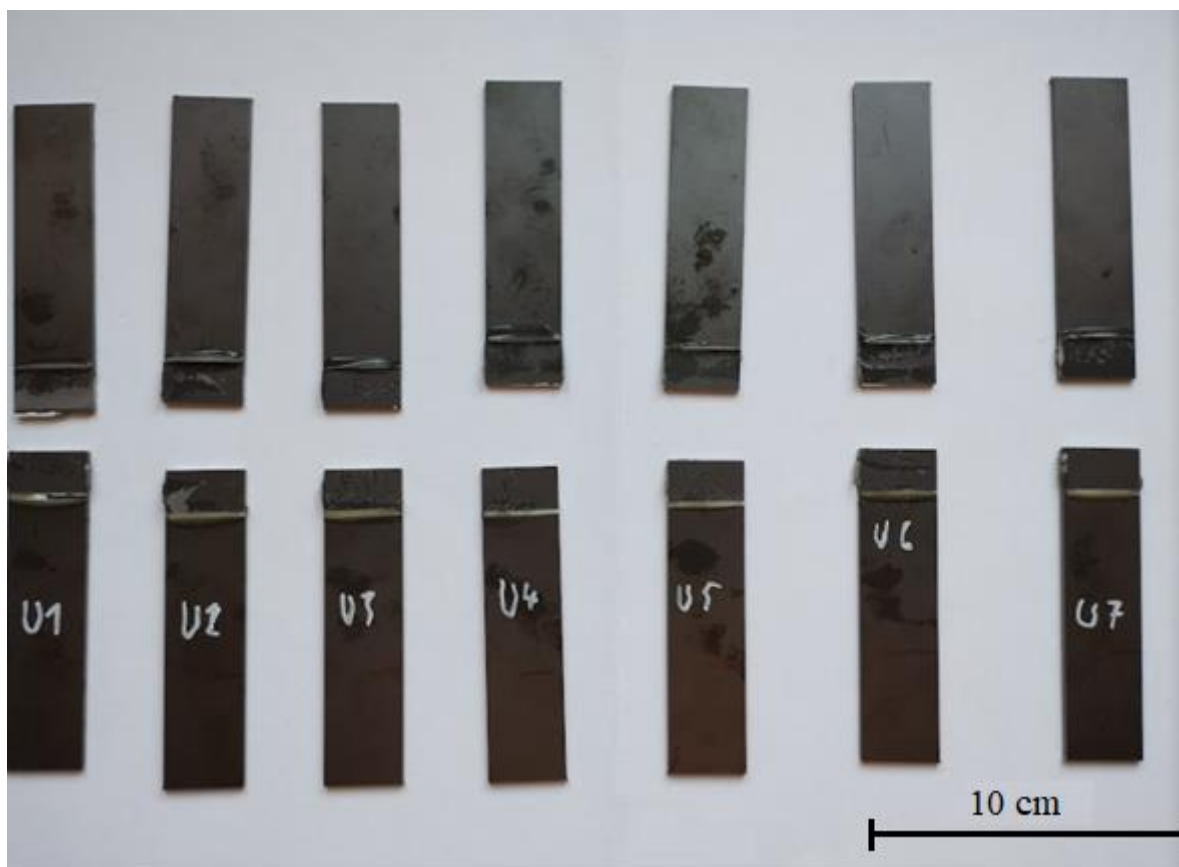
Tabulka 15. Naměřené a vypočtené hodnoty pro lepidlo UHU

Číslo vzorku	Maximální síla do porušení spoje [kN]	Vypočtené smykové napětí [MPa]
U1	6,53	20,90
U2	6,66	21,31
U3	5,36	17,15
U4	4,45	14,24
U5	5,34	17,09
U6	5,50	17,60
U7	4,78	15,30

