



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Předúpravy povrchů hliníkových lepených spojů

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

AUTOR: Tomáš Stránský

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Jaroslav Červený, Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: B 2342 Teoretický základ strojního inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha

2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Stránský** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **501284**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Teoretický základ strojírenství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Předúpravy povrchů hliníkových lepených spojů

Název bakalářské práce anglicky:

Surface pretreatment of aluminum glued joints

Pokyny pro vypracování:

- problematika lepení kovových spojů
- problematika vhodných předúprav povrchu pro lepené spoje ze slitin hliníků
- zkoušky lepených spojů
- provedení lepeného spoje na předem připravených vzorcích
- vyhodnocení destruktivních zkoušek lepených vzorků

Seznam doporučené literatury:

Kreibich, V., Teorie a technologie povrchových úprav. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01472-X
Peterka, J.: Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. SNTL Praha 1980.
Müller, M. – Brožek, M.: Technologie lepení. Tématický magazín, Svařování – dělení – spojování materiálů, TM vydavatelství, Praha 2/2004 s. 56-57, ISSN 1212 – 4044.
Hisem, P. – Elisová, L.: Základy technologie lepení. Tématický magazín, Lepidla - tmely - PU pěny - lepicí pásy v praxi, TM vydavatelství, Praha 1/2003, s. 2-3, ISSN 1212 - 4044
ČSN ISO 10365. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje. Praha: Český normalizační institut, 1995.
DIN 6701 - Lepení kolejových vozidel a jejich dílů

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jaroslav Červený, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání bakalářské práce: **11.08.2023**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2023**

Ing. Jaroslav Červený, 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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jaroslava Červeného, 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 rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jaroslavu Červenému Ph.D., za vedení a odbornou pomoc s vypracováním mé bakalářské práce a panu Ing. Vítu Novákovi za pomoc při realizaci smykové zkoušky. Dále bych rád poděkoval společnostem, které umožnili bezplatně vykonat dané předúpravy povrchů pro experimentální část, a to konkrétně: LASCAM systems s.r.o, LONTECH-surface treatment s.r.o, Alkion service s.r.o.



Anotace

Bakalářská práce je zaměřená na měření pevnostních vlastností lepených spojů s různými předúpravami povrchu. Pro experiment bylo vybráno pět různých předúprav povrchu. Pro vytvoření všech lepených spojů bylo použito lepidlo 3M™ Scotch-Weld™ DP8625NS, aby bylo možné posoudit vliv předúpravy povrchu na pevnost lepeného spoje. Jako předúpravy stykových ploch pro lepený spoj byly vybrány tyto předúpravy: broušení s odmaštěním izopropylalkoholem, moření v 10 % kyselině chlorovodíkové, plazma, laser, tryskání suchým ledem. V experimentální části jsou testovány přeplátované spoje s rozměry styčné plochy 30x30 mm. Po provedení předúpravy povrchu je vždy otestována povrchová energie očištěné plochy. Vytvořené spoje byly testovány smykovou zkouškou a následně byly vyhodnoceny pevnosti jednotlivých spojů.

Klíčová slova: lepení, lepené spoje, předúpravy povrchu při lepení, lepidla, rozdělení lepidel, pevnost lepených spojů

Název diplomové práce: Předúpravy povrchů hliníkových lepených spojů

Autor práce: Tomáš Stránský

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Červený, Ph.D.

Konzultant: Ing. Vít Novák

Akademický rok: 2022/2023

Vysoká škola: ČVUT v Praze, Fakulta strojní

Ústav: 12133 – Ústav strojírenské technologie

Vedoucí ústavu: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.

Rozsah práce: 79 stránek, 8 tabulek, 50 obrázků

Annotation

This bachelor thesis is focused on measuring strength properties of glue joints with use of different surface pretreatment. Five different surface pretreatments were selected for the experiment. For all bonded joints was used adhesive 3M™ Scotch-Weld™ DP8625NS to assess the effect of surface pretreatment on the strenght of the bond. The selected pretreatments for the bonded joint surfaces were: grinding with degreasing using isopropylalcohol, immersion in 10% hydrochloric acid, plasma treatment, laser treatment, dry ice blasting. In the experiment, overlapped joints with a contact surface area of 30x30 mm were tested. After each surface pretreatment, the surface energy of the cleaned surface was tested. Glue joints were tested using shear test and the strenght of each joint was subsequently evaluated.

Keywords: gluing, surface pretreatments for glue joints, adhesives, strength of glue joints

Title of the final thesis: Surface pretreatment of aluminium glued joints
Author: Tomáš Stránský
Supervisor: Ing. Jaroslav Červený, Ph.D.
Consultant: Ing. Vít Novák
Academic year: 2022/2023
University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department: 12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department: doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
Extent: 79 pages, 8 tables, 50 pictures

Obsah

1. ÚVOD	14
1.1 Cíle práce.....	15
2. Lepené spoje.....	16
2.1 Historie.....	16
2.2 Adheze, koheze a smáčivost	16
2.3 Výhody a nevýhody lepených spojů	18
2.3.1 Výhody lepených spojů	18
2.3.2 Nevýhody lepených spojů	18
2.4 Konstrukce lepených spojů	19
2.5 Zkoušky lepených spojů	20
2.5.1 Nedestruktivní zkoušky	20
2.5.2 Destruktivní zkoušky	22
2.5.3 Zkouška pevnosti ve smyku dle normy ČSN EN 1465.....	22
2.5.4 Zkouška lámavosti dle ČSN 66 8511	23
2.5.5 Pevnost v odlupování dle ČSN EN ISO 11339.....	23
2.5.6 Zkouška rázové pevnosti dle ČSN 66 8512	24
2.6 Poruchy lepených spojů	25
2.7 Kontrola čistoty povrchu	25
2.7.1 Kontrola pomocí inkoustu	26
2.7.2 Kontrola pomocí postřikové metody.....	27
2.7.3 Kontrola pomocí fluorescence	27
3. Lepidla.....	28
3.1 Rozdělení lepidel	28
3.2 Rozdělení podle chemického složení.....	28
3.2.1 Epoxidová lepidla.....	29

3.2.2	Akrylátová lepidla.....	30
3.2.3	Polyuretanová lepidla	30
3.2.4	Kyanoakrylátová lepidla.....	30
3.2.5	Silikonová lepidla	31
3.3	Rozdělení podle fyzikální podstaty	31
3.3.1	Lepidla kapalná	31
3.3.2	Plastická lepidla.....	31
3.3.3	Tuhá lepidla.....	32
3.4	Rozdělení podle principu vytvrzování.....	32
3.5	Aplikace lepidel.....	32
3.5.1	Ruční aplikace.....	32
3.5.2	Nanášení lepidla pomocí přípravků.....	33
3.5.3	Aplikace lepidla za horka	33
4.	Předúpravy povrchů před lepením	34
4.1	Mechanické.....	34
4.1.1	Broušení	34
4.1.2	Kartáčování	35
4.1.3	Tryskání	35
4.1.4	Abraziva.....	37
4.2	Chemické předúpravy povrchů	39
4.2.1	Moření	39
4.2.2	Chromátování.....	40
4.2.3	Fosfátování.....	40
4.2.4	Primerování.....	40
4.2.5	Anodická oxidace hliníku (eloxování).....	41
4.2.6	Chemical vapor deposition (CVD).....	42
4.3	Fyzikální.....	42

4.3.1	Plazmový výboj	42
4.3.2	Laser	43
4.3.3	Pyrosil.....	44
4.3.4	Physical vapour deposition (PVD).....	44
5.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	45
5.1	Vlastnosti lepených vzorků.....	45
5.2	Technologický postup výroby vzorků lepených spojů	45
5.3	Povrchové předúpravy povrchu vzorku před lepením	46
5.3.1	Broušení s odmaštěním.....	46
5.3.2	Moření	47
5.3.3	Plazma	48
5.3.4	Laser	50
5.3.5	Tryskání suchým ledem.....	52
5.4	Přípravek na lepení.....	53
5.4.1	Označení vzorků	54
5.4.2	Postup založení vzorku do přípravku na lepení	54
5.5	Použité lepidlo.....	56
5.6	Zkouška smáčivosti povrchu	57
5.7	Smyková zkouška	58
5.7.1	Průběh smykové zkoušky.....	59
5.7.2	Průběh přetržení.....	60
5.8	Výsledky tahové zkoušky	60
5.9	Hodnocení porušení lepeného spoje.....	61
5.9.1	Broušení s odmaštěním.....	62
5.9.2	Moření	63
5.9.3	Plazma	63
5.9.4	Laser	64

5.9.5	Tryskání suchým ledem	65
5.10	Diskuze výsledků	65
6.	Závěr	68
	Seznam použité literatury	71
	Seznam obrázků	76
	Seznam tabulek	78
	Seznam grafů	79
	Seznam příloh	79

Seznam zkratek

zkratka	vysvětlení
Př. n. l.	Před naším letopočtem
USA	Spojené státy americké
%	Procento
MPa	Megapascal
N	Newton
ČSN	Česká státní norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
mm	Milimetr
μm	Mikrometr
nm	Nanometr
mm ²	Milimetry čtverečné
°C	Stupně celsia
°	Stupně
N.mm ⁻¹	Newton na milimetr
N.mm ⁻²	Newton na milimetr čtverečný
J.cm ⁻¹	Joule na centimetr
Ns.m ⁻²	Newton sekunda na metr čtverečný
CF	Kohezní porušení
AF	Adhezní porušení
SCF	Speciálně kohezní porušení
SF	Porucha substrátu
DF	Delaminační porucha
ACFP	Adhezně-kohezní porušení
Al ₂ O ₃	Oxid hlinitý
AlMg ₃	Slitina hliníku a hořčíku
min	Minuty
mA	Miliampér
CVD	Chemical vapor deposition
PVD	Physical vapor deposition
mN.m ⁻¹	Milnewton na metr

kHz	Kilohertz
A	Ampér
V	Volt
W	Watt
mJ	Milijoule
ms ⁻¹	Metr za sekundu
m ³ .min ⁻¹	Metr krychlový za minutu
EN AW 5754	Označení slitiny hliníku
H22	Tvrдост

Seznam použité symboliky

symbol	[jednotka]	vysvětlení
t	[°C]	Teplota
p	[Pa]	Tlak
τ	[MPa]	Smyková pevnost při namáhání tahem
F_{\max}	[N]	Maximální tahová síla
S	[mm ²]	Plocha lepeného spoje
σ_{sab}	[N.mm ⁻¹]	Střední pevnost v odlupování
F_S	[N]	Průměrná síla
b	[mm ²]	Plocha lepeného spoje
R_m	[MPa]	Pevnosti v tahu
R_p	[MPa]	Mez kluzu
A	[%]	Tažnost
E	[MPa]	Modul pružnosti
σ_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
η	[Ns.m ⁻²]	Viskozita
P	[W]	Výkon
f	[kHz]	Frekvence

1. ÚVOD

V dnešní době je při výrobě silničních a kolejových vozidel, letadel a různých konstrukcí kladen stále větší důraz na efektivitu a nízkou hmotnost. Z tohoto důvodu je zapotřebí hledat nové způsoby, jakými lze hmotnost ušetřit a zefektivnit možnosti spojení materiálů.

Lepené spoje se začaly využívat již v 90. letech minulého století, ovšem převážně v rámci hybridních spojů, tedy ve spojení s dalšími metodami spojování materiálů pro lepší pevnost a kvalitu spoje. Dnes se již přechází i na spoje čistě lepené. Při spojení lepením nedochází k destrukci materiálů a spoje dosahují podobných pevnostních hodnot jako při použití běžných metod jako je svařování, nýtování, šroubové spoje apod.

Bakalářské práce pojednává o vlivu předúprav povrchu na výslednou kvalitu a pevnost lepeného spoje. Teoretická část se zabývá lepenými spoji, předúpravami povrchu používaných pro hliník a zkouškami lepených spojů.

V praktické části bylo zvoleno pět různých předúprav povrchu, které byly následně porovnávány na základě zkoušky smáčivosti povrchu a smykové zkoušky na trhacím stroji.

1.1 Cíle práce

- Problematika lepení kovových spojů
- Problematika vhodných předúprav povrchu pro lepené spoje ze slitin hliníku
- Zkoušky lepených spojů
- Provedení lepeného spoje na předem připravených vzorcích
- Vyhodnocení destruktivních zkoušek lepených vzorků

2. Lepené spoje

Lepení je proces, při kterém se mohou spojovat jak stejné, tak i různé materiály na základě působení adhezních a kohezních sil. Oproti spojování svařováním, nýtováním a šroubovými spoji je třeba zajistit poměrně velkou plochu pro spojení k dosažení podobné pevnosti výsledného spoje. Spoj mezi materiály je vytvořen za pomoci lepidla a vzniká tak nerozebíratelný spoj. Pevnost spoje je ovlivněna mnoha faktory jako je například adheze mezi lepidlem a materiálem, koheze lepidla nebo smáčivost povrchu. Pro vyšší pevnost spoje je vhodné, aby hlavní silový účinek na spoj byl v rovině lepené plochy a spoj byl primárně namáhán smykovým napětím. [37]

2.1 Historie

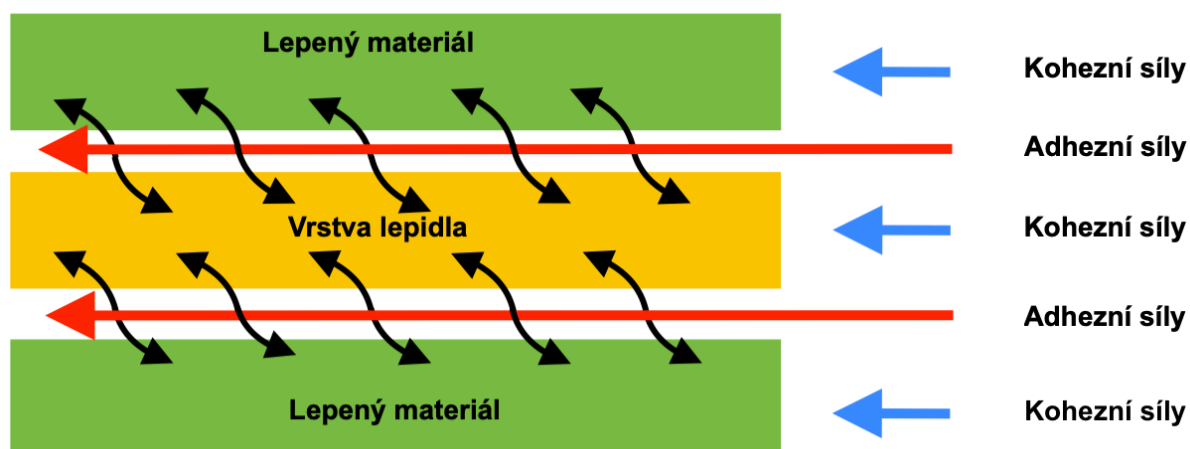
Lepené spoje se kolem nás nacházejí již od samého počátku evoluce člověka, pouze v jiných formách, než si je typicky představíme. Stačí se rozhlédnout kolem nás. V přírodě se nachází mnoho příkladů odkud se člověk mohl inspirovat pro používání adhezních látek. Jsou to například pavučiny, pryskyřice ze stromů, včelí med, mušle přilepené na korálu atd. První zmínky o využití technologie lepení člověkem jsou z roku 200 000 př. n. l. Samotný průmysl se pak začal rozvíjet v 19. století v USA. V minulém století se začaly vytvářet a zkoumat lepidla, která vedla k dnešním formám lepidel. První rozsáhlejší využití lepených spojů proběhlo v leteckém průmyslu okolo roku 1950. [10]

2.2 Adheze, koheze a smáčivost

Adheze je zjednodušeně řečeno schopnost dvou materiálu k sobě přilnout pomocí působení fyzikálních a chemických sil. Adhezní síly lze rozdělit na mechanické (uchycení v pórech a nerovnostech materiálu) a specifické adhezní síly (chemické vazby, difúzní síly, van der Waalsovy síly, valenční adhezní síly, apod.). Čím vyšší je adhezní síla tím pevnější je vazba mezi materiálem a lepidlem.

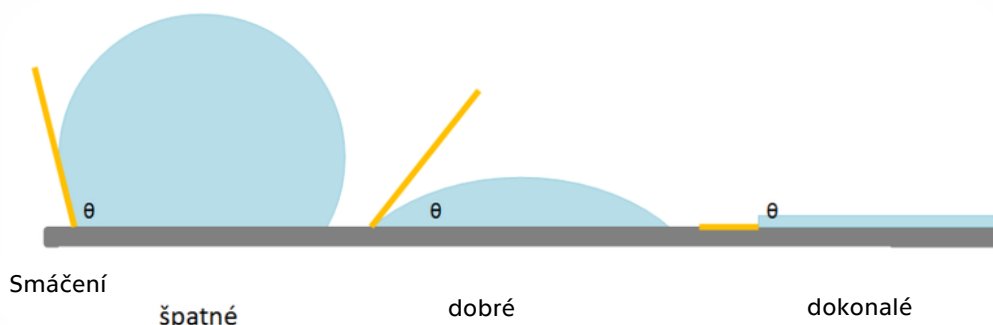
Koheze definuje soudružnost kapaliny, tedy schopnost lepidla držet při sobě. Kohezní síly jsou vnitřní síly mezi molekulami a valenčními vazbami v látce.

Velikost koheze je definována kohezní energií, která udává velikost energie potřebné k překonání mezimolekulárních a valenčních sil. (Obr. 1) [22], [37]



Obr. 1 Kohezní a adhezní síly

Smáčivost je vlastnost kapaliny přilnout k povrchu pevné látky. Při nanášení kapaliny na povrch by se kapalina ideálně měla roztéct po povrchu pro získání těsného kontaktu mezi kapalinou a povrchem. V případě špatné smáčivosti bude kapalina tvořit kapičky. Pro lepení je tedy zapotřebí smáčivého povrchu, aby bylo zajištěno rovnoměrné rozprostření lepidla po povrchu a vytvoření adhezních vazeb. Smáčivost závisí na polaritě a povrchové energii pevné látky. Žluté čáry na obrázku prezentují kontaktní úhel mezi kapkou a povrchem. Pokud je úhel větší než-li 90° dochází k tzv. odpudivosti. (Obr. 2) [23], [24]



Obr. 2 Smáčivost povrchu [24]

2.3 Výhody a nevýhody lepených spojů

2.3.1 Výhody lepených spojů

- **Spojení různých materiálů** – Lze spojovat materiály různých vlastností, popřípadě materiály, které například nelze svařit kvůli jejich vlastnostem.
- **Spojování materiálu bez ohledu na jejich tloušťku.**
- **Proces probíhá za nízkých teplot** – Proces lepení probíhá za teplot do 200 °C (záleží na typu lepidla), proto nenastává riziko změn vlastností materiálu na základě ohřevu.
- **Dobré doplňkové funkce (tlumení, vodivost, izolace)** – Díky lepidlům ve spoji dochází k dobrému utěsnění spoje a tím i těsnosti výsledného výrobku. Při vhodné volbě lepidla lze dosáhnout i tlumících vlastností spoje či v případě potřeby, elektrické vodivosti spoje.
- **Dá se kombinovat s jinými metodami** – Pro získání lepších pevnostních vlastností spoje se dají vytvořit hybridní lepené spoje, což je spojení metody lepením s dalšími spojovacími metodami jako je např. nýtování, šroubové spoje nebo bodové svařování.
- **Možnost automatizace** – V dnešní době je snaha všechny výrobní procesy automatizovat, z důvodu vyšší rychlosti, nižších nákladů a možnosti nepřerušovat výrobu.
- **Úspora hmotnosti** – Lepidla jsou lehká, proto lze výrazně snížit hmotnost oproti spojovacím metodám jako je svařování nebo šroubové spoje.

