



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

Předúpravy povrchu pro lepené spoje

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR: Bc. Marek Masopust

VEDOUcí PRÁCE: Ing. Jan Kudláček Ph.D.

STUDIJNÍ PROGRAM: N 2301 Strojní inženýrství

STUDIJNÍ OBOR: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Praha 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Masopust** Jméno: **Marek** Osobní číslo: **475029**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výrobní inženýrství**
Specializace: **Bez specializace**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Předúpravy povrchu pro lepené spoje

Název diplomové práce anglicky:

Surface pretreatments for adhesive joints

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rozbor problematiky lepených spojů
- 2) Rozbor problematiky vhodných předúprav povrchu pro lepené spoje
- 3) Lepené spoje skleněných materiálů
- 4) Vliv předúpravy povrchu na vlastnosti vybraných lepených spojů.
- 5) Technicko- ekonomické zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

R. D. Adams - Structural Adhesive Joints in Engineering, 2012
Anna Rudawska - Adhesives: Applications and Properties, 2016

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Kudláček, Ph.D. ústav strojírenské technologie FS

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

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **15.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2024**

Ing. Jan Kudláček, 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

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Tímto prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jana Kudláčka 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

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Kudláčkovi Ph.D. za jeho odborné rady a vedení práce, dále pánům Ing. Jiřímu Kuchařovi Ph.D. a Ing. Vítu Novákovi za jejich ochotu a cenné rady při práci na experimentu a především Ing. Nikol Bachurové za její vřelý přístup, cenné rady a odborné názory při práci na experimentální části. Děkuji rovněž panu Vladislavu Rázkovi z Jablonce nad Nisou za zprostředkování 3D tisku.

Anotace

Diplomová práce se v teoretické části zabývá obecným přehledem teorie lepených spojů, teorií předúpravy povrchu a dělením předúprav, speciální pozornost je následně věnována lepeným spojům skla. V praktické části se zabývá hodnocením předúprav povrchu pro vybrané lepené spoje. Na vzorcích skla typu clear vision se provádí tři různé povrchové předúpravy (odmaštění, tryskání, leptání), následně se měří drsnosti pomocí drsnoměru od společnosti Mitutoyo a poté jsou aplikována tři vybraná lepidla (dvousložkové epoxidové, vteřinové kyanoakrylátové a dvousložkové akrylátové), kterými se na vzorky lepí kovové panenky. Po vytvrzení lepidla se provádí zkouška odtrhem ke stanovení napětí potřebného pro odtržení panenky ze skleněného vzorku. Vybrané vzorky jsou rovněž odmaštěny, s přesahem slepeny každým z použitých lepidel a následně v trhacím stroji testovány na stříh za pomoci speciálních, na 3D tiskárně vyrobených, přípravků k upnutí. Zkoumá se vliv vybraných předúprav a zvolených lepidel na odolnost a způsob porušení lepeného spoje, určuje se statisticky nejlepší varianta předúpravy v kombinaci s lepidlem pro odtrhovou zkoušku a vytváří se metodika pro zkoušku vzorků na stříh.

Název diplomové práce:	Předúpravy povrchu pro lepené spoje
Autor práce:	Bc. Marek Masopust
Vedoucí práce:	Ing. Jan Kudláček Ph.D.
Konzultant:	
Akademický rok:	2023/2024
Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	12133 – Ústav strojírenské technologie
Vedoucí ústavu:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Rozsah práce:	88 stránek, 22 tabulek, 43 obrázků
Klíčová slova:	předúpravy povrchu, lepené spoje, clear vision sklo, drsnost, zkouška odtrhem, zkouška stříhem

Annotation

The thesis in its theoretical part deals with a general overview of glued joints, the theory of surface pretreatments, special attention is paid to glass adhesive joints. In experimental part, the thesis deals with an evaluation of surface pretreatments for selected glued joints. Three different surface pretreatments (degreasing, blasting, etching) are performed on clear vision glass samples, then roughness is measured using a Mitutoyo device. Afterwards, three selected adhesives (two-component epoxy, cyanoacrylate and two-component acrylate) are applied to glue metal dolls to glass samples. After the glue is hardened a tear test is performed to determine the stress required to tear the doll from the glass sample. Selected samples are also degreased and then glued with and overlap using each of the three adhesives available. Later these samples are tested for shear stress using specially 3D printed clamping devices. The influence of selected pretreatments and adhesives on resistance against failure and type of failure mode is investigated. Statistically best option of pretreatment in combination with the adhesive for tear-off testing is determined and new methodology for testing shear stress is created.

Title of the final thesis:	Surface pretreatments for adhesive joints
Author:	Bc. Marek Masopust
Supervisor:	Ing. Jan Kudláček Ph.D.
Consultant:	
Academic year:	2023/2024
University:	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	12133 – Department of Manufacturing Technology
Head of department:	doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE
Extent:	88 pages, 22 tables, 43 pictures
Keywords:	surface pretreatments, adhesive joints, clear vision glass, roughness, pull-off test, shear test

Obsah

Obsah	7
Seznam zkratek	11
1 Úvod	12
2 Teoretická část	13
2.1 Lepený spoj	13
2.1.2 Historie lepených spojů	13
2.1.3 Výhody lepených spojů	14
2.1.4 Nevýhody lepených spojů	16
2.2 Teorie lepícího procesu	16
2.2.1 Adheze	17
2.2.1.1 Mechanická teorie adheze	17
2.2.1.2 Difúzní teorie adheze	18
2.2.1.3 Chemická teorie adheze	18
2.2.1.4 Molekulová teorie adheze	18
2.2.1.5 Elektrostatická teorie adheze	19
2.2.2 Koheze	19
2.2.3 Smáčivost	19
2.3 Lepidla	20
2.3.1 Tepelné vlastnosti lepidel	21
2.3.2 Mechanické vlastnosti lepidel	22
2.3.3 Deformace lepidel	22
2.3.4 Stárnutí lepidel	22
2.3.5 Dělení lepidel dle původu	23
2.3.5.2 Plastomery	24
2.3.6 Dělení lepidel podle tuhnutí ve spojích	25
2.3.6.1 Roztoková a disperzní lepidla	25

2.3.6.2	Reaktivní lepidla	25
2.3.6.3	Tavná lepidla	25
2.4	Technologie lepených spojů.	26
2.5	Předúpravy povrchu pro lepené spoje.....	27
2.5.1	Mechanické úpravy povrchu	27
2.5.1.1	Broušení	28
2.5.1.2	Kartáčování	28
2.5.1.3	Tryskání.....	29
	Kovová abraziva.....	29
	Nekovová abraziva	30
	Pneumatické tryskání	30
	Tryskání metací jednotkou	31
	Mokrý tryskání	31
2.5.2	Chemické úpravy povrchu	31
2.5.2.1	Odmašťování.....	31
	Odmašťování organickými rozpouštědly	32
	Odmašťování alkalickými roztoky.....	32
	Elektrolytické odmašťování	32
	Emulzní odmašťování	33
	Odmašťování pomocí ultrazvuku.....	33
	Parní odmašťování	33
	Oplach	34
2.5.3	Aktivní úpravy povrchu	34
2.5.3.1	Aktivní mechanické úpravy povrchu	34
	Koronování.....	34
	Plazmová předúprava	35
	Předúprava plamenem.....	35
	Předúprava suchým ledem	35

2.5.3.2 Aktivní chemické předúpravy povrchu	36
Moření	36
Dekapování.....	36
Primery	36
Fosfátování	37
Chromátování	37
Eloxování	37
2.6 Lepené spoje ze skla	37
2.6.1 Výběr lepidla	38
2.6.2 Aplikace	38
2.6.3 Předúpravy povrchu	39
2.6.4 Vliv různých faktorů na mechanické vlastnosti spoje.....	40
4 Experimentální část	42
4.1 Použité vzorky	42
4.2 Předúpravy povrchu	43
4.2.1 Odmaštění.....	43
4.2.2 Tryskání.....	44
4.2.3 Leptání.....	46
4.3 Měření drsnosti povrchu	47
4.4 Lepení vzorků	50
4.4.1 Loctite EA 9445	51
4.4.2 Auratech AR 011	51
4.4.3 Auratech AR 708.....	52
4.4.4 Příprava vzorků a lepení.....	53
4.4 Odrhová zkouška přilnavosti dle ČSN ISO 4624	54
4.4.1 Průběh odtrhávání	56
4.4.2 Výsledky odtrhové zkoušky pro Loctite EA 9455	58
4.4.2.1 Předúprava odmaštěním	58

4.4.3 Výsledky odtrhové zkoušky pro Auratech AR 011	61
4.4.4 Výsledky odtrhové zkoušky pro Auratech AR 708	64
4.4.5 Grafické srovnání výsledků odtrhové zkoušky	67
4.5 Zkouška stříhem.....	70
5 Technicko – ekonomické zhodnocení	76
6 Závěr.....	77
Bibliografie.....	80
Seznam tabulek.....	84
Seznam obrázků.....	85
Seznam grafů	87
Přílohy	88

Seznam zkratek

ČSN	Česká národní norma
EN	Evropská norma
ISO	International organisation for standardisation (mezinárodní organizace pro standardizaci)
O	Kyslík
CO	Oxid uhelnatý
NH ₂	Amin
CO ₂	Oxid uhličitý
UV	Ultraviolet (ultrafialové)
T _g	Teplota skelného přechodu
TPE	Termoplastický elastomer
PUR	Polyuretanový kaučuk
PVD	Polyvinylchlorid
PS	Polystyren
PVB	Polyvinyl butyral
PE	Polyethylen
SSG	Structural sealant glazing (zasklení s konstrukčním tmelem)
R _a	Střední hodnota drsnosti
R _z	Střední hloubka drsnosti
λ _c	Mezní vlnová délka
PLA	Kyselina polymléčná

1 Úvod

Lepené spoje se staly neodmyslitelnou součástí mnoha průmyslových odvětví, a to především díky svým výhodám, mezi které patří snadná montáž, vynikající pevnost spoje a schopnost spojovat materiály různých vlastností. Pro dosažení optimální adheze a vytvoření pevného a trvanlivého spoje je však nutné dodržovat pravidla pro správnou předúpravu povrchu.

V teoretické části se práce zaměřuje na problematiku lepených spojů, shrnuje historii, pojednává o teoriích lepícího procesu, dále se pak věnuje lepícím prostředkům a zaměřuje se na problematiku předúprav povrchu před lepícím procesem. Speciální pozornost se věnuje lepeným spojům skla.

V praktické části se práce zabývá vlivem vybraných předúprav povrchu a zvolených lepících prostředků na odolnost spoje a způsob jeho porušení. Na vzorcích se provádí tři různé typy předúprav, které se pro každou skupinu liší. Následně jsou aplikována 3 různá lepidla a provádí se zkouška odtrhem dle ČSN ISO 4624. Vybrané vzorky jsou rovněž testovány na stříh za pomoci speciálního přípravku vyrobeného metodou 3D tisku.

Cílem práce je zhodnotit vliv použitých předúprav a lepidel na drsnost povrchu, na pevnost a způsob porušení lepeného spoje se sklem a vytvoření základu pro metodiku dalšího testování lepených spojů skla.

2 Teoretická část

2.1 Lepený spoj

Lidstvo zná lepidla již přibližně 6000 let, avšak až ve 20. století došlo výraznému rozmachu technologií lepení. V dnešní době je tato technologie již zcela běžným způsobem spojování nejrůznějších různorodých materiálů. Principem lepení je vytvoření nerozebíratelného spoje pomocí přídavného lepícího materiálu, který je nejčastěji v tekuté formě a během tuhnutí přilne k základnímu materiálu spojovaných součástí díky adhezi. Mezi nejčastěji lepené materiály patří dřevo, papír, kůže, sklo, keramika (běžná i stavební), kovy, pryž, textil, termoplasty či beton. [1]

2.1.2 Historie lepených spojů

Za počátek lepení se považuje již doba kamenná, ve které lidé používali březovou smůlu k výrobě nádob (věder) ze stromové kůry. Smůla se nanášela na slepované části pomocí kamenného klínu způsobem, který lze přirovnat k dnešní technologii pájení. První lepidla živočišného původu byla vyrobena ve Starověkém Egyptě, jednalo se o směs klišu (z kůže a kostí hospodářských zvířat) a křídly. Takto zhotovená lepidla se využívala k lepení prvních rakví.

První zmínky o užívání lepidel se datují do doby cca. 4000 let před naším letopočtem. Na pravěkých pohřebištích byla archeology nalezena keramika, která byla rozbita a následně opravena pomocí pryskyřice. Dalším příkladem jsou babylonské sošky, které měly přilepené oči do očních důlků. Babyloňané byli zároveň patrně prvními lidmi, kteří použili lepidlo jako tmel, konkrétně tak utěšňovali spáry lodí.

Ve starověku se k lepení používal albumin, ten se získával ze zvířecí kůže a ze zbytků kostí se využíval dextrin. Starověcí Řekové a Římané přišli s technikou dýchování, ta spočívá v lepení tenkých vrstev dřeva na sebe. Pro utěsnění spárů lodí se v této době zároveň začal používat včelí vosk.

Na počátku 18. století došlo k založení prvních plantáží, které zajišťovaly produkci surovin na výrobu klišu. Díky tomu mohlo dojít k rozšíření produkce a používání lepidel.

Roku 1823 bylo v Anglii patentováno lepení kaučukovým lepidlem. První patent na vulkanizované kaučukové lepidlo pak přišel zhruba 30 let po objevu vulkanizace přírodního kaučuku. V roce 1872 vznikla v Americe první továrna na výrobu celuloidu. Až do druhé světové války se lepily pouze materiály, které měly schopnost vsakování lepidla, tedy například dřevo, kůže nebo papír.

Významným milníkem byl objev formaldehydové pryskyřice. Výrobce letadel de Havilland (původem z Anglie) začal využívat lepidlo s názvem Redux při výrobě letounu DH – 103 Hornet. Díky lepení duralu a překližky došlo k výraznému snížení hmotnosti použitého dřeva. Lepení se setkalo s velkým úspěchem, proto bylo následně použito i u dalšího letounu společnosti de Havilland DH – 104 Dove.

V USA přišel rozmach lepení v leteckém průmyslu až s rokem 1941. Do roku 1943 bylo, nejčastěji u stíhacích letounů, slepeno přibližně 50 000 různých prvků. Právě díky letectví se technologie lepení stává jednou z nejvyužívanějších metod pro pevné, rychlé a snadné spojení konstrukčních materiálů. Dochází k lepení stále větších a složitějších dílců a díky značnému kvalitativnímu vývoji se lepení začíná využívat i u menších letounů.

Od roku 1965 již začali techniku lepení využívat všichni nejznámější světoví výrobci letounů. Došlo k výraznému zjednodušení postupů lepení, díky čemuž se technologie začala uplatňovat i v ostatních odvětvích průmyslu. Jednalo se například o automobilový průmysl, lodní průmysl, stavebnictví či měřicí a regulační techniku.

V současné době světová produkce výroby lepidel stále roste, jsou vyráběna podle přesných požadavků zákazníků a jen stěží by se hledal obor, kde se lepidla nevyužívají. I přes značnou historii technologie lepení se stále jedná o obor, který se neustále vyvíjí a nabízí velikou perspektivu do budoucna. [1][2][3]

2.1.3 Výhody lepených spojů

Tradičními způsoby spojování materiálu je například svařování, pájení, nýtování či šroubové spojení. Lepení nachází využití v případech, kdy jsou zmíněné tradiční způsoby spojování materiálu nevyhovující. Například svarové spoje nelze zcela nahradit lepenými spoji, je však žádoucí obě metody kombinovat.

Vzniklý spoj musí být dostatečně pevný, houževnatý a nepohyblivý. Technologie lepení má řadu výhod, zároveň také množství nevýhod. Při konstrukci se musí pečlivě zvážit vhodnost technologie lepení ve srovnání s jinými technologiemi.

Mezi významné výhody technologie lepení patří:

- Možnost spojování různorodých materiálů
- Eliminace tepelného namáhání spojovaných materiálů
- Minimální nebo žádné ovlivnění struktury materiálů
- Zanedbatelný nárůst hmotnosti finálního výrobku
- Schopnost tlumit vibrace a chvění
- Pevnost při namáhání ve smyku, rázová pevnost
- Spojování materiálů, které nejdou spojit jinou technologií
- Absence koncentrátorů napětí
- Možnost snížení výrobních nákladů
- Snížení elektrolytické koroze v případě kovových materiálů

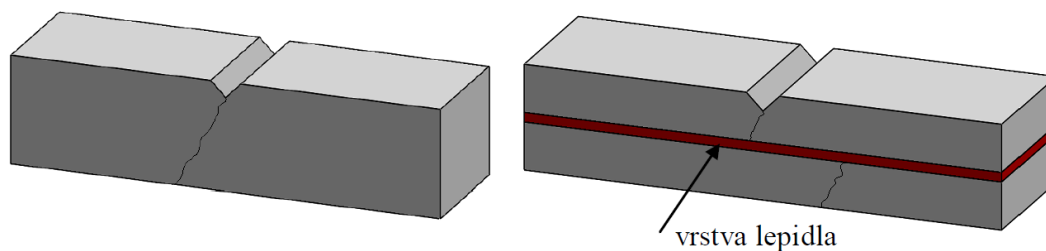
Za hlavní výhody lepených spojů se považuje především celkové zvýšení pevnosti nově vzniklého spoje. Zatímco např. šroubové spoje jsou limitovány tloušťkou spojovaných materiálů a dochází k místní koncentraci napětí, u lepených spojů tento problém odpadá.

Lepidla zároveň utěsňují a vyrovnávají nerovnosti materiálů, čímž značně narůstá protikorozní odolnost. Tento nárůst je znatelný především u švových svarů.

Výrobní náklady klesají především díky úspoře času práce, jelikož krom předúprav povrchu nejsou vyžadovány přípravné práce jako hloubení závitů apod. Zároveň je výhodné, že vytvrzovací doba nezávisí na délce a šířce spoje.

Obrázek 1 znázorňuje schopnost lepidla potlačit účinek vrubu. Defekt se šíří směrem od vrubu do materiálu. Zastavuje se však v nanesené vrstvě lepidla a dále se šíří z jiného místa, takže část druhá část spoje není vrubem nikterak ovlivněna. Tímto principem dochází k výraznému zvýšení vrubové houževnatosti ve srovnání s výrobkem z jednoho kusu materiálu.

[1][3]



Obrázek 1 - Rozdíl účinku vrubu na jednolitý díl a lepený díl [3]

2.1.4 Nevýhody lepených spojů

Jako hlavní nedostatky technologie lepení se uvádí následující:

- Obtížná demontáž vzniklých spojů
- Nemožná recyklace spoje
- Vysoké požadavky na čistotu povrchu lepených ploch
- Nutnost speciálních úprav pro materiály se špatnými adhezními vlastnostmi
- Citlivost vzniklého spoje na namáhání v odlupování
- Omezená odolnost spoje při vysokých teplotách
- Nízká životnost v silně agresivních prostředích
- Nemožnost lepení při nízkých teplotách
- Vliv klimatických podmínek
- Uskladnění a použitelnost většiny lepidel je časově omezené [1][3]

2.2 Teorie lepícího procesu

Přiblížení dvou materiálů na molekulární vzdálenost je v praxi nemožné, neboť spojované plochy by musely být dokonale čisté, rovné a souběžné.

Přilnavost mezi pevnou a tekutou látkou je výrazně lepší, ke spojování materiálů se využívá lepidel (adheziv). Lepidlo musí povrch součásti dostatečně smáčet a za přesně stanovených podmínek musí mít schopnost přejít do pevného stavu. Lepidlo se zároveň dokáže přizpůsobit nerovnostem povrchu a odstraňuje většinu pohlcených par a plynů z pórů v povrchu.

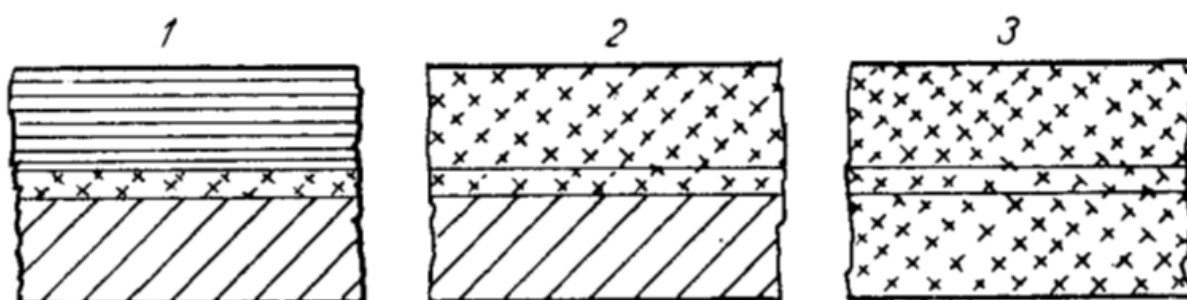
Pevnost a odolnost lepeného spoje závisí na třech hlavních parametrech:

- Adheze
- Koheze
- Smáčivost lepeného povrchu [2]

2.2.1 Adheze

Adheze se definuje jako souhrn chemických a fyzikálních sil, pomocí kterých dochází k vzájemnému poutání částic povrchů přiblížených materiálů (lepidlo a lepený materiál). Při dotyku povrchů různorodých materiálů dochází k vzájemnému kontaktu jednotlivých atomů, které na sebe působí vazbami. Vzniklé vazby jsou ovlivněny velikostí přitažlivých sil. Na základě různého složení lepidel a lepených materiálů rozlišujeme různé formy adheze. Ke vzniku autoadheze dochází v okamžiku, kdy má lepidlo a spojovaný materiál identické složení.