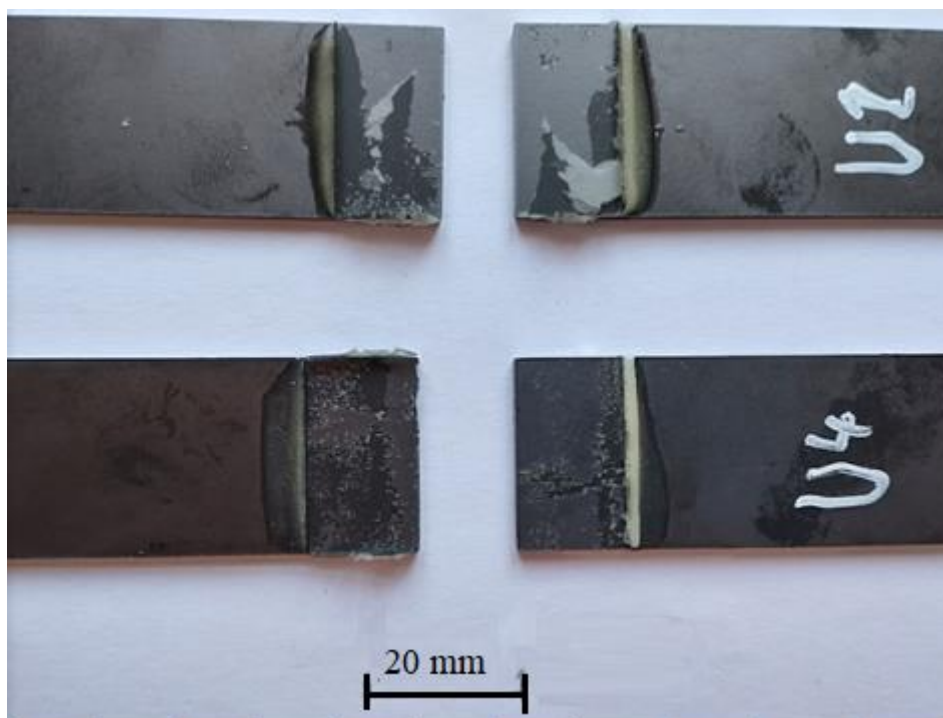


Obrázek 50. Porovnání smykových napětí vzorků U1-U7

Nejvyšší dosažené smykové napětí je 21,31 MPa (viz Tab. 15) a nejmenší 14,24 MPa a to u vzorků U2 a U4 (viz obr. 52). Střední hodnota vyšla 17,65 MPa, je zobrazena jako oranžová přímka na obr. 50, odchylka největšího napětí od střední hodnoty je 20,7 % a nejmenšího napětí od střední hodnoty 19,3 %. Směrodatná odchylka vychází 2,44 MPa. Nedochozí k poruše materiálu, pouze k poruše spoje obr. 51.



Obrázek 51. Vzorky U1-U7 po přetrnutí [foto autora]



Obrázek 52. Porušení spojů U4 a U2 [foto autora]

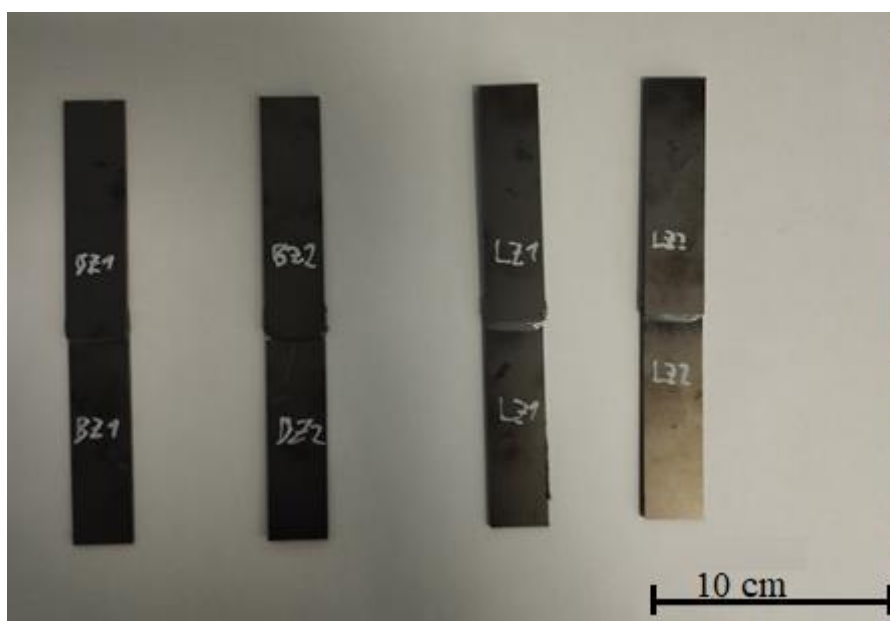
Tabulka 16. Poruchy spoje pro vzorky lepené lepidlem UHU