2.3.2 Nevýhody lepených spojů

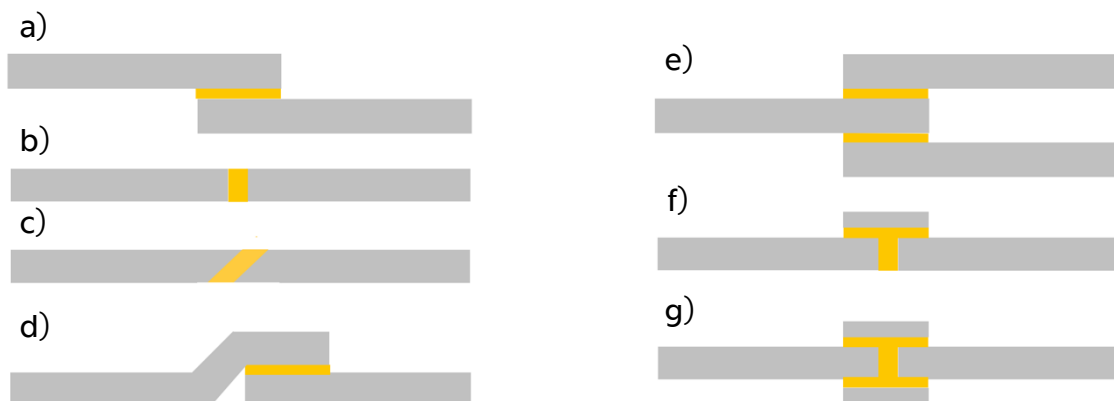
- **Nízká počáteční pevnost** – Je třeba vyčkat na vytvrzení lepidla, než získá 100 % pevnost. V technickém listu lepidla bývá uvedena i nutná doba vytvrzení pro manipulační pevnost, což je pevnost, při které je lepidlo vytvrzeno jen z části, ale již nehrozí poškození spoje při běžné manipulaci. Tomuto problému lze předejít hybridním spojem, kdy fixace spoje je zajištěna druhou spojovací metodou (např. nýty).
- **Předúprava povrchu** – Lepené plochy vždy vyžadují předúpravu povrchu, a to minimálně formou odmaštění pomocí hadříku nebo ubrousku. Dále se dají použít i pokročilejší a nákladnější metody jako je například

předúprava povrchu laserem, plazmou, pyrosilem, mořením v kyselině, anodickou oxidací apod.

- **Vysoké požadavky na čistotu prostředí a výrobní postup** – Je třeba zajistit co nejvíce čisté prostředí, aby nedošlo ke kontaminaci slepované plochy nebo lepidla. Je nutné zajistit přesný výrobní postup, aby bylo vždy dosaženo kvalitního spoje.
- **Omezená pevnost za tepla** – Při vyšších teplotách je riziko, že vlivem tepla lepidlo začne téct a tím ztratí své pevnostní vlastnosti.
- **Složitá demontáž** – Vzhledem k tomu, že jsou lepené spoje trvalé, je komplikované spoje demontovat případně rozebírat.
- **Trvalý spoj, náročné opravy** – Jedná se o nerozebíratelný spoj, proto není možné dělat pozdější úpravy jako např. u šroubových spojů. Při narušení spoje je oprava velmi komplikovaná a nákladná, někdy i nemožná.
- **Zatím neexistují spolehlivé nedestruktivní zkoušky lepených spojů**
- **Lepidla mají omezenou trvanlivost** – Při dlouhodobém skladování může dojít k zatuhnutí lepidla a tím pádem k znehodnocení. Zároveň je třeba lepidla skladovat v tepelném rozmezí, které stanoví výrobce.

2.4 Konstrukce lepených spojů

Lepené spoje je třeba navrhovat tak, aby byly co nejméně namáhané na krut a odlupování, jelikož na tyto dva druhy namáhání jsou lepené spoje citlivé. Spoje je třeba vytvářet co nejméně členité a předcházet dodatečným úpravám. V praxi se nejčastěji používají spoje přeplátované, jelikož většinou vykazují lepší mechanické vlastnosti než spoje tupé (Obr. 3). Přeplátované spoje mají větší spojovací plochu než tupé spoje, proto většinou dosahují vyšších pevností. Využívají se primárně v konstrukcích, které jsou namáhané na smyk a tlak. [8], [18]



Obr. 3 Druhy lepených spojů: a) Překlátovaný spoj, b) Tupý spoj, c) spoj zkosený tupý, d) spoj lemový, e) spoj dvojitě překlátovaný, f) spoj s příložkou, g) spoj s dvěma příložkami

2.5 Zkoušky lepených spojů

V praxi se pro kontrolu spojů využívají destruktivní nebo nedestruktivní zkoušky. Nedestruktivní zkoušky jsou vhodné pro kontrolu lepených spojů, jelikož neporuší lepený spoj. Na druhé straně neposkytnou tolik informací o kvalitě spoje jako destruktivní zkouška.

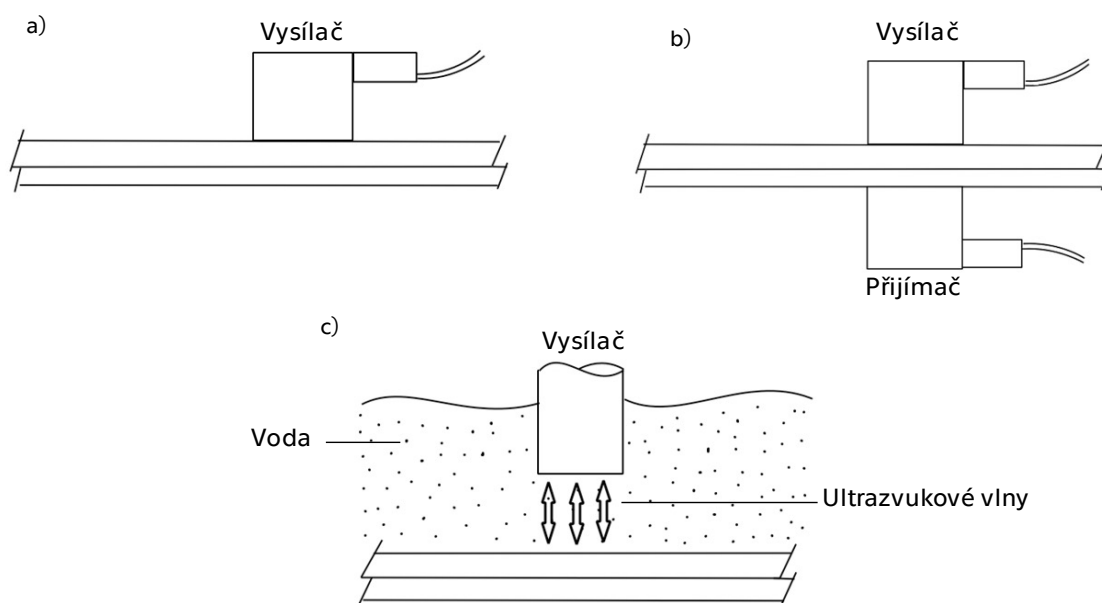
2.5.1 Nedestruktivní zkoušky

Nedestruktivní zkoušky jsou metody testování, které nezpůsobí poškození lepeného spoje. Mezi základní metody nedestruktivních zkoušek patří vizuální zkouška, případně za pomoci lupy, test pomocí zvuku a kapilární zkouška. Nákladnější metody nedestruktivních zkoušek je zkouška ultrazvukem, rentgenem nebo přísavným zvonem.

- **Vizuální zkouška** – Jednoduchá metoda, při které se provede vizuální kontrola spoje. Zkušené oko může odhalit již na první pohled špatně provedený lepený spoj. [12]
- **Zvukový test** – Jedná se o jednu z prvně používaných nedestruktivních zkoušek. Spočívá v klepání například kladívkem na materiál v místě spoje a vyhodnocování vznikajícího zvuku. Rozdíly v tónu zvuku indikují

nedostatky lepeného spoje jako je nedostatečné vytvrzení lepidla, dutiny, trhliny apod. [12]

- **Kapilární zkouška** – Při kapilární zkoušce je na spoj nanесena vrstva kapaliny a pozoruje se, zda se kapalina vsakuje do spoje či ne. Pokud se kapalina vsákne znamená to, že došlo ke špatnému spojení materiálu a lepidla. [19]
- **Zkouška ultrazvukem** – V dnešní době se jedná o nejvíce používanou metodu. Do materiálu jsou vysílány ultrazvukové vlny, které jsou následně přijímány. Pokud se ve spoji nachází nějaké trhliny, vzduchové bubliny apod. naruší se průchod vln skrz materiál, což je rozpoznáno přijímačem a následně se vyhodnocují poruchy spoje. Při kontrole se používají tři základní metody. U první metody je signál vysílán i přijímán na jedné straně spoje. Druhá metoda je obdobná jako první, ovšem ultrazvukový signál je vysílán na jedné straně a na straně druhé přijímán. V třetím případě je spoj vložen do vodní lázně. Voda slouží jako vazební mechanismus pro ultrazvukový signál. (Obr. 4) [12]



Obr. 4 Metody zkoušky ultrazvukem, a) signál je vysílán i přijímán z jedné strany spoje, b) signál je vysílán z jedné strany a přijímán ze strany druhé, c) lepený spoj je vložen do vodní lázně

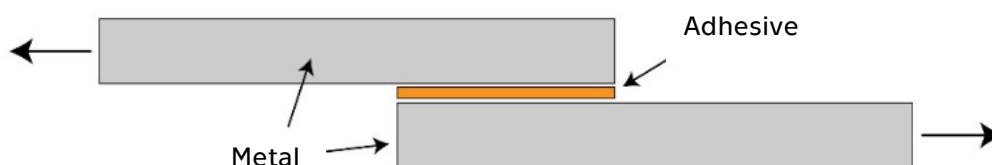
- **Zkouška rentgenem** – Zkouška rentgenem je nákladnější než ultrazvukem a vyžaduje zkušenější personál. Spoj je prozařován rentgenovým paprskem a následně jsou vyhodnocovány různé nespojitosti v lepeném spoji. Pro použití zkoušky rentgenem je třeba použít lepidla, která obsahují částice kovu. [12]
- **Zkouška přísavným zvonem** – Přísavný zvon je polokoule ze skla nebo transparentního plastu s těsnicí pryží na dosedací ploše. Zvon je umístěn přes spoj, který je postříkán předurčenou kapalinou. Následně je ze zvonu odsát vzduch pro vytvoření podtlaku ve zvonu (40-50 kPa). Při netěsnosti spoje začnou ze spoje vycházet bublinky. [19]

2.5.2 Destruktivní zkoušky

Při destruktivních zkouškách dochází k porušení spoje pro zjištění jeho pevnosti a kvality. Destruktivní zkoušky lze dále dělit na statické a dynamické.

2.5.3 Zkouška pevnosti ve smyku dle normy ČSN EN 1465

Zkouška pevnosti ve smyku spočívá v namáhání spoje na smyk, tedy ve směru podélné osy, až do porušení materiálu. Zkouška se provádí na univerzálním trhacím stroji a výsledná pevnost ve smyku se udává v MPa. Tato metoda je využívána především z důvodu nízké náročnosti. Na obrázku níže je zobrazeno namáhání při testování vzorku na smyk. Šipky znázorňují působící síly na spoj. (Obr. 5) [12], [29]



Obr. 5 Zkouška pevnosti ve smyku [30]

Výsledná pevnost ve smyku se vypočítá z rovnice (1.)

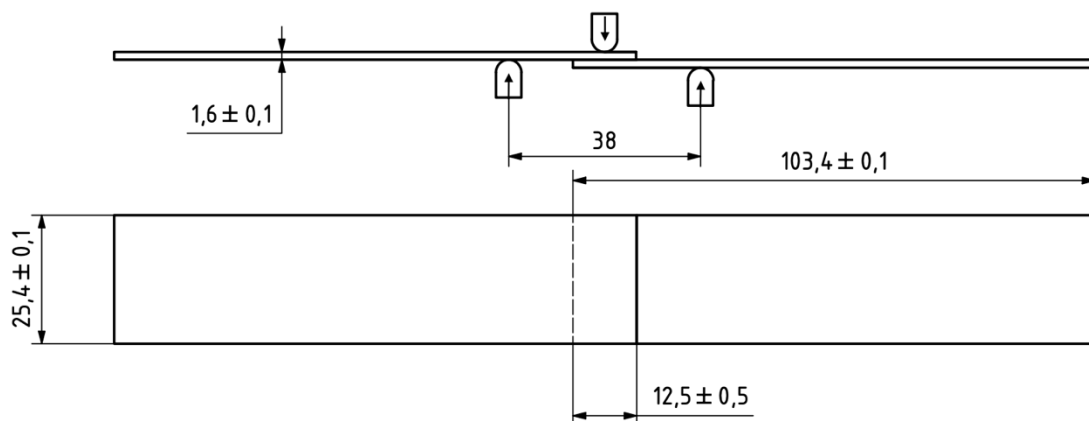
$$\tau = \frac{F_{max}}{S} \quad (1.)$$

Kde:

- τ – Smyková pevnost při namáhání tahem [MPa]
- F_{max} – Maximální tahová síla [N]
- S – Plocha lepeného spoje [mm²]

2.5.4 Zkouška lámavosti dle ČSN 66 8511

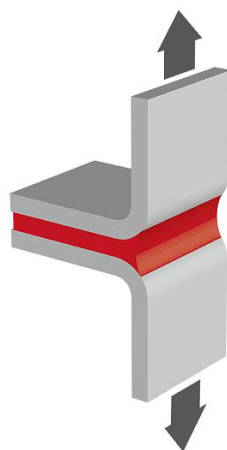
Při zkoušení lámavosti je spoj namáhán statickým ohybem do přerušení spoje. Výsledná hodnota zatížení se udává v newtonech. (Obr. 6) [29]



Obr. 6 Umístění vzorku při zkoušce lámavosti

2.5.5 Pevnost v odlupování dle ČSN EN ISO 11339

Díky dobře navrženému spoji lze zlepšit pevnost spoje v odlupování, ovšem nelze zaručit, že všechny síly, které odlupování způsobují, budou eliminovány. Lepené spoje mívají nejnižší pevnost právě při namáhání na odlupování, proto je tato zkouška velice důležitá. Při samotné zkoušce je nejprve vzorek upraven do tvaru, ve kterém je možné jej namáhat na odlupování. Nejčastěji se testuje namáháním kolmo na lepený spoj, tedy pod úhlem 90° (Obr. 7). Destičky jsou od sebe následně odtrhávány a měří se síla potřebná pro oddělení slepených destiček. Výsledná pevnost v odlupu se získá ze vztahu (2.). [12], [29]



Obr. 7 Testování pevnosti v odlupování [31]

$$\sigma_{sab} = \frac{F_s}{b} \quad (2.)$$

Kde:

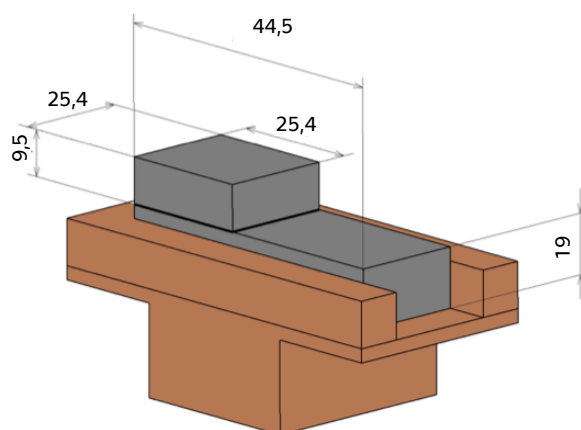
σ_{sab} – Střední pevnost v odlupování [$\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$]

F_s – Průměrná síla [N]

b – Plocha lepeného spoje [mm^2]

2.5.6 Zkouška rázové pevnosti dle ČSN 66 8512

Zkoušení lepených spojů rázovým tlakem je důležitou součástí testování, jelikož polymerní materiály (lepidla) jsou velice náchylná na porušení právě při náhlém zatížení velkou silou. Samotná zkouška spočívá v namáhání spoje rázovým tlakem ve směru podélné osy až do porušení vzorku (Obr. 8). Rázová pevnost spoje se udává v [$\text{J}\cdot\text{cm}^{-1}$]. [12], [29]



Obr. 8 Zkušební vzorek pro zkoušku rázové pevnosti [32]

2.6 Poruchy lepených spojů

Po provedení destruktivních zkoušek se posuzuje typ selhání lepeného spoje. Většinou se plocha lepeného spoje rozdělí na několik sektorů a v každém sektoru se vyhodnocuje typ porušení. Výsledkem je pak průměr poruch ze všech sektorů.