[1]



- 1 – složení lepidla je odlišné od složení lepených dílců, běžný adhezivní vztah
2 – lepidlo a jedna z lepených ploch mají shodné chemické složení – jednostranná (částečná) autoadheze
3 – lepidlo a oba lepené materiály mají shodné chemické složení – úplná autoadheze

Obrázek 2 - Vztah mezi adhezí a lepeným materiálem [3]

2.2.1.1 Mechanická teorie adheze

Povrch každého materiálu je tvořen vrcholy a prohlubněmi. Souhrnně se tyto nerovnosti nazývají jako drsnost povrchu. Mechanická teorie adheze předpokládá dokonalé proniknutí adheziva (lepidla) do prohlubní adherendu (materiálu), kde po zatuhnutí lepidla dojde k vytvoření prolnutého systému. Pevnost lepené spoje se odvíjí od počtu prolnutí lepidla do nerovností v materiálu. V dnešní době je tato teorie využívána již pouze zřídka, například pro adhezi pryže a textilu či pro výrobu překližek. [2]

2.2.1.2 Difúzní teorie adheze

Založena na skutečnosti, že některé látky jako například polymery mezi sebou mohou interagovat napříč rozhraním. Pevnost spoje je závislá na době kontaktu lepidla s materiálem, teplotě lepení, molekulární hmotností polymerů a charakteru adheziv a adherendu. [3]

2.2.1.3 Chemická teorie adheze

Chemická teorie se zakládá na působení kovalentních vazeb mezi molekulami lepidla a lepeného materiálu. Uplatňuje se pro hladké i pro porézní povrchy materiálů.

Pro vytvoření pevného spoje, který bude vykazovat kohezivní lom (namísto adhezivního) musí dojít k chemické reakci mezi adhezivem a adherendem při vzniku kovalentní vazby přes rozhraní lepidlo-materiál. Nejvyšší kvality spoje se dosáhne při lepení materiálů s reaktivním či chemicky upraveným povrchem.

Atomy účastníci se chemické vazby sdílí elektronový pár, do kterého každý atom přispívá jedním elektronem. Sdílení elektronového páru odpovídá jednoduché kovalentní vazbě. Kovy, přírodní polymery a oxidované plasty se výborně lepí s volnými chemickými skupinami $-O$, $-OH$, $-CO$ či $-NH_2$.

Zásadní je výběr vhodného lepidla, v případě tvorby kovalentní vazby musí lepidlo obsahovat volné skupiny, které jsou schopné reagovat s povrchem lepeného materiálu. Mezi vysoce reaktivní lepidla patří lepidla skupin epoxidových, hydroxidových a karboxidových.

V některých případech skuteční může docházet ke vzniku chemických vazeb, obecně však lepení probíhá v podmínkách, které nepodporují jejich vznik. Nelze tedy garantovat zvýšení pevnosti spoje po konci reakce. [4]

2.2.1.4 Molekulová teorie adheze

V současnosti nejvíce akceptované teorie, vychází se smáčecích jevů, adsorpce a adheze. Adheze vzniká vzájemným působením molekul (adherendu a adheziva), proto je nutné, aby molekuly měly polární funkční skupiny, které jsou schopné vzájemné interakce.

Adhezní spoje vznikají ve dvou fázích, první zahrnuje přemístění molekul lepidla blíže k povrchu lepeného materiálu, ve druhé dojde ke vzniku mezimolekulárních sil na styčných

plochách. Tyto síly se označují Van der Waalsovy. Po dosažení adsorpční rovnováhy přestávají síly mezi lepidlem a materiálem působit.

Dosah výše zmíněných sil je menší, než hloubka drsnosti lepených ploch, proto je nutné, aby lepidlo mělo perfektní smáčivost a vyplnilo nerovnosti povrchu materiálu. [4]

2.2.1.5 Elektrostatická teorie adheze

Podle této teorie je vznik adheze ve spoji zapříčiněn dotykem dvou rozdílných substancí a vznikem dvojvrstvy. Ze spoje se stává kondenzátor, jehož rozdílně nabitě desky se přitahují. Při oddělení materiálů je nutné potenciálový rozdíl vybit nebo nechat vyzářit ve formě elektronové emise.

Elektrostatická teorie a souvislost mezi pevností spoje a velikostí povrchového elektrostatického náboje nebyla dosud přesvědčivě prokázána. [3]

2.2.2 Koheze

Označení sil, jimiž se pojí částice téhož materiálu (v našem případě vrstvy lepidla). Velikost koheze je popsána kohezní energií, která se definuje jako velikost energie potřebné pro odtržení jedné částice od ostatních.

Rostoucí teplota, způsobující pohyb molekul v materiálu, je příčinou snižování kohezní pevnosti. Kohezní pevnost je také dána charakterem lepidla. Jednosložková lepidla (zpravidla termoplasty) měknou se zvyšující se teplotou. Dvousložková lepidla (epoxidy) jsou lepidly s velmi vysokou kohezní pevností. Naopak akryláty se řadí mezi lepidla s velmi nízkou kohezí.

Kohezní pevnost může být klíčovou pro soudržnost lepidla především v případech, kdy není možné zajistit dostatečnou velikost adheze v závislosti na povrchové úpravě před lepením.

[1][3]

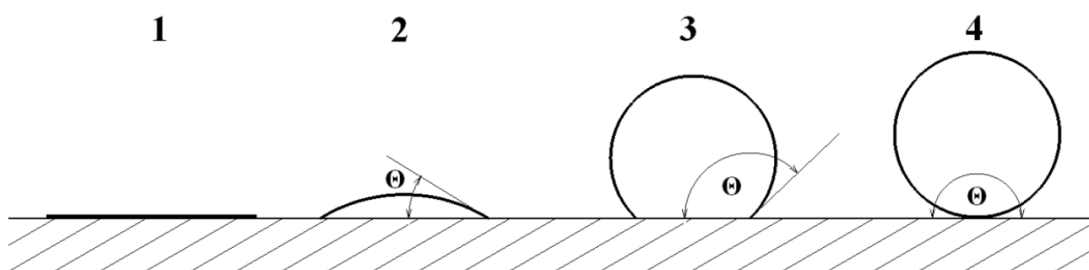
2.2.3 Smáčivost

Smáčivost je definována jako schopnost kapaliny přilnout k povrchu látky a udržovat s povrchem kontakt. Stupně smáčení jsou určeny adhezními a kohezními silami. V situaci, kdy lepidlo špatně smáčí povrch adherendu, může docházet k ulpívání bublin vzduchu ve fázovém

rozhraní. Kvůli tomu vznikají slabé vazebné vrstvy mezi lepidlem a lepeným materiálem, které snižují pevnost lepeného spoje a mohou způsobovat defekty mezi vazebnými vrstvami. V případě kvalitního spoje dochází k lomu mimo vazebné vrstvy.

Nejlepší smáčivosti se dosahuje, když je hodnota kontaktního úhlu smáčení blízko nule.

Obrázek 3 znázorňuje smáčivost povrchu kapalinou v závislosti na úhlu smáčení. V případě 1 dochází k úplnému smáčení povrchu, úhel smáčení $\Theta = 0$. V případě 2 dochází k částečnému smáčení povrchu, úhel smáčení $0 < \Theta < \pi/2$. Příklad 3 znázorňuje malé smáčení povrchu, úhel smáčení $\pi/2 < \Theta < \pi$. V posledním případě, značeném číslem 4, je povrch zcela nesmáčený a $\Theta = \pi$. [3][5]



Obrázek 3 - Smáčivost povrchu kapalinou [3]

K dobré smáčivosti napomáhá nízká viskozita lepidla, přiměřený tlak spojování a co nejdelší doba kontaktu adheziva s povrchem adherendu. Ke smáčení pevného povrchu dochází pouze v případě, kdy je povrchová energie lepidla stejná nebo ideálně menší, než je kritická povrchová energie lepené látky. Kovové materiály s vysokou povrchovou energií se tedy lepí snadno, v případě umělých hmot je často nutné povrchovou energii příznivě ovlivnit vhodnou povrchovou úpravou. [3][5]

2.3 Lepidla

Lepidla se skládají z filmotvorných makromolekulárních látek, jejichž původ může být přírodní nebo syntetický. Filmotvorné látky mají lineární nebo trojrozměrnou strukturu. Lineární struktura (termoplastická) je rozpustná po použití organických rozpouštědel, trojrozměrná struktura se netaví ani nerozpouští.

Na trhu se v současnosti vyskytuje obrovské množství lepidel, která mají odlišné vlastnosti na základě různých chemických složení.

Mezi sledované parametry lepidel patří viskozita a s ní spojené smáčení povrchu (rozebráno v předchozích odstavcích). Dále je žádoucí krátká či regulovatelná doba vytvrzování, ta závisí na chemickém složení lepidla, podílu složek, způsobu lepení a prostředí, ve kterém k lepení probíhá. V neposlední řadě je důležitým parametrem doba skladovatelnosti (doba před otevřením / použitím) lepidla.

Stupeň kyselosti lepidla se udává v hodnotách pH, kde hodnota menší než 7 značí kyselost lepidla, větší než 7 pak zásaditost. Hodnota pH je důležitá pro skladování a vytvrzování. Dojde-li k poklesu hodnoty pH, dochází ke kondenzaci lepidla ještě před jeho použitím, čímž se zpomaluje nebo úplně zastavuje proces vytvrzování. Vliv na vytvrzení má rovněž relativní vlhkost v lepidle.

Pro správnou funkci lepidel je nutné zajistit homogenitu lepidla. Zásadní je toto především u dvousložkových lepidel, kde se musí dbát na správné pořadí přidávání komponent do směsi a řádné promíchání. Důležité je rovněž dbát na čistotu při manipulaci a při nanášení lepidla, nedodržení technologické kázně v průběhu výroby vede ke zhoršení mechanických vlastností. [6][7]

2.3.1 Tepelné vlastnosti lepidel

Mezi základní tepelné vlastnosti lepidel patří tepelná vodivost, tepelná roztažnost a měrná tepelná kapacita.

Tepelná vodivost definuje schopnost látky přenést tepelnou energii mezi jednotlivými částicemi. V případě lepidel je hodnota tepelné vodivosti výrazně nižší než u kovů (například pro měď 510 W.mK^{-1} , pro syntetická lepidla $0,2 \text{ W.mK}^{-1}$).

Výkyvy teplot v prostředí, kterému je lepidlo vystaveno, mohou způsobit rozměrové i objemové změny. Tyto změny popisuje tepelná roztažnost. S rostoucí teplotou roste součinitel tepelné roztažnosti, nižší teplotní roztažnost najdeme u lepidel s vyšším modulem pružnosti. Hodnota teplotní roztažnosti je u lepidel obecně vyšší než u kovů. [7][8]

2.3.2 Mechanické vlastnosti lepidel

Mechanické vlastnosti lepidel jsou ovlivňovány teplotou stejně jako tepelná vodivost a tepelná roztažnost. Dále závisí na chemickém složení látky, velikosti makromolekul a jejich uspořádání.

Jedna z hlavních mechanických vlastností lepidel je modul pružnosti E [MPa], který se může zjistit ze zkoušek v tahu, ohybu či smyku. Modul pružnosti v tahu je ovlivnitelný složením zkoušeného materiálu.

Ze zkoušek tahu, tlaku či ohybu lze dále stanovit mez pevnosti. Při vyšších teplotách se snižuje pevnost lepidla, tento pokles ovšem závisí i na teplotě lepidla a prostředí, ve kterém pevnost stanovujeme.

Poslední z důležitých mechanických vlastností je tvrdost. Tvrdost je definována jako odpor proti vnikání cizích těles. Univerzální metoda pro zjišťování tvrdosti u všech druhů lepidel neexistuje, používají se tedy různé metody v závislosti na konzistenci lepidla. [6][7][8]

2.3.3 Deformace lepidel

Při působení vnějšího zatížení dochází k přetvoření materiálu, ta mohou být v případě polymerních materiálů trojího charakteru:

- Elastická deformace – vratná deformace způsobená změnou v uspořádání elektronů.
- Visko-elastická deformace – vratná deformace, závislá na čase, způsobená protažením molekulových řetězců struktury lepidla.
- Visko-plastická deformace – nevratná deformace, závislá na čase, způsobená posunem molekulárních řetězců.

Výše zmíněné procesy nemusí nastávat postupně, obvykle dochází k jejich kombinaci. Vznik deformací je závislý na typu a struktuře lepidla. [8]

2.3.4 Stárnutí lepidel

Stárnutí lepidel je důležitý faktor, který může ovlivnit vlastnosti a trvanlivost lepidel. Je způsobeno řadou faktorů (např. chemické, mechanické, teplotní a biologické). Pro zaručení

požadovaných vlastností a životnosti lepeného spoje je nutné dobře porozumět výše zmíněným faktorům.

- Chemické stárnutí – Dochází k němu reakcí s UV zářením, oxidací či hydrolyzou. UV záření může narušit polymerní řetězce v lepidle, čímž dojde k jeho degradaci. Oxidací, při které reagují molekuly lepidla s molekulami kyslíku, může dojít ke ztrátě elasticity a snížení adhezních sil. Hydrolyzou, tedy reakcí lepidla s vodou, může dojít k rozkladu struktur lepidla a tím snížení pevnosti spoje.
 - Mechanické stárnutí – Vzniká při opakovaném namáhání lepeného spoje, např. vibrace, tlakové síly, tahové síly a podobné. Namáhání může způsobit oslabení vazby mezi lepenými povrchy nebo deformaci lepidla.
 - Teplotní stárnutí – Teplota často hraje klíčovou roli při stárnutí lepidel. Vysoké teploty mohou urychlovat chemické reakce v lepidle a tím způsobit jeho degradaci. Nízké teploty zase způsobují ztrátu elasticity a tím pokles pevnosti lepidla.
 - Biologické stárnutí – Způsobeno působením plísní nebo bakterií, problém především ve stavebnictví, kde jsou lepidla vystavena vlhkosti a organickým materiálům.
- [13][32][33]

2.3.5 Dělení lepidel dle původu

Lepidla se dělí dle několika kritérií. Z hlediska původu se dělí na přírodní a syntetická lepidla, přírodní lepidla se dále dělí na rostlinná a živočišná. Syntetická lepidla se vyrábí chemickými procesy. Díky jejich příznivým vlastnostem (především vysoká pevnost a chemická odolnost) postupně vytlačují přírodní lepidla. Nejvíce používaná syntetická lepidla jsou v současnosti polymery.

Polymerní lepidla se na základě mechanických vlastností dělí na elastomery a plastomery.[8][9]

2.3.5.1 Elastomery

Jedná se o polymery se silně visko-elastickým chováním a nízkým modulem pružnosti. Jsou tvořeny dlouhými polymerními řetězci (sesíťovanými) s malým počtem chemických vazeb. Kvůli tomu jsou pružné a měkké i za normálních pokojových teplot. Elastomery ochlazené pod teplotu skelného přechodu (T_g) vykazují menší pružnost.

Po odstranění působícího zatížení se elastomery vrací do původního tvaru (vratná deformace). Elastomery dobře absorbují energii a snášejí dynamické namáhání i nerovnoměrné zatížení.

Typickými zástupci elastomerů jsou termoplastický elastomer (TPE), polyuretanový kaučuk (PUR) nebo silikonový kaučuk. [1][8][9]

2.3.5.2 Plastomery

Za běžných podmínek jsou tvrdé a křehké, při zvýšených teplotách se stávají plastickými a tvárnými. Dělí se na dvě skupiny podle schopnosti zpětného tuhnutí po ochlazení. Pokud plastomer po zahřátí změkne a po ochlazení opět ztuhne, jedná se o termoplast. Pokud je změna po zahřátí trvalá a nevratná, mluvíme o reaktoplastu.

Termoplasty jsou tvořeny lineárními řetězci se slabými mezimolekulárními vazbami. Během zahřívání se vlivem dodané energie začínají makromolekuly termoplastů rozkmitávat, čímž se narušují vnitřní soudržné síly. Polymer začíná měnit tvar a přechází do plastického stavu, ve kterém se dá tvářet. Jeho vlastnosti v tomto stavu jsou podobné kaučuku. Opakované zahřívání a ochlazování termoplastů může způsobit jejich degradaci, oxidaci nebo tepelné stárnutí. Nejznámějšími termoplasty jsou polyvinylchlorid (PVC), polystyren (PS) či polyvinylbutyral (PVB), ze kterého se vyrábí fólie pro vrstvená skla.

Reaktoplasty (známé také jako termosety) mají lineární složení makromolekul. Po jejich zahřátí dochází k zesíťování, což je proces, při kterém se řetězce spojují pomocí chemických vazeb a vzniká tak trojrozměrná síť. Od momentu zesíťování není možné jednotlivé řetězce oddělit od sebe. Chemické vazby jsou natolik silné, že hmotu nelze znovu roztavit. Při vystavení vysokým teplotám (více než 200°C) reaktoplasty nenávratně tuhnou. Zesíťováním se spojují molekuly o velké molekulové hmotnosti, což způsobuje nárůst teploty skelného přechodu a zlepšují odolnost proti okolnímu prostředí, jako například působení vysokých teplot. Díky této skutečnosti se reaktoplasty využívají za zvýšených teplot mnohem více než termoplasty. Typickými reaktoplasty jsou epoxidové a fenolytické pryskyřice (PE), akryláty nebo dvousložkové polyuretany. [1][8][9]

2.3.6 Dělení lepidel podle tuhnutí ve spojích

Při aplikaci jsou lepidla obvykle v tekutém stavu, pro správnou funkci spoje je nutné jeho správně tuhnutí. Lepidla se dělí podle způsobu, jakým se dostanou z fáze tekuté do fáze tuhé.

2.3.6.1 Roztoková a disperzní lepidla

Tuhnou díky vsakování a odtékání vody či organických rozpouštědel. Tvoří je až 60% přírodních či syntetických látek, která se rozpouští nebo dispergují ve vodě nebo organických rozpouštědlech.

Dají se použít pouze v případech, kdy je jeden z adherendu propustný pro plyny. Lepidlo se správně nanáší na obě kontaktní plochy a je nutné zajistit správně přiléhání těchto ploch. Vlivem vysychání dispergačních látek a rozpouštědel dochází ke zmenšení původního objemu lepidla a vytváří se tenký film.

Do této skupiny patří například polyamidová lepidla, polyvinylacetátová lepidla, lepidla na bázi PVC a sloučeniny celulózy.

2.3.6.2 Reaktivní lepidla

Průmyslově rozšířená lepidla na bázi epoxidových a fenolických pryskyřic, jejich proces tuhnutí nastává změnou ve vnitřní struktuře.

Dále se dělí na jednosložková lepidla (vytvrzení pouze zvýšenou teplotou) a vícesložková lepidla (vytvrzení po smísení složek a následného působení zvýšené teploty).

Reaktivní lepidla tuhnou rovněž vlivem vlhkosti okolního prostředí, podobně jako lepidla silikonová a kyanoakrylátová. Dále se tuhnutí aktivuje pomocí kontaktu s kovem (akrylátové lepidlo) nebo přidáním tvrdidla (polyuretanové nebo epoxidové lepidlo).

2.3.6.3 Tavná lepidla

Za normální teploty si zachovávají strukturu a vlastnosti jako termoplasty, při zahřívání na teploty 160-200°C se lepidlo taví a stává se kapalným a lepivým.

Nanáší se pouze na jednu stranu adherendu, spoj se následně nechává vychladit, případně se na něj působí tlakem pro zvýšení počáteční pevnosti.