Číslo vzorku	Porušení spoje
U1	AF (90 %) + ACFP (10 %)
U2	AF (80 %) + ACFP (20 %)
U3	AF (60 %) + CF (40 %)
U4	AF (70 %) + CF (30 %)
U5	AF (80 %) + CF (20 %)
U6	AF (85 %) + CF (15 %)
U7	AF (95 %) + CF (5 %)

U vzorků U1 a U2 dochází nejen k adhezní poruše spoje, ale i kombinaci kohézního a adhezního porušení s odlupováním Tab. 16, což se u ostatních lepidel nevyskytuje. Je zajímavé, že právě tyto 2 vzorky jsou nejpevnější.

3.7.4 Vzorky se zdrsňným povrchem

Vzorky, kde byl povrch zdrsňn smirkovým papírem, měly všechny lepší výsledky, než byla střední hodnota výsledků u vzorků lepených stejným lepidlem. Přehlátování spoje bylo stejné jako u předešlých vzorků (viz obr. 53). Obzvlášť vzorky lepené lepidlem Bison vydržely relativně velké zatížení Tab. 17.



Obrázek 53. Vzorky se zdrsňným povrchem před přetrhnutím [foto autora]

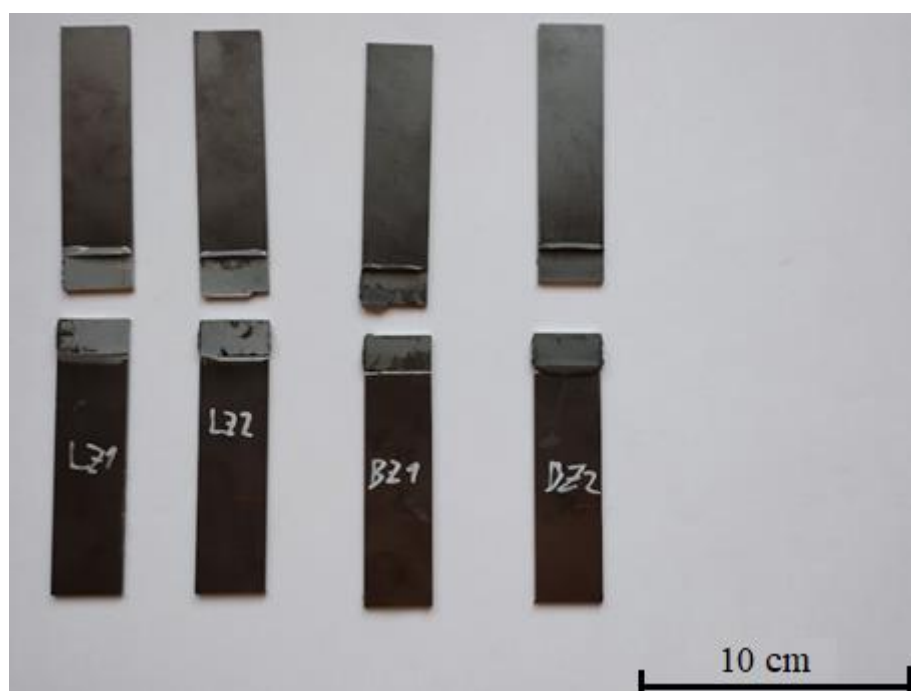
Tabulka 17. Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky se zdrsňným povrchem