V praxi se nejčastěji setkáváme se třemi druhy porušení, kterými jsou kohezní porušení (CF), adhezní porušení (AF) a speciálně kohezní porušení (SCF). Při kohezním porušení dojde k selhání spoje v lepidle, při adhezním se lepidlo odloupne od adherendu. Při speciálně kohezním porušení dojde ke kombinaci kohezní a adhezní poruchy. Níže je uvedena tabulka různých druhů poruch lepených spojů dle ČSN ISO 10365. [19]

Tabulka 1 Označení typů porušení [33]

Místo porušení	Typ porušení	Označení poruchy
Základní materiál	Porušení 1 nebo 2 adherendů	SF
	Porušení 1 adherendu	CSF
	Delaminační porušení	DF
Lepidlo	Kohezní porušení	CF
	Speciální kohezní porušení	SCF
	Adhezní porušení	AF
	Kombinace adhezního a kohezního porušení	ACFP

2.7 Kontrola čistoty povrchu

Po provedení předúpravy povrchu je vhodné ověřit čistotu povrchu, jelikož se jedná o aspekt, který může zásadně ovlivnit pevnost výsledného spoje. Dělí se na přímé a nepřímé metody, kdy přímou metodou se míra odmaštění zjišťuje přímo ze součásti, zatímco u metody nepřímé je kontrola provedena pomocí

rozpouštědla. Rozpouštědlo z povrchu materiálu vytáhne mastnotu a následně se analyzuje míra znečištění. Základní kontrolou je vizuální kontrola, kdy se vizuálně kontrolují lesklá místa na povrchu, zmatnění, otisky prstu, prach apod. Nevýhodu vizuální kontroly odmaštění je, že výsledky metody mohou být ovlivněny subjektivním posouzením pracovníka. [14]

2.7.1 Kontrola pomocí inkoustu

Při kontrole pomocí inkoustu je na očištěný povrch nanesen inkoust, například fixou nebo štětičkou, a sleduje se, jak se inkoust rozprostírá po povrchu. Inkoust bude reagovat různě podle povrchové energie materiálu. Každý inkoust má různé definované hodnoty povrchové energie (Obr. 10). Pokud inkoust tvoří kapičky, znamená to, že povrchová energie materiálu je nižší než povrchová energie inkoustu. Pokud inkoust tvoří souvislou vrstvu, znamená to, že materiál má stejnou nebo vyšší povrchovou energii než inkoust (Obr. 9). [39]



Obr. 9 Testovací inkoust na vzorku. Vlevo je odmaštěný materiál (inkoust tvoří souvislou vrstvu), vpravo je mastný povrch (inkoust tvoří kapičky, není slitý)



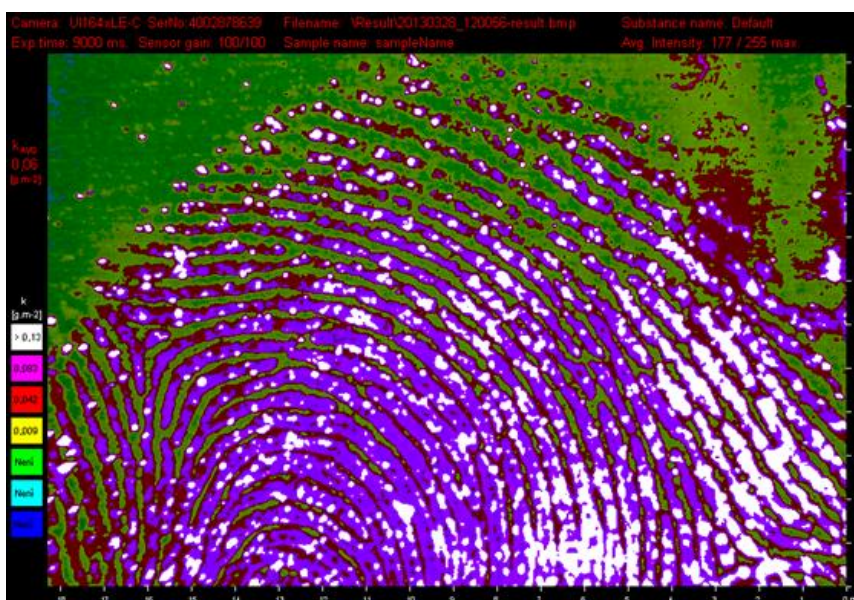
Obr. 10 Testovací fixy a inkousty Arcotest [39]

2.7.2 Kontrola pomocí postřikové metody

Tato metoda je určena pro měření nižšího stupně zamaštění na suchém kovovém povrchu. Princip spočívá v rozprašování vodního roztoku látky snižující povrchové napětí na povrch. Následně se měří doba od počátku postřiku do doby, kdy se na povrchu vytvoří souvislá vrstva vodního filmu. Tato doba je závislá na druhu znečištění a je úměrná plošné koncentraci látek způsobujících znečištění. Pokud se doba postřiku neliší o více jak 20 % od kontrolního vzorku, lze povrch považovat za čistý. [19]

2.7.3 Kontrola pomocí fluorescence

Přístrojová detekce mastných nečistot je založena na principu vyvolání luminescence kontaminujících látek, která je následně zachycena a vyhodnocena speciálním softwarem (Obr. 11). Tato metoda umožňuje detekci všech typů nečistot, které vykazují luminescenci, a to díky počtu konjugovaných dvojných vazeb a rozvětvení uhlíkatého řetězce v látkách. Přístroj dokáže rozlišit i slabší luminescenci látek s malým počtem konjugovaných dvojných vazeb a malým rozvětvením uhlíkatého řetězce. Touto metodou lze účinně detekovat mastné nečistoty, maziva a oleje se syntetickou složkou. [34]



Obr. 11 Sekvenční metoda detekce mastných nečistot, otisk lidského palce na hladkém AlMg3 plechu [34]

3. Lepidla

Lepidlo je pojivo pro spojení dvou nebo více materiálů. Většina lepidel je na bázi epoxidové pryskyřice, ale používají se například i kaučuková a polyuretanová lepidla. Pro vytvrzení lepidel se využívá buďto reakční cesta, kdy lepidlo vytvrdne na základě chemické reakce nebo fyzikální cesta, kdy v lepidle neproběhne žádná chemická reakce a vytvrdí se pouze fyzikálním procesem. [18]

Při výběru lepidla je třeba zvážit všechna kritéria a na základě toho zvolit nejvhodnější lepidlo. Neexistuje univerzální lepidlo, které by bylo schopné spojit všechny materiály se stejnou výslednou pevností. Kromě spojovaných materiálů je třeba uvážit v jakém prostředí se konstrukce bude nacházet (teplota, vlhkost, povětrnostní podmínky atd.).

3.1 Rozdělení lepidel

Rozdělení lepidel je velice komplexní, jelikož lepidla lze dělit z hlediska různých aspektů. Nejčastěji používané dělení je například na základě původu, funkce, chemického složení, fyzikálních vlastností a aplikace.

Ovšem tyto kritéria je třeba vyhodnocovat současně, jelikož ne všechny tekutá lepidla mají stejné chemické složení, pevná lepidla mohou mít jiné druhy vytvrzování atd.

3.2 Rozdělení podle chemického složení

Chemické složení je jedním z nejdůležitějších kritérií při výběru lepidla. Je třeba brát v úvahu chemické látky v lepidle, aby byly kompatibilní s lepeným materiálem. Při nevhodné volbě lepidla může být poškozen výchozí materiál nebo může vzniknout špatná vazba mezi lepidlem a materiálem a tím nekvalitní spoj.

Tabulka 2 Rozdělení lepidel podle vlastností [8]

Základní pryskyřice	Podmínky vytvrzování			Pevnost		Maximální provozní teplota	Trvanlivost ocelových spojů
	Teplota [°C]	Tlak [Pa]	Doba [min]	Smyk	Odlup		
2-složkové epoxidy	20	0	60-480	Vysoká	Nízká-střední	60 - 80	Nízká-střední
2-složkové akrylové (2.generace)	20	0	5-6	Vysoká	Střední-Vysoká	80	Vysoká
1-složkový silikon	20	0	120	Nízká	Nízká	180	Vysoká
Termolepidla	20	0	0,4-0,5	Nízká-Střední	Nízká-Střední	130	Střední
Disperzní lepidlo	20	0		Střední	Střední	100	Vysoká

3.2.1 Epoxidová lepidla

Epoxidová lepidla jsou jakostní lepidla, které jsou známé svou vysokou pevností a chemickou odolností. Převážně se jimi lepí kovy, skla a keramika. Uplatnění nachází například v průmyslové výrobě při výrobě automobilů, letadel, lodí a stavebních konstrukcí.

Hlavními složkami lepidla jsou epoxidové pryskyřice a tvrdidlo. Je třeba poměrně přesně dodržovat poměry těchto dvou složek pro získání požadované pevnosti lepidla. Po nanesení na povrch složky polymerují a vytváří tak pevnou a chemicky odolnou vrstvu. Většinou lze lepidla používat za teplot okolo 100 °C, nicméně modifikací lze zvýšit odolnost až na 260 °C.

Existuje několik druhů epoxidových lepidel, které se liší vlastnostmi a místy použití. Některé z nich jsou:

- **Dvou-složková epoxidová lepidla:** Toto je jedna z nejčastěji používaných forem epoxidového lepidla. Před aplikací je smíchána epoxidová pryskyřice s tvrdidlem a následně je směs nanesena. Vytvrzení lepidla je v řádech minut až hodin. Pro větší sériové výroby je to méně vhodná forma lepidla z důvodu potřeby míchání složek, proto se v průmyslu někdy upřednostňují lepidla vytvrzované teplem.

- **Jedno-složková epoxidová lepidla:** Mají pouze jednu složku, kterou je epoxidová pryskyřice a jsou vytvrzovány pomocí tepla. Jsou vhodnější pro sériovou výrobu.
- **Epoxidová lepidla s plniv:** Tyto lepidla obsahují různé druhy plniv, jako jsou skelná vlákna, kovové částice nebo keramické prášky. Díky plnivu se zlepšuje odolnost vůči otěru a pevnost. Využívají se například při konstrukci lodí.

Při práci s epoxidovými lepidly je třeba dbát bezpečnostních předpisů, jelikož obsahují chemikálie, které jsou při vdechování zdraví škodlivé. Ovšem při uložení v odvětraném prostoru jsou dlouho skladovatelné. [8], [9]

3.2.2 Akrylátová lepidla

Jedná se o syntetická lepidla, která jsou založena na polymerech akrylové kyseliny a jejích derivátech. Velkou výhodou akrylátových lepidel je rychlé vytvrzování na základě reakce s kovem. Dále mají vynikající adhezi na různé povrchy (plast, sklo, keramika, kov, dřevo), dobrou odolnost proti vlhkosti, korozi a UV záření. Snadno se aplikují na povrch, proto jsou velice často využívány v průmyslových aplikacích. Například v automobilovém průmyslu se využívají pro lepení čelních oken. [8]

3.2.3 Polyuretanová lepidla

Polyuretanová lepidla se vyznačují vysokou pevností v tahu a dobrou elasticitou. Jsou založena na kombinaci polyuretanové pryskyřice a tvrdidla. Často se využívají pro lepení plastů, které jsou obtížně lepitelné pomocí jiných lepidel. [8]

3.2.4 Kyanoakrylátová lepidla

Kyanoakrylátová lepidla mají rychlou dobu tuhnutí, a to v rámci vteřin až minut. Není vhodné je využívat na lepení savých povrchů. Lze s nimi lepit gumy, kovy, plasty a skla. Nejčastěji se používají pro lepení menších částí jako

jsou šperky, zubní protézy, přístrojové součástky apod. Mají vysokou odolnost proti vibracím, vysokou pevnost a elasticitu. [8]

3.2.5 Silikonová lepidla

Silikonová lepidla se nejčastěji používají k elastickému těsnění, lepení a fixaci ve stavebnictví, průmyslu a domácnostech. Mají vynikající přilnavost k řadě dobře očištěných materiálů a odolávají různým vlivům, včetně povětrnosti, vody, slabým kyselinám a zásadám a teplotám od -50°C do 180°C. Tyto kaučuky jsou využívány k lepení a těsnění skla, dilatačních spár a trhlin v koupelnách, prádelnách, kuchyních, a v elektrotechnice. [8]

3.3 Rozdělení podle fyzikální podstaty

Specifikace lepidel podle fyzikální podstaty je v podstatě rozdělení dle skupenství lepidla. Dělí se na tři základní typy: kapalná, plastická a tuhá.

3.3.1 Lepidla kapalná

Jedná se o tekutá lepidla, převážně používána pro spojování dílů s malou mezerou. Řadí se sem: [11]

- Reaktivní monomery
- Reaktivní prepolymery
- Roztoková lepidla
- Disperzní lepidla

3.3.2 Plastická lepidla

Plastická lepidla mají podobnou konzistenci jako modelovací hmota nebo jílovitá hlína. Využívají se pro lepení dílů, mezi kterými je větší mezera. Řadí se sem: [11]

- Tmely
- Kaučukové patche
- Některé typy cementů
- Pasty apod.

3.3.3 Tuhá lepidla

Jedná se o lepidla, které je třeba při aplikaci rozpustit pomocí účinku tepla, čímž jsou převedeny do plastického stavu a následně přilnou k povrchu materiálu. Řadí se sem: [11]

- Termolepidla
- Lepící folie apod.

3.4 Rozdělení podle principu vytvrzování

Dalším způsobem rozdělení lepidel je podle mechanismu vytvrzování lepidla. Ty lze rozdělit dále na fyzikálně nebo chemicky tuhnoucí lepidla. Chemické reakce mohou být aktivovány tepelně, světelně nebo přidáním jiné látky. Fyzikálně tuhnoucí lepidla jsou vytvrzována většinou vysycháním nebo odpařováním rozpouštědla. Níže jsou uvedeny základní skupiny tohoto dělení: [8]

- Vytvrzování UV zářením
- Vytvrzování vlivem zvýšené teploty
- Vytvrzování vsáknutím a odpařením vody
- Vytvrzování přidáním tavidel
- Vytvrzování okolní vlhkostí
- Vytvrzování odtěkáním rozpouštědel
- Lepidla tavná

3.5 Aplikace lepidel

Výběr typu aplikace lepidla je velice důležitá část výrobního procesu, jelikož je třeba zajistit předepsanou tloušťku nanášené vrstvy lepidla a ideálně ji dodržet ve všech bodech lepeného spoje. Konstantní vrstvu lepidla lze zajistit například přidáním distančních kuliček do lepidla. [6]

3.5.1 Ruční aplikace

Pro ruční aplikaci lepidel lze použít různé prostředky, běžně používané jsou vypsány níže. [11]

- **Štětce** – Používají se štětce s jemným tužším vlasem, čímž se zajišťuje přesnost nanesení lepidla a tenká vrstva. Štětce je třeba často čistit.

- **Tyčinky** – Pro aplikaci lepidla na malé plochy nebo do dutin. Většinou jsou pro jednorázové použití ze dřeva nebo skla.
- **Špachtle (stěrka)** – Vyrábí se z plechu, plastu nebo tvrdé pryže. Velikost stěrky lze upravit vlastním potřebám dle určité aplikace.
- **Tuby** – Největší výhodou použití tuby je možnost dobře odstupňovat množství aplikovaného lepidla. Výrobci často nabízejí různé nástavce, díky kterým lze využít tuby pro různé aplikace na malé plochy, dutiny, kombinované spoje atd.
- **Nůžky** – Pro stříhání foliových nebo páskových lepidel, které se vloží do spoje. Následně se lepidlo aktivuje pomocí tepla nebo rozpouštědla a vytvoří se spoj.

3.5.2 Nanášení lepidla pomocí přípravků

- **Injekční stříkačky** – Používají se pro aplikaci tekutých lepidel do nepřístupných míst.
- **Vytlačecí pistole** – Obdobné jako injekční stříkačky ovšem k vytlačení lepidla dochází mechanicky nebo skrz pružiny.
- **Ruční válcové natírače**
- **Ruční nožové natírače**
- **Vzduchové stříkací pistole** – Mají velké ztráty při aplikaci.
- **Bezvzduchové stříkací pistole** – Pro aplikace lepidel za vysokého tlaku.

3.5.3 Aplikace lepidla za horka

- **Aplikace lepidla natavováním** – Tuhé lepidlo se roztaje, většinou při průchodu tavnou komorou, a následně je nanášeno na povrch. Pro ruční aplikaci se používá tavná pistole, pro automatizované nanášení diskové kotouče nebo válce. [11]
- **Fluidizační aplikace** – Při tomto procesu je přehřáté těleso vloženo do tzv. fluidizační vany, kde je rozvířený prášek z lepidla. Na tělese se usadí rozvířený prášek. Po nanesení vrstvy je většinou třeba ihned slepit adherendy k sobě. [11]

4. Předúpravy povrchů před lepením

Předúprava povrchu představuje jednu z nejdůležitějších částí výroby lepeného spoje pro zajištění kvalitní vazby mezi adhezivem a adherendem. Hlavní cíl předúpravy povrchu je dosažení požadovaných vlastností materiálu (drsnost, čistota, struktura, trvanlivost). Toho lze dosáhnout různými cestami a metodami, které jsou popsány dále v práci. [1]

4.1 Mechanické

Mechanické úpravy povrchu se využívají především pro odstranění přebytečných vrstev (koroze, oxidy, nečistoty) a získání požadované drsnosti, což má za následek zkvalitnění spoje. Před samotnou úpravou povrchu je potřeba vždy povrch odmastit rozpouštědlem, chemickou látkou nebo párou. Následuje zdrsnění povrchu níže uvedenými metodami pro zvětšení plochy lepeného spoje. [38]

4.1.1 Broušení

Využívá se především pro odstranění větších nerovností povrchu (např. rýhy, švy odlitků) postupným odebíráním materiálu. První fází postupu je hrubé broušení brusivem se zrnitostí 24 až 100. Provádí se za sucha, aby úbytek materiálu byl co největší. Následně se povrch upravuje jemným broušením brusivem se zrnitostí 120 až 240. Většinou se jedná o mokré broušení, kdy se brusné kotouče přimazávají, k dosažení kvalitnějšího povrchu. Pro dosažení výsledné drsnosti se povrch přešetí brusivem se zrnitostí 280 až 500. Těmito operacemi je třeba dosáhnout požadavků, které jsou stanoveny technologem.

Při broušení se využívají brusné kotouče s pevnou nebo volnou vazbou, brusné pásy nebo brusné papíry. Využití brusných papírů je časově neefektivní, proto se využívají spíše brusné pásy a brusné kotouče. Nejrychlejší broušení umožňují brusné pásy, ale nejsou tolik přesné jako brusné kotouče. Broušení je poměrně přesnou metodou, a to zejména díky malému úběru třísky, což umožňuje dosažení nízkých drsností povrchu. [2]

4.1.2 Kartáčování

Kartáčování se využívá pro odstranění hrubých nečistot (např. rzi, starých nátěrů) nebo sjednocení povrchu po broušení, odstranění oxidické vrstvy, která vznikne broušením. K odstranění nečistot se používají drátěné kartáče, s dráty z oceli, mosazi nebo fosforového bronzu (Obr. 12). Pro hliník je vhodné používat drátěné kartáče s měkčími dráty. Kartáčováním nelze zajistit úplné odstranění nečistot, jelikož nečistoty zůstávají usazené v pórech materiálu. Pro úpravu povrchu po broušení se využívají měkké a pružné kartáče z umělých a přírodních vláken. [2], [3]



Obr. 12 Ukázka různých druhů kartáčů [41]

4.1.3 Tryskání

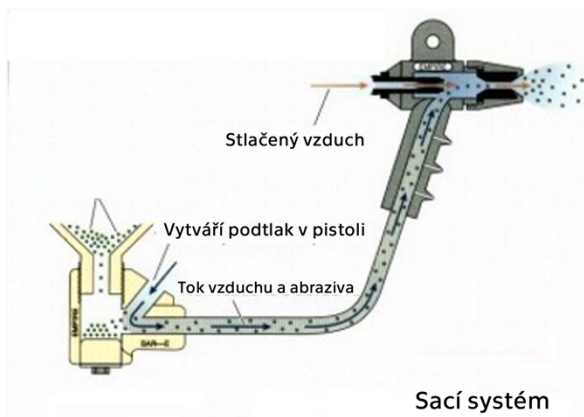
Tryskání se provádí za účelem odstranění korozních produktů, grafitu a pro získání požadované drsnosti a pevnosti povrchu dílu. Při procesu dopadají na čištěný povrch abrasivní částice, které jsou urychlovány stlačeným vzduchem, vodou nebo metacím kolem. Účinkem kinetické energie abrasivní částice při nárazu jsou vyštipovány nečistoty usazené na povrchu. Při použití tupých tvarů abrasiva (např. kovové kuličky) se povrch materiálu spíše zpevňuje (vytvrzuje), a naopak může docházet k zatlačení nečistot do pórů materiálu. [2], [3], [4]

Velkou výhodou tryskání je snazší čištění povrchů tvarově komplikovanějších dílů a jeho efektivnost. Na straně druhé, proces je energeticky náročný a u určitých abraziv je nevýhodou velká prašnost procesu, kterou lze snížit například přidáním vody k tryskacím částicím.

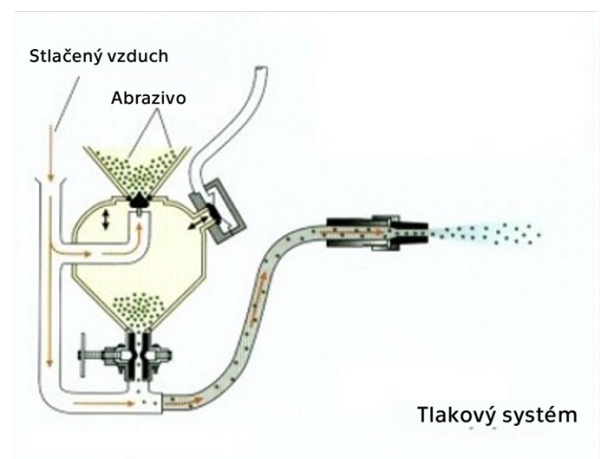
Technologie tryskání se dá rozdělit do dvou skupin podle typu urychlení abraziva, a to na mechanické a pneumatické

Mechanické tryskání je prováděno metacím kolem, kdy je abrazivo přiváděno na lopatky metacího kola a působením odstředivé síly následně metáno na součást. V průmyslových aplikacích je spotřeba materiálu až 10 tun za hodinu práce.