Díky tomu, že jsou tavná lepidla z termoplastů, je možná jejich recyklace (rozpojení spoje) opětovným zahřátím. Naopak je nutné mít na paměti, že tepelná odolnost tavných lepidel je omezena jejich teplotou tavení. [1][8][9]

2.4 Technologie lepených spojů.

Pro dosažení dlouhodobé spolehlivosti a trvanlivosti spoje je nutné přizpůsobení celé konstrukce. Především je třeba dodržet následující pravidla:

- Mechanické namáhání se nesmí soustředit pouze v místě spoje, musí být rozloženo rovnoměrně.
- Spoj musí být namáhán v tahu a ve smyku, je nutné omezit na minimum namáhání v odlupování a kroucení (nejhorší stav pro lepený spoj).
- Plocha lepeného spoje musí být dostatečně velká a napětí má být po celém spoji rovnoměrně rozloženo.
- Lepené materiály by měly mít podobné (ideálně stejné) koeficienty teplotní roztažnosti, zvláště v místě spoje.
- Dotykové plochy musí být co nejméně členité, není žádoucí provádět jakékoliv úpravy po slepení.
- Lepení by mělo probíhat v jedné operaci, aby se předešlo časovým prodlevám.
- Hotové spoje se nezatěžují dalším tlakem a vyššími teplotami.

Lepená soustava se rozdělí na části, které budou nejvhodnější pro následné lepení. Pokud toto není možné, pak je nutné zvážit tvarovou úpravu spoje či připojit dodatečné zpevnění. Tím dosáhneme požadovaného rozložení napětí na celou plochu.

Jednostranně přeplátovaný spoj se využije v případě, kdy je tloušťka adherendu výrazně menší než ostatní rozměry. Spoj vytvořený jednostranným přeplátováním je vhodný pro tuhé materiály namáhané v tahu, tlaku či smyku. Naopak se nedoporučuje pro lepení elastických materiálů. V průběhu zatěžování dochází k ovlivnění elasticity v celém spoji.

Oboustranně přeplátovaný spoj se využije v případech, kdy je tloušťka adherendu větší než 30mm. Pevnost spoje je více ovlivňována účinky odlupovacích sil, přeplátováním lze tomuto negativnímu vlivu předejít.

Při lepení dostatečně velkých ploch se používá tupý spoj, který je vhodný pro tahové i tlakové namáhání. Naopak je nevhodný pro namáhání ohybem. Šířka lepených materiálů pro tuto metodu by se měla pohybovat v rozmezí 30-50mm. Spoj je možné zesílit podložením. Tupých spojů lze využít pro tuhé i elastické materiály.

V případě, kdy má být spoj namáhán tahem i ohybem, je vhodné využít zkosený tupý spoj. Ten je využitelný, podobně jako spoj tupý, pro tuhé i elastické materiály. [2][3][4]

2.5 Předúpravy povrchu pro lepené spoje

Předúprava povrchu lepeného materiálů je první operací celé technologie lepení a je jednou z nejdůležitějších, protože umožňuje vytvoření spoje s optimálními vlastnostmi. Provádí se za účelem vytvoření spoje s maximální fyzikální a chemickou odolností a pevností. Správně provedená předúprava povrchu zajistí smáčivost a adhezi. Předúpravy povrchu lze rozdělit na předběžné, základní a dodatečné.

Hlavním cílem předúprav povrchu je podpořit tvorbu silných chemických a fyzikálních vazeb a to zajištěním následujícího:

- Odstranění nečistot z povrchu spojovaných materiálů (mastnota, prach, korozní produkty, oxidické vrstvy, mikroorganismy, bakterie atd.)
- Odstranění veškerých nežádoucích povlaků (především v případě opakovaného lepení) nebo ochranných povlaků (protikorozi ochrana)
- Dosažení příznivé stereometrické povrchové textury spojovaného materiálu
- Aktivace povrchů spojovaných materiálů (související s povrchovou energií)

V následujících kapitolách budou rozebrány základní druhy předúprav povrchů. [10, 11]

2.5.1 Mechanické úpravy povrchu

Pomocí mechanických úprav se dosahuje požadované jakosti povrchu. Důvody pro provádění předúprav jsou čištění povrchu a úprava geometrie, které zaručí dostatečnou drsnost

a zvyšuje styčnou plochu mezi adherendem a adhezivem. Dále se mechanickým čišťením odstraňují korozní vrstvy či jiné malé nečistoty. [11][12][13]

2.5.1.1 Broušení

Jedná se o základní operaci pro rychlé odstranění hrubých nečistot z povrchu materiálu, například rzi a nežádoucích oxidů kovů. Využívá se v případech, kde by pouhé odmaštění nebylo dostatečné. Díky broušení zároveň dosáhneme potřebné drsnosti povrchu pro lepení (průměrná aritmetická úchylka profilu bývá řádově v desetinách μm).

Mezi nejpoužívanější brusné materiály se řadí korund, karbidy křemíku, diamant, kubický nitrid boru atd.

Před provedením procesu broušení se doporučuje zařadit odmaštění povrchu, které by mělo následovat i po provedení procesu broušení

Povrch adherendu lze brousit ručně kotoučovou bruskou, dojde tak k odstranění ostrin, otřepů, hrubých nečistot, rzi a ke zjemnění povrchu po předchozím obrábění. Kvůli různému přítlaku na nástroj není možné zajistit konstantní drsnost povrchu na celé ploše. Stopy po nástroji se v závislosti na přítlaku tedy mohou měnit. Kromě proměnlivé kvality povrchu patří mezi nevýhody ručního broušení také nemožnost brousit malé otvory, nákladnost procesu, pracovní bezpečnost a hygiena práce.

Další technologií broušení je pásové broušení, tato varianta umožňuje urychlení procesu oproti kotoučové brusce, ale nepřináší výhody z pohledu přesnosti.

Proces broušení lze automatizovat, vyplatí se to však pouze ve velkých podnicích s velkoobjemovou výrobou. Pro malé podniky se automatizace kvůli vysoké pořizovací ceně a nutnosti nastavování při výměně mezi výrobky nevyplácí. [11][12]

2.5.1.2 Kartáčování

Provádí se za účelem odstranění hrubých nečistot z povrchu nebo ke zjemnění a sjednocení povrchu. Kartáčováním lze rovněž odstranit vrstvu oxidů vzniklou při broušení.

Pro kartáčování k odstranění hrubých nečistot se využívají především drátěné kartáče, jejichž dráty bývají ocelové či mosazné. Odstranění všech nečistot není možné kvůli zbytkům korozních nečistot v pórech.

V případě kartáčování ke zjemnění povrchu se využívá měkkých a pružných kartáčů z umělých nebo organických vláken. Touto metodou lze docílit snížení hodnoty drsnosti u tvarově složitých a členitých výrobků. [11][12][13]

2.5.1.3 Tryskání

Určeno k čištění povrchu od korozních produktů a nečistot, zároveň také k zajištění požadované drsnosti. Jedná se o nejefektivnější ze způsobů mechanický předúprav povrchu. Pracuje na principu dopadu urychlených zrn abraziva, které na základě úhlu dopadu na povrch materiálu z něj vytrhávají drobné částice. Kinetickou energii získají částice stlačeným vzduchem, tlakem vody či metacím kolem. Klíčovými parametry tryskání jsou úhel dopadu abraziva, ostrost hran abraziva a tvrdost tryskaného abraziva.

Tryskací prostředek se volí podle tryskaného materiálu, tloušťky stěn součásti, požadovaných vlastností na výsledný povrch a dle výchozího stavu povrchu před tryskáním. Tryskací prostředky se obecně dělí na drtě (ostré) a granuláty (oblé). Drtě se využívají při odstraňování povrchových vrstev, granuláty na zjemnění struktury povrchu.

Tryskací prostředky se rovněž dělí dle materiálu abraziva, nejčastěji se jedná o kovová abraziva, umělý korund a balotina. [11][12]

Kovová abraziva

Typickými kovovými abrazivy jsou ocelový granulát a ocelová drť. Ocelový granulát se využívá při tryskání svařenců a odlitků systémy s metacím koly. Kuličky se vyrábějí z oceli se sorbitickou strukturou (pružnost, odolnost proti rázům a únavě).

Ostrohranným ocelovým abrazivem je ocelová drť, která se vyrábí drcením tepelně zpracovaného ocelového granulátu se zrny většího průměru. Ocelová drť se používá k modifikaci kvality povrchu pneumatickým tryskáním. Přejít mezi ocelovým granulátem a ocelovou drtí tvoří tzv. sekaný drát., který vlastnostmi spadá mezi dvě výše jmenovaná abraziva. Využívá se v systémech s metacím koly, což je umožněno postupným zaoblováním

původně ostrých hran sekaného drátu, které snižují opotřebení metacího kola. Použití sekaného drátu tak může výrazně prodloužit životnost abraziva i lopatek metacího kola. [12]

Nekovová abraziva

Typickým nekovovým abrazivem je korund, který se používá pro odstranění otřepů, korozních produktů či zdrsňování povrchu. Používá se v hnědé a bílé formě. Hnědý korund je nejtvrší nekovový tryskací prostředek, k opotřebení dochází velmi pomalu. Naopak bílý korund se používá pro aplikace s vysokými požadavky na čistotu. Bílá barva umožňuje vyzorovat znečištění tryskacího prostředku, po kterém musí následovat výměna abraziva.

Dalším nekovovým syntetickým abrazivem je balotina, mikrokuličky ze sodného skla. Používá se pro otryskávání ocelí a hliníkových slitin, také pro jemné zdrsňování povrchu nebo jeho zpevňování, tzv. shot peening. Balotina je chemicky stabilní a ekologicky nezávadná, nejčastěji je tryskání balotinou zařazeno jako poslední krok předúprav.

Tryskání suchým ledem z povrchu efektivně odstraňuje mastnotu, rez, olej a zbytky emulzí. Suchý led (oxid uhličitý) má teplotu -79°C , což při dopadu na povrch způsobí termický šok. Oxid uhličitý se dostane mezi povrchovou vrstvou a samotný materiál, kde díky sublimaci zvětší svůj objem a odtrhne povrchovou vrstvu. Suchým ledem lze tryskat i složité součásti, jedná se o efektivní a bezodpadový proces. [12][13]

Pneumatické tryskání

Dle způsobu urychlení vzduchu se dělí na sací a tlakové, pracuje na principu přívodu abraziva do stlačeného vzduchu, který proudí ven z trysky vysokou rychlostí.

V případě tlakového pneumatického tryskání je abrazivo uloženo v tlakové nádobě, z níž postupně propadá do regulační komory, kde je urychleno proudícím vzduchem. Směs vzduchu a abraziva je hnána skrze hadici do trysky s malým průměrem, kde dojde k expanzi vzduchu. Díky expanzi je směs vzduchu a abraziva urychlena na tryskaný povrch.

Při metodě sacího pneumatického tryskání je abrazivo nasáváno do prostoru pistole z beztlakové nádoby. Díky proudění stlačeného vzduchu z primární trysky vznikne v meziprostoru podtlak, kterým je abrazivo nasáváno skrze přívodní hadici do meziprostoru, ve kterém dojde ke smísení se vzduchem. Takto vzniklá směs se následně urychlí v pracovní trysce

a je vrhána na povrch. Oproti tlakovému tryskání je proces nepřetržitý (odpadá nutnost dosypávání abraziva), ale hůře využívá energii stlačeného vzduchu. [11][12][13]

Tryskání metací jednotkou

Jedná se o vysoce účinnou metodu s možností automatizace, systémy metacích jednotek jsou často konstruovány jako průběžné. K urychlování abraziva dochází mechanicky pomocí rotujících lopatek. Abrazivo se obvykle přivádí středem metací jednotky a vlivem odstředivé síly je posouváno na okraj lopatek. Rychlost abraziva látajícího z metacích kol může být až 80 m.s⁻¹. [12]

Mokrý tryskání

Principem je mísení vody s abrazivem a stlačeným vzduchem. Mokrý tryskání umožňuje dosáhnout nižších hodnot drsnosti povrchu ve srovnání s pneumickým tryskáním, díky přívodu vody do stlačeného vzduchu lze totiž použít abraziva s jemnější zrnitostí. Při mokřém tryskání zároveň klesá spotřeba abraziva a snižuje se celková prašnost procesu. [12]

2.5.2 Chemické úpravy povrchu

Chemické úpravy povrchu se provádějí s cílem vyčištění povrchu od ulpělých nečistot, jako například prach, mastnota, olej, vlhkost apod. Kvůli využití chemikálií v těchto procesech je nutné věnovat pozornost bezpečnosti práce a dopadu procesu na životní prostředí (způsob zpracování odpadu). Zároveň je nutné zohlednit kompatibilitu materiálu se zvolenou metodou. [13]

2.5.2.1 Odmašťování

Standardně se jedná o první operaci v rámci předúprav povrchu před lepení, využívá organická rozpouštědla a roztoky.

Odmašťování organickými rozpouštědly

Rozpouštění ulpělých nečistot probíhá pomocí molekulárních pochodů, dochází k rychlému rozpuštění velkého množství mastnoti, díky čemuž je proces vhodný pro čištění velkých ploch. Organická rozpouštědla musí mít schopnost rozpouštět ulpělou mastnotu, musí být nehořlavá, málo toxická, stálá a regenerovatelná (opakovaně použitelná).

Organická rozpouštědla lze použít ve formě kapaliny i ve formě páry, která se využívá v odmašťovacích lázních s ohřevem rozpouštědla, díky kterému vzniká nad lázní vrstva páry, ve které se čištěné výrobky několik sekund před ponorem drží. Nejčastěji se v dnešní době využívají areny (aromatické uhlovodíky) a alifatické uhlovodíky, naopak z ekologických důvodů se upouští od organochloridů. [12]

Odmašťování alkalickými roztoky

Tato metoda je založena na rozpouštění nečistot rozpustných ve vodě. Principem je narušení mastného povlaku, vytěsnění nečistot do lázně a následné emulgace či dispergace uvolněné mastnoty, čímž se zabráňuje zpětnému usazení na povrchu materiálu.

Vytěsňování nečistot zajišťují organické tenzidy, které snižují povrchové napětí roztoku a napětí v místech styku dvou fází, zároveň mají schopnost obklopit rozptýlené nečistoty, čímž zabráňují jejich opětovnému shlukování a ulpívání na materiálu.

Metoda se provádí ponorem součástí do nádob s roztokem, který se míchá a zahřívá na teplotu mezi 70 a 90°C. Jako rozpouštědla se využívají fosfáty, boráty, silikáty či hydroxidy sodíku a hydroxidy draslíku. [12]

Elektrolytické odmašťování

Jedná se o jednu z nejefektivnějších metod odmašťování. Při procesu se musí dodržet přesné složení chemického odmašťovacího prostředku. Proces odmašťování umocňuje katodický či anodický cyklus, při kterém se při průchodu proudu uvolňuje na povrchu materiálu kyslík a vodík.

Důležitým parametrem elektrolytického odmašťování je proudová hustota, při vyšších hodnotách proudové hustoty je odmašťování účinnější. Z pohledu katodického a anodického je

účinnější odmašťování katodické, neboť množství vodíku vyloučeného na katodě je až dvojnásobně vyšší oproti množství kyslíku, který se vyloučí na anodě při procesu anodického odmašťování. Kvůli adsorpci koloidů či vyloučených kovů z vodní lázně na povrch nelze vždy katodickou metodou dosáhnout požadovaných výsledků, proto obvykle proces odmaštění končí anodickým cyklem. [11][12]

Emulzní odmašťování

Provádí se ponorem výrobku do rozpouštědla obohaceného o emulgátory nebo nástřikem směsi emulgátorů na znečištěný povrch. Rozpouštědlo obohacené o emulgátory odstraní mastnotu a následný oplach odstraní produkty tepelného a mechanického zpracování. Nástřiková metoda se vyznačuje slabší odmašťovací schopností, ale pro odstranění oleje, mastnoty či prachu z povrchu kovových materiálů je dostačující. V lázni se využívají organická rozpouštědla jako etanol, aceton či toluen nebo alkalické roztoky, voda a emulgátory. V závislosti na odmašťovacím médiu lze proces provádět za zvýšených i normálních teplot. [11][12][13]

Odmašťování pomocí ultrazvuku

Využívá se pro čištění menších dílů se složitou geometrií. Metoda je založena na šíření ultrazvukových vln médiem, využívá mechanismů kavitačního (exploze kavitačních bublin, které vyvolají rázovou vlnu šířící se všemi směry) a akustického proudění (charakterizováno tlakovým gradientem s kolmým směrem ke zdroji). Díky dvou zmíněným mechanismům vzniká obrovské množství bublinek v kapalině, jejichž následné imploze a akustické vedení odstraňuje nečistoty z povrchu. Ultrazvukové vany se vyrábějí v různých rozměrech v závislosti na plánovaném využití. Budiče ultrazvuku jsou připevněny na dně nebo stěnách nádob. [12]

Parní odmašťování

Principem je stříkání proudu mokré páry pod vysokým tlakem. Přidáním alkalických roztoků lze zvýšit účinnost procesu. Parní odmašťování je charakteristické vysokým čistícím účinkem a to díky kombinaci vysokých teplot, tlaku vody a přísadkami alkalických roztoků. Využívá se především pro čištění rozměrných ploch. [12][14]

Oplach

Oplachy jsou nedílnou součástí předúprav povrchu, je nutné je zařadit mezi jednotlivé operace a na závěr celé technologie. Při manipulaci s výrobky mezi jednotlivými operacemi mohou na povrchu ulpět nečistoty vyskytující se na hladině lázně, ty je nutné odstranit oplachem. Rozlišuje se několik způsobů oplachu, jedním z nich je oplach postřikem, který se využívá na očištění velkých ploch, jeho nevýhodou je velká spotřeba vody a tím i nevhodnost celého procesu. Dalším typem je oplach ve vaně, který se dále liší podle frekvence výměn vody (méně časté výměny = úspora nákladů, ale zhoršení kvality oplachu kvůli postupnému znehodnocení lázně). Nejvhodnějším procesem je dvoustupňový oplach s protiproudou výměnou vody. [14]

2.5.3 Aktivní úpravy povrchu

Procesy měnící chemické složení povrchu výrobku, zlepšují jeho smáčivost, usnadňují zapojení do lepeného spoje a také ochraňují povrch materiálu před okolními vlivy během provozu. Jedná o převážně poslední stupeň předúprav, nevyužívají se vždy, ale pouze v případech, kdy jsou kladeny vysoké nároky na pevnost a životnost lepeného spoje. Aktivní úpravy povrchu nelze provádět samostatně, vždy jim musí předcházet některá z předúprav povrchu zmíněná výše. Aktivní úpravy povrchu se dělí na mechanické a chemické.

2.5.3.1 Aktivní mechanické úpravy povrchu

Pro aktivní mechanické úpravy povrchu se využívá působení plamene, laseru, elektrického výboje nebo UV záření. Níže vyjmenované metody se používají pro aktivaci povrchů u polymerů.

Koronování

Koronování je proud elektronů a iontů urychlených elektrickým polem, provádí se za účelem zlepšení adhezních vlastností povrchu. Zařízení na koronování se často zařazují do výrobních linek, vybavení má nízké pořizovací náklady a proces je bezodpadový. [13]

Plazmová předúprava

Využívá se v případech, kdy jsou vysoké nároky na pevnost spoje (lze dosáhnout až 4x vyšší pevnosti ve srovnání s neupraveným povrchem). Proces probíhá ve vakuové komoře za částečného vakua (zvýšené náklady = vhodné pro hromadnou výrobu). Plazma během krátkého času vyvolá změny zasahující do hloubky několika molekul od povrchu, lze vytvořit smáčivý povrch i na jinak nesmáčivých materiálech. [13]

Předúprava plamenem

Povrch materiálu se na krátký čas vystaví působení plamenu z plynového hořáku. Molekulové vazby na povrchu se poruší a napojí se na ně ionty z plamene. Tím se zvýší povrchová energie materiálu a zlepší se adheze. Výsledné vlastnosti jsou ovlivněny časem působení plamene, vzdáleností hořáku od povrchu a poměr vzduchu s plynem (metan či propanbutan) ve směsi. [12][13]

Předúprava suchým ledem

Jedná se o jednu z nejmodernějších předúprav. Suchý led je pevnou formou oxidu uhličitého, při atmosférických podmínkách sublimuje kolem teploty -78°C . Suchý led se nejčastěji získává při výrobě čpavku, kde vzniká jako odpadní produkt. CO_2 v plynné podobě se následně stlačuje do tlakových nádob a ochlazuje až do momentu zkapalnění. Zkapalněný oxid uhličitý se díky expanzi při výstupu nádoby mění ve sněhovou hmotu, ze které se vyrábí pelety, tvarem podobné zrnkům rýže. Princip použití je následně stejný jako v případě pneumatického tryskání. Pelety dopadající na povrch působí pomocí kinetické energie a teplotního šoku, který je způsoben nečistotám na povrchu i materiálu pod nimi (může mít i nežádoucí efekt). Nečistoty na povrchu popraskají kvůli smykovému napětí, které vzniká rozdílem teplot. Následně jsou nečistoty odfouknuty z povrchu stlačeným vzduchem, který unáší na povrch suchý led. [29][30][31]

2.5.3.2 Aktivní chemické předúpravy povrchu

Moření

Moření se provádí v kyselých nebo silně zásaditých chemikáliích. Nejčastěji se využívají roztoky kyselin, jako například sírová, chlorovodíková, dusičná, fosforečná, fluorovodíková atd., nebo alkalické roztoky (hydroxidy).