Číslo vzorku	Maximální síla do porušení spoje [kN]	Vypočtené smykové napětí [MPa]
LZ1	6,31	20,19
LZ2	6,37	20,38
BZ1	7,50	24,00
BZ2	7,69	24,61

Vzorky slepené lepidlem Bison jsou pevnější o 23 % víc, než byla střední odchylka vzorků (po necelých 5 MPa viz Tab. 17), které byly pouze odmaštěny. U vzorků lepidla Loctite se pevnost zvýší pouze o 6 %. Všechny dané vzorky mají však lepší adhezi než vzorky bez zdrsňnění viz obr. 54. Kohézní porucha vždy převládá nad adhézní viz Tab. 18.

Tabulka 18. Poruchy spoje pro vzorky se zdrsňným povrchem

Číslo vzorku	Porušení spoje
LZ1	AF (3 %) + CF (97 %)
LZ2	AF (5 %) + CF (95 %)
BZ1	AF (20 %) + CF (80 %)
BZ2	AF (3 %) + CF (97 %)



Obrázek 54. Vzorky se zrsňným povrchem po přetrhnutí [foto autora]

4. ZÁVĚR

Bakalářská práce vycházela z teoretických poznatků uvedených v úvodní části, kde byla podrobně popsána technologie lepení. Na základě uvedených příkladů lepených spojů z praxe a základního namáhání, které musí spoje vydržet, byla navržena metodika práce.

V praktické části bakalářské práce byly vyrobeny vzorky pro zkoušku pevnosti lepených spojů ve smyku (dle ČSN EN 1465). Pro zhotovení těchto vzorků se vycházelo z nařezání plechu na rozměry podle normy ČSN EN 1465. Dále byl proveden výběr tří lepidel vhodných pro lepení oceli, předúprava povrchu před lepením, a nakonec vytvoření lepených spojů. Byla provedena vybraná zkouška, podle již zmíněné normy pro všechny vzorky lepené lepidly od výrobců Bison, Loctite a UHU.

Z výsledků zkoušky je patrné, že pro lepení oceli S235J2C+N je nejlepší z vybraných lepidel, lepidlo značky Bison. Ovšem střední hodnoty dosažených napětí nedosahují inzerovaných napětí od žádného výrobce. Pro lepidlo Bison Epoxy Metal je inzerováno napětí až 22 MPa, střední hodnota spočtených napětí je 19,76 MPa, směrodatná odchylka zde vychází 2,497 MPa. Pro lepidlo Loctite EA 3450 je inzerováno napětí až 21 MPa, střední hodnota spočtených napětí je 19,14 MPa, střední odchylka vychází 3,418 MPa. Lepidlo UHU PLUS Endfest 2K-Epoxy dokonce inzeruje pevnost spoje až 29 MPa, ale výsledná střední hodnota spočteného napětí pro tyto vzorky vyšla pouze 17,65 MPa, směrodatná odchylka vyšla 2,440 MPa.

Dále pro vzorky se zdrsňeným lepeným povrchem, pro lepidlo Loctite a pro lepidlo Bison, se síla pro přetržení zvýšila. Pro vzorky s lepidlem Loctite byly obě napětí 20,19 MPa a 20,38 MPa menší než napětí inzerované. Avšak vzorky s použitým lepidlem Bison předčily inzerované napětí od 2 MPa, vzorek BZ1 – 24 MPa a vzorek BZ2 – 24,61 MPa. Jelikož nebylo zkoušeno dostatečné množství vzorků nemůžeme jednoznačně konstatovat, že zdrsňení povrchu zvýší pevnost spoje vždy a dostatečně, ale je možné předpokládat, že ano.

Pro další výzkum lze doporučit hlubší studium povrchů, které jsou předpřipraveny na lepení. Doporučuji pro následné experimenty použít větší počet vzorků a mikroskopické zkoumání vybraných povrchů před a po lepení. Mikroskopickým zkoumáním bude možné zjistit, zda nedochází k difuzi některých látek do povrchu kovu. Bude zajímavé věnovat pozornost vyhodnocování zůstatkového lepidla na povrchu po provedení tahových zkoušek.