Při pneumatickém tryskání je abrazivo umístěno v tlakové nádobě, odkud je vedeno do trysky, kde je urychleno proudem vzduchu směrem na povrch součásti. Pneumatické tryskání lze dále rozdělit na sací a tlakové. Při sacím tryskání je abrazivo nasáváno díky podtlaku, který vzniká v meziprostoru a poté putuje do trysky (Obr. 13). U tlakového tryskání abrazivo propadává přes regulační komoru přímo do proudícího vzduchu, který putuje do trysky (Obr. 14). Nevýhodou tlakového tryskání je potřeba přerušení procesu pro doplnění abraziva. [2], [3], [4]



Obr. 13 Princip sacího tryskání [42]



Obr. 14 Princip tlakového tryskání [42]

4.1.4 Abraziva

Je mnoho druhů abraziv, které se liší tvary a druhem materiálu. Tvarově jsou dva základní typy, ostrohranné (drtě) a oblé (granuláty). Drtě jsou vhodné spíše pro čištění povrchu a granuláty pro vytvrzení povrchu a získání nízké drsnosti. Volba abraziva záleží na více faktorech, ovšem abrazivo by mělo být vždy vybráno s ohledem na tvrdost a složení čištěného materiálu, abychom materiál nepoškodili nebo nekontaminovali abrazivním materiálem.

Korundová abraziva

Korund je nekovové syntetické abrazivo využívané zejména na tvrdé ušlechtilé oceli, z důvodu jeho tvrdosti. Vyrábí se ve dvou základních formách, a to v hnědé a bílé formě. Hnědý korund (Al_2O_3) je využíván pro většinu tryskacích prací, hlavně kvůli vyšší odolnosti proti opotřebení. Bílý korund se využívá pro tryskání v aplikacích, kde jsou vysoké požadavky na čistotu tryskacího média, jako například v leteckém průmyslu. Nicméně, výsledky tryskání obou korundů jsou velice podobné. [15]

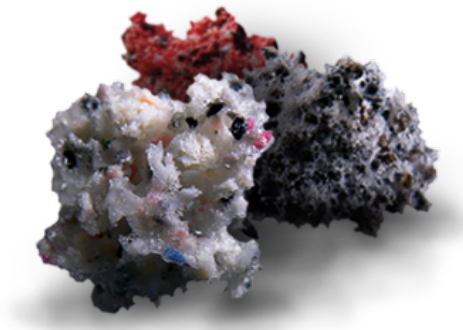
Balotina

Balotiny jsou kuličky tvořené ze sodného skla, které jsou využívány pro povrchovou úpravu tryskáním nerezových ocelí a hliníkových slitin. Tímto abrazivem lze docílit jemného zdrsnění a zpevnění povrchu. Jedná se o chemicky stálý, toxikologicky a ekologicky nezávadný tryskací prostředek. [15]

Polyuretanová pěna s příměsí dalších abraziv (Sponge-jet)

Jako abrazivo se používá polyuretanová pěna, která v sobě má zamíchané mikročástice jiného abraziva (Obr. 15). Jako přidané abrazivo mohou být použity například ocelové kuličky. Při nárazu se pěna roztáhne po povrchu čištěného materiálu, kuličky narazí přes pěnu, a při následné kontrakci pěny jsou nečistoty vytrhávány ven.

Aplikace metody Sponge-jet se v České republice poprvé objevila v roce 1997 v chemických závodech v Sokolově pro obnovu ocelových konstrukcí. [20]



Obr. 15 Polyuretanová pěna s abarazivem [45]

Suchý led

Jedná se o poměrně moderní metodu čištění povrchu. V průmyslu se začala testovat v roce 1980. Suchý led je vytvářen z oxidu dusičitého, který je ochlazen na teplotu $-78,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, čímž se vytvoří abrazivní pelety s průměrem 1 až 6 mm a délkou 5 až 15 mm (Obr. 16). Při nárazu částice suchého ledu se povrch ochlazuje, což napomáhá odstraňování nežádoucích vrstev. Suchý led okamžitě po dopadu na povrch sublimuje, tudíž z abraziva nevzniká žádný odpad. Jedná se o velmi účinnou, rychlou a šetrnou metodu čištění. Velkou výhodou tryskání suchým ledem je nenarušení základního materiálu. Metoda je vhodná pro tvarově složité součásti. [4], [21]



Obr. 16 Pelety suchého ledu [44]

4.2 Chemické předúpravy povrchů

Chemické předúpravy povrchu slouží primárně k vyčištění povrchu od nečistot a naleptání povrchu před lepením. Jedná se o velmi účinnou, ale nákladnou metodu, která je náročná na dodržení postupů. Vzhledem k použití chemikálií jsou procesy přísně řízeny zákony o bezpečnosti práce a ochrany životního prostředí. Následné skladování a likvidace vzniklých odpadů může být také komplikované. Stále je snaha nacházet šetrnější metody předúprav ovšem s ohledem na regulace Evropské unie není snadné nacházet vhodnější možnosti.

Po každém procesu chemického čištění je třeba lepený materiál důkladně očistit pomocí vody, a to ponořením do lázně nebo oplachem, tak aby došlo k odstranění všech zbytků chemikálií na materiálu. Pro kontrolu čistoty povrchu se využívá například lázeň s čistou vodou, kam se vzorek ponoří. Po vyjmutí z lázně musí vodní hladina zůstat neporušena po dobu 30 sekund. Pokud je tato podmínka splněna je vzorek považován za čistý. [38]

V případě hliníkových spojů se chemických metod užívá převážně pro výrobky, u kterých se očekává dlouhodobé vystavení přírodním vlivům. [1]

4.2.1 Moření

Moření je odstraňování kovových oxidů, vznikajících při tepelném zpracování a hydratovaných oxidů vznikajících korozi, chemickým nebo elektrochemickým způsobem. Jako mořidlo se používá silná kyselina nebo kombinace kyselin, při elektrochemickém moření je do lázně navíc vpuštěn elektrický proud pro podpoření chemické reakce. V případě hliníku je třeba brát zřetel na výchozí materiál a nepoužívat příliš agresivní kyseliny. Mezi běžně používané kyseliny pro moření patří kyselina sírová, kyselina chlorovodíková, kyselina dusičná, kyselina fluorovodíková, kyselina fosforečná. Postupně se také začíná využívat metoda sdruženého moření s odmašťováním, kde se využívají roztoky minerálních kyselin s vyšším obsahem organických tenzidů. Tyto kyseliny jsou schopny materiál, jak mořit, tak odmašťovat. [2], [3]

Proces většinou probíhá tak, že je součást ponořena do lázně s předurčeným roztokem kyseliny, kde se ponechá na požadovanou dobu za požadované teploty. Následně je součást vyjmuta z lázně a opláchnuta vodou, čímž je proces moření zastaven. [3]

4.2.2 Chromátování

Chromátování se využívá pro úpravu povrchu ocelí a neželezných kovů. Zvyšuje odolnost proti korozi, a především zvyšuje adhezi povrchu materiálu pro nanášení dalších vrstev.

Odmaštěné součásti se ponoří do chromátovací lázně na několik desítek sekund a poté se osuší. Tím na povrchu vznikají pasivační vrstvy, které jsou bezbarvé nebo žluté až zelené. Lázeň pro úpravu hliníku a jeho slitin bývají kyselého typu, kdy je primární složkou kyselina chromová. [5]

4.2.3 Fosfátování

Je metodou, při které se na povrchu součásti vytvoří souvislá vrstva z nerozpustných fosforečnanů. Ta zlepšuje adhezní vlastnosti povrchu díky své krystalické struktuře. Lázeň pro fosfátování je nejčastěji tvořena z fosforečnanu zinečnatého, zinečnato – vápenatého a manganatého.

Vrstva na povrchu vzniká tak, že se součást ponoří do kyseliny, která reaguje s materiálem (kovem) součásti. Touto reakcí vzniká v roztoku nerovnováha, díky čemuž se fosforečnan rozkládá a na povrchu se uchyťává terciální krystalický fosforečnan.

4.2.4 Primerování

Primery se využívají především pro zlepšení přilnavosti lepidla k povrchu adherendu. Převážně se jedná o zředěný roztok lepidla v organickém rozpouštědle, který je následně nanesen na povrch například sprejováním, válečkem nebo štětcem. Tím se vytvoří na povrchu tenká vrstva o tloušťce do 0,05 mm. Tato vrstva zlepšuje smáčivost povrchu a odolnost proti odlupu, po vyčištění povrchu chrání před oxidací, může zabránit nežádoucím reakcím mezi adhezivem a adherendem a usnadňuje fixaci lepených částí při montáži.

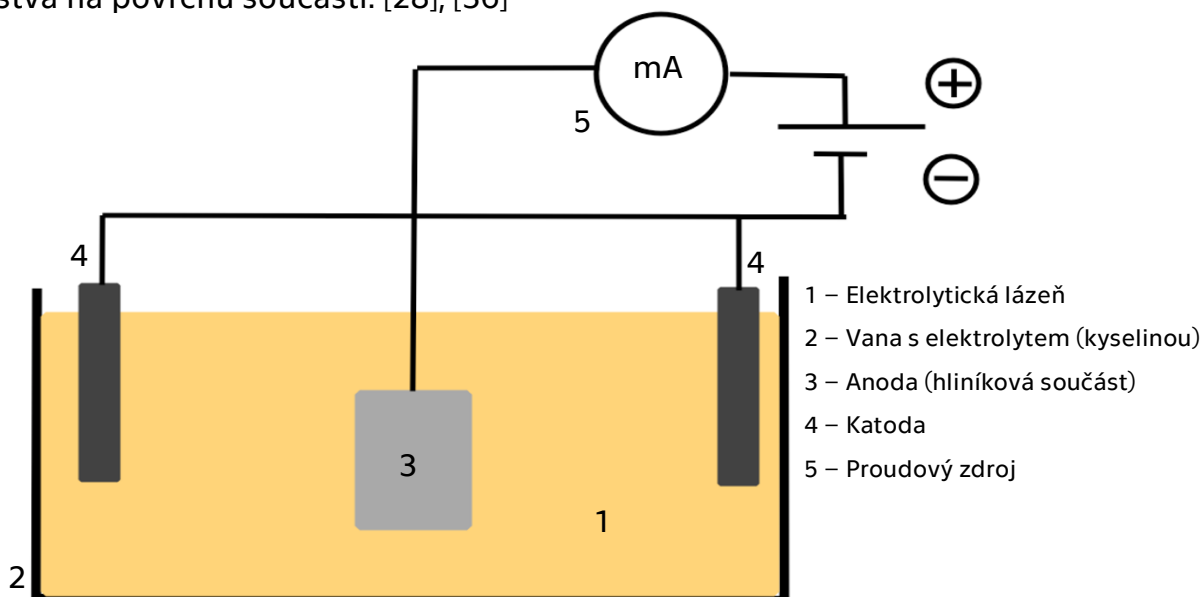
Primery přinášejí možnost flexibilnější výroby, jelikož výrazně prodlužují dobu, která může uplynout mezi počáteční úpravou povrchu a aplikací lepidla (až na dobu 6 měsíců). Dále přinášejí vysokou kvalitu lepeného spoje, nižší nároky na vytvrzování spoje a více možností ve volbě lepidla.

Primery většinou nejsou plně vytvrzeny při počáteční aplikaci lepidla. Vytvrzují se buď při pokojové teplotě nebo se vysušují za zvýšené teploty na 65,5 °C po dobu 30 až 60 minut.

Při výběru primeru je důležité brát v úvahu kompatibilitu s lepidlem, které chceme použít pro lepený spoj. [1], [7]

4.2.5 Anodická oxidace hliníku (eloxování)

Anodická oxidace hliníku se využívá pro vytvoření oxidační vrstvy na povrchu materiálu. Jedná se o elektrochemické ošetření, které odstraňuje vzniklou oxidační vrstvu při reakci kyslíku a hliníku a vytvoří novou oxidační vrstvu, která materiál chrání před další oxidací. Při procesu anodické oxidace hliníku je materiál vložen do lázně s kyselinou. V praxi se běžně používá kyselina sírová, která zajistí kvalitní oxidační vrstvu a je cenově dostupná nebo kyselina chromová, která vytváří tenčí oxidační vrstvu než kyselina sírová a současně zajišťuje vysokou antikorozi odolnost a vysokou adhezi povrchu. V lázni kyseliny je výrobek připojen ke kladnému pólu stejnosměrného zdroje a slouží jako anoda. Do lázně kyseliny je přiveden přes anodu záporný pól zdroje, což způsobí předání kyslíku anodě pomocí záporných anionů. Takto vzniká nová oxidační vrstva na povrchu součásti. [28], [36]



Obr. 17 Schéma anodické oxidace hliníku

4.2.6 Chemical vapor deposition (CVD)

Jedná se o chemický proces používaný pro vytvoření tenké vrstvy na povrchu materiálu. Materiál je nejdříve očištěn a následně vložen do reakční komory, kde teploty dosahují od 200 do 600 °C. Následně je do komory vpuštěn prekurzorový plyn, který reaguje s horkým povrchem materiálu a chemickou reakcí v plynné fázi nebo na rozhraní plynné a pevné fáze se na povrchu materiálu vytvoří tenká vrstva od 3 do 25 μm. CVD metoda přináší mnoho výhod jako je tepelná stabilita povlaku, jeho vysoká homogenita a kvalitní přilnutí vrstvy k materiálu. Použitý prekurzorový plyn by měl mít ideálně pokojovou teplotu, čehož je v případě některých prekurzorů náročné dosáhnout. [13]

4.3 Fyzikální

Fyzikální metody fungují na principu ohřátí povrchu materiálu a následné změny vlastností povrchu působením tepla nebo za působení tepla se na povrch hliníku nataví jiná látka.

4.3.1 Plazmový výboj

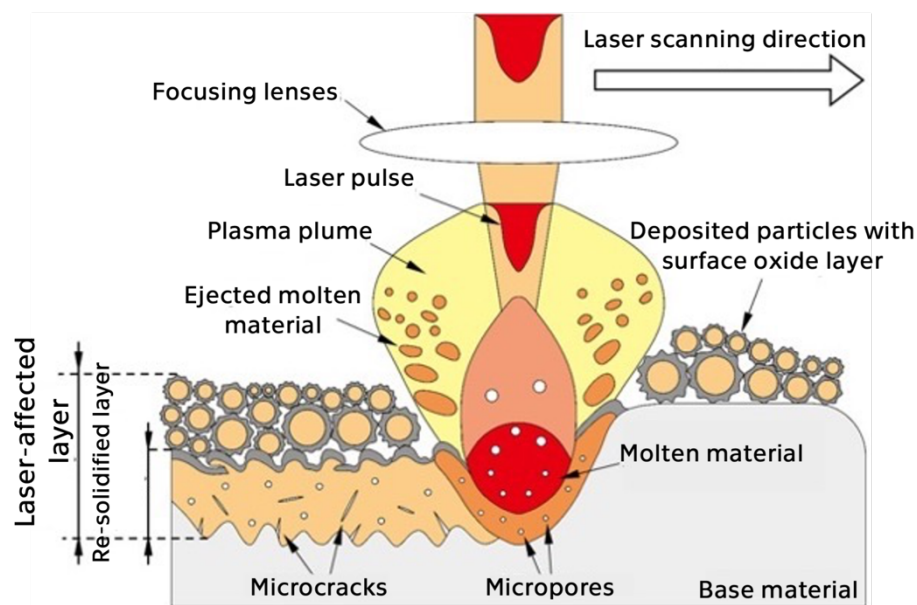
Předúprava povrchu pomocí plazmového výboje začíná být v posledních letech velmi oblíbenou metodou díky vysoké účinnosti při zlepšování vlastností materiálu, relativně nízké ceně a své ekologičnosti.

Plazmový paprsek je vytvořen za pomoci plynu (kyslík, helium nebo dusík) a elektrického proudu (stejnoseměrný, střídavý). Plasma vytvoří vysoce reaktivní prostředí, což vede k vytvoření aktivních částic na povrchu (ionty, excitované atomy, radikály atd.). Vytvořením aktivních částic se odstraní nečistoty, zlepšuje se smáčivost, tvrdost a drsnost povrchu a adheze. Nevýhodou procesu je nutnost odmaštění povrchu před samotným čištěním plazmou, jelikož plazmovým výbojem nelze zajistit odmaštění povrchu. Celý proces se řídí skrz tři hlavní parametry, kterými je použitý plyn, tlak a přivedená elektrická energie.

Plazmový výboj lze použít pro různé aplikace jako je čištění povrchu, aktivace nebo zlepšení vlastností povrchu bez výrazné změny rozměrů výrobku. Z tohoto důvodu je atraktivní možností pro průmysly jako je například letecký, automobilový nebo zdravotnický. [25], [26]

4.3.2 Laser

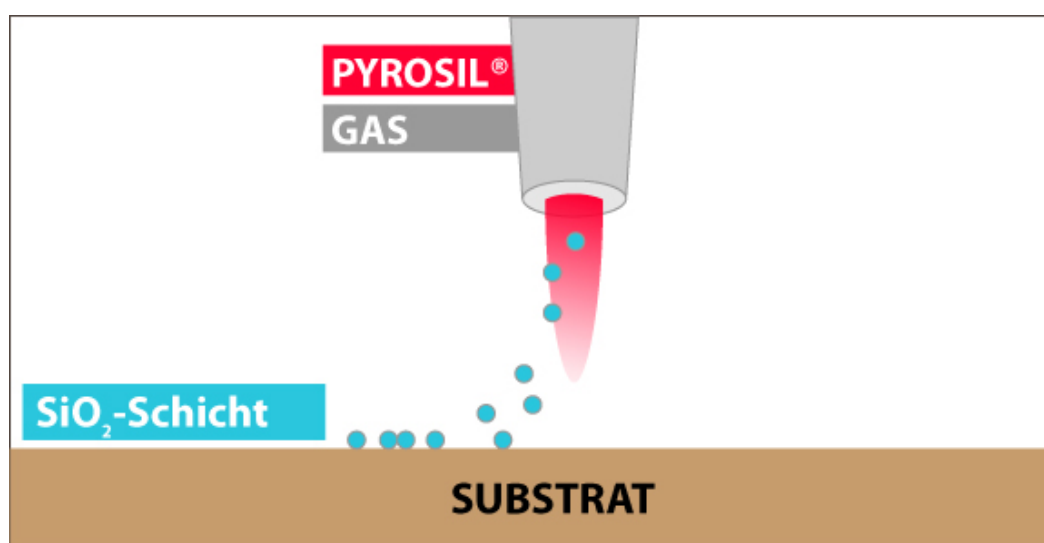
Jedná se o proces, kdy se účinkem laserového paprsku odstraňují nežádoucí vrstvy a nečistoty na povrchu materiálu. Na obrázku níže je popsáno, jak probíhá proces čištění povrchu (Obr. 18). Při účinku laseru dochází k přenosu energie z laseru do materiálu, čímž jsou vrstvy na povrchu materiálu (bravy, rez, nečistoty) ohřáty na extrémní teplotu. To má za následek odloupení a odstraňování nežádoucích vrstev a v extrémním případě i odpařování materiálu. Rozžhavený materiál vytvoří tzv. plazmový oblak, který vytváří vnitřní přetlak a je schopen vytěsnit část rozžhaveného materiálu ze středu laserového paprsku. Zbývající roztavený materiál zůstane v kráteru vytvořeném laserovým paprskem. Vlivem tepelné difúze a vedení tepla se kolem roztaveného materiálu mění vlastnosti materiálu oproti původnímu. Následným rychlým vychladnutím se na povrchu materiálu vytvoří nová vrstva, přičemž při kontaktu materiálu se vzduchem vzniká vrstva oxidu hlinitého a částice kovu oxidují. V nové vrstvě se vytváří mikrotrhliny a mikropóry, které zajistí lepší pevnost a odolnost proti korozi lepených spojů. [16]