Při moření se z povrchu odstraňují nečistoty vzniklé oxidací, především pak okuje, rez či oxidické vrstvy vzniklé během tepelného, mechanického nebo chemického zpracování. Během procesu dochází k leptání povrchu a vytváří se dutinky pro zachycení lepidla. Do mořicí lázně se přidávají inhibitory, díky kterým se proces zrovnoměrní, zabraňuje přemoření materiálu a snižují množství emisí produkovaných mořicí lázní. Moření se nejčastěji využívá pro úpravu povrchu kovových materiálů. [5]

Dekapování

Dekapováním se zbavuje povrch materiálu tenkých vrstev oxidů. Rovněž se tak aktivuje povrch, který je následně snazší zapojit do lepeného spoje. Proces dekapování je kratší než proces moření, využívá se roztoků kyselin. Ocel se aktivuje v roztoku kyseliny sírové, měď v roztoku kyseliny dusičné nebo sírové a hliník v roztocích hydroxidu sodného. [11][12][13]

Primery

Primery jsou složením převážně kapaliny, které se na povrch aplikují před nanesením lepidla. Na povrch jsou primery aplikovány krátce po přípravě povrchu, výsledkem jejich aplikace je částečně lepidlý nebo suchý film. Obvykle je nutné nechat primer zaschnout při pokojové teplotě, v některých případech i za zvýšených teplot v řádu desítek minut. Primery zvyšují adhezi a pevnost spoje, dále se používají kvůli ochraně povrchu nebo inhibici koroze lepeného materiálu. Po nanesení vzniká nová vrstva, která vytváří dobrý spoj s lepidlem i substrátem pomocí chemické vazby. Je možné je využít pro kovové i nekovové materiály a v některých případech mohou nahrazovat předúpravy povrchu. [13]

Fosfátování

Fosfátování je chemický proces, při kterém se na povrchu kovového materiálu vytvoří anorganická vrstva z roztoku kyseliny fosforečné a jejích solí. Takto vyloučené povlaky jsou velmi porézní a tím pádem velmi nasákavé. Fosfátování se provádí za účelem zlepšení protikorozi odolnosti a zlepšení přilnavosti lepidel a nátěrů. [11][13]

Chromátování

Na povrchu ocelí i neželezných kovů vzniká vrstva zvyšující protikorozi odolnost, poskytující mechanickou ochranu povrchu a zlepšující adhezi. Vrstva je tvořena směsí základního kovu a sloučenin chromu. Provádí se v kyselých chromátovacích lázních, v nichž je hlavní složkou kyselina chromová. Výhodou těchto lázní je, že jsou stabilní a mají schopnost regenerace. [11][14]

Eloxování

Využívá se především pro hliník a slitiny hliníku, na jehož povrchu vzniká vrstva oxidu hlinitého. Ta je odolná vůči korozi a je navíc i tvrdá a ošetrzdorná. Vrstva oxidu hlinitého vzniká díky průchodu stejnosměrného proudu skrze lázeň (nejčastěji s kyselinou sírovou a chromovou) s katodou a anodou. Povlakovaný materiál se stává anodou, jako katoda slouží elektroda z kovového materiálu, nejčastěji olovo, korozivzdorná ocel či titan.[13]

2.6 Lepené spoje ze skla

Lepené spoje mají pro konstrukční aplikace skla veliký potenciál. Pevnost, tuhost, trvanlivost a další materiálové parametry je třeba posoudit na základě testování, aby bylo možné zvolit pro dané aplikace vhodná lepidla. Testovací programy zahrnují krátkodobé, dlouhodobé a dynamické způsoby zatěžování. Kombinace křehkého skla a tvárných materiálů zvětšuje oblast potenciálních aplikací daleko za hranice využitelnosti samotného skla.

Sklo se označuje jako ambivalentní stavební materiál. Jeho použití klade vysoké nároky, protože křehký materiál neodpouští designové ani konstrukční omyly, při správném zacházení je však „benevolentní“. Použití lepidel pro spojování skla nabízí možnost spoje na bázi látka-

látka, což umožňuje homogenní přenos zatížení a díky tomu dochází k výraznému snížení lokálních napětí ve srovnání se šroubovými spoji. [15]

2.6.1 Výběr lepidla

Při návrhu lepených spojů ze skla stojí před designéry nelehký úkol zvolit z obrovské škály dostupných lepicích produktů.

Mezi preferované vlastnosti lepidel pro konstrukční aplikace skla patří:

- Dostatečná pevnost
- Odolnost (UV záření, povětrnostní vlivy, detergenty)
- Vysoká tuhost pro těsná spojení
- Vysoká flexibilita pro spoje materiálů s různou teplotní roztažností
- Nízký sklon ke creepu
- Teplotní rozsah pro aplikace -20°C až $+80^{\circ}\text{C}$
- Průhlednost (především u viditelných a designových prvků)

Některé z výše jmenovaných požadavků jsou si vzájemně protichůdné. Jednotné schéma požadavků, které musí lepidlo splňovat, neexistuje. V závislosti na výše uvedených požadavcích se lepidla dělí podle chemických skupin pro různé konstrukční aplikace.

Kromě materiálových charakteristik mají na strukturální vlastnosti vliv i další parametry, především pak geometrie spoje a aplikované zatížení. [15]

2.6.2 Aplikace

Silikony se využívá pro fasády se strukturálním tmelem (SSG – Structural Sealant Glazing). Lineární nosný spoj spojuje sklo s nosným rámem fasádního prvku. Silikony nabízí dobrou teplotní stabilitu a zachovávají si flexibilitu i při nízkých teplotách. To je činí způsobilými pro aplikace lineárních spojů materiálů s různými koeficienty teplotní roztažnosti, například spoje skla a hliníku. Testy stárnutí a léta zkušeností prokázaly vynikající životnost silikonových adheziv. Nevýhodou jsou však nízké hodnoty dovoleného maximálního napětí. Za další nevýhody se považuje tloušťka spoje a neprůhledný vzhled lepidla.

Za účelem dosažení průhlednosti lepeného skleněného spoje lze vyrobit spoje za pomoci akrylátových lepidel, které se vytvrzují v UV a viditelném světle. Jedná se o čirá lepidla, díky čemuž jsou vhodná z hlediska vzhledu spoje. Ve srovnání se silikonovými lepidly dosahují akrylátová lepidla mnohem vyšších počátečních pevností a umožňují vyrábět i mnohem tenčí spoje. Jejich omezením je však zhoršení vlastností vlivem stárnutí a je třeba věnovat pozornost odlišnému chování v závislosti na teplotě.

Epoxidová lepidla jsou další skupinou s velkým potenciálem pro lepení skla. Mezi jejich hlavní výhody patří houževnatost, odolnost proti chemickému poškození či odolnost proti environmentálním vlivům. Využívají se v případech, kdy je od spoje požadována vyšší pevnost a nižší tažnost, tedy například tupé nebo bodové spoje. [15]

2.6.3 Předúpravy povrchu

Jak již bylo rozepsáno v předchozích kapitolách, předúpravy povrchů jsou zásadní pro vytvoření pevného a odolného spoje, slouží k odstranění nečistot a zlepšení adheze mezi lepenými povrchy a lepidlem.

Mezi hlavní předúpravy povrchu pro lepené povrchy ze skla patří:

- Odmašťování
- Oplachy
- Povrchová aktivace (dekapování)
- Broušení či pískování – zdrsnění povrchu pro vytvoření mikroskopických drážek, díky kterým se zvýší adhezní plocha, je nutné dbát opatrnosti, aby nedošlo k poškození skleněného materiálu
- Aplikace primeru
- Geometrické kontrola rovnosti povrchu

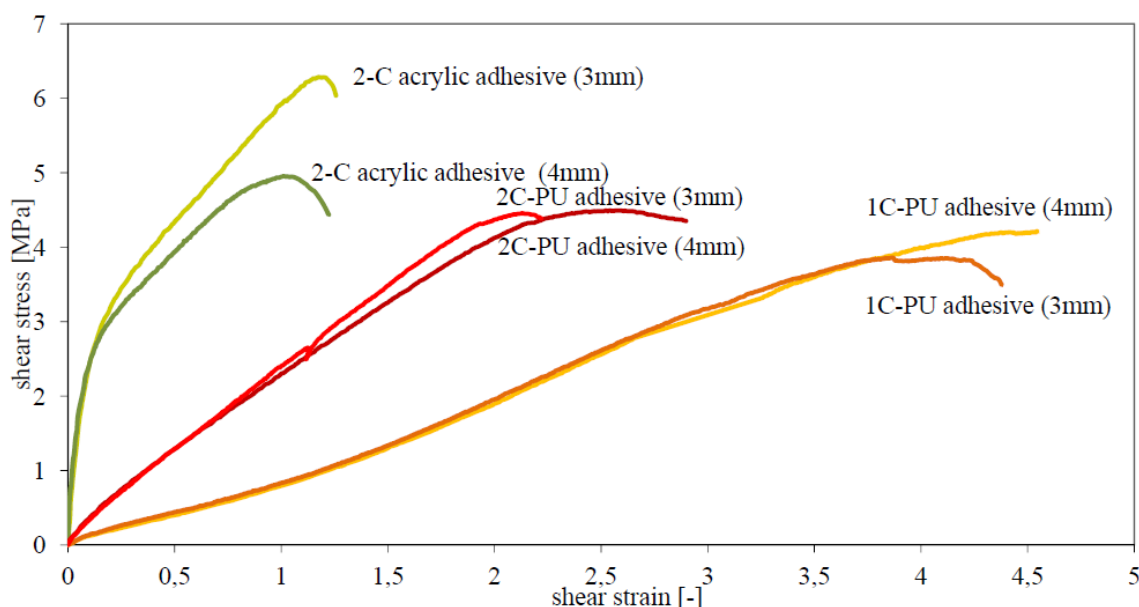
Složení jednotlivých předúprav se může lišit podle specifických aplikací. Lepení skla jakožto konstrukčního materiálu je stále poměrně nová technologie, proto dosud neexistují univerzální postupy předúprav – každý případ si žádá specifické postupy. [15][16]

2.6.4 Vliv různých faktorů na mechanické vlastnosti spoje

Výzkum prokázal, že pevnost lepených spojů skla při smykovém zatížení klesá s rostoucí teplotou. [17]

Další pokusy prokázaly, že úprava povrchu skla pískováním před lepením může zlepšovat odolnost spoje při smykovém namáhání ve srovnání s hladkým povrchem skla. Zároveň nebyl pozorován pokles pevnosti pískovaného skla, protože rozhodujícím faktorem v rámci lepeného spoje byla kohezní pevnost lepidla.

Vliv tloušťky lepidla byl pozorován u dvousložkového akrylátového lepidla, kde pevnost lepeného spoje klesala s jeho narůstající tloušťkou. U polyuretanových lepidel nebyl vliv tloušťky na pevnost spoje patrný (viz. obrázek 4)



Obrázek 4 - Vliv tloušťky lepené vrstvy na mechanické vlastnosti spoje. [18]

Různá lepidla vykazují jiné vlastnosti při stárnutí, které lze simulovat zkouškou ve venkovním prostředí po dobu 5 let (středoevropské klima). Polyuretanová adheziva a dvousložková akrylátová lepidla nevykazovala výrazné zhoršení mechanických vlastností, ale byly pozorovány určité změny, především u akrylátových lepidel.

Některé typy lepidel vytvrzované UV zářením vykazovaly nevhodné vlastnosti po provedení umělého stárnutí. U dalšího typu lepidla vytvrzovaného UV zářením došlo k poklesu pevnosti až o 40% oproti původním hodnotám. Tyto změny byly způsobeny působením

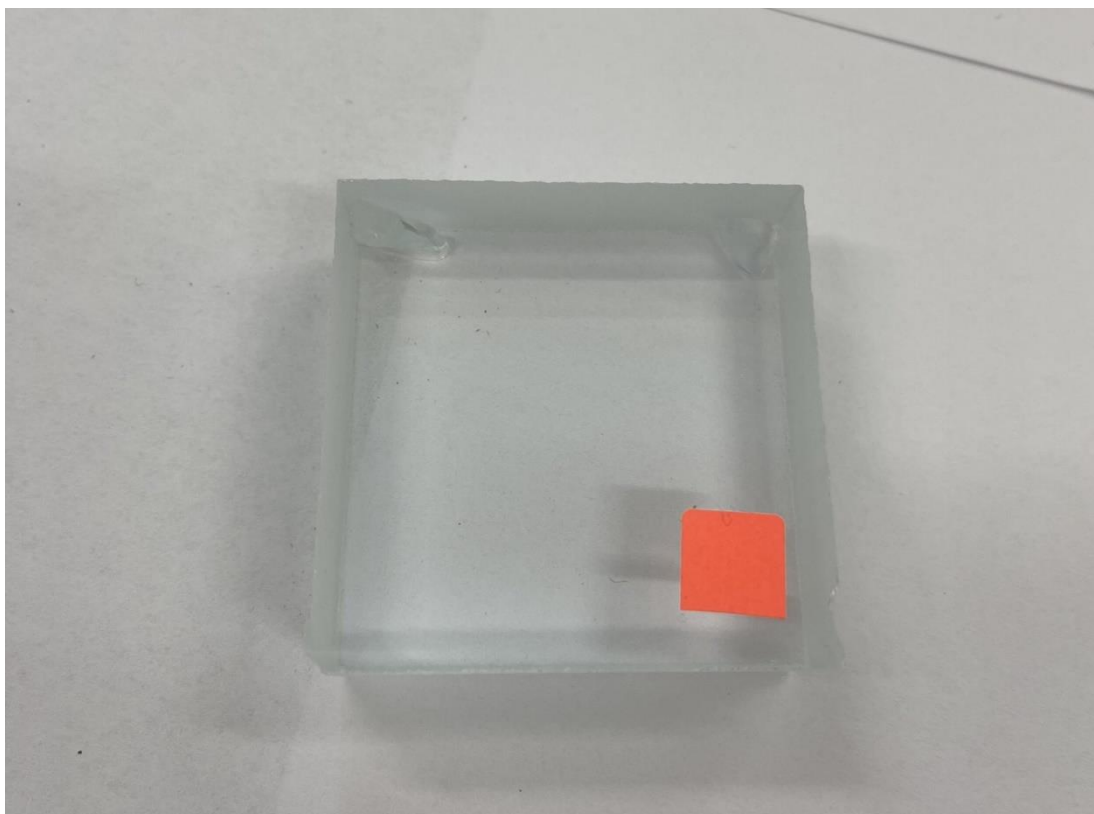
vlhkosti. Tento negativní vliv lze odstranit transparentním těsněním, které je odolné proti environmentálním vlivům.

Závislost mezi vlivem stárnutí a časem není lineární, kvůli této skutečnosti je jen velmi obtížně předpovídat chování spoje v různém čase. Mechanické vlastnosti se mohou méně či více zhoršovat v závislosti na chemickém složení a makromolekulární struktuře konkrétního lepidla. [18]

4 Experimentální část

4.1 Použité vzorky

Pro účely práce byly použity vzorky skla typu „clear vision“. Jedná se o kvádr o rozměrech 50x50x19 mm jehož obě strany mají rozdílné povrchové chemické složení. Jedna strana (na obrázku 5 vyznačena oranžovou nálepkou) je vyrobena procesem, kdy se z pece roztavené sklo plaví v lázni roztaveného cínu v redukční atmosféře, čímž vzniká povrchová vrstva, která bude v práci dále označována jako cínová. Druhá strana vzorku zmíněné úpravě nepodléhá a bude v práci označována jako strana vzduchová. Vizually nejsou obě zmíněné strany rozlišitelné, při experimentu se dbalo zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k jejich záměně. Proto byla cínová strana v průběhu experimentů neustále označována. [15]



Obrázek 5 - Vzorek skla typu "clear vision"

4.2 Předúpravy povrchu

V rámci experimentu se pro 27 vzorků provedly 3 různé předúpravy (vždy po 9 vzorcích). Prvních 9 vzorků bylo odmaštěno ultrazvukem, dalších 9 bylo tryskáno drceným korundem a posledních 9 vzorků bylo naleptáno leptací pastou. Jednotlivé postupy jsou rozebrány v následujících podkapitolách.

4.2.1 Odmaštění

Odmaštění vzorků probíhalo vždy po třech kusech v ultrazvukové čističce Kraintek K-2LE. Před umístěním vzorků do čističky byly sejmuty nálepky označující cínovou stranu, aby nedošlo ke znehodnocení lázně jejich oddělením při čistícím procesu. Do čističky byly umístěny tak, že cínová strana směřovala směrem vzhůru a po vytažení a vysušení proběhlo opětovné označení.

Čistící prostředek byl použit STAR 75PN o koncentraci 10% na 2l demineralizované vody + tenzid SurTec 086 0,6% (12ml). Odmaštění proběhlo v intervalu dlouhém 5 minut při teplotě lázně 50°C.

Po konci procesu odmaštění následoval dvoustupňový oplach v demineralizované vodě, délka jednoho oplachu byla 1 minuta. Vzorky byly následně vysušeny horkovzdušnou pistolí Bosch GHG 660 LCD Professional, aby bylo možné přistoupit k procesu lepení ihned po odmaštění.



Obrázek 6 - Ultrazvuková čistička Kraintek K-2LE



Obrázek 7 - Horkovzdušná pistole Bosch GHG 660 LCD Professional

Odmaštěné vzorky se vizuálně ani po hmatu nikterak neliší od původního vzorku bez jakýchkoliv provedených úprav. Povrch zůstává lesklý a na dotek hladký.

4.2.2 Tryskání

Tryskání vzorků proběhlo na manuálním tlakovém tryskacím zařízení od společnosti S.A.F. PRAHA s.r.o. v prostorách ČVUT FS pod dohledem zkušeného pracovníka. Vzorky byly umístěny do tryskací komory, kde byly kontinuálním manuálním pohybem tryskací hlavice tryskány směsí drceného hnědého korundu F60 ze vzdálenosti přibližně 20cm po dobu 30 sekund z každé strany.



Obrázek 8 - Tryskací zařízení od S.A.F. PRAHA s.r.o.

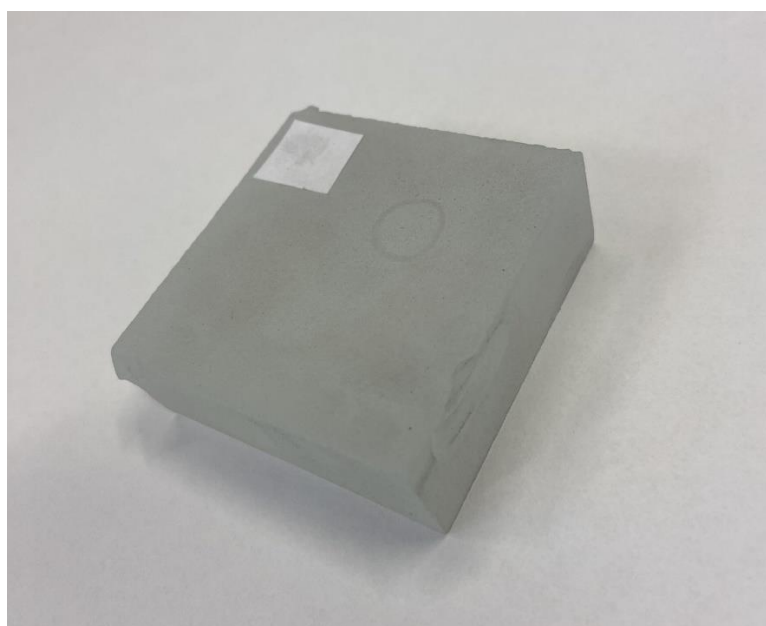


Obrázek 9 - Vnitřní komora tryskacího zařízení

Po provedení tryskání byly vzorky vizuálně značně odlišné od původních, na pohled matné s hmatatelně drsným povrchem.

Kvůli značnému znečištění vzorku během tryskání byl před odmaštění v ultrazvukové lázni zařazen oplach v tekoucí vodě. Následný proces ultrazvukového odmaštění, oplachu a vysoušení proběhl viz. podkapitola 4.2.1

Po ukončení tryskání každého jednotlivého vzorku byla opět označena původní cínová strana (viz. bílá nálepka na vzorku na obrázku 10).