Vzhledem k tomu, že se na trhu vyskytuje velký počet různých lepidel, doporučuji věnovat pozornost předloženým referencím vybraných lepidel, zda odpovídají deklarované kvalitě např. pro lepené spoje ocelí.

Cílem práce bylo popsání problematiky technologie lepení a v praktické části vytvoření lepeného spoje pro vybraná lepidla s následnou zkouškou pevnosti spoje, což bylo splněno.

Bibliografie

- [1] PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Vydání první. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1980. 792s
- [2] BERAN, Rudolf. *Základy teorie lepení* [online]. Brno: Lear, a.s., 2014 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z:
http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Teorie_lepeni%20_%20LEAR.pdf
- [3] GREGOR, Miroslav. *Technologie a technika lepení - základní informace* [online]. Broumov: Z-Trade, s.r.o., 2013 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z:
<http://www.lepidla.cz/clanky/technologie-a-technika-lepeni---zakladni-informace.html>
- [4] PETRIE, E. M. *Handbook of adhesives and sealants*. New York: McGraw-Hill. [online]. 2007 [cit. 2022-03-05]. Dostupné z:
<http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Handbook%20of%20Adhesives%20and%20Sealants.pdf>
- [5] GREGOR, Miroslav. *Odborné lepení kovů* [online]. Broumov: Z-Trade, s.r.o., 2013 [cit. 2022-02-04]. Dostupné z: <http://www.lepidla.cz/clanky/odborne-lepeni-kovu.html>
- [6] NOVÁK, Libor. *Kyanoakrylátové lepidlo v průmyslu*. Brno, 2016. 73s, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček [online]. [cit. 2022-03-06] Dostupné z:
<https://dspace.vutbr.cz/xmlui/handle/11012/60873?show=full>
- [7] EBNESAJJAD, Sina. *Adhesives Technology Handbook*. 2nd edition. Norwich: William Andrew Inc., 2008
- [8] BRIŠ, P., KUBEŇA, J., *Lepení v praxi*. Vydání první. Praha: Grada Publishing a.s., 2017
- [9] EBNESAJJAD, Sina. *Handbook of Adhesives and Surface Preparation: Technology, Applications and Manufacturing*. Oxford: William Andrews 2011
- [10] COGNARD, Philippe. *Adhesives and Sealants: General Knowledge, Application Techniques, New Curing Techniques*. Handbook of Adhesives and Sealants. Volume 2. Oxford: Elsevier 2006
- [11] KUPSKI, J., TEXEIRA DE FREITAS, S., *Design of adhesively bonded lap joints with laminated CFPRP adherends: Review, challenges and new opportunities for aerospace structures*.