Obr. 18 Laserový paprsek [16]

4.3.3 Pyrosil

Předúprava povrchu pyrosilem spočívá v nanesení tenkého povlaku oxidu křemíku na povrch materiálu pomocí plamene. Do plamene na bázi plynu (např. propanu) je přidán prekurzor obsahující křemík, tedy Pyrosil (Obr. 19). Pyrosil hoří v plamenu a na povrchu vytváří tenkou vrstvu v rozmezí 5-100 nm, která zvyšuje povrchovou energii materiálu a zdrsňuje povrch. Vzniklá vrstva je vizuálně neviditelná a prodlužuje možnou dobu skladování výrobku až na 4 týdny. Při procesu nedochází k dlouhému styku plamene s materiálem, proto nehrozí změna vlastností výchozího materiálu. [17], [27]



Obr. 19 Princip vytvoření povlaku pyrosilem [27]

4.3.4 Physical vapour deposition (PVD)

Při fyzikální depozici probíhá nanášení povlaku ve vakuu, kdy je pevný kov převeden do plynného stavu a následně kondenzací plynu dochází k vytváření nové ochranné vrstvy na součást. Dle způsobu převedení kovu do plynného skupenství lze PVD metodu rozdělit na vakuové napařování, vakuové napařování a iontové plátování. Vakuové napařování probíhá za pomoci elektrického oblouku nebo plazmy. Při iontovém plátování je proces podpořen aplikací atomů s vyšší energií. Jedná se o ekologicky nejšetrnější metodu depozice vrstev, jelikož při procesu nevznikají žádné nebezpečné látky. [14]

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Pro experimentální část bylo vybráno pět různých předúprav povrchu, u kterých se následně testovala čistota povrchu pomocí testovacích inkoustů a jejich vliv na výslednou pevnost lepeného spoje. Pro experiment byl zvolen přeplátovaný spoj z důvodu jeho častého využití v praxi. Vybrané předúpravy povrchu pro experimentální část:

1. Broušení s odmaštěním izopropylalkoholem
2. Moření v 10 % kyselině chlorovodíkové
3. Plazma
4. Laser
5. Tryskání suchým ledem

5.1 Vlastnosti lepených vzorků

Materiálem lepených vzorků byla vybrána hliníková slitina **EN AW 5754 (AlMg₃)** o tvrdosti **H 22**. Jedná se o slitinu hliníku a magnézia, která se vyznačuje nízkou hmotností, dobrou korozní odolností, svařitelností a eloxovatelností. Díky těmto vlastnostem je často využívána při stavbě automobilů, kolejových vozidel, jacht, letadel, tlakových nádob a v potravinářském průmyslu. Vzorky jsou vyrobeny z plechu s tloušťkou 4 mm a rozměry 100x30 mm. [35]

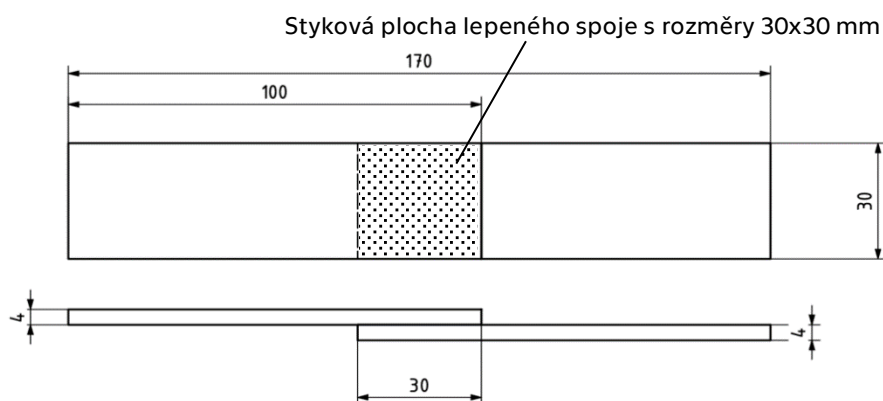
Tabulka 3 Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 5754 (AlMg₃) o tvrdosti H22 [35]

Pevnost v tahu R_m	220-270	MPa
Mez kluzu R_p	130	MPa
Tažnost A	9	%

5.2 Technologický postup výroby vzorků lepených spojů

1. Předúprava povrchu lepeného spoje
 - a. Broušení a následné odmaštění izopropylalkoholem pomocí papírového ubrousku
 - b. Moření v 10 % kyselině chlorovodíkové s následným oplachem vodou

- c. Ošetření povrchu plazmou
 - d. Ošetření povrchu laserem
 - e. Tryskání povrchu suchým ledem
2. Na jednom vzorku byla provedena předúprava povrchu mimo stykovou plochu lepeného spoje, kde byla provedena zkouška smáčivosti povrchu
 3. Příprava lepidla dle technického listu
 4. Vložení vzorku do přípravku na lepení
 5. Nanesení lepidla na vzorek
 6. Vložení druhého vzorku do přípravku a zajištění polohy
 7. Vytvrzení lepeného spoje v přípravku po dobu minimálně 48 hodin



Obr. 20 Technická dokumentace lepeného spoje

5.3 Povrchové předúpravy povrchu vzorku před lepením

5.3.1 Broušení s odmaštěním

Pro broušení vzorků byl použit brusný papír s hrubostí P600. Broušení bylo prováděno příčně k směru namáhání a bylo považováno za dokončené při dosažení uniformního povrchu.

Následně byl vzorek odmaštěn. Cílem správného odmaštění je zbavení vzorku všech tuků a olejů, které by mohly mít vliv na výslednou kvalitu spoje. Odmaštění bylo provedeno pomocí papírového ubrousku a izopropylalkoholu, který byl nanesen na papírový ubrousek. Plocha byla otřena papírovým ubrouskem jedním tahem směrem ven ze vzorku. Tento proces se opakoval do té doby,

než zůstal papírový ubrousek čistý. Po odmaštění byly vzorky vysušeny na vzduchu.

Technologický postup:

1. Broušení stykové plochy brusným papírem P600
2. Očištění vzorku papírovým ubrouskem navlhčeným v izopropylalkoholu
3. Zkouška smáčivosti povrchu
4. Vytvoření lepeného spoje v přípravku

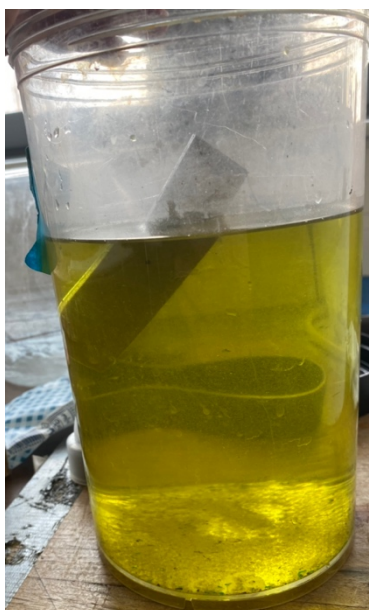
Předúprava povrchu a slepení vzorků bylo provedeno při teplotě 20 °C. Smáčivost povrchu očištěné plochy je 44 mN.m⁻¹.



Obr. 21 Zkouška smáčivosti povrchu broušení

5.3.2 Moření

Moření bylo prováděno ve vodném roztoku 10 % kyseliny chlorovodíkové. Vzorek byl nejdříve očištěn izopropylalkoholem a opláchnut ve vodě. Následně byl ponořen do kyseliny chlorovodíkové, kde byl mořen po dobu 120 sekund. Po dokončení procesu moření byl vzorek důkladně opláchnut ve vodě a vysušen na vzduchu. Poté již bylo možné přejít k samotnému slepení vzorků.



Obr. 22 Proces moření vzorku

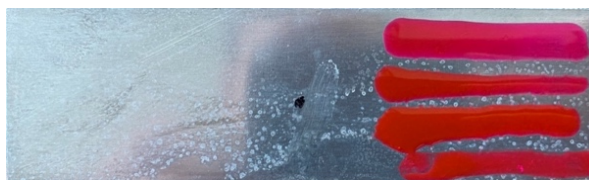


Obr. 23 Oplach vzorku ve vodě

Technologický postup:

1. Očištění vzorku papírovým ubrouskem navlhčeným v izopropylalkoholu
2. Oplach vzorku ve vodní lázni
3. Moření v 10 % kyselině chlorovodíkové po dobu 120 sekund
4. Oplach vzorku ve vodní lázni
5. Vysušení vzorků na vzduchu
6. Zkouška smáčivosti povrchu
7. Vytvoření lepeného spoje v přípravku

Předúprava povrchu a slepení vzorků bylo provedeno v teplotním rozmezí 21–22 °C. Smáčivost povrchu očištěné plochy je 42 mN.m⁻¹.



Obr. 24 Zkouška smáčivosti povrchu moření

5.3.3 Plazma

Při předúpravě povrchu plazmou mohou být na povrch materiálu integrovány různé funkční skupiny v závislosti na použitém plynu. Použitím vzduchu jako procesního plynu lze na povrch materiálu nanést funkční skupiny obsahující

kyslík (např. $-C-O$, $-C=O$ atd.) a skupiny obsahující dusík (NH_2 , $N-C=O$ atd.), které zlepšují smáčivost povrchu a adhezní vlastnosti.

Pro předúpravu povrchu byl použit přístroj Plasmatreat s generátorem FG 5001, transformátorem HTR 12, tryskou RD 1004 a koncovou tryskou 22826. S provozními parametry: frekvence 21kHz, proud 17,8 A a napětí 280 V. Podpurným plynem byl vzduch a celý proces probíhal za atmosférického tlaku. Před samotným ošetřením plazmou byl povrch odmaštěn izopropylalkoholem. Předúprava povrchu byla provedena ve spolupráci s LONTECH - surface treatment s.r.o.



Obr. 25 Proces čištění plazmou

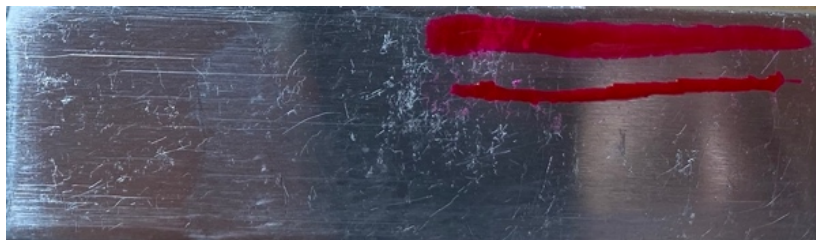


Obr. 26 Přístroj pro čištění povrchu plazmou

Technologický postup:

1. Očištění vzorku papírovým ubrouskem navlhčený izopropylalkoholem
2. Ošetření povrchu plazmou
3. Zkouška smáčivosti povrchu
4. Vytvoření lepeného spoje v přípravku

Předúprava povrchu a slepení vzorků bylo provedeno v teplotním rozmezí teplotě 20–22 °C. Smáčivost povrchu očištěné plochy je 38 mN.m⁻¹.



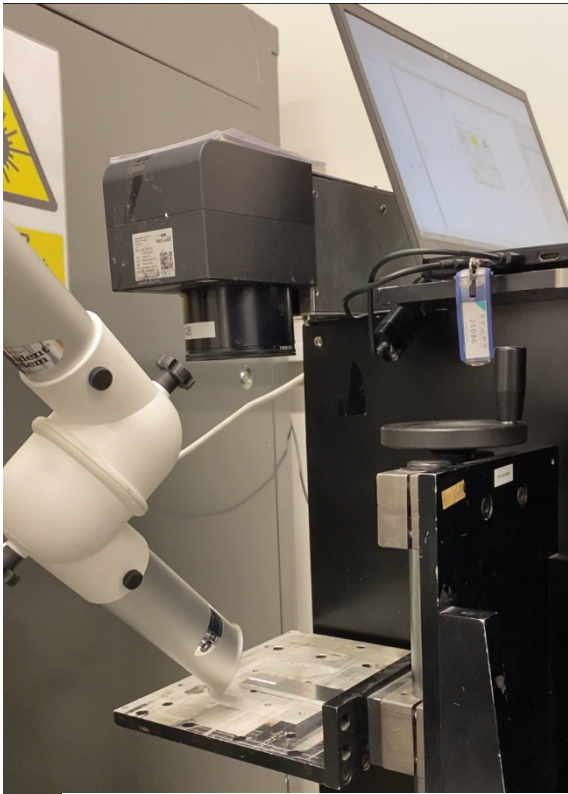
Obr. 27 Zkouška smáčivosti povrchu plazma

5.3.4 Laser

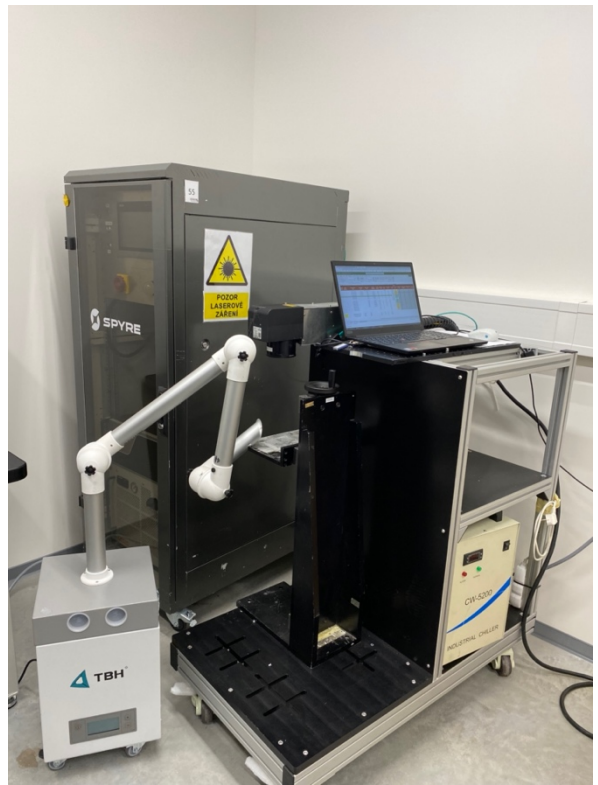
Čištění povrchu laserem bylo provedeno ve spolupráci s firmou LASCAM systems s.r.o. Pro práci byl použit vláknový pulsní laser. Experimentální metodou byly nastaveny parametry laseru tak, aby se povrch materiálu pouze čistil a nezdrsňoval. Pro čištění vzorků byl nastaven průměrný výkon laseru na 200 W. Frekvence pulzů laseru byla 60 kHz o energii každého pulzu 10 mJ. Laserový paprsek byl zaostřen na kruhový spot o průměru 0,5 mm. Tzv. hatch neboli překrytí jednotlivých řádků bylo nastaveno na 0,4 mm. V tabulce níže jsou uvedeny parametry dvou nastavení, kdy první nastavení parametrů bylo příliš agresivní a zdrsňovalo povrch materiálu. Druhé nastavení bylo již použito pro čištění všech vzorků.

Tabulka 4 Parametry nastavení laseru

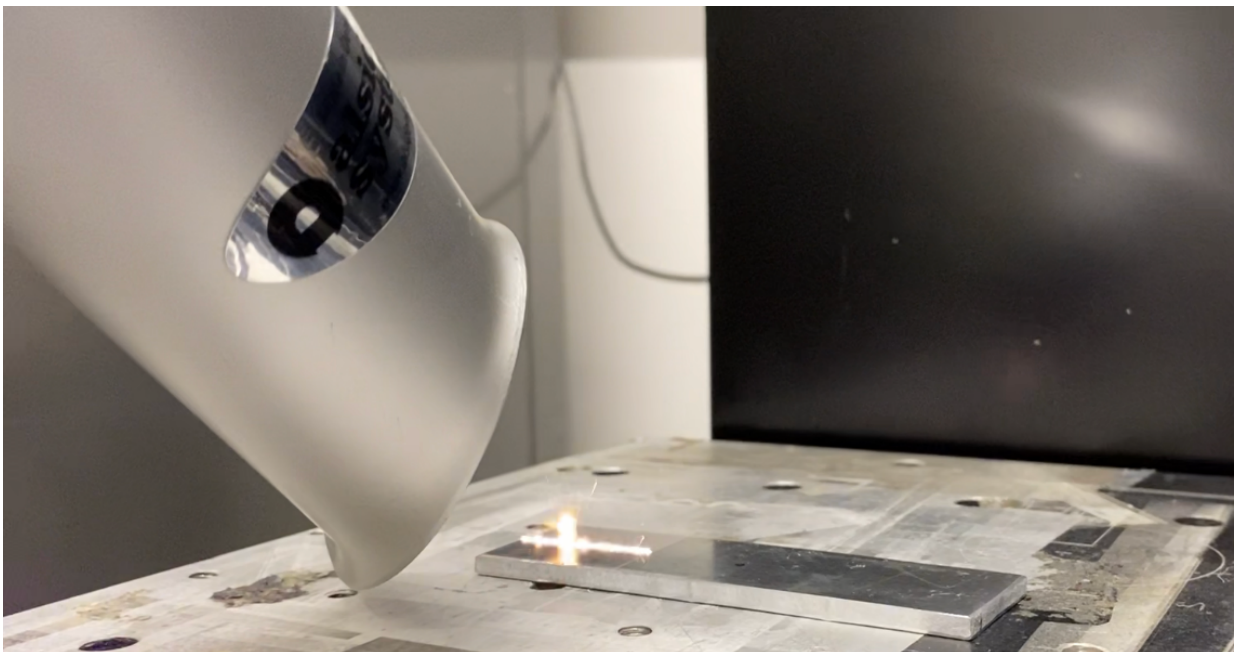
Výkon [W]	Frekvence [kHz]	Vlnová délka [nm]	Energie pulzu [mJ]	Velikost spotu [mm]	Rychlost posuvu [m/s]	Hatch [mm]
300	30	1064	10	0,5	10	0,25
200	60	1064	10	0,5	10	0,4



Obr. 28 Proces čištění laserem



Obr. 29 Uspořádání laseru



Obr. 30 Proces čištění povrchu laserem

Technologický postup:

1. Ošetření povrchu laserem
2. Zkouška smáčivosti povrchu
3. Vytvoření lepeného spoje v přípravku

Předúprava povrchu a slepení vzorků bylo provedeno v teplotním rozmezí 21-22 °C. Smáčivost povrchu očištěné plochy je 50 mN.m^{-1} . Pro zkoušku smáčivosti povrchu mi byly firmou LASCAM systems s.r.o. propůjčeny testovací fixy s hodnotami smáčivosti povrchu 50 mN.m^{-1} (modrý fix) a 72 mN.m^{-1} (fialový fix). Díky tomu bylo možné zjistit vyšší smáčivost povrchu, než je maximální hodnota inkoustů v použité tetovací sadě Arcotest.



Obr. 31 Zkouška smáčivosti povrchu laser

5.3.5 Tryskání suchým ledem

Tryskání suchým ledem bylo provedeno za pomoci firmy Alkion service s.r.o. Pro tryskání byl použit přístroj IC 022. Samotné tryskání bylo provedeno ve vnějším prostředí. Vzorek byl nejdříve upnut do svěráku a následně otryskán suchým ledem s provozním tlakem 6 barů a objemovým průtokem vzduchu $1 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$. Po tryskání již proces lepení probíhal ve vnitřních prostorech za pokojové teploty. V případě vzniku kondenzátu na povrchu vzorku se vzorek nechal vysušit na vzduchu a až poté byl slepen.