Obrázek 10 - Tryskaný vzorek ve stavu před prvním oplachem tekoucí vodou

4.2.3 Leptání

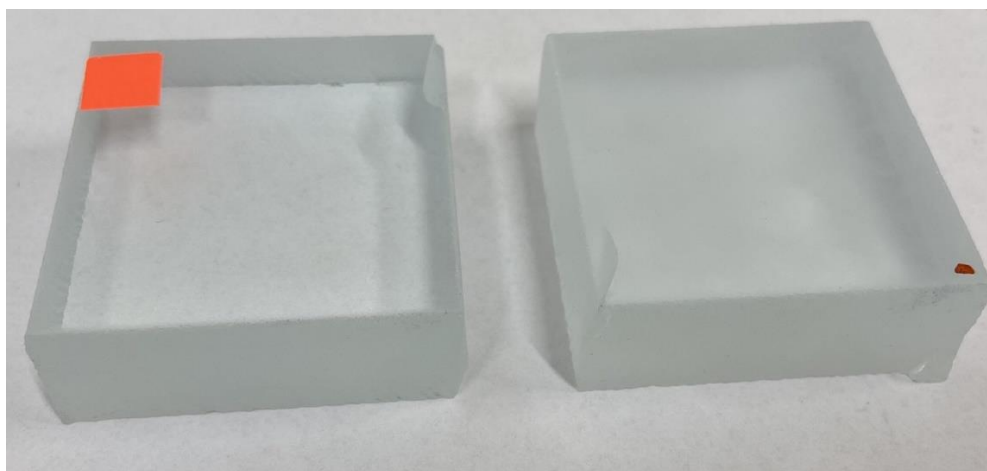
Leptání se provedlo za pomoci komerčně dostupné leptací pasty Pentart Glass Etching Paste. Vzorky byly, v souladu s doporučením výrobce, očištěny suchým hadříkem. Pasta byla ve sklenici promíchána pomocí dřevěné stěrky a následně byla stejným dřívkem nanesena na povrch skla tak, aby vytvořila souvislou vrstvu a zcela zakrývala povrch. Stejný proces byl proveden na cínové i vzduchové straně.



Obrázek 11 - Leptací pasta Pentart Glass Etching Paste [19]

Po 45 minutách leptání (výrobce doporučeno minimálně 30 minut) byly vzorky jednotlivě důkladně opláchnuty tekoucí vodou, aby byly zbaveny všech zbytků leptací pasty. Po oplachu tekoucí vodou následovalo vysušení suchým hadříkem a ultrazvukové odmaštění s následnými dvěma oplachy v demineralizované vodě s následným vysušením viz. podkapitola 4.2.1

Vzorky po naleptání byly vizuálně odlišitelné od původních, byly průsvitné, ale neprůhledné, na pohled matné a na dotek s drsnějším povrchem, než jaký měly původní vzorky. Obrázek 12 nabízí srovnání původního vzorku (vlevo) a vzorku po naleptání (vpravo)



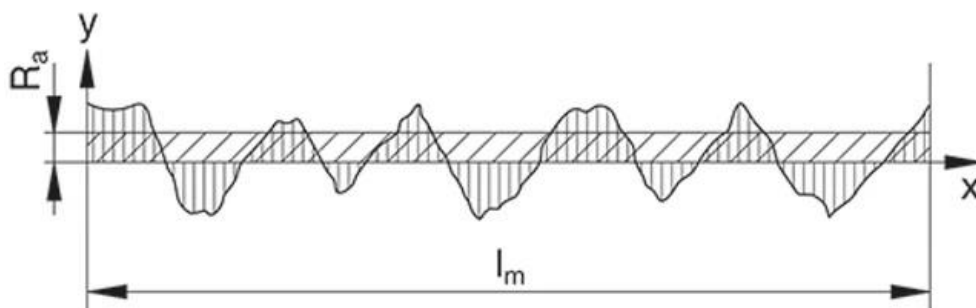
Obrázek 12 - Srovnání původního a naleptaného vzorku

4.3 Měření drsnosti povrchu

Po provedení všech předúprav zmíněných v podkapitole 4.2 byly všechny vzorky podrobeny měření drsnosti povrchu.

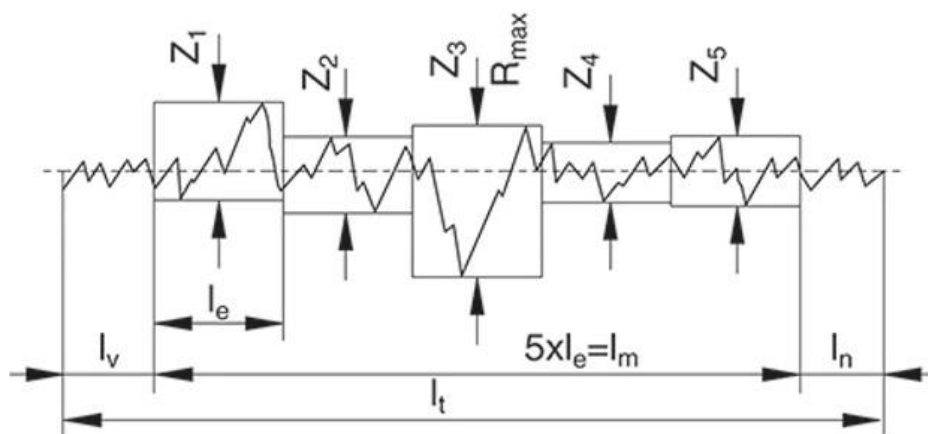
Předmětem zájmu byly hodnoty průměrné aritmetické odchylky drsnosti (označováno R_a) a hodnoty největší výšky profilu drsnosti (označováno R_z).

R_a je definováno jako aritmetický průměr absolutních hodnot na pořadnici profilu drsnosti povrchu. Zároveň se, z pohledu statistického, jedná o střední aritmetickou úchylku hodnot drsnosti na pořadnici od střední čáry. [20]



Obrázek 13 - Střední hodnota drsnosti R_a [21]

R_z se definuje jako střední hodnota vypočítaná na základě jednotlivých hloubek drsnosti pěti za sebou následujících měřených úseků l_e . Jedná se o vzdálenost nejvyššího a nejhlubšího místa bodu profilu R_z . [20][21]



Obrázek 14 - Střední hloubka drsnosti R_z [21]

Měření drsnosti se provádělo drsnoměrem Mitutoyo SURFTEST SJ-210, jedná se o drsnoměr citlivý na snímání drobných nerovností díky snímacímu hrotu s malým vrcholovým úhlem. Tabulka 1 uvádí vybrané technické údaje použitého drsnoměru.



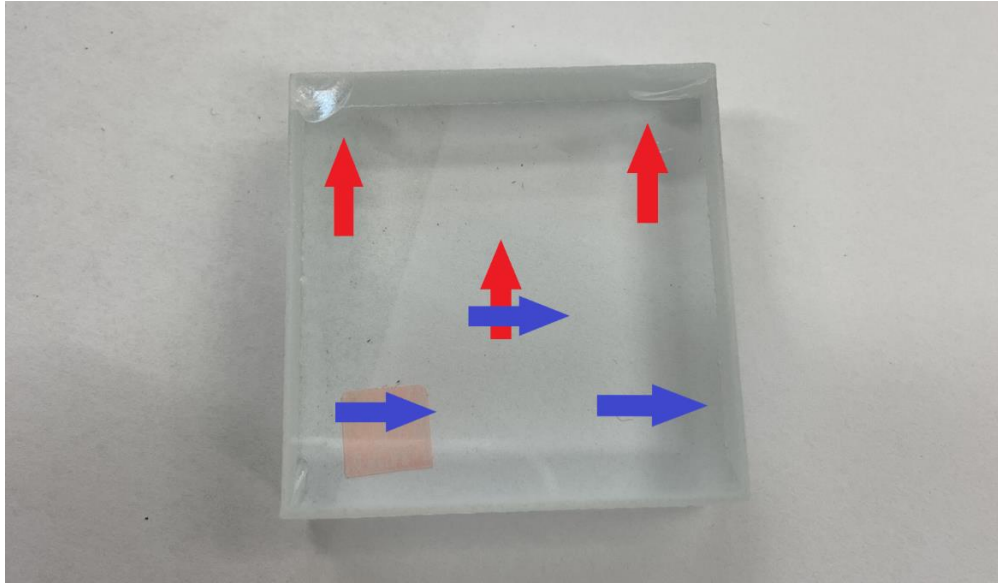
Obrázek 15 - Drsnoměr Mitutoyo Surfrest SJ-210

Maximální rozsah měření	360 μm
Grafické znázornění	měřicí profil, BAC křivka, ADC křivka
Rozhraní	Rozhraní RS232C.; Rozhraní USB; Rozhraní RS232C
Standardy drsnosti	DIN EN ISO, VDA, ANSI, JIS, MOTIF
Měřicí trasa podélného snímání	16 mm
Cut-Off (λ_c)	0,08; 0,25; 0,8; 2,5 mm
Rychlost dotyku	0,25; 0,5; 0,75 $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
Zdroj energie	Provoz s akumulátorem

Tabulka 1 - Technické údaje drsnoměru MITUTOYO SURFTEST SJ-210 [22]

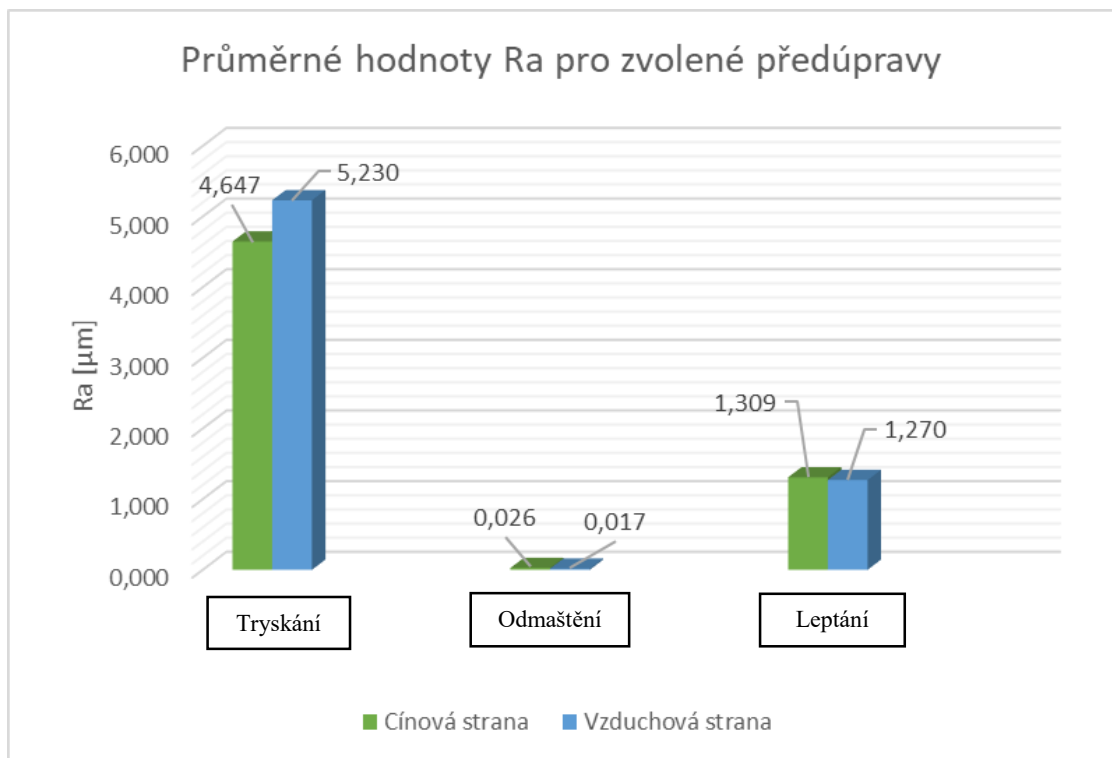
Kalibrace drsnoměru se provedla pomocí etalonů, které jsou výrobcem přiloženy v balení k samotnému drsnoměru. Mezní vlnová délka byla zvolena $\lambda_c=0,8\mu\text{m}$.

Samotné měření se provádělo na každém vzorku 6x z každé strany, přičemž 3 měření byla ve směru označeném x a 3 ve směru označeném y. Schéma příkladu měření jedné strany vzorku je znázorněno na obrázku 15. Modré šipky znázorňují měření v ose x, červené v ose y.

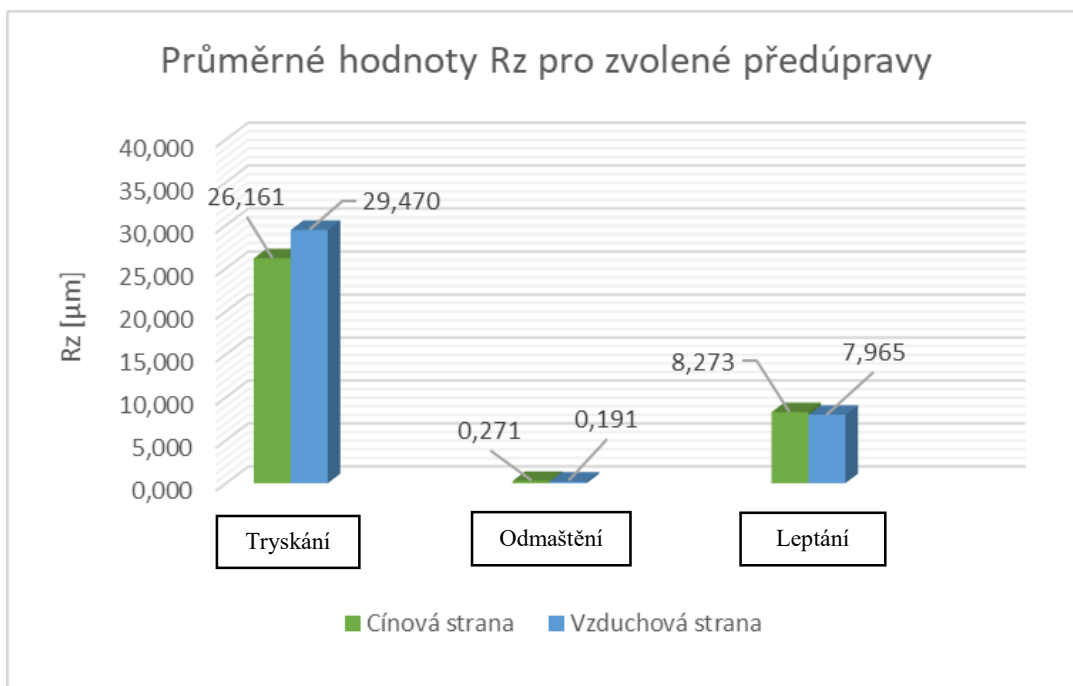


Obrázek 16 - Schéma měření drsnosti vzorků

Naměřené hodnoty drsností se z přístroje zapisovaly do tabulek a následně byly vypočteny průměrné hodnoty drsností pro cínovou a vzduchovou stranu všech vzorků. Kompletní tabulky výsledků jsou uvedeny v příloze.



Graf 1 - Průměrné hodnoty Ra pro zvolené předúpravy



Graf 2 - Průměrné hodnoty Rz pro zvolené předúpravy

Na základě analýzy obou grafů lze konstatovat, že na drsnost povrchu vzorku nemá vliv, zda se jedná o stranu cínovou či vzduchovou. V případě odmaštěných vzorků byl rozdíl mezi oběma stranami, na základě analýzy dat, zanedbatelný. V případě vzorků, které byly tryskány a leptány došlo k výrazné změně morfologie povrchu a vliv cínové či vzduchové strany zde již nebyl relevantní.

Dle očekávání byly naměřeny nejvyšší drsnosti pro tryskané vzorky, následovaly leptané vzorky a nejnižší hodnoty drsnosti byly naměřeny pro vzorky odmaštěné.

4.4 Lepení vzorků

Pro experimentální část byla zvolena tři odlišná lepidla. Prvním bylo dvousložkové epoxidové lepidlo Loctite EA 9445, vteřinové lepidlo Auratech AR 011 a dvousložkové akrylátové lepidlo Auratech AR 708. Všechna tři použitá lepidla byla průhledná a bezbarvá. Volba lepidel značky Auratech byla diskutována přímo s výrobcem dle popisu experimentu.

4.4.1 Loctite EA 9445

Jedná se o dvousložkové, rychle vytvrzující epoxidové lepidlo s nízkou viskozitou, určené pro průmyslové součástky. Je výrobcem popisováno jako ideální pro lepení a zalévání optických součástek, jako například senzory a čočky. Vytváří opticky čistou vrstvu s vysokou pevností a odolností vůči rázům. Při pokojové teplotě získává pevnost během 3 až 6 hodin. Pro lehkou manipulaci jsou součásti fixovány již po 15 minutách od nalepení (při pokojové teplotě). Mísící poměr pryskyřice:tvrdidlo je 1:1 a lepidlo je nanášeno pomocí aplikační pistole a mísící špičky. [22]



Obrázek 17 - Loctite EA 9455



Obrázek 18 - Ruční aplikační pistole pro dvojkartuše [23]

4.4.2 Auratech AR 011

Jedná se o rychle tvrdnoucí standardní typ lepidla pro různá použití, lepidlo je bezbarvé, průhledné a chemickou bází je ethylester kyseliny kyanoakrylátové. Doba vytvrzení je do 60 sekund pro všechny druhy materiálů, konečná pevnost po 24 hodinách. Lepidlo se na povrch nanáší dávkovací špičkou umístěnou přímo na obalu produktu. [24]



Obrázek 19 - Lepidlo Auratech AR 011

4.4.3 Auratech AR 708

Jedná se o průhledné, bezbarvé, vysokopevnostní a rychletvrdnoucí konstrukční dvousložkové akrylátové lepidlo. Během vytvrzování vytváří téměř neviditelný pevný a pružný film se suchým povrchem. Lepidlo není citlivé na chyby v míchání, ale nejlepší pevnosti se dosáhne při objemovém míšícím poměru 1:1, což lze zaručit použitím aplikační pistole pro dvoukomorové kartuše a míšící špičkou. Manipulační pevnosti je dosaženo po cca 3 minutách při 25°C, konečné pevnosti po 24 hodinách při 25°C. [25]



Obrázek 20 - Lepidlo Auratech AR 708

4.4.4 Příprava vzorků a lepení

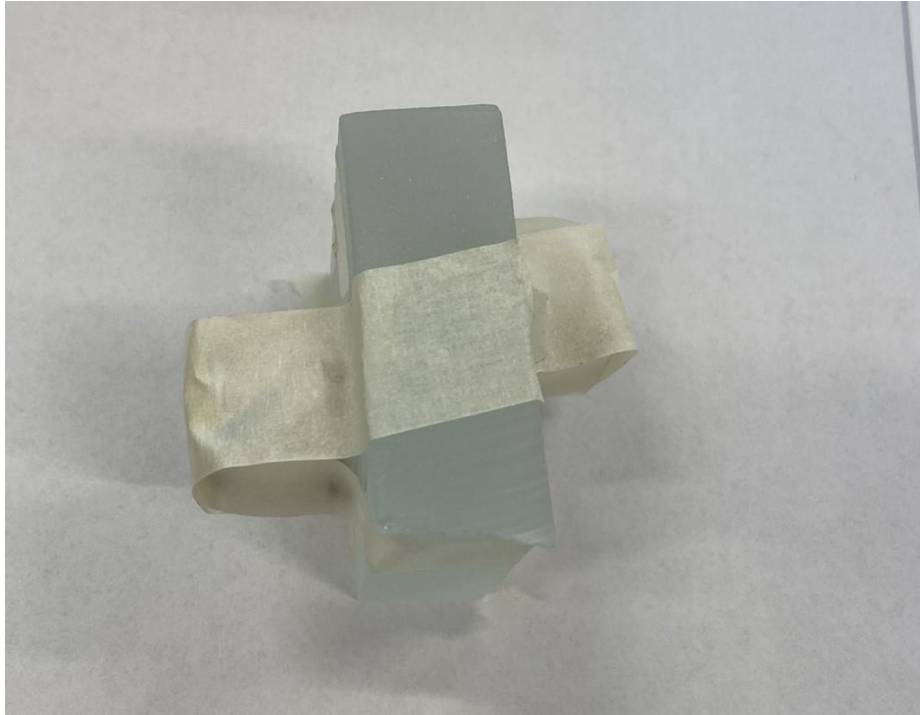
Povrchy všech vzorků byly před aplikací lepidla vždy ošetřeny technickým benzinem P 6402, který byl aplikován na papírové utěrce, aby byl povrch finálně zbaven nečistot, které mohly na povrchu ulpít po odmaštění a oplachu.

Lepidla Loctite EA 9455 a Auratech AR 708 byla nanášena pomocí aplikační pistole a mísící špičky. Zpracovatelnost obou lepidel byla přibližně do dvou minut od vytlačení lepidla do mísící špičky, bylo tedy třeba postupovat bez přestávek a po menším množství kusů. Vteřinové lepidlo AR 011 bylo nanášeno dávkovací špičkou na obalu výrobku.