- Composite Structures, Volume 268. 15.7. 2021. [online]. [cit. 2022-30-6] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822321003834>
- [12] NIU, Y., XU, X., GUO, S., *Structural Optimization Design of a Typical Adhesive Bonded Honeycomb-Core Sandwich T-joint in Side Bonding Using Multi-Island Genetic Algorithm*. Appl Compos Mater 2021. [online]. [cit. 2022-06-30] Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10443-021-09882-2>
- [13] KUKA – Robots & Automation, 2020, *Automated application of adhesives and sealants to vehicle bodies*, Youtube video. [2022-07-11]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=0OwsM4TYsZ8>
- [14] HRUŠKOVÁ, Markéta., *Technologie lepení v automobilovém průmyslu*. [online]. [cit. 2022-02-07] Dostupné z: <https://adoc.pub/technologie-lepeni-v-automobilovem-prmyslu.html#:~:text=Lepen%C3%A9%20konstruk%C4%8Dn%C3%AD%20spoje%20se%20v,je%20p%C5%99edev%C5%A1%C3%ADm%20vhodn%C3%A1%20konstrukce%20spoje>
- [15] ČSN EN 1465, *Lepidla – Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav*. 10/2009
- [16] ZWICKLINE, *Static testing machines – universal testing machines for static applications*. [online] [cit. 2022-07-24] Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/products/static-materials-testing-machines/universal-testing-machines-for-static-applications/zwickiline/>
- [17] ZWICKLINE, *Impact Testers and Charpy Impact Testers*. [online] [cit. 2022-07-24] Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/products/products-for-impact-testing/>
- [18] BISON, *Bison Epoxy Metal*. [online] [cit. 2022-07-24] Dostupné z: [bison.net/en/product.6305443](https://www.bison.net/en/product.6305443)
- [19] LOCTITE, *LOCTITE EA 3450*. [online] [cit. 2022-07-24] Dostupné z: <http://tds.henkel.com/tds5/Studio/ShowPDF/243%20NEW-EN?pid=EA%203450&format=MTR&subformat=REAC&language=EN&plant=WERCS>
- [20] UHUBOSTIK, *UHU PLUS ENDFEST 2K-EPOXY*. [online] [cit. 2022-07-24] Dostupné z: <https://www.uhubostik.it/images/uploads/uhu/st-D5344.pdf>
- [21] ČSN ISO 10365, *Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. 8/2022
- [22] MATMATCH, *EN 10025-2 Grade S235J2C normalized or normalized formed (+N)*. [online] [cit. 2022-07-24] Dostupné z: <https://matmatch.com/materials/minfm94186-en-10025-grade-s235j2c-normalized-or-normalized-formed-n->

- [23] ČSN EN 10025-2, *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí – Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované Konstrukční oceli*. 11/2020
- [24] ČVUT – FAKULTA STAVEBNÍ, EC, *Dynamická zkušebna – Vybavení dynamické zkušebny*.
[online] [cit. 2022-08-02] Dostupné z:
<http://ecentrum.fsv.cvut.cz/cz/zkusebny/dynamika.html>

Seznam tabulek

Tabulka 1. Nejčastěji používané reaktoplastická lepidla [9]	16
Tabulka 2. Nejčastěji používaná termoplastická lepidla [9]	18
Tabulka 3. Nejčastěji používané elastomerická lepidla [9]	20
Tabulka 4. Nejčastěji používané polymerní směsi lepidel [9]	21
Tabulka 5. Příklady rozdílného použití povrchové úpravy kovových materiálů [5]	24
Tabulka 6. Báze lepidel, charakter lepeného spoje, aplikace [14]	30
Tabulka 7. Označení typů porušení dle ČSN ISO 10365 [21]	41
Tabulka 8. Vlastnosti materiálu [22]	43
Tabulka 9. Chemické složení [22]	44
Tabulka 10. Odolnost vůči chemikáliím [19]	46
Tabulka 11. Naměřené a vypočtené hodnoty pro lepidlo Bison	53
Tabulka 12. Poruchy spoje pro vzorky lepené lepidlem Bison	55
Tabulka 13. Naměřené a vypočtené hodnoty pro lepidlo Loctite	57
Tabulka 14. Poruchy spoje pro vzorky lepené lepidlem Loctite	58
Tabulka 15. Naměřené a vypočtené hodnoty pro lepidlo UHU	60
Tabulka 16. Poruchy spoje pro vzorky lepené lepidlem UHU	62
Tabulka 17. Naměřené a vypočtené hodnoty pro vzorky se zdrsňným povrchem	63