Obr. 32 Proces tryskání suchým ledem



Obr. 33 Pelety suchého ledu

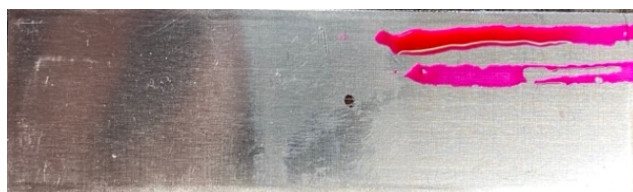


Obr. 34 Příklad přístroje pro tryskání suchým ledem IC-022

Technologický postup:

1. Upnutí vzorku do svěráku
2. Tryskání vzorku suchým ledem
3. V případě vzniku kondenzátu vysušení povrchu na vzduchu
4. Zkouška smáčivosti povrchu
5. Vytvoření lepeného spoje v přípravku

Předúprava povrchu a slepení vzorků bylo provedeno v teplotním rozmezí 19–21 °C. Smáčivost povrchu očištěné plochy je 38 mN.m⁻¹.



Obr. 35 Zkouška smáčivosti povrchu tryskání suchým ledem

5.4 Přípravek na lepení

Pro zajištění rovinnosti spoje, stálého přitlaku a zjednodušení manipulace se vzorky byl vytvořen pomocí programu Autodesk Inventor 2021 přípravek na lepení. Přípravek byl zhotoven pomocí technologie 3D tisku. Přípravek se skládá z postele, která zajišťuje rovnoběžnost vzorků, příčky pro zajištění konstantního překrytí vzorku 30 mm a objímky pro zajištění konstantního

přítlaku. Příčka musí být vyjímatelná z důvodu možnosti odebrání slepených vzorků z přípravku.

5.4.1 Označení vzorků

Pro experimentální část bylo vytvořeno celkem 20 vzorků. Pro každou předúpravu povrchu byly vytvořeny čtyři vzorky. Tři vzorky byly slepeny očištěné a na jeden vzorek byl přidán otisk prstu pro simulaci znečištění, které může vzniknout při nevhodné manipulaci.

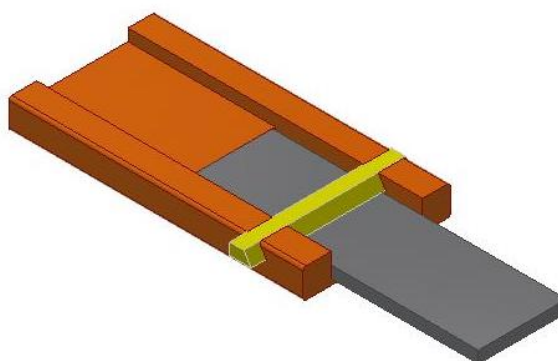
Slepené vzorky byly označeny pomocí počátečního písmene použité předúpravy povrchu a číslicí. V případě vzorku s otiskem prstu bylo použito počáteční písmeno a písmeno O jako otisk prstu. Systém označení vzorků je uveden v tabulce níže.

Tabulka 5 Označení vzorků

	Broušení	Moření	Plazma	Laser	Tryskání
Vzorek 1	B1	M1	P1	L1	T1
Vzorek 2	B2	M2	P2	L2	T2
Vzorek 3	B3	M3	P3	L3	T3
Vzorek s otiskem prstu	BO	MO	PO	LO	TO

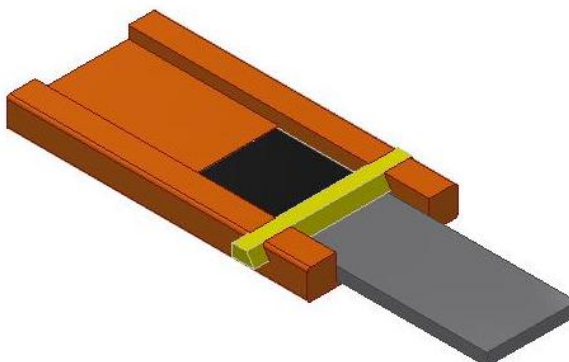
5.4.2 Postup založení vzorku do přípravku na lepení

1. Založení prvního vzorku do postele



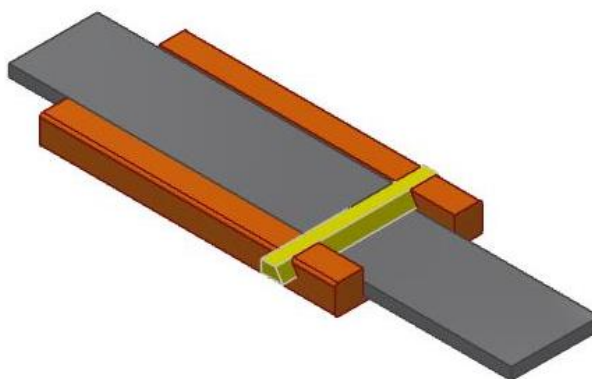
Obr. 36 Schéma založení prvního vzorku

2. Nanesení adhesiva pomocí dřevěné tyčky



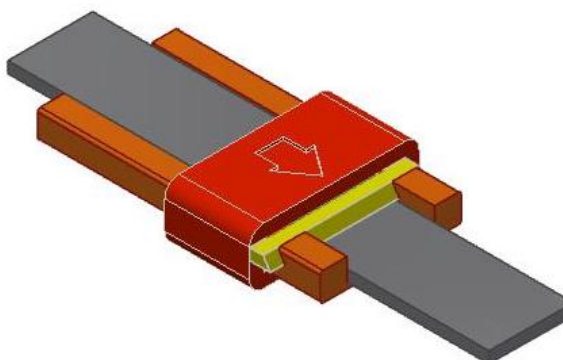
Obr. 37 Schéma nanesení adhesiva

3. Přiložení druhého vzorku do postele. Vzorek se nejprve vloží přímo na své místo a následně je přitlačen proti přičce pro zajištění překrytí plechů.



Obr. 38 Schéma vložení druhého vzorku

4. Nasunutí přitlačné objímky



Obr. 39 Schéma nasazení přitlačné objímky

5.5 Použité lepidlo

Pro experimentální část bylo zvoleno lepidlo 3M™ Scotch-Weld™ Flexible Acrylic Adhesive DP8625NS. Jedná se o dvousložkové akrylátové lepidlo, které je strukturně pevné a flexibilní. Lepidlo lze použít na různé materiály a mírně zamaštěné povrchy. Vykazuje větší než 200 % prodloužení a je schopno odolat namáhání způsobené rozdílnými koeficienty tepelné roztažnosti materiálů. Lepidlo obsahuje malé kuličky o průměru 250 mikronů, které zajišťují konstantní vrstvu lepidla. Lepidlo má 23minutovou životnost s 28minutovým časem do manipulační pevnosti. Úplného vytvrzení dosahuje po 24 hodinách při teplotě 22 °C. [40]

Tabulka 6 Vlastnosti použitého lepidla [40]

Parametry lepidla 3M™ Scotch-Weld™ DP8625NS		
Modul pružnosti E	0,7	MPa
Mez pevnosti v tahu σ_m	5,89	MPa
Tažnost A	200	%
Viskozita η	0,09	Ns/m ²
Teplotní odolnost	-40 až 149	°C
Tloušťka vrstvy	250	μm



Obr. 40 Lepidlo 3M™ Scotch-Weld™ DP8625NS

Správný poměr akrylátové složky a tužidla byl zajištěn pomocí aplikační pistole 3M. Složky byly nejdříve vytlačeny na plastový tácek, kde byly důkladně promíchány pomocí dřevěné tyčky, kterou bylo lepidlo následně aplikováno.



Obr. 41 Aplikační pistole 3M

5.6 Zkouška smáčivosti povrchu

Po každé provedené předúpravě povrchu byla provedena zkouška smáčivosti povrchu. Zkouška se prováděla ihned po dokončení předúpravy, aby nedošlo k ovlivnění výsledku oxidací materiálu a dalších vlivů okolí. Na povrch vzorku vždy nanášen inkoust Arcotest pomocí čisté štětičky. Výsledky byly následně vyhodnoceny vizuální metodou.



Obr. 42 Inkousty Arcotest pro zkoušku smáčivosti povrchu

5.7 Smyková zkouška

Po řádném vytvrzení lepidla v místě stykových ploch byla provedena smyková zkouška v laboratořích ČVUT v Praze na trhacím stroji LabTest 5.100SP1. Vzorek byl na začátku zkoušky uchycen do čelistí trhacího stroje. Následně byl spuštěn posuv horního uchycení až do momentu, kdy došlo k přerušení spoje. Rychlost posuvu byla zvolena na $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.

Po provedení zkoušky trhacím strojem byly odečteny maximální síly v průběhu zkoušky a zapsány do tabulky. Z těchto hodnot bylo následně možné dopočítat dosažené napětí v každém spoji.

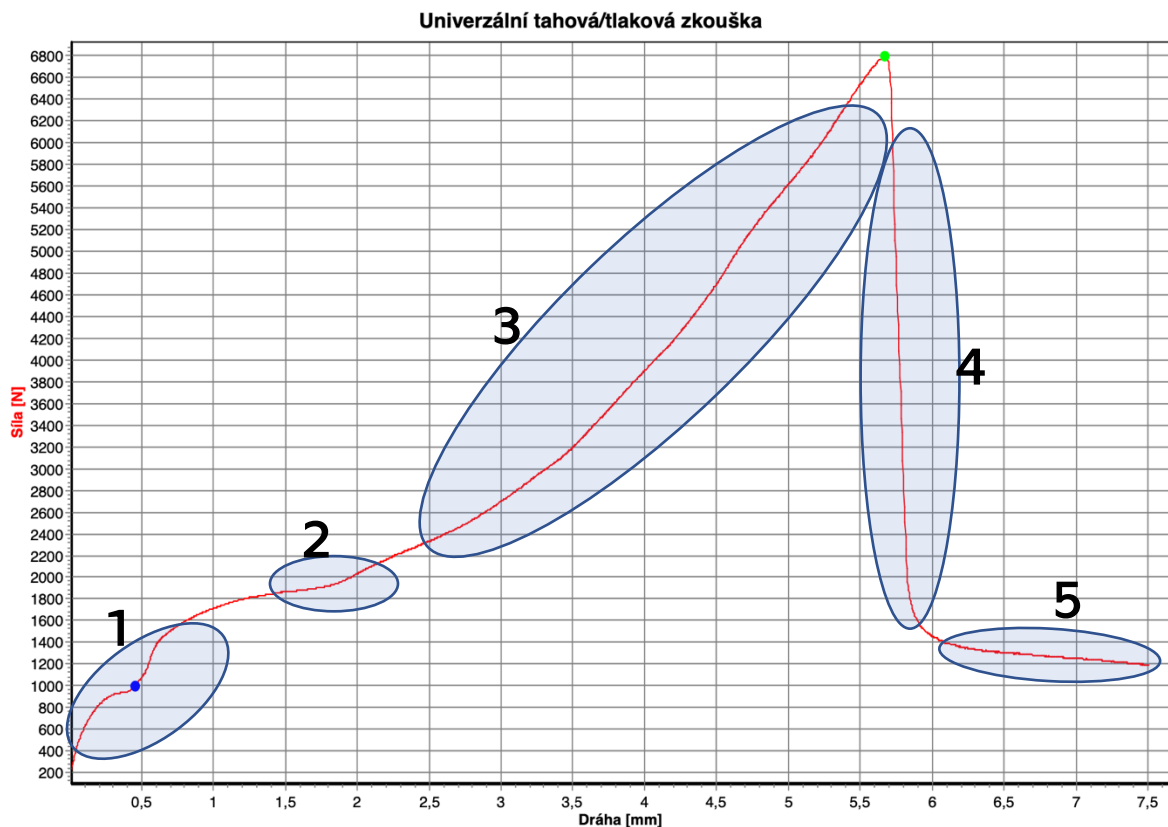


Obr. 44 Trhací stroj LabTest 5.100SP1



Obr. 43 Uchycení vzorku v čelistích

5.7.1 Průběh smykové zkoušky



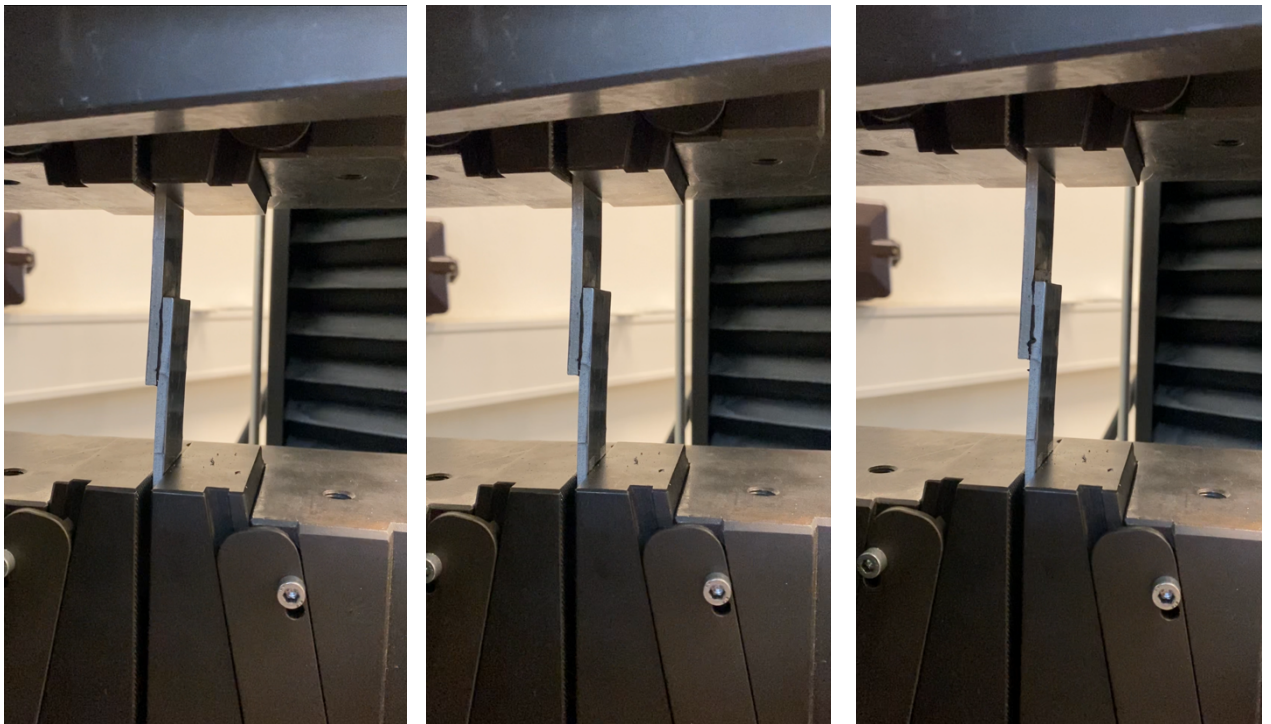
Graf 1 Průběh smykové zkoušky lepeného spoje P4

Průběh smykové zkoušky je možné rozdělit na jednotlivé oblasti:

1. Oblast, ve které dochází k vymezení vůlí (v uchycení vzorku, ve spoji apod.)
2. Drobné poklesy mohou být způsobeny prokluzem vzorku v čelistích nebo "zakousnutím" se čelistí do vzorku
3. Plastická deformace spoje
4. Přerušení soudružnosti lepeného spoje
5. Zbytková pevnost v lepeném spoji

Pro ilustrační průběh smykové zkoušky (Graf 1) byl použit vzorek P4. Průběhy zbylých smykových zkoušek jsou přiloženy k práci na externím disku.

5.7.2 Průběh přetržení



Obr. 45 Průběh smykové zkoušky, porušení mezi druhou a třetí

První fotka je pořízena na počátku průběhu smykové zkoušky. Druhý snímek je pořízen již v průběhu zatížení, proto lze vidět mírnou deformaci, kdy se vzorek srovná do osy čelistí. Na třetím obrázku již došlo k porušení spoje a lze vidět posuv horní destičky vůči spodní. Ze snímků je možné vidět, že deformace spoje před přetržením byla minimální. Viditelný posuv na tahovém diagramu je tedy převážně způsoben vymezením vůlí stroje, prokluzem, uchycením vzorku v čelistích. Část posuvu je způsobena i mírnou elasticitou použitého lepidla.

5.8 Výsledky tahové zkoušky

V první tabulce lze vidět výsledné síly přetržení jednotlivých vzorků po provedení tahové zkoušky. Ve druhé tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty sil při porušení vzorku a napětí, které ve vzorku vzniklo.

Tabulka 7 Výsledky zkoušky na trhačím stroji

	Síla při přetrhnutí [N]				
	Broušení	Moření	Plazma	Laser	Tryskání
Vzorek 1	6712	7525,8	7819,5	7591,8	7835,8
Vzorek 2	5910,2	7225,1	7168,8	7300,9	7548,7
Vzorek 3	5477,3	7749	6792,8	7570,6	7427
Vzorek s otiskem	6688,5	6796	6366,5	6889,4	7260,5

Tabulka 8 Průměrné hodnoty výsledků zkoušek na trhačím stroji

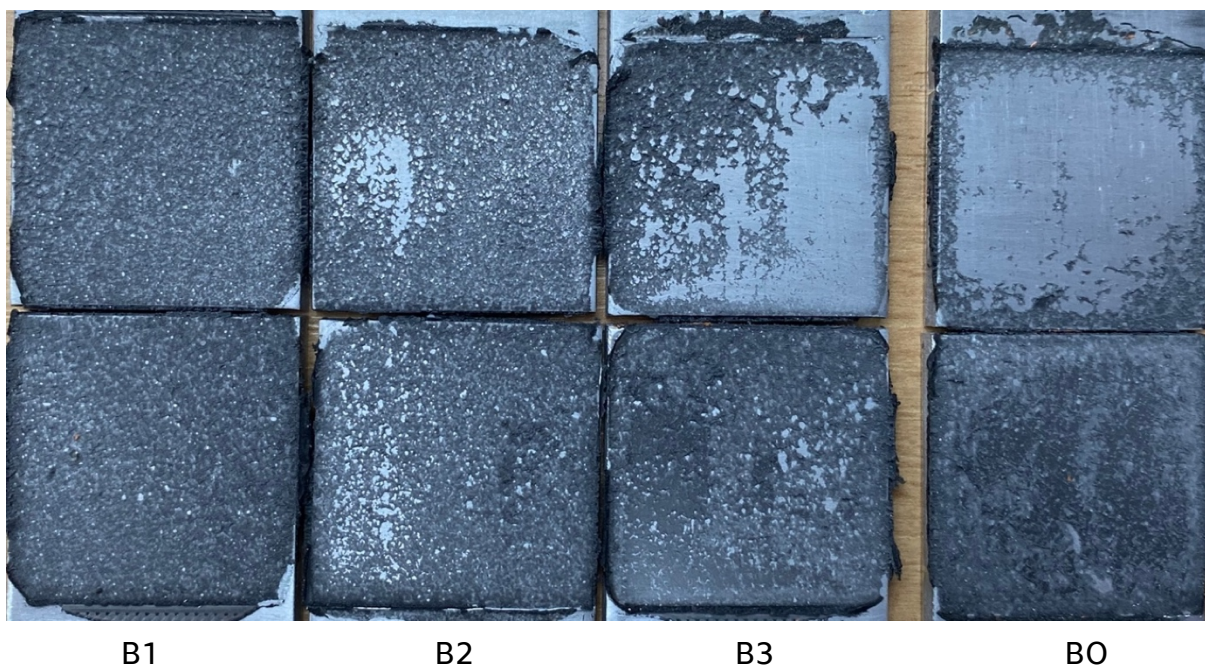
	Síla při přetrhnutí [N]				
	Broušení	Moření	Plazma	Laser	Tryskání
Bez otisku	6033,2	7500,0	7260,4	7487,8	7603,8
S otiskem	6688,5	6796	6366,5	6889,4	7260,5
	Napětí při přetrhnutí [MPa]				
Bez otisku	7,15	8,33	8,07	8,32	8,45
S otiskem	6,09	7,55	7,07	7,65	8,07

Dle technického listu lepidla bylo možné spočítat očekávanou pevnost spoje, která je 5,89 MPa. V porovnání s výsledky v tabulce je očekávaná hodnota pevnosti spoje nižší než pevnost spoje při zkoušce v experimentální části. To je způsobeno tím, že výrobce použil jinou předúpravu povrchu a na spoj působily jiné okolní vlivy jako je například teplota a vlhkost vzduchu. Nejlepší průměrné hodnoty dosáhla předúprava povrchu pomocí tryskání suchým ledem, ovšem všechny hodnoty jsou si velmi blízké, s výjimkou předúpravy broušením s následným čištěním izopropylalkoholem.