Lepidlo bylo nanášeno na kovovou panenku, jejíž lepená plocha byla zdrsňena několika ručními tahy na brusném papíře. Použité množství lepidla objemově přibližně odpovídalo zrnku hrachu, takové množství bylo dostatečné pro pokrytí celé plochy lepeného spoje. Po přiložení na sklo se s panenkou jemně zakroužilo kolem svislé osy, aby se lepidlo rozprostřelo po celé ploše spoje a následně lehce přitlačilo pro vytlačení všech potenciálních vzduchových bublin. Takto nalepená panenka byla ještě pozičně zajištěna papírovou páskou, aby nedošlo k jejímu pohybu během následné manipulace se vzorkem.

Na jeden vzorek byla vždy z každé strany, v protilehlém rohu, nalepena jedna panenka. Odtrhy probíhaly po 24 hodinách od nalepení, aby bylo zajištěno dosažení konečné pevnosti lepidel. Po odtržení prvních dvou panenek byly na vzorky nalepeny další dvě panenky, tentokrát byly nalepeny do opačných rohů, než v prvním případě (pokud to stav vzorku umožnil). Dohromady byly tedy na každý vzorek nalepeny 4 panenky – 2 z cínové strany a 2 ze vzduchové strany.

Na obrázku 21 můžeme vidět nalepené panenky na vzorku, zajištěné papírovou lepenkou, během procesu vytvrzování lepidla.



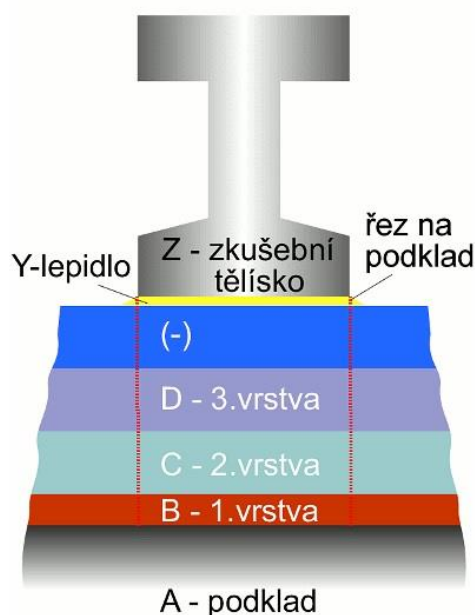
Obrázek 21 - Vytvrzování lepidla - panenky přilepené lepidlem a zajištěné papírovou páskou

4.4 Odtrhová zkouška přilnavosti dle ČSN ISO 4624

Odtrhová zkouška je vhodná ke zkoušení adheze (přilnavosti) mezi zkušebním tělískem (panenkou) a vzorkem, na kterém je nanesen povlak práškového plastu. Lepidlo nesmí vyvolávat změny v povlaku a musí mít vyšší pevnost než vlastní spoj.

Zkouška vyhodnocuje napětí potřebné pro přetržení vazby mezi nátěrem a podkladem. Po odtržení panenky z povlaku se pozoruje charakter lomu, který proběhne buď na rozhraní dvou složek (adhezní lom) nebo se prolomí vnitřní vazby složek (kohezní lom). V mnoha případech je možné pozorovat kombinaci obou lomů. [26] [27]

Odrhová zkouška dle ČSN ISO 4624



Obrázek 22 - Obecné schéma odtrhové zkoušky přilnavosti [27]

Klasifikace	Popis
A	Kohezní lom v podkladu
A/B	Adhezní lom mezi podkladem a první vrstvou
B	Kohezní lom první vrstvy
B/C	Adhezní lom mezi první a druhou vrstvou
-	Kohezní lom poslední vrstvy
-/Y	Adhezní lom mezi poslední vrstvou a lepidlem
Y	Kohezní lom v lepidle
Y/Z	Adhezní lom mezi lepidlem a zkušebním tělesem

Tabulka 2 - Klasifikace lomu dle ČSN ISO 4624 [26]

Pro případ popsaného experimentu nelze vyhodnocovat lomy mezi jednotlivými vrstvami, neboť na podklad (vzorek skla) je přímo nalepené lepidlo s panenkou. Pro vyhodnocení tedy mohou nastat následující případy:

- A – kohezní lom v podkladu
- A/Y – Adhezní lom mezi poslední vrstvou (skleněný vzorek) a lepidlem
- Y – kohezní lom v lepidle
- Y/Z – Adhezní lom mezi lepidlem a zkušebním tělesem.

4.4.1 Průběh odtrhávání

Odtrhávání se provádělo pomocí automatického odtrhoměru Elcometer 510, který disponuje rozsahem 0-30 MPa (0–4000 psi), schopností rozlišení 0,01 MPa (1 psi) a přesností $\pm 0,1$ MPa ($\pm 14,5$ psi). [28]



Obrázek 23 - Odtrhoměr Elcometer 510

Z panenek byla odstraněna jistící papírová páska a lepené spoje byly vizuálně zkontrolovány kvůli případným defektům vzniklým během tvrdnutí. Následně byly vzorky pomocí manuálního pohybu vykrúžovacím korunkovým vrtákem Starrett zbaveny přebytečného lepidla, které mohlo být vytlačeno během procesu lepení. Tím se zajistilo, aby lepidlo bylo pouze mezi panenkou a vzorkem a nedocházelo ke zkreslení výsledků.



Obrázek 24 - Okroužení panenek pomocí vykrúžovacího vrtáku Starrett

Po okroužení byla na panenku uchycena odtrhová část přístroje Elcometer 510, správné uchycení panenky se zajišťuje zacvaknutím bočních páček přístroje.



Obrázek 25 - Odtrhoměr Elcometer 510 zajištěný na nalepené panence

Při průběhu zkoušky bylo nutné vzorek přidržovat, kvůli riziku poranění o střepy vzniklé poškozením vzorku se měření provádělo v ochranných rukavicích.

V několika případech během odtrhů nastala situace, kdy došlo k poškození vzorku, panenka nebyla odtržena, ale zkouška byla přístrojem zastavena. V takových případech je řádek v následujících tabulkách vyznačen šedě a hodnoty napětí nejsou započítávány do celkového vyhodnocení průměrných hodnot napětí potřebného k odtrhu.

V několika dalších případech, především pak při druhém kole měření na vzorku (odtrhávání 3. a 4. panenky) došlo k úplné destrukci vzorku a nebylo možné stanovit způsob porušení, neboť panenka zůstala přilepená k části vzorku, na který už však nebylo možné nasadit odtrhoměr. Všechna poškození byla poznamenána do tabulek a všechny vzorky byly po odtržení panenky vyfoceny (viz. příloha). V následujících tabulkách je vždy uvedeno číslo měření, číslo vzorku, strana, přilnavost (napětí nutné pro odtržení), hodnocení poškození a případné poznámky. Shrnující tabulky poté obsahují hodnotu aritmetického průměru přilnavosti, hodnotu směrodatné odchylky a pro srovnání hodnotu mediánu.

4.4.2 Výsledky odtrhové zkoušky pro Loctite EA 9455

4.4.2.1 Předúprava odmaštěním

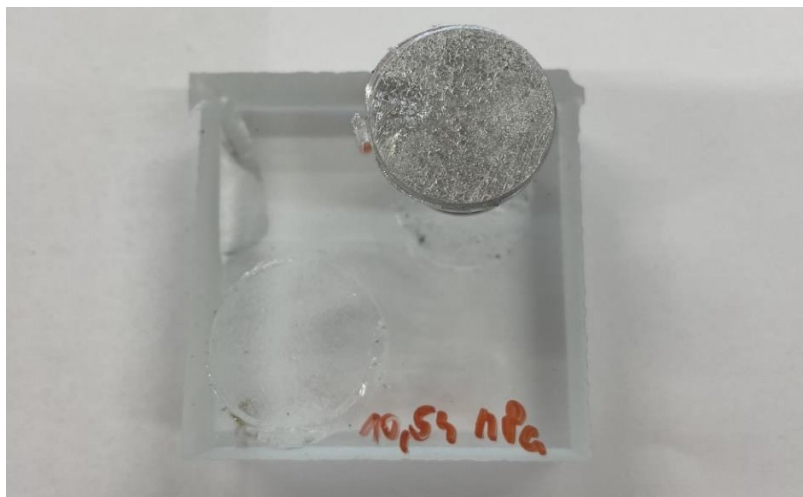
Měření	Vzorek	Strana	Přilnavost dle ČSN EN ISO 4624	Hodnocení	Poznámka
1	1	Cín	10,75 MPa	100% Y	-
	1	Cín	8,86 MPa	-	poškození vzorku
	1	Vzduch	7,23 MPa	100% Y	-
	2	Cín	11,99 MPa	95% Y 5% Y/Z	-
	2	Vzduch	11,87 MPa	100% Y	-
	3	Cín	8,00 MPa	85% Y, 15% Y/Z	-
2	3	Vzduch	10,54 MPa	100% Y	-
	1	Cín	15,75 MPa	100% Y	-
	1	Vzduch	6,55 MPa	-	poškození vzorku
	1	Vzduch	12,24 MPa	100% Y	-
	2	Cín	19,80 MPa	100% Y	-
	2	Vzduch	13,76 MPa	100% Y	-
	3	Cín	16,15 MPa	100% Y	-
3	Vzduch	12,89 MPa	95% Y, 5% Y/Z	-	

Tabulka 3 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava odmaštěním

Měření 1	Měření 2	Celkové
Cín	Cín	Cín
Průměr [MPa]	Průměr [MPa]	Průměr [MPa]
10,247	17,233	13,740
σ [MPa]	σ [MPa]	σ [MPa]
1,668	1,822	3,910
Median [MPa]	Median [MPa]	Median [MPa]
10,750	16,150	13,870
Vzduch	Vzduch	Vzduch
Průměr [MPa]	Průměr [MPa]	Průměr [MPa]
9,880	12,963	11,422
σ [MPa]	σ [MPa]	σ [MPa]
1,951	0,623	2,115
Median [MPa]	Median [MPa]	Median [MPa]
10,540	12,890	12,055

Tabulka 4 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava odmaštěním

- Průměrné zastoupení druhů porušení: 97,9% Y; 2,1% Y/Z



Obrázek 26 - Adhezni lom v lepidle Loctite EA 9455, předúprava odmaštěním

4.4.2.2 Předúprava tryskáním

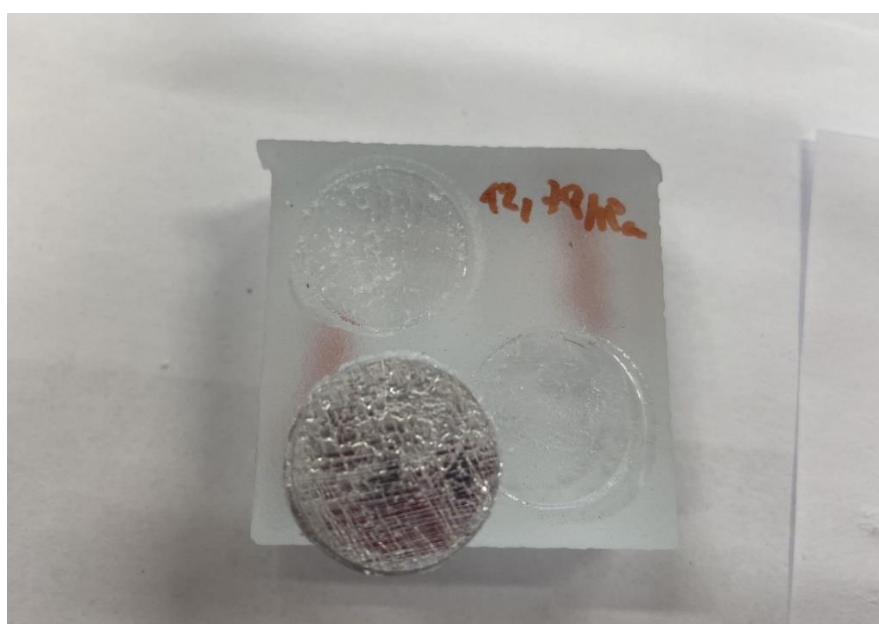
Měření	Vzorek	Strana	Přilnavost dle ČSN EN ISO 4624	Hodnocení	Poznámka
1	1	Cín	11,54 MPa	100% Y	-
	1	Vzduch	13,93 MPa	100% Y	-
	2	Cín	10,50 MPa	100% Y	-
	2	Vzduch	14,04 MPa	100% Y	-
	3	Cín	9,07 MPa	-	poškození vzorku
	3	Cín	10,17 MPa	90% Y, 10% Y/Z	-
2	1	Vzduch	10,79 MPa	85% Y, 15% Y/Z	-
	1	Cín	14,09 MPa	100% Y	-
	2	Cín	15,34 MPa	100% Y	-
	2	Vzduch	12,77 MPa	95% Y, 5% Y/Z	-
	3	Cín	12,72 MPa	95% Y, 5% A/Y	-
	3	Vzduch	12,44 MPa	100% Y	-

Tabulka 5 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava tryskáním

Měření 1	Měření 2	Celkově
Cín	Cín	Cín
Průměr [MPa] 10,737	Průměr [MPa] 14,050	Průměr [MPa] 12,393
σ [MPa] 0,584	σ [MPa] 1,070	σ [MPa] 1,867
Median [MPa] 10,500	Median [MPa] 14,090	Median [MPa] 12,130
Vzduch	Vzduch	Vzduch
Průměr [MPa] 12,920	Průměr [MPa] 12,667	Průměr [MPa] 12,793
σ [MPa] 1,507	σ [MPa] 0,160	σ [MPa] 1,079
Median [MPa] 13,930	Median [MPa] 12,770	Median [MPa] 12,780

Tabulka 6 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava tryskáním

- Průměrné zastoupení druhů porušení: 97,1% Y; 2,9% Y/Z



Obrázek 27 - Adhezní lom v lepidle Loctite EA 9455, předúprava tryskáním

4.4.2.3 Předúprava leptáním

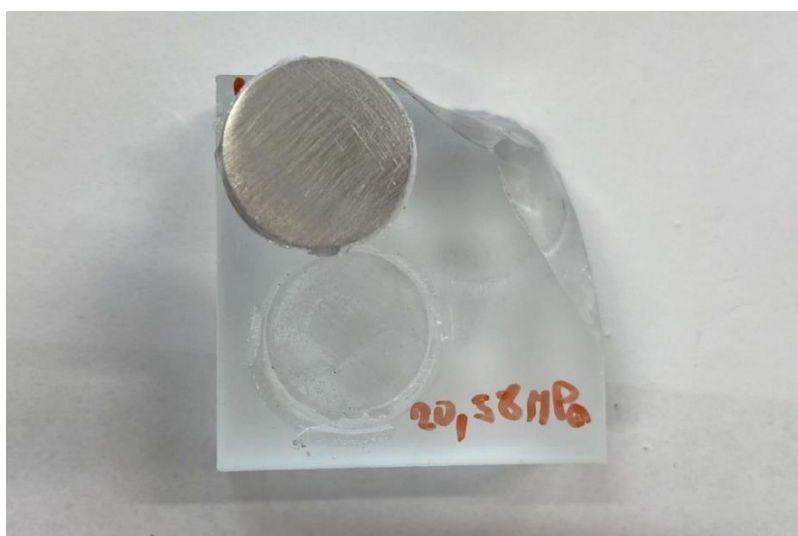
Měření	Vzorek	Strana	Přilnavost dle ČSN EN ISO 4624	Hodnocení	Poznámka
1	1	Cín	20,58 MPa	100% Y	-
	1	Vzduch	9,91 MPa	-	poškození vzorku
	1	Vzduch	7,07 MPa	-	poškození vzorku
	1	Vzduch	10,64 MPa	100% Y	-
	2	Cín	19,39 MPa	100% Y	-
	2	Vzduch	20,58 MPa	90% A/Y, 10% Y	-
	3	Cín	18,65 MPa	92% Y, 8% Y/Z	-
2	3	Vzduch	24,65 MPa	100% Y	-
	1	Cín	3,47 MPa	-	poškození vzorku
	1	Cín	7,01 MPa	80% Y, 20% Y/Z	-
	1	Vzduch	11,84 MPa	-	poškození vzorku
	1	Vzduch	9,78 MPa	85% Y, 15% A/Y	-
	2	Cín	11,45 MPa	100% Y	-
	2	Vzduch	7,47 MPa	75% Y, 25% Y/Z	-
	3	Vzduch	9,27 MPa	95% Y, 5% Y/Z	-
3	Cín	11,29 MPa	90% Y, 10% Y/Z	-	

Tabulka 7 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava leptáním

Měření 1	Měření 2	Celkově
Cín	Cín	Cín
Průměr [MPa] 19,540	Průměr [MPa] 9,917	Průměr [MPa] 14,728
σ [MPa] 0,795	σ [MPa] 2,056	σ [MPa] 5,058
Median [MPa] 19,390	Median [MPa] 11,290	Median [MPa] 15,050
Vzduch	Vzduch	Vzduch
Průměr [MPa] 18,623	Průměr [MPa] 8,840	Průměr [MPa] 13,732
σ [MPa] 5,885	σ [MPa] 0,991	σ [MPa] 6,460
Median [MPa] 20,580	Median [MPa] 9,270	Median [MPa] 10,210

Tabulka 8 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava leptáním

- Průměrné zastoupení druhů porušení: 85,6% Y; 8,7% A/Y; 5,7% Y/Z



Obrázek 28 – Adhezní lom mezi vzorkem a lepidlem Loctite EA 9455, předúprava tryskáním

4.4.3 Výsledky odtrhové zkoušky pro Auratech AR 011

4.4.3.1 Předúprava odmaštěním

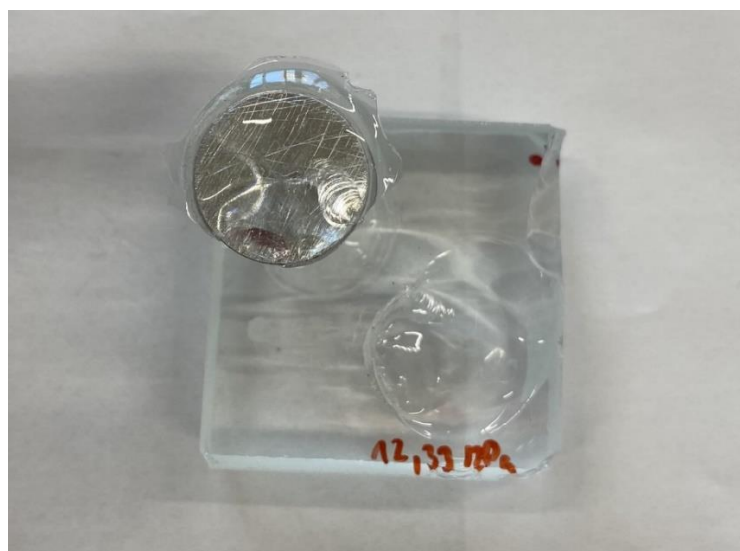
Měření	Vzorek	Strana	Přilnavost dle ČSN EN ISO 4624	Hodnocení	Poznámka
1	1	Cín	8,97 MPa	100% A	-
	1	Vzduch	15,42 MPa	100% A	-
	2	Cín	13,31 MPa	100% A	-
	2	Vzduch	14,78 MPa	100% A	-
	3	Cín	13,81 MPa	85% A, 15% Y	-
	3	Vzduch	12,33 MPa	100% A	-
2	1	Cín	6,02 MPa	85% A, 15% Y	-
	1	Vzduch	11,26 MPa	90% A, 10% Y	-
	2	Cín	11,59 MPa	90% A, 10% Y	-
	2	Vzduch	9,92 MPa	90% Y, 10% A	-
	3	Cín	8,62 MPa	60% Y, 40% A	-
	3	Vzduch	10,30 MPa	80% Y, 20% A	-

Tabulka 9 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava odmaštěním

Měření 1	Měření 2	Celkově
Cín	Cín	Cín
Průměr [MPa] 12,030	Průměr [MPa] 8,743	Průměr [MPa] 10,387
σ [MPa] 2,173	σ [MPa] 2,276	σ [MPa] 2,766
Median [MPa] 13,310	Median [MPa] 8,620	Median [MPa] 10,280
Vzduch	Vzduch	Vzduch
Průměr [MPa] 14,177	Průměr [MPa] 10,493	Průměr [MPa] 12,335
σ [MPa] 1,332	σ [MPa] 0,564	σ [MPa] 2,107
Median [MPa] 14,780	Median [MPa] 10,300	Median [MPa] 11,795

Tabulka 10 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava odmaštěním

- Průměrné zastoupení druhů porušení: 76,7% A; 23,3% Y



Obrázek 29 – Kohezní lom ve vzorku skla, lepidlo Auratech AR 011, předúprava odmaštěním