Tabulka 18. Poruchy spoje pro vzorky se zdrsňným povrchem	63
---	----

Seznam obrázků

Obrázek 1. Struktura lepeného spoje; upraveno z [3]	12
Obrázek 2. Příklady kohézních a adhezních chyb spoje; upraveno z [4]	14
Obrázek 3. Příklady špatné (horní) a dobré (spodní) smáčivosti; upraveno z [4]	15
Obrázek 4. Smáčivost podle úhlu smáčení [6].....	15
Obrázek 5. Typy namáhání lepených spojů; upraveno z [4]	26
Obrázek 6. Příklady konstrukčního provedení spojů; upraveno z [11]	27
Obrázek 7. Deformace způsobené zatížením; upraveno z [4]	27
Obrázek 8. Vlnitý překrývaný spoj; upraveno z [11]	28
Obrázek 9. Příklady konstrukčního provedení koutových spojů [5]	28
Obrázek 10. Mnoho letadlových částí je lepeno vysoce výkonnými lepidly [10].....	29
Obrázek 11. Konstrukční tvar typického sendvičového T-spoje letadla s voštinovým jádrem; upraveno z [12]	30
Obrázek 12. Použití lepidel ve stavbě karoserie [14].....	31
Obrázek 13. Štětec upevněný na robotovi [13].....	32
Obrázek 14. Příklady aplikací pomocí injekční stříkačky [10].....	32
Obrázek 15. Vytlačovací pistole [10].....	33
Obrázek 16. Loxeal Engineering Adhesives [foto autora]	33
Obrázek 17. Ruční stříkání [10].....	34
Obrázek 18. Válec pro aplikaci nataveného lepidla [10].....	34
Obrázek 19. Příklady ultrazvukových zařízení pro kontrolu spoje [4]	37
Obrázek 20. Vzorek pro zkoušení pevnosti ve smyku podle ČSN EN 1465 (66 8510) [15]	38
Obrázek 21. Trhací stroj [16]	38
Obrázek 22. Vzorek pro zkoušení lámavosti podle ČSN 66 8511 [1].....	39
Obrázek 23. Modelová řada univerzálních zkušebních zařízení zwickLine (Z0.5, Z2.5, Z5.0) [16]	39
Obrázek 24. Vzorek pro T-zkoušku v odlupování [1]	40
Obrázek 25. 90°zkouška odlupování na zařízení zwickiLine [16]	40
Obrázek 26. Rázová zkouška [17]	41

Obrázek 27. Plech pro vzorky [foto autora]	44
Obrázek 28. Trumpf True laser 3030 [foto autora]	45
Obrázek 29. Lepidlo Bison Epoxy Metal [foto autora].....	45
Obrázek 30. Lepidlo Loctite EA 3450	46
Obrázek 31. Lepidlo UHU PLUS ENDFEST 2K-EPOXY [foto autora]	47
Obrázek 32. Odmašťování povrchu [foto autora]	48
Obrázek 33. Namíchané lepidlo Loctite [foto autora]	48
Obrázek 34. Nanášení lepidla na vzorek [foto autora]	49
Obrázek 35. Stažení plechů k sobě [foto autora]	49
Obrázek 36. Vytvrzování vzorků v digestoři [foto autora]	50
Obrázek 37. Spoj po vytvrzení [foto autora]	50
Obrázek 38. Vzorky se zdrsňným povrchem [foto autora]	51
Obrázek 39. Zatěžovací stroj INOVA ZUZ 200 [foto autora]	51
Obrázek 40. Vzorky B1-B7 před přetrhnutím [foto autora]	53
Obrázek 41. Porovnání smykového napětí vzorků B1-B7	54
Obrázek 42. Vzorky B1-B7 po přetrhnutí [foto autora]	54
Obrázek 43. Porušení spoje B1 a B7 [foto autora]	55
Obrázek 44. Zatěžovací stroj se vzorkem [foto autora]	56
Obrázek 45. Vzorky L1-L7 před přetrhnutím [foto autora]	56
Obrázek 46. Porovnání smykových napětí vzorků L1-L7.....	57
Obrázek 47. Vzorky L1-L7 po přetrhnutí [foto autora]	58
Obrázek 48. Porušení spoje L1 a L5 [foto autora]	59
Obrázek 49. Vzorky U1-U7 před přetrhnutím [foto autora]	59
Obrázek 50. Porovnání smykových napětí vzorků U1-U7	60
Obrázek 51. Vzorky U1-U7 po přetrhnutí [foto autora]	61
Obrázek 52. Porušení spojů U4 a U2 [foto autora]	61
Obrázek 53. Vzorky se zdrsňným povrchem před přetrhnutím [foto autora]	62
Obrázek 54. Vzorky se zrsňným povrchem po přetrhnutí [foto autora]	63