5.9 Hodnocení porušení lepeného spoje

U jednotlivých předúprav povrchu bylo po přerušení lepeného spoje posuzováno, k jakému druhu porušení došlo. Hodnocena byla adhezní a kohezní porucha, nebo jejich kombinace. Díky tomu je možné lépe analyzovat, zda byl materiál dostatečně očištěn a z jakého důvodu spoj selhal.

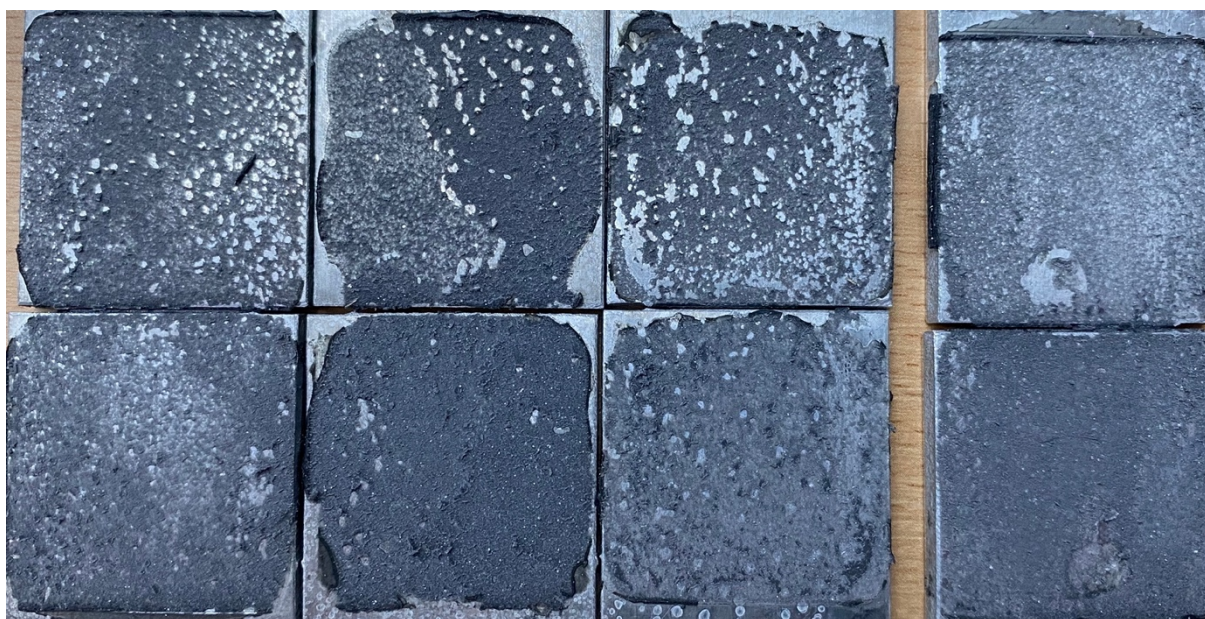
5.9.1 Broušení s odmaštěním



Obr. 46 Broušení-porucha spoje, označení vzorků zleva: B1, B2, B3, BO

Z fotky je možné vidět, že na vzorku B1 a B2 došlo převážně ke koheznímu porušení spoje (CF). U vzorku B3 došlo k adhezní poruše (AF), což mohlo být způsobeno nedostatečným odmaštěním nebo zbytky částic po broušení. V posledním případě byl na vzorek přidán otisk prstu (znečištění) a došlo téměř k 100 % adheznímu poruše ve spoji (AF) v následku znečištění.

5.9.2 Moření



M1

M2

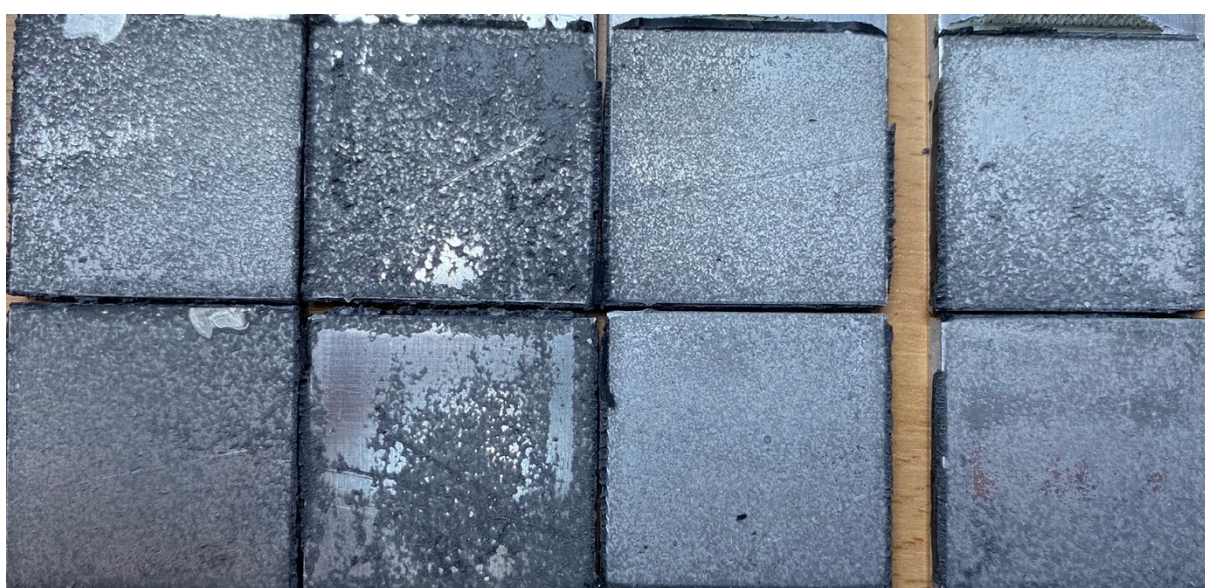
M3

M0

Obr. 47 Moření – porucha spoje, označení vzorků zleva: M1, M2, M3, M0

Při předúpravě povrchu pomocí 10 % kyseliny chlorovodíkové došlo u všech vzorků ke kohezně adhezní poruše spoje (ACFP) s mírně převažujícím kohezním porušením. U vzorku s otiskem prstu lze vidět oko s adhezním porušením. Toto místo bylo znečištěno otiskem prstu, čímž vznikla tato vada.

5.9.3 Plazma



P1

P2

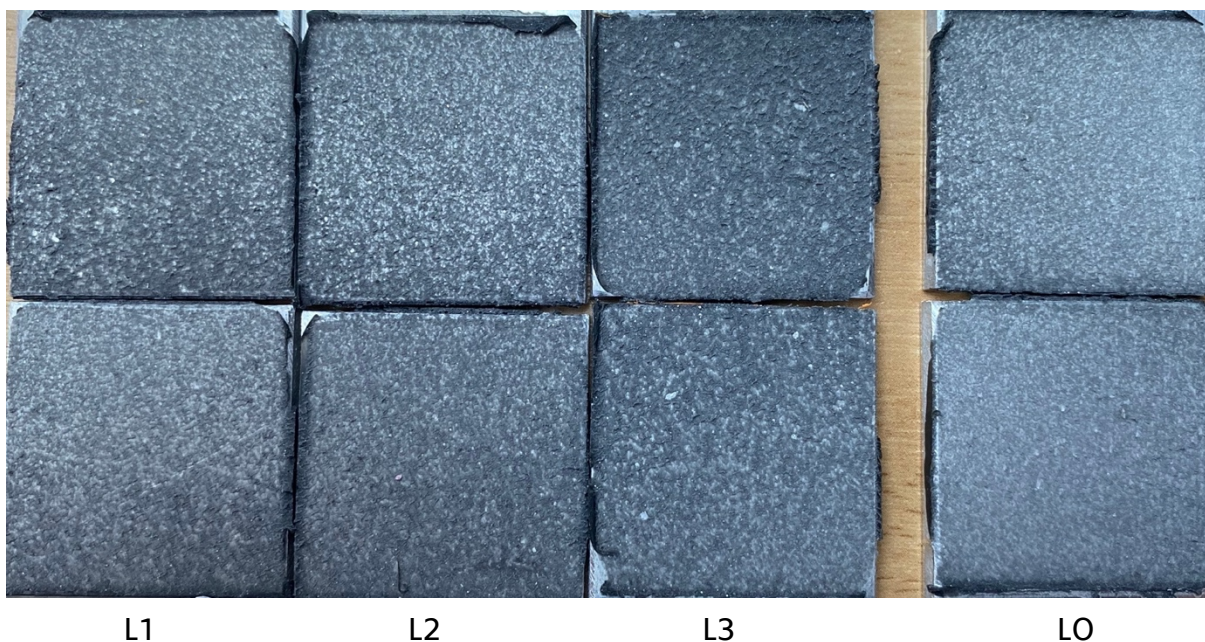
P3

P0

Obr. 48 Plazma – porucha spoje, označení vzorků zleva: P1, P2, P3, P0

Na vzorku P1 a P3 došlo převážně ke koheznímu porušení spoje s menšími adhezními poruchami (CF). U vzorku P2 je poměrně značná porucha adhezní (AF). U vzorku došlo ke špatnému přilnutí lepidla, ale na výslednou pevnost spoje to nemělo zásadnější vliv. U vzorku s otiskem prstu, není adhezní vada výraznější, ovšem spoj dosáhl nižší pevnosti než zbylé vzorky. Na vzorku PO došlo k adhezně kohezní vadě (ACFP).

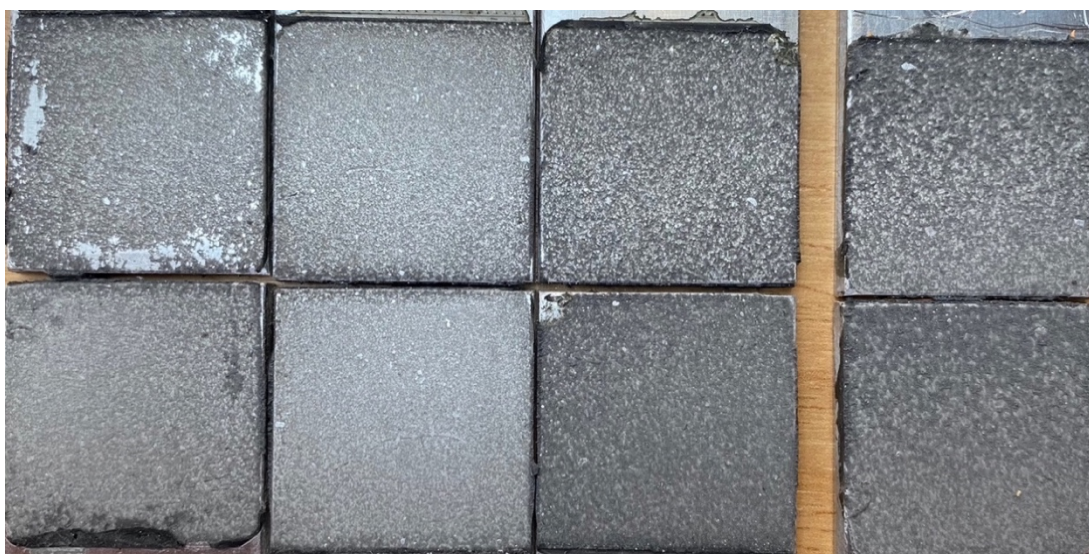
5.9.4 Laser



Obr. 49 Laser – porucha spoje, označení vzorků zleva: L1, L2, L3, L0

V případě předúpravy laserem u všech vzorků došlo ke kohezní poruše spoje (CF), což poukazuje na kvalitní přilnutí lepidla k materiálu. Výsledek vzorku s otiskem nebyl výrazně ovlivněn. To je pravděpodobně způsobeno malým zamaštěním prstu při vytvoření otisku prstu.

5.9.5 Tryskání suchým ledem



T1 T2 T3 T0
Obr. 50 Tryskání – porucha spoje, označení vzorků zleva: T1, T2, T3, T0

Na fotce lze vidět, že v případě vzorku T1 došlo v některých místech ke špatnému přilnutí lepidla. To může být způsobeno nedostatečným očištěním vzorku. U spojů upravených tryskáním suchým ledem došlo převážně ke kohezní vadě lepeného spoje (CF), tudíž očištění materiálu bylo kvalitní. V případě vzorku s otiskem prstu nedošlo k zásadnějšímu ovlivnění spoje jako tomu bylo u vzorku očištěným laserem. Pravděpodobně to bylo způsobeno stejným důvodem jako v předchozím případě.

5.10 Diskuze výsledků

Při lepení kovových spojů je třeba zajistit vhodnou teplotu okolí pro lepidlo, dostačující vrstvu lepidla a pokrytí lepidla po celé stykové ploše spoje. Ideální teploty pro vytvoření lepeného spoje se pohybují okolo 20 °C, což je přibližně pokojová teplota, proto vhodná teplota byla zajištěna vytvořením lepeného spoje ve vnitřním prostředí. Pomocí přípravku a kuliček v lepidle bylo zajištěno správné překrytí vzorků a dostačující vrstva lepidla ve spoji.

Pro předúpravu povrchu hliníku a jeho slitin nelze použít veškeré dostupné technologie z důvodu chemických vlastností a tvrdosti materiálu. Například pokud by bylo použito tryskání ocelovým abrazivem, došlo by ke kontaminaci povrchu materiálu a znehodnocení. Z tohoto důvodu byly vybrány jen některé

předúpravy povrchu a v případě tryskání je tryskání suchým ledem vhodnou možností pro předúpravu povrchu hliníku, jelikož povrch materiálu není kontaminován jinými látkami a nedochází k poničení či změně povrchu.

K získání objektivních výsledků vlivu předúprav povrchu na lepený spoj byly použity tři zkoušky. Zkouška smáčivosti povrchu, která odhalí kvalitu očištění povrchu a případné znečištění. Pomocí smykové zkoušky byla zjištěna adhezní pevnost ve spoji. V případě kvalitního očištění vzorku a dobré adhezní pevnosti byla zjištěna kohezní pevnost lepeného spoje. Po přerušení spoje byla provedena vizuální zkouška stykových ploch pro zjištění adhezních a kohezních vad ve spoji. Z vizuální zkoušky lze následně identifikovat, zda došlo k adhezní vadě ve spoji, tedy porušení vazby mezi lepidlem a vzorkem nebo ke kohezní vadě, která naznačuje kvalitní očištění povrchu, jelikož dříve došlo k porušení lepidla než vazby mezi povrchem vzorku a lepidla.

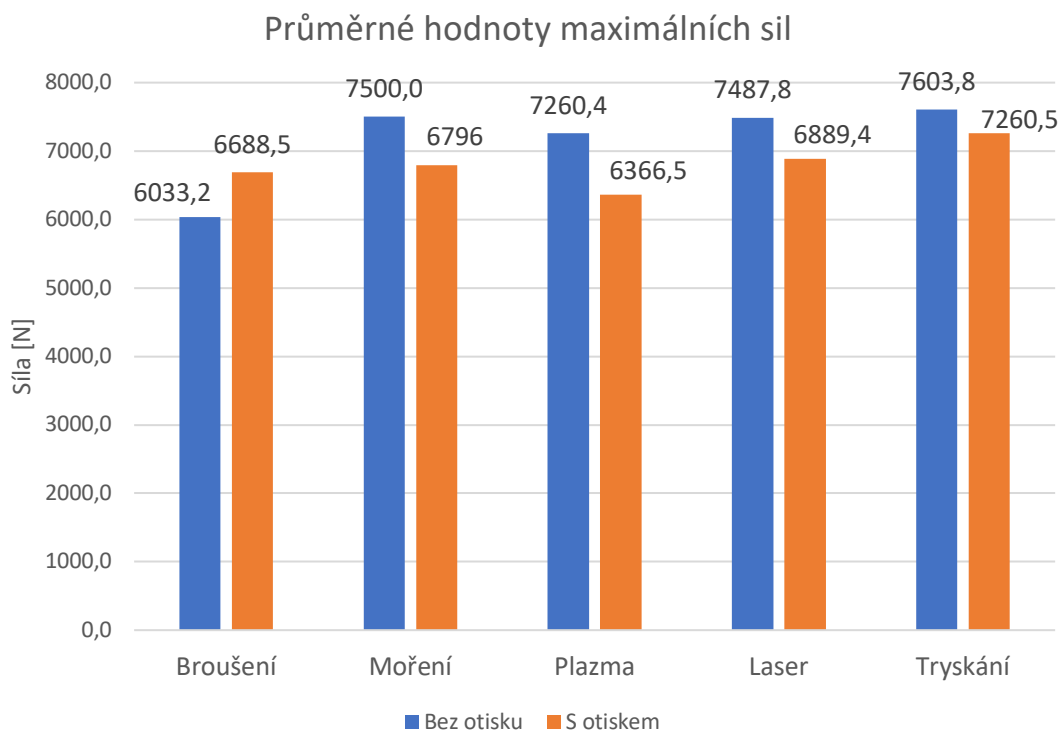
Na vzorcích po předúpravě povrchu byla provedena zkouška smáčivosti povrchu. Zkouška smáčivosti povrchu se prováděla za účelem zjištění k jak kvalitnímu očištění povrchu došlo. Minimální očekávaná smáčivost povrchu byla $36 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. Všechny předúpravy povrchu dosáhly vyšších hodnot smáčivosti povrchu.

Následně se prováděla smyková zkouška vzorků do přerušení spoje pro zjištění maximální síly, které je lepený spoj schopen přenést. Všechny vzorky vykazovaly obdobné maximální síly při přerušení v rozsahu 5477,3 N až 7835,8 N. Na základě smykové zkoušky lze říci, že všechny použité předúpravy povrchu zajistily kvalitní očištění povrchu pro přenos sil ve spoji. Vzorky, na které byl přidán otisk prstu vykazovaly nižší pevnost spoje dle očekávání. Otiskem prstu byla na povrch materiálu nanesena především mastnota s nečistotami. Znečištění plochy mělo za následek nižší pevnost spoje. Znečištění tohoto typu může vzniknout například při nevhodné manipulaci s očištěným materiálem.

Po smykové zkoušce byla provedeno vizuální vyhodnocení typu porušení spoje. Na vzorcích, na které nebyl přidán otisk prstu došlo téměř ve všech případech ke koheznímu porušení spoje. Na některých vzorcích došlo k mírné adhezní poruše spoje, což mohlo být způsobeno nedostatečným očištěním vzorku nebo znečištěním stykové plochy okolím. Vzorky s otiskem prstu měly ve dvou případech viditelnou adhezní poruchu ve spoji následkem nanesené

mastnoty. Adhezní porušení spoje lze vidět na vzorku BO a MO, tedy vzorky, které byly broušeny a očištěny izopropylalkoholem a vzorky mořené v 10 % kyselině chlorovodíkové. Na vzorcích očištěných laserem, plazmou a tryskáním suchým ledem není viditelný otisk prstu ve spoji, což bylo pravděpodobně způsobeno malým znečištěním povrchu, ale i přesto vzorky vykazovali nižší pevnost spoje oproti vzorkům bez znečištění.