4.4.3.2 Předúprava tryskáním

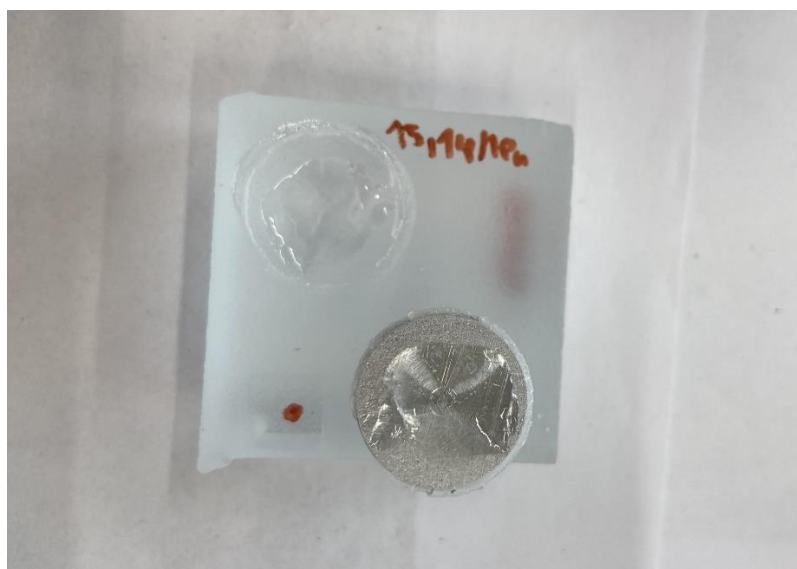
Měření	Vzorek	Strana	Přilnavost dle ČSN EN ISO 4624	Hodnocení	Poznámka
1	1	Cín	11,36 MPa	65% A, 35% A/Y	-
	1	Vzduch	10,60 MPa	80% A/Y, 20% Y	-
	2	Cín	15,14 MPa	75% A, 25% A/Y	-
	2	Vzduch	9,41 MPa	70% A, 30% A/Y	-
	3	Cín	12,58 MPa	100% A	-
	3	Vzduch	15,31 MPa	100% A	-
2	1	Cín	10,69 MPa	80% A/Y, 20% A	-
	1	Vzduch	12,14 MPa	100% A	-
	2	Cín	9,42 MPa	55% A/Y, 45% A	-
	2	Vzduch	9,82 MPa	75% A/Y, 25% A	-
	3	Cín	7,33 MPa	60% A, 40% A/Y	-
	3	Vzduch	9,60 MPa	97% A/Y, 3% A	-

Tabulka 11 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava tryskáním

Měření 1	Měření 2	Celkově
Cín	Cín	Cín
Průměr [MPa] 13,027	Průměr [MPa] 9,147	Průměr [MPa] 11,087
σ [MPa] 1,575	σ [MPa] 1,385	σ [MPa] 2,442
Median [MPa] 12,580	Median [MPa] 9,420	Median [MPa] 11,025
Vzduch	Vzduch	Vzduch
Průměr [MPa] 11,773	Průměr [MPa] 10,520	Průměr [MPa] 11,147
σ [MPa] 2,548	σ [MPa] 1,149	σ [MPa] 2,073
Median [MPa] 10,600	Median [MPa] 9,820	Median [MPa] 10,210

Tabulka 12 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava tryskáním

- Průměrné zastoupení druhů porušení: 55,3% A; 43,1% A/Y, 1,6% Y



Obrázek 30 - Kombinace kohezního lomu ve vzorku a adhezního lomu mezi vzorkem a lepidlem, lepidlo Auratech AR 011, předúprava tryskáním

4.4.3.3 Předúprava leptáním

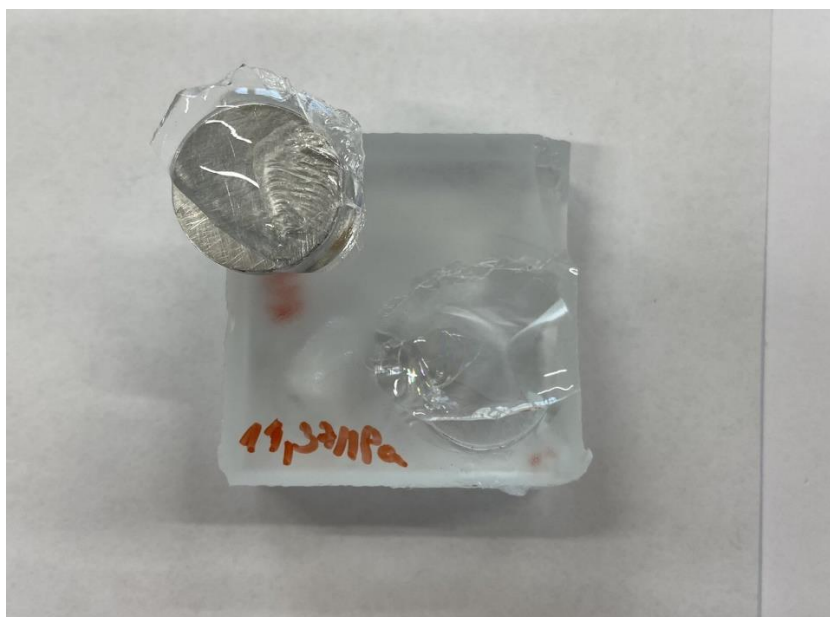
Měření	Vzorek	Strana	Přilnavost dle ČSN EN ISO 4624	Hodnocení	Poznámka
1	1	Cín	12,85 MPa	100% A	-
	1	Vzduch	5,09 MPa	100% Y	-
	2	Cín	11,80 MPa	80% A, 20% Y/Z	-
	2	Vzduch	11,37 MPa	85% A, 15% Y/Z	-
	3	Cín	9,95 MPa	70% Y/Z, 30% A	-
	3	Vzduch	11,68 MPa	80% Y/Z, 20% A/Y	-
2	1	Cín	9,16 MPa	55% Y, 45% A	-
	1	Vzduch	11,34 MPa	50% A, 50% Y/Z	vzorek zničen
	2	Cín	8,35 MPa	90% Y/Z, 10% Y	-
	2	Vzduch	13,20 MPa	80% Y/Z, 20% A	-
	3	Cín	11,31 MPa	100% A	vzorek zničen
	3	Vzduch	12,24 MPa	70% A, 30% Y/Z	-

Tabulka 13 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava leptáním

Měření 1	Měření 2	Celkově
Cín	Cín	Cín
Průměr [MPa]	Průměr [MPa]	Průměr [MPa]
11,533	9,607	10,570
σ [MPa]	σ [MPa]	σ [MPa]
1,199	1,249	1,558
Median [MPa]	Median [MPa]	Median [MPa]
11,800	9,160	10,630
Vzduch	Vzduch	Vzduch
Průměr [MPa]	Průměr [MPa]	Průměr [MPa]
9,380	12,260	10,820
σ [MPa]	σ [MPa]	σ [MPa]
3,036	0,759	2,640
Median [MPa]	Median [MPa]	Median [MPa]
11,370	12,240	11,525

Tabulka 14 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava leptáním

- Průměrné zastoupení druhů porušení: 48,3% A; 36,3% Y/Z; 13,7% Y; 1,7% A/Y



Obrázek 31 - Kombinace kohezního lomu ve vzorku a adhezního lomu mezi lepidlem a zkušebním tělesem, lepidlo Auratech AR 011, předúprava leptáním

4.4.4 Výsledky odtrhové zkoušky pro Auratech AR 708

4.4.4.1 Předúprava odmaštěním

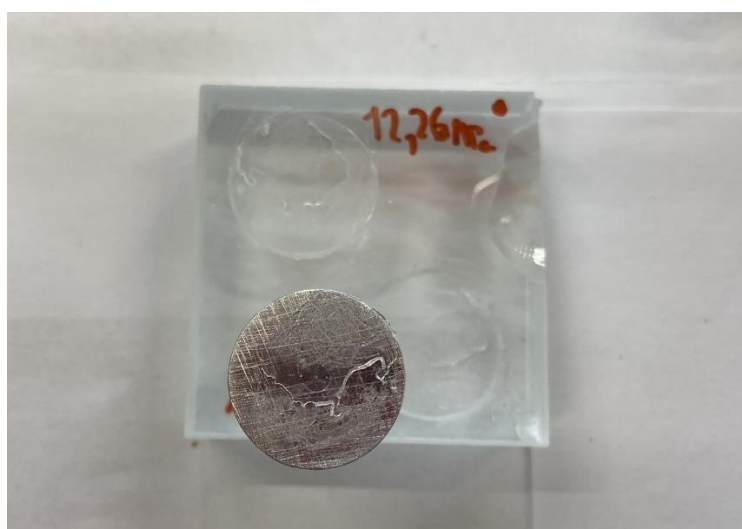
Měření	Vzorek	Strana	Přilnavost dle ČSN EN ISO 4624	Hodnocení	Poznámka
1	1	Cín	12,26 MPa	60% Y/Z, 40 A/Y	-
	1	Vzduch	15,40 MPa	80% A/Y, 20% Y/Z	-
	2	Cín	15,69 MPa	75% A/Y, 25% Y/Z	-
	2	Vzduch	17,33 MPa	90% A/Y, 10% Y/Z	-
	3	Cín	16,73 MPa	60% A/Y, 40% Y/Z	-
	3	Vzduch	12,09 MPa	95% A/Y, 5% Y/Z	-
2	1	Cín	10,21 MPa	100% A/Y	-
	1	Vzduch	14,72 MPa	100% A	-
	2	Cín	12,67 MPa	100% A	-
	2	Vzduch	10,99 MPa	100% A	-
	3	Cín	8,22 MPa	-	poškození vzorku
	3	Vzduch	17,78 MPa	100% A/Y	-

Tabulka 15 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava odmaštěním

Měření 1	Měření 2	Celkově
Cín	Cín	Cín
Průměr [MPa]	Průměr [MPa]	Průměr [MPa]
14,893	11,047	12,970
σ [MPa]	σ [MPa]	σ [MPa]
1,910	1,148	2,486
Median [MPa]	Median [MPa]	Median [MPa]
15,690	10,260	12,465
Vzduch	Vzduch	Vzduch
Průměr [MPa]	Průměr [MPa]	Průměr [MPa]
14,940	14,497	14,718
σ [MPa]	σ [MPa]	σ [MPa]
2,164	2,777	2,499
Median [MPa]	Median [MPa]	Median [MPa]
15,400	14,720	15,060

Tabulka 16 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava odmaštěním

- Průměrné zastoupení druhů porušení: 61,7 A/Y; 25% A; 13,3% Y/Z



Obrázek 32 - Kombinace adhezního lomu mezi vzorkem a lepidlem a adhezního lomu mezi lepidlem a zkušebním tělesem, lepidlo Auratech AR 708, předúprava odmaštěním

4.4.4.2 Předúprava tryskáním

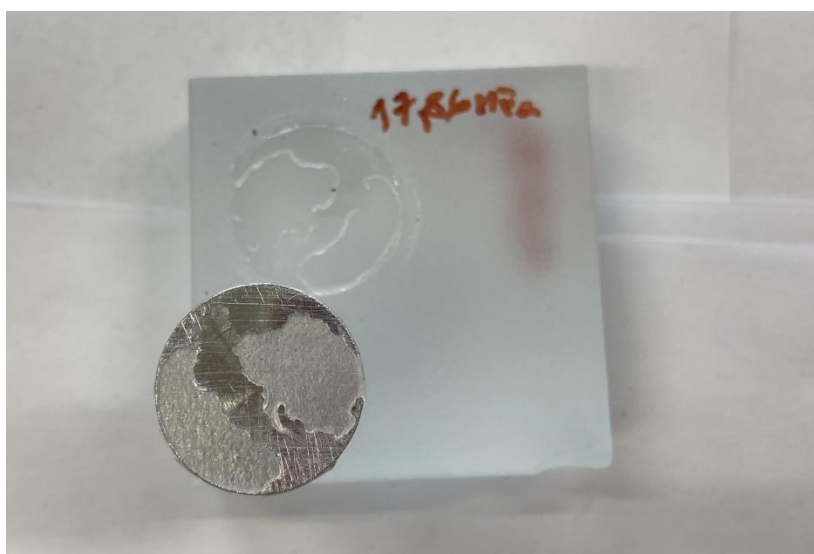
Měření	Vzorek	Strana	Přilnavost dle ČSN EN ISO 4624	Hodnocení	Poznámka
1	1	Cín	6,58 MPa	95% A/Y, 5% Y	-
	1	Vzduch	13,56 MPa	65% Y/Z, 35% Y	-
	2	Cín	10,52 MPa	97% A/Y, 3% Y	-
	2	Vzduch	15,36 MPa	100% A	poškození vzorku
	3	Cín	16,48 MPa	100% A/Y	-
	3	Vzduch	17,86 MPa	60% A/Y, 40% Y/Z	-
2	1	Cín	18,63 MPa	100% A	vzorek zničen
	1	Vzduch	14,09 MPa	-	poškození vzorku
	1	Vzduch	8,14 MPa	-	poškození vzorku
	1	Vzduch	6,25 MPa	Nelze stanovit	vzorek zničen
	2	Cín	11,40 MPa	100% A	poškození vzorku
	2	Vzduch	12,20 MPa	100% A	vzorek zničen
	3	Cín	16,28 MPa	92% A/Y, 8% Y/Z	-
	3	Vzduch	12,62 MPa	70% A/Y, 30% Y/Z	-

Tabulka 17 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava tryskáním

Měření 1	Měření 2	Celkově
Cín	Cín	Cín
Průměr [MPa]	Průměr [MPa]	Průměr [MPa]
11,187	15,437	13,312
σ [MPa]	σ [MPa]	σ [MPa]
4,077	3,011	4,167
Median [MPa]	Median [MPa]	Median [MPa]
10,52	16,28	13,84
Vzduch	Vzduch	Vzduch
Průměr [MPa]	Průměr [MPa]	Průměr [MPa]
15,593	12,410	14,320
σ [MPa]	σ [MPa]	σ [MPa]
1,763	0,210	2,077
Median [MPa]	Median [MPa]	Median [MPa]
15,360	12,410	13,560

Tabulka 18 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava tryskáním

- Průměrné zastoupení druhů porušení: 46,7% A/Y; 36,4% A; 13% Y/Z; 3,9% Y



Obrázek 33 - Kombinace adhezního lomu mezi vzorkem a lepidlem a adhezního lomu mezi lepidlem a zkušebním tělesem, lepidlo Auratech AR 708, předúprava tryskáním

4.4.4.3 Předúprava leptáním

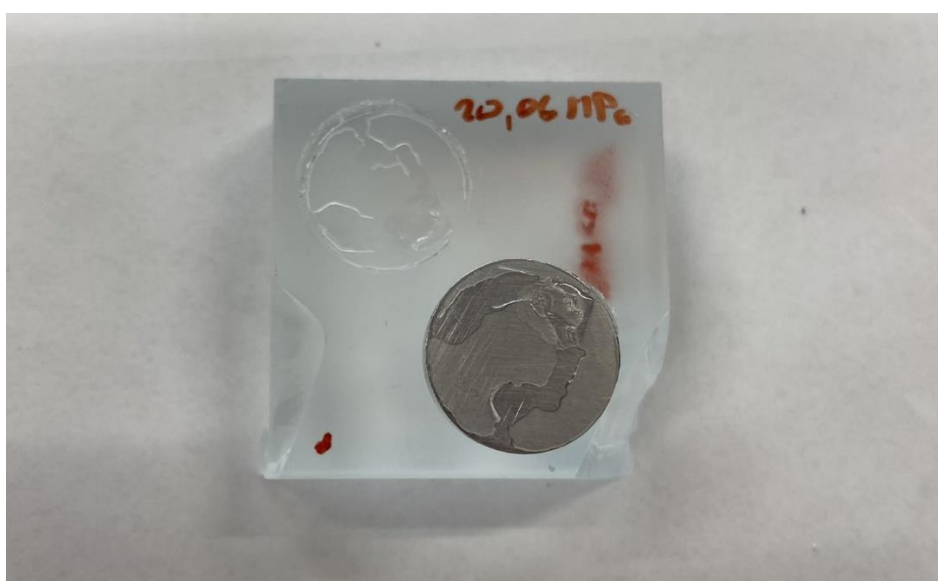
Měření	Vzorek	Strana	Přilnavost dle ČSN EN ISO 4624	Hodnocení	Poznámka
1	1	Cín	22,04 MPa	50% A/Y, 50% Y	-
	1	Vzduch	22,11 MPa	65% A/Y, 35% Y/Z	-
	2	Cín	21,74 MPa	60% A/Y, 40% Y/Z	-
	2	Vzduch	21,21 MPa	60% Y/Z, 40% A/Y	-
	3	Cín	20,06 MPa	80% A/Y, 20% Y/Z	-
	3	Vzduch	15,07 MPa	75% A/Y, 25% Y/Z	-
2	1	Cín	11,29 MPa	100% A	vzorek zničen
	1	Vzduch	13,54 MPa	85% A/Y, 15% Y/Z	-
	2	Cín	8,17 MPa	Nelze určit	vzorek zničen
	2	Vzduch	10,21 MPa	100% A/Y	-
	3	Cín	13,61 MPa	100% A/Y	-
	3	Vzduch	13,58 MPa	90% A/Y, 10% Y/Z	-

Tabulka 19 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava leptáním

Měření 1	Měření 2	Celkově
Cín	Cín	Cín
Průměr [MPa]	Průměr [MPa]	Průměr [MPa]
21,280	12,450	17,748
σ [MPa]	σ [MPa]	σ [MPa]
0,871	1,160	4,439
Median [MPa]	Median [MPa]	Median [MPa]
21,740	12,450	20,060
Vzduch	Vzduch	Vzduch
Průměr [MPa]	Průměr [MPa]	Průměr [MPa]
19,463	12,443	15,953
σ [MPa]	σ [MPa]	σ [MPa]
3,128	1,579	4,297
Median [MPa]	Median [MPa]	Median [MPa]
21,210	13,540	14,325

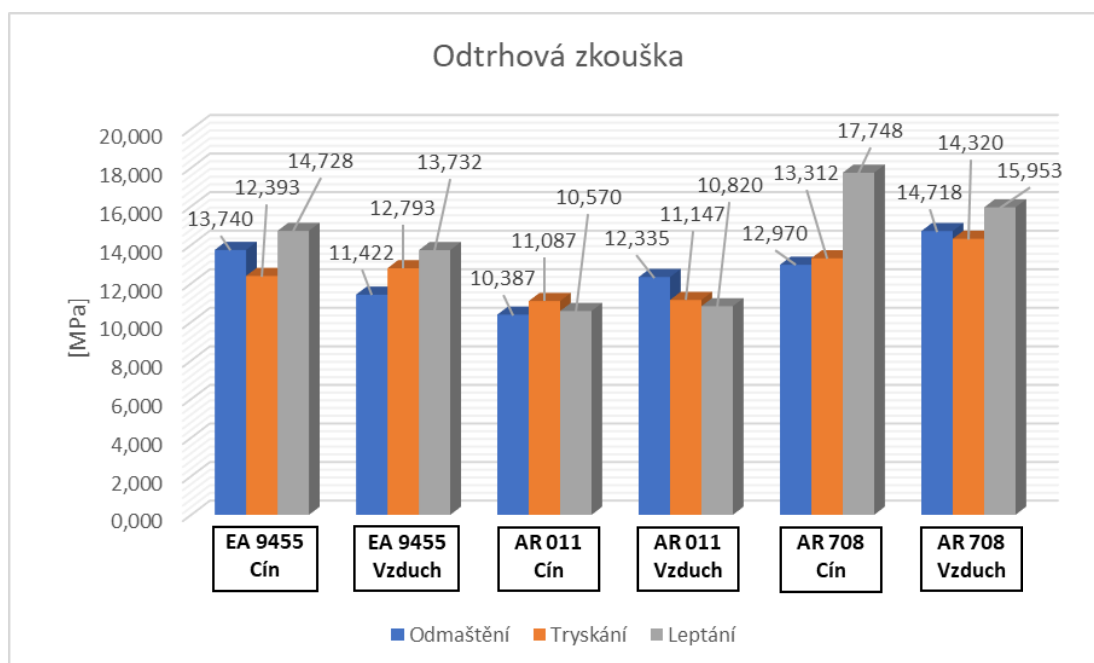
Tabulka 20 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava leptáním

- Průměrné zastoupení druhů porušení: 67,8 A/Y; 18,6% Y/Z; 9,1% A; 4,5% Y



Obrázek 34 - Kombinace adhezního lomu mezi vzorkem a lepidlem a adhezního lomu mezi lepidlem a zkušebním tělesem, lepidlo Auratech AR 708, předúprava leptáním