6. Závěr



Graf 2 Sloupcový graf průměrných hodnot sil

Nejlepší smáčivosti povrchu dosáhla metoda předúpravy povrchu laserem a broušení s následným odmaštěním izopropylalkoholem. U předúpravy povrchu broušením nebylo možné otestovat vyšší smáčivost povrchu z důvodu maximální hodnoty inkoustu $44 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ v použité sadě Arcotest. Referenční hodnota smáčivosti povrchu v průmyslu je přibližně $38 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, které dosáhly všechny předúpravy povrchu. Povrch očištěný pomocí laseru vykazoval hodnotu smáčivosti povrchu $50 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. Při očištění povrchu laserem dochází k celkovému odstranění oxidační vrstvy a části výchozího materiálu, proto je smáčivost povrchu vysoká.

Dle technického listu lepidla je pevnost lepidla při smykové zkoušce na hliníkovém substrátu pevnost $5,9 \text{ MPa}$. Z vypočtených napětí (Tabulka 8) lze vidět, že napětí dosažené při smykové zkoušce, spoj dosahoval vyšších pevností, než je uvedeno v technickém listu. To je pravděpodobně způsobeno použitím jiných předúprav povrchu, než byly použity výrobcem pro zjištění pevnosti lepidla v tahu. Na základě výsledků zkoušky smáčivosti povrchu byla

očekávaná nejlepší pevnost vzorků upravené laserem. Nejvyšší pevnosti spoje dosáhla předúprava povrchu tryskáním suchým ledem, kde je hodnota maximální síly 7603,8 N. Předúprava povrchu mořením dosáhla síly při přetržení 7500 N a laserem 7487,8 N. Tyto hodnoty se blíží výsledku smykové zkoušky na tryskaných vzorcích, proto je lze považovat za podobně kvalitní. Vzorky, které byly broušeny a odmaštěny izopropylalkoholem a ošetřeny plazmou dosáhly nižších hodnot a to 6033,2 N a 7260,4 N. Ačkoliv broušené vzorky dosáhly nejnižší pevnosti, tak se jedná o nejlevnější předúpravu povrchu a může být dostačující pro některé aplikace.

Vizuální kontrola porušených spojů má nejlepší výsledky pro předúpravu povrchu laserem, kdy ani na jednom vzorku nedošlo k adheznímu porušení spoje, což poukazuje na dobré očištění povrchu. Na vzorcích se zbylými předúpravami povrchů docházelo na některých vzorcích k adheznímu porušení ve spoji. K největšímu adheznímu porušení došlo na obroušených vzorcích, což mohlo být způsobeno například zbytky nečistot v pórech po broušení. Na vzorcích očištěných mořením taktéž docházelo k adheznímu porušení spoje, a to pravděpodobně z důvodu znečištěné kyseliny chlorovodíkové použité pro moření. Při procesu moření se nečistoty v kyselině mohly dostat do povrchu a způsobit nižší adhezní pevnost ve spoji. Ve všech spojích docházelo převážně ke koheznímu porušení spoje, tudíž všechny předúpravy povrchu lze považovat za kvalitní.

Cílem experimentální části bylo zjistit vliv modernějších technologií předúprav povrchu oproti levnějším a starším metodám na výslednou pevnost spoje. Na základě smykové zkoušky je nejvhodnější metoda tryskání suchým ledem, ovšem je třeba zvážit jednotlivé požadavky pro každou aplikaci individuálně a na základě toho následně zvolit metodu, která bude pro specifickou aplikaci nejvhodnější. Například u předúpravy povrchu suchým ledem je riziko vzniku kondenzátu na povrchu materiálu, což může mít za následek nižší pevnost spoje. Proto je třeba při automatizaci procesu zajistit dostatečný čas mezi předúpravou povrchu a aplikací lepidla. Nejvhodnější předúprava povrchu v průmyslu z hlediska různých kritérií (pevnost spoje, cena, spolehlivost, kvalita předúpravy) je dle mého názoru předúprava

povrchu laserem. Ačkoliv počáteční náklady jsou vyšší, tak laser má dlouhou životnost (vláknové lasery až 100 000 hodin) a je možné měnit intenzitu laseru dle požadavků na jednotlivé aplikace. Dále se laser bude dobře integrovat do automatizované výrobní linky, jelikož je poměrně malý a není potřeba externích nádrží na abrazivo nebo dalších komponent.

Seznam použité literatury

- [1] EBNESAJJAD, Sina. *Surface Treatments of Materials for Adhesive Bonding: Second Edition* [online]. 2nd ed. Oxford: Elsevier Science & Technology Books, 2014 [cit. 2020-12-29]. ISBN 978-0-323-26435-8. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=1495678> .
- [2] V. KRAUS. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2009. ISBN 978-80-7082-668-3.
- [3] V. KREIBICH, K. HOCH. *Koroze a technologie povrchových úprav*. 2. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 1991. ISBN 80-01-00750-2.
- [4] H. A. YOUSSEF, H. A. EL-HOFY a M. H. AHMED. *Manufacturing technology: materials, processes and equipment*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017. ISBN 978-1-138-07213-8.
- [5] M. MOHYLA. *Technologie povrchových úprav kovů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1995. ISBN 80-7078-267-6.
- [6] P. COGNARD. *Adhesives and Sealants: General Knowledge, Application Techniques, New Curing Techniques*. Handbook of Adhesives and Sealants. Volume 2. Oxford: Elsevier, 2006. ISBN 978-0-08-044708-7.
- [7] M. C. CHATURVEDI. *Welding and joining of aerospace materials*. Second edition. Duxford, United Kingdom: Woodhead Publishing, an imprint of Elsevier, [2021]. ISBN 9780128191408.
- [8] M. OSTEN, J. MLEZIVA. *Práce s lepidly a tmely*. Praha: Grada, 1996. Profi & hobby. ISBN 80-7169-338-3.
- [9] A. PIZZI, K. L. MITTAL, ed. *Handbook of adhesive technology*. Third edition. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, [2018]. ISBN 978-1-4987-3644-2. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/reader.action?docID=5191121&query=Handbook+of+Adhesive+Technology>

- [10] M. DEANS. *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications* [online]. SECOND EDITION. Duxford: Elsevier, 2021 [cit. 2023-01-08]. ISBN 978-0-323-85143-5. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=-AQhEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Adhesive+Bonding+science,+technology+applications&ots=pUEv9eyPgJ&sig=oCwuGrnO3qZO3XDhht2tR0EApdA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [11] P. BRIŠ, J. KUBĚNA, J. ŠTRKAŇ. *Lepení v praxi*. Praha: Grada Publishing, 2017. ISBN 978-80-271-0247-1
- [12] E. M. PETRIE. *Handbook of adhesives and sealants*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2007. McGraw-Hill handbooks. ISBN 978-0-07-147916-5. Dostupné z: <https://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/lepeni/Handbook%20of%20Adhesives%20and%20Sealants.pdf>
- [13] PARK, J. a T. S. SUDARSHAN. *Chemical vapor deposition*. Volume 2. Materials Park, OH 44073-0002: ASM International, 2001. ISBN 0-87170-731-4.
- [14] J. PODJUKLOVÁ. *Speciální technologie povrchových úprav I.*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 1994. 76 s. ISBN 80-7078-235-8.
- [15] *Povrcháři* [online]. 2010. prosinec 2010 [cit. 2022-11-24]. ISSN 1802-9833. Dostupné z: http://povrchari.cz/kestazeni/201010__povrchari.pdf
- [16] M. JUNYING, H. WAN, B. E. CARLSON, L. JIANPING, S. CHENGCHENG. Application of laser ablation in adhesive bonding of metallic materials: A review. *Optics & Laser Technology* [online]. 2020, 128 [cit. 2023-03-01]. ISSN 0030-3992. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106188>
- [17] V. SEITZ, K. ARZT, S. MAHNEL, C. RAPP, S. SCHWAMINGER, M. HOFFSTETTER, E. WINTERMANTEL. Improvement of adhesion strength of self-adhesive silicone rubber on thermoplastic substrates – Comparison of an atmospheric pressure plasma jet (APPJ) and a Pyrosil® flame. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 2016, 65-72. ISSN 0143-7496. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2015.12.009>.
- [18] O. KYSILKA, J. KUBÍČEK. *Hybridní spoje*. Centrum lepení Brno. Brno, 2021.
- [19] O. KYSILKA. *Norma din 6701 a DIN 2304-1: Informace k prEN 17460*. Centrum lepení Brno. Brno, 2021.
- [20] Technologie Sponge-Jet. *Průmyslové spektrum* [online]. 06.06.2001 [cit. 2022-11-22]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-sponge-jet>

- [21] G. SPUR, E. UHLMANN a F. ELBING. Dry-ice blasting for cleaning: process, optimization and application. *Elsevier* [online]. 402-411 [cit. 2022-11-22].
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164899002045>
- [22] M. GREGOR. *Technologie a technika lepení - základní informace* [online]. 24.05.2021 [cit. 2023-01-08]. Dostupné z: <https://www.lepidla.cz/clanky/technologie-a-technika-lepeni---zakladni-informace>
- [23] 3M. *Úvod do povrchové energie* [online]. [cit. 2023-01-08].
Dostupné z: https://www.3mcesko.cz/3M/cs_CZ/bonding-and-assembly-ctl/training-education/science-of-adhesion/introduction-surface-energy/
- [24] EKOBAL. *POVRCHOVÉ NAPĚTÍ NEPODCEŇUJTE* [online]. 27.3.2019 [cit. 2023-01-08].
Dostupné z: <https://www.ekobal.cz/o-nas/aktuality/povrchove-napeti-nepodcenujte>
- [25] V. K. PATEL, S. BHOWMIK. Plasma processing of aluminum alloys to promote adhesion: A critical review. *Reviews of Adhesion and Adhesives*, 2017, 5.1: 79-104.
Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Vinay-Patel-6/publication/315989621_Plasma_Processing_of_Aluminum_Alloys_to_Promote_Adhesion_A_Critical_Review/links/59022679a6fdcc8ed51180f7/Plasma-Processing-of-Aluminum-Alloys-to-Promote-Adhesion-A-Critical-Review.pdf?_sg%5B0%5D=started_experiment_milestone&origin=journalDetail
- [26] Plazma – efektivní nástroj pro povrchové úpravy. *Technický týdeník* [online]. Business Media CZ, 5.11.2014 [cit. 2023-03-01].
Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/plazma-efektivni-nastroj-pro-povrchove-upravy_27718.html
- [27] *PYROSIL® PROCESS* [online]. In: . [cit. 2023-03-01]. Dostupné z: <https://www.sura-instruments.de/en/technologies/pyrosilr-process>
- [28] P. BERKA. *Anodická oxidace* [online]. ALUNET.cz [cit. 2023-06-08].
Dostupné z: <http://www.alunet.cz/anodicka-oxidace>
- [29] J. PETERKA. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Praha: SNTL, 1980, s. 215.
Dostupné z: <https://ndk.cz/uuid/uuid:0d5ad7cf-1805-4c0d-88d9-461f0732ce89>

- [30] *The Lap Shear Test is an adhesion measurement* [online]. Charter Coating Service [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://chartercoating.com/test-methods/shear-adhesion/>
- [31] *Jak je to s odlupováním (přesněji řečeno s adhezí při odlupování)?* [online]. Tesca [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.tesa.com/cs-cz/wikitapia/jak-je-to-s-odlupovanim-presneji-receno-s-adhezi-pri-odlupovani.html>
- [32] ČSN 66 8512 – Zkoušky lepených spojů (kov s kovem). Rázová pevnost lepených spojů.
- [33] ČSN ISO 10365. *Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. 10/1995. Pardubice: SYNPO, 1995.
- [34] *Vyhodnocování čistoty povrchu: nástroj kvality povrchových úprav* [online]. TechTest, s.r.o, 2015 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.techtest.eu/clanek1.html>
- [35] Proal, „proal.cz,“ Proal s.r.o., [Online]. Available: <https://proal.cz/hlinik/slitiny-hliniku/en-aw-5754/>. [Přístup získán 30 březen 2023].
- [36] Eloxování [online]. Alumeco CZ [cit. 2023-06-08]. Dostupné z: <https://www.alumeco.cz/technicke-informace/povrchove-osetreni/eloxovani/>
- [37] P. BÍŽA. *Předúprava povrchu hliníkových slitin pro lepené spoje*[online]. Pardubice, 2013 [cit. 2022-10-15]. Dostupné z: https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/52219/BizaP_Predupravapovrchu_PS_2013.pdf?sequence=3. Diplomová práce. Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Švanda, Ph.D.
- [38] D. ČERNÝ. *Předúpravy a čištění povrchů pro technologie lepení* [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-10-18]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/97263/F2-BP-2021-Cerny-Daniel-Predupravy%20a%20cisten%C3%AD%20povrchu%20pro%20technologie%20lepeni.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. Vedoucí práce Ing. Jiří Kuchař, Ph.D., IWE.
- [39] *Arcotest - Fixy a inkousty* [online]. Ostrava-Kunčičky: Proinex Instruments [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.proinex.cz/p/arcotest-fixy-a-inkousty>

- [40] SCOTCH-WELD DP8625NS 3M vysoce flexibilní strukturální lepidlo s rychlým vytvrzením, 45 ml. <https://www.3market.cz> [online]. [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.3market.cz/scotch-weld-dp8625ns-3m-vysoce-flexibilni-strukturalni-lepidlo-s-rychlym-vytvrzenim-45-ml/>
- [41] *Odjehlování. Čištění. Strukturování.* [online]. Brno: KLINGSPOR Brusivo, spol. s r.o. [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.klingspor.cz/tisk/aktualne/odjehlovni-strukturovn>
- [42] Co je pískování? Čím se pískuje?. *Pískovačka.cz* [online]. Brno: KLINGSPOR Brusivo, spol. s r.o., 15.7.2016 [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.piskovacka.cz/info-82-co-je-piskovani-cim-se-piskuje/>
- [43] *TRYSKACÍ MATERIÁLY* [online]. [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.abrasiv.cz/tryskaci-materialy>
- [44] Types of Dry Ice. <https://www.spongejet.com> [online]. [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.continentalcarbonic.com/dry-ice-types.html>
- [45] Sponge Media. <https://www.spongejet.com> [online]. [cit. 2023-03-02]. Dostupné z: <https://www.spongejet.com/store/sponge-media/>

Seznam obrázků

Obr. 1 Kohezní a adhezní síly	17
Obr. 2 Smáčivost povrchu [24].....	17
Obr. 3 Druhy lepených spojů: a) Přeplátovaný spoj, b) Tupý spoj, c) spoj zkosený tupý, d) spoj lemový, e) spoj dvojitě přeplátovaný, f) spoj s příložkou, g) spoj s dvěma příložkami	20
Obr. 4 Metody zkoušky ultrazvukem, a) signál je vysílán i přijímán z jedné strany spoje, b) signál je vysílán z jedné strany a přijímán ze strany druhé, c) lepený spoj je vložen do vodní lázně	21
Obr. 5 Zkouška pevnosti ve smyku [30]	22
Obr. 6 Umístění vzorku při zkoušce lámavosti	23
Obr. 7 Testování pevnosti v odlupování [31]	24
Obr. 8 Zkušební vzorek pro zkoušku rázové pevnosti [32].....	24
Obr. 9 Testovací inkoust na vzorku. Vlevo je odmaštěný materiál (inkoust tvoří souvislou vrstvu), vpravo je mastný povrch (inkoust tvoří kapičky, není slitý)....	26
Obr. 10 Testovací fixy a inkousty Arcotest [39].....	26
Obr. 11 Sekvenční metoda detekce mastných nečistot, otisk lidského palce na hladkém AlMg3 plechu [34].....	27
Obr. 12 Ukázka různých druhů kartáčů [41].....	35
Obr. 13 Princip sacího tryskání [42].....	36
Obr. 14 Princip tlakového tryskání [42]	36
Obr. 15 Polyuretanová pěna s abarazivem [45].....	38
Obr. 16 Pelety suchého ledu [44].....	38
Obr. 17 Schéma anodické oxidace hliníku.....	41
Obr. 18 Laserový paprsek [16].....	43
Obr. 19 Princip vytvoření povlaku pyrosilem [27]	44
Obr. 20 Technická dokumentace lepeného spoje	46
Obr. 21 Zkouška smáčivosti povrchu broušení	47
Obr. 22 Proces moření vzorku Obr. 23 Oplach vzorku ve vodě.....	48
Obr. 24 Zkouška smáčivosti povrchu moření.....	48
Obr. 25 Proces čištění plazmou.....	49
Obr. 26 Přístroj pro čištění povrchu plazmou	49

Obr. 27 Zkouška smáčivosti povrchu plazma	50
Obr. 28 Proces čištění laserem	51
Obr. 29 Uspořádání laseru	51
Obr. 30 Proces čištění povrchu laserem	51
Obr. 31 Zkouška smáčivosti povrchu laser	52
Obr. 32 Proces tryskání suchým ledem	52
Obr. 33 Pelety suchého ledu	52
Obr. 34 Přístroj pro tryskání suchým ledem IC-022	53
Obr. 35 Zkouška smáčivosti povrchu tryskání suchým ledem.....	53
Obr. 36 Schéma založení prvního vzorku.....	54
Obr. 37 Schéma nanesení adheziva.....	55
Obr. 38 Schéma vložení druhého vzorku	55
Obr. 39 Schéma nasazení přítlačné objímky.....	55
Obr. 40 Lepidlo 3M™ Scotch-Weld™ DP8625NS	56
Obr. 41 Aplikační pistole 3M.....	57
Obr. 42 Inkousty Arcotest pro zkoušku smáčivosti povrchu	57
Obr. 44 Uchycení vzorku v čelistích	58
Obr. 43 Trhací stroj LabTest 5.100SP1	58
Obr. 45 Průběh smykové zkoušky, porušení mezi druhou a třetí	60
Obr. 46 Broušení-porucha spoje, označení vzorků zleva: B1, B2, B3, BO	62
Obr. 47 Moření – porucha spoje, označení vzorků zleva: M1, M2, M3, MO	63
Obr. 48 Plazma – porucha spoje, označení vzorků zleva: P1, P2, P3, PO	63
Obr. 49 Laser – porucha spoje, označení vzorků zleva: L1, L2, L3, LO	64
Obr. 50 Tryskání – porucha spoje, označení vzorků zleva: T1, T2, T3, TO	65

Seznam tabulek

Tabulka 1 Označení typů porušení [33].....	25
Tabulka 2 Rozdělení lepidel podle vlastností [8]	29
Tabulka 3 Mechanické vlastnosti slitiny EN AW 5754 (AlMg3) o tvrdosti H22 [35]	45
Tabulka 4 Parametry nastavení laseru.....	50
Tabulka 5 Označení vzorků.....	54
Tabulka 6 Vlastnosti použitého lepidla [40]	56
Tabulka 7 Výsledky zkoušky na trhacím stroji.....	61
Tabulka 8 Průměrné hodnoty výsledků zkoušek na trhacím stroji	61

Seznam grafů

Graf 1 Průběh smykové zkoušky lepeného spoje	59
Graf 2 Sloupcový graf průměrných hodnot sil	68

Seznam příloh

- Příloha 1:** Technický list lepidla 3M™ Scotch-Weld™ DP8625NS
- Příloha 2:** Smykové zkoušky lepených spojů