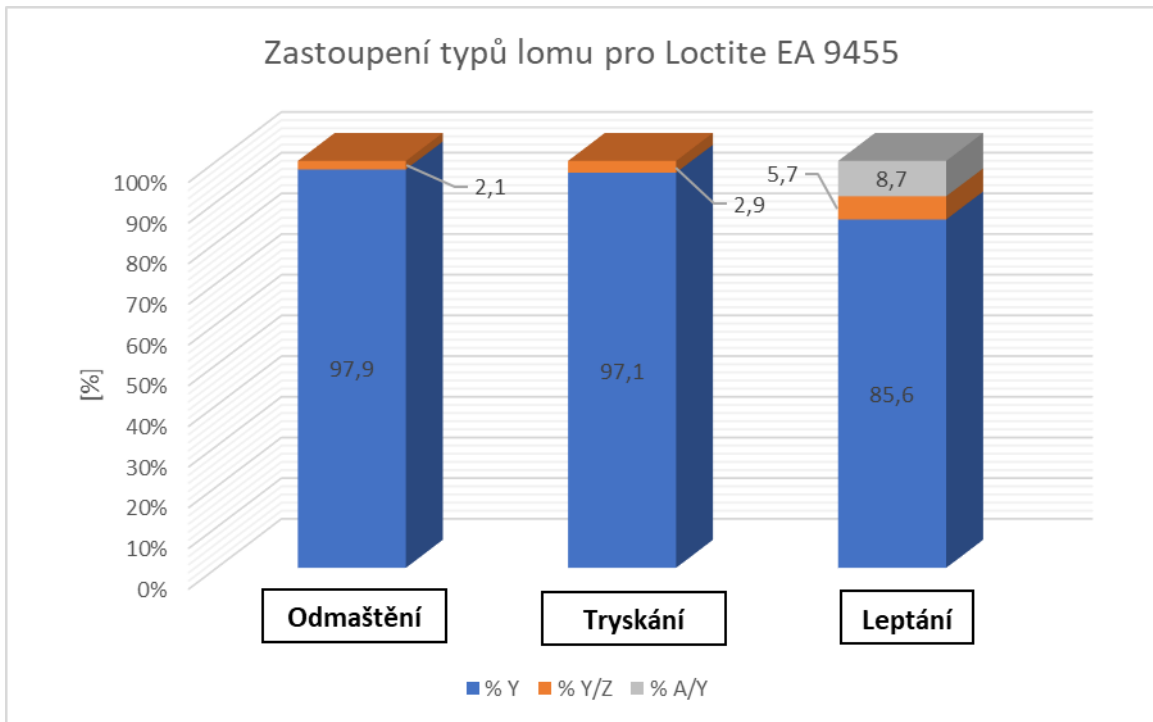
4.4.5 Grafické srovnání výsledků odtrhové zkoušky



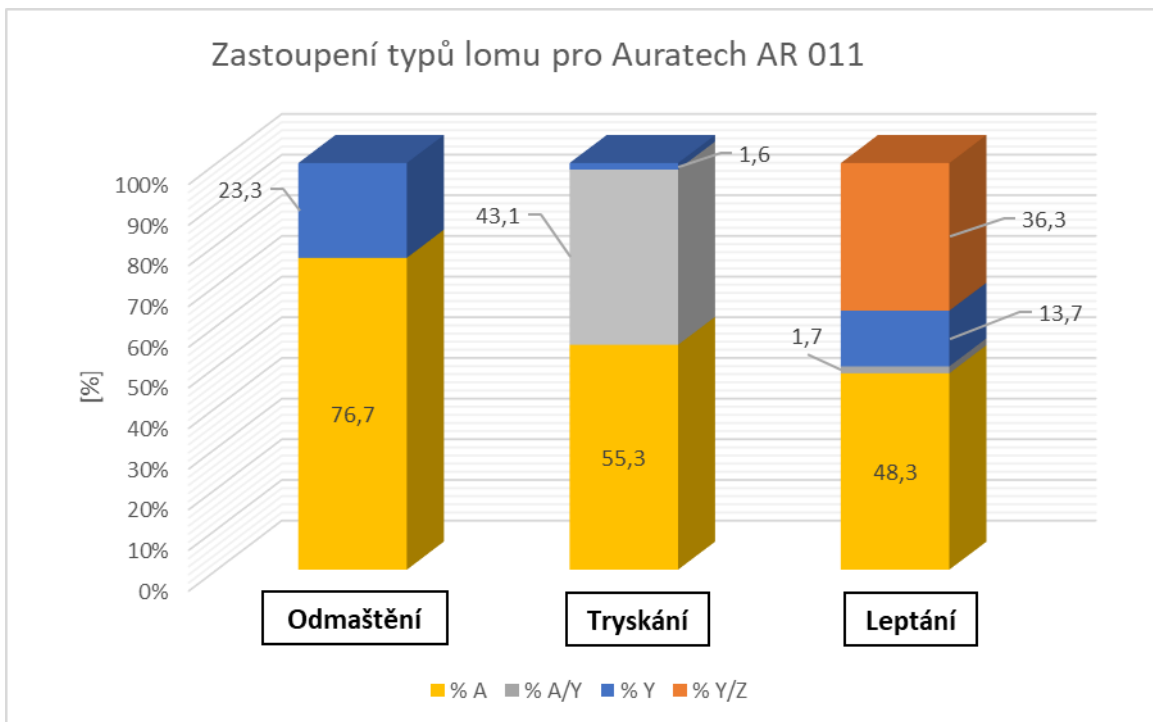
Graf 3 - Srovnání výsledků odtrhové zkoušky

Na základě naměřených hodnot lze konstatovat, že nejvyššího napětí bylo třeba pro odtržení panenek přilepených dvousložkovým akrylátovým lepidlem AR 708. Následuje dvousložkové epoxidové lepidlo Loctite EA 9455 a nejmenšího napětí bylo třeba pro odtržení panenek přilepených vteřinovým lepidlem AR 011. V případě vteřinového lepidla AR 011 byl zároveň zdaleka nejčastější výskyt kohezního lomu v podkladu, kdy byla panenka ze vzorku vytržena i s částí skla.

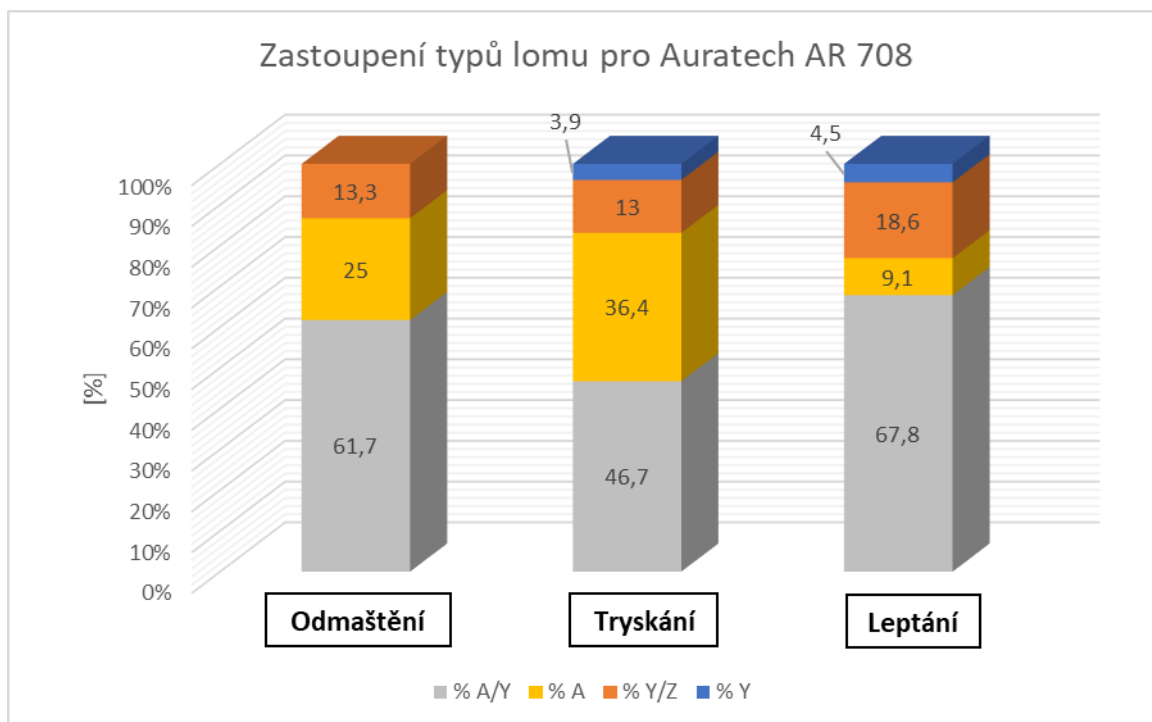
Pro lepidla EA 9455 a AR 708 se jako nejvhodnější předúprava, pro dosažení maximální odolnosti proti odtržení, jeví leptání. V případě lepidla AR 708 jsou hodnoty pro tryskaný a odmaštěný povrch srovnatelné a zároveň znatelně nižší než pro leptaný povrch. Pro lepidlo EA9455 jsou srovnatelné hodnoty tryskaného povrchu pro cínovou a vzduchovou stranu, v případě odmaštěného povrchu bylo dosaženo průměrně větší přilnavosti na cínové straně. V případě lepidla AR 011 jsou průměrné hodnoty napětí potřebného pro odtrh nejvíce kompaktní, to je způsobeno především faktem, že docházelo nejčastěji ke koheznímu poškození ve skle.



Graf 4 - Zastoupení typů lomu pro Loctite EA 9455



Graf 5 - Zastoupení typů lomu pro Auratech AR 011



Graf 6 - Zastoupení typů lomu pro Auratech AR 708

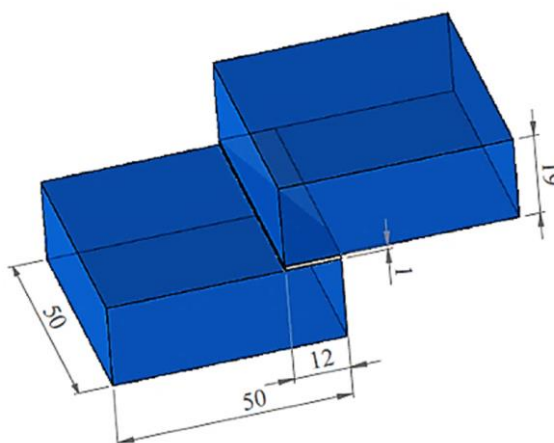
Na základě grafů 4-6, ve kterých je zobrazeno procentuální zastoupení jednotlivých druhů porušení (viz. klasifikace lomu dle ČSN ISO 4624) lze konstatovat následující:

- Lepidlo Loctite EA 9455 se porušuje ze všech tří lepidel nejpodobnějším způsobem napříč všemi třemi druhy předúprav, přes 93% všech odtrhů skončilo kohezním lomem v lepidle, v případě předúpravy odmaštěním a tryskáním to bylo dokonce přes 97% odtrhů.
- U lepidla Auratech AR 011 nejčastěji nastalo porušení kohezním lomem skla (vzorku), celkem se tak porušilo přes 60% vzorků, nejvíce se pak kohezní lom vyskytoval u odmaštěných vzorků (76,7%). U tryskaných vzorků je 43% zastoupen lom adhezní mezi poslední vrstvou (sklem) a lepidlem. U vzorků tryskaných se zase častěji vyskytoval lom adhezní mezi lepidlem a zkušebním tělískem (36,3%).
- V případě lepidla Auratech 708 nejčastěji nastal lom adhezní mezi vzorkem a lepidlem (dohromady téměř 59% ze všech odtrhů), následovaný kohezním lomem skla (celkem 23,5%, nejvíce u tryskaných vzorků), který se vyskytoval především v druhé sérii měření, kdy byly vzorky oslabené prvními odtrhy. Adhezní lom mezi lepidlem a zkušebním tělískem nastal v necelých 15% odtrhů. Kohezní lom se vyskytoval v méně než 3% případech, u odmaštěných vzorků nebyl pozorován vůbec.

4.5 Zkouška stříhem

V rámci experimentu rovněž proběhl pokus o vytvoření a otestování nové metodiky pro zkoušku stříhem dvou slepených vzorků skla. Motivací zde bylo především vytvoření přípravků, které budou kompatibilní s technologickým vybavením FS ČVUT a bude tak možnost měření v budoucnu opakovat ve větší míře.

Dle schématu slepených vzorků [15] bylo třeba nejprve navrhnout přípravek pro lepení vzorků tak, aby slepená plocha byla $50 \times 12 \text{ mm}^2$ a vrstva lepidla byla 1 mm.



Obrázek 35 - Schéma slepení vzorků [15]

Pro potřeby slepení dvou vzorků byl v programu Autodesk Inventor navrhnut a následně na 3D tiskárně vyroben jednoduchý přípravek, který pozičně zajišťoval oba vzorky a zároveň umožnil požadovanou tloušťku lepidla 1 mm. Výroba probíhala na 3D tiskárně Creality Ender 5, použitý materiál PLA, výplň 20% (větší hodnoty výplně nebylo třeba, neboť výrobek nebyl určen k namáhání).

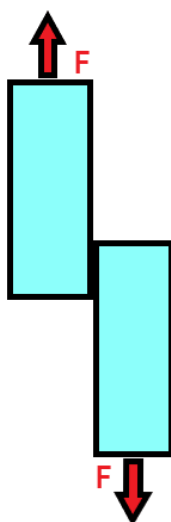


Obrázek 36 - Slepené vzorky ve vyrobeném přípravku

Vzorky pro lepení prošly povrchovou úpravou viz. 4.2.1, tedy ultrazvukové odmaštění, dvoustupňový oplach a vysušení. Před aplikací lepidla byly vzorky rovněž ošetřeny technickým benzinem P 6402 naneseným na papírovou utěrku.

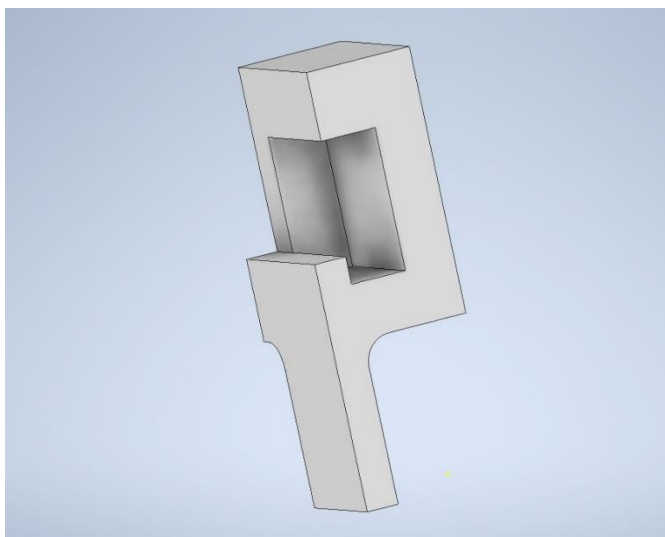
Vzorky byly slepeny vždy na vzduchové straně, dohromady byly v přípravku zhotoveny 3 slepené vzorky (z 6 původních vzorků skla), přičemž byla využita všechna 3 dříve zmíněná lepidla (EA 9455, AR 011, AR 708).

Ve druhé fázi bylo zapotřebí navrhnout přípravek, který by umožnil zkoušku stříhem pomocí fixace vzorků proti jinému než svislému namáhání a zároveň vyhovoval možnostem upnutí na zařízení dostupném v laboratoři FS ČVUT.



Obrázek 37 - Schéma požadovaného zatížení

Návrh přípravku pro zkoušku stříhem proběhl opět v programu Autodesk Inventor. Navrhnutý model musel splňovat podmínky pro upnutí do trhacího zařízení LabTest Model 5.100SP1 a zároveň musel být dostatečně odolný, aby nedošlo k jeho porušení dříve, než dojde k porušení lepeného spoje. Výsledný model poloviny přípravku je na obrázku 29. Model bylo následně nutné vytisknout v počtu dvou kusů, které mohly být po následné výrobě nasunuty na slepený vzorek.



Obrázek 38 - 3D model poloviny přípravku pro zkoušku střihem

Tisk přípravku proběhl opět na 3D tiskárně Creality Ender 5, zvolený materiál PLA, výplň nastavena na 40% (kvůli požadavku na odolnost proti namáhání), vrstva 0,3 mm a rychlost tisku $60 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$.

Zkouška proběhla na stroji LabTest Model 5.100SP1, jehož vybrané technické parametry jsou uvedeny v tabulce 21.



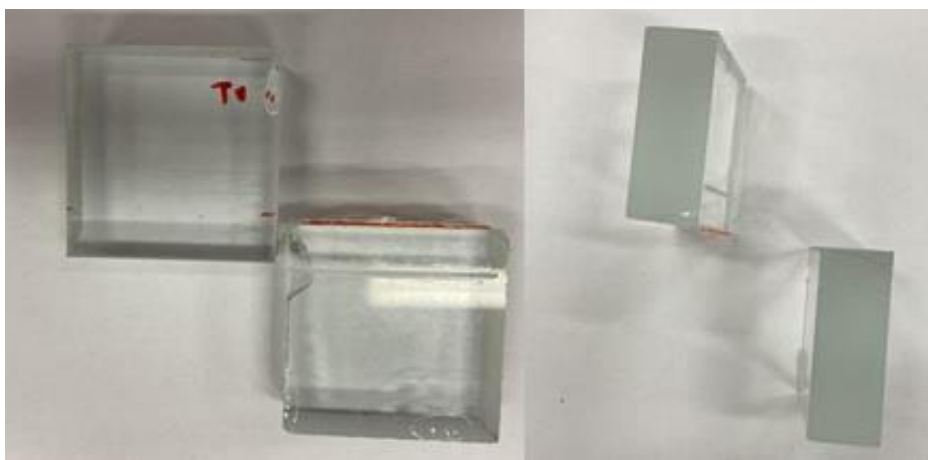
Obrázek 39 - LabTest 5.100SP1

Jmenovité zatížení [kN]	100
Max. zkušební rychlost [mm.min ⁻¹]	600
Přesnost řízení rychlosti [%]	±0,5
Rozlišení přičníku [μm]	1
Tuhost rámu [mm.N ⁻¹]	1,6x 10 ⁻⁶
Rozpětí sil [kN]	500-600
Přesnost měření síly [%]	±0,3 z hodnoty v rozsahu
Přesnost dráhy [μm]	1 - ČSN EN ř513
Přesnost měření napětí [%]	±0,5 průtahoměru

Tabulka 21 - Technická data stroje LabTest Model 5.100SP1

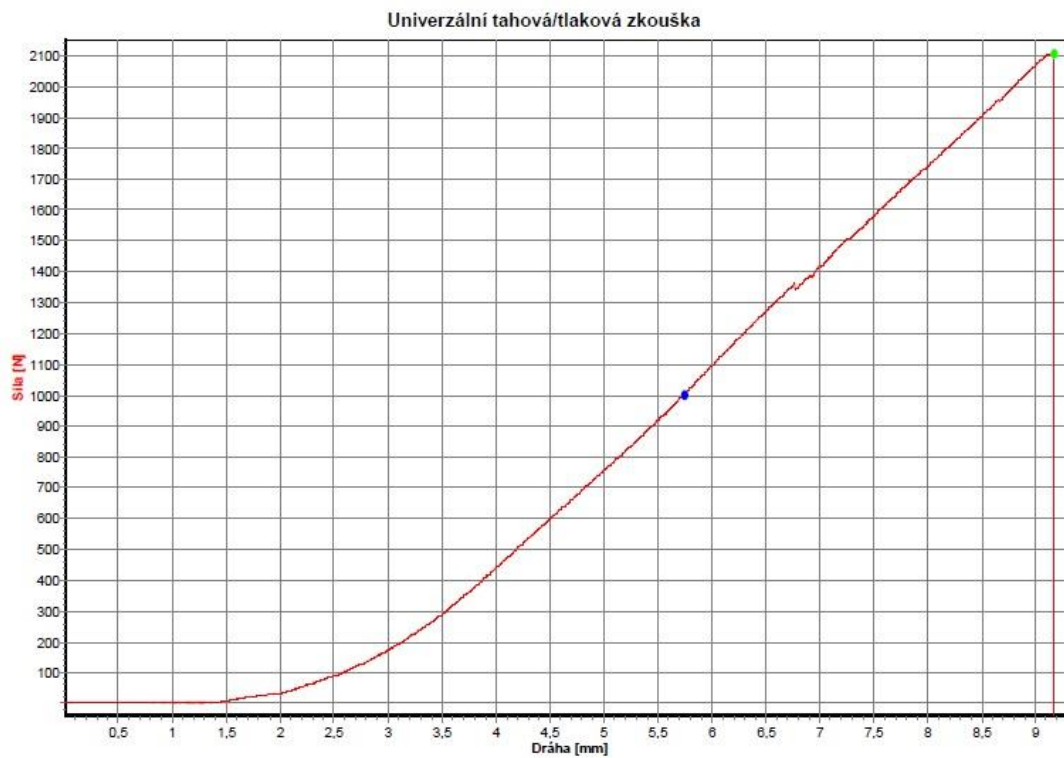
Slepené vzorky byly opatrně nasunuty do vyrobených přípravků a vše bylo upnuto do zařízení LabTest. Následovalo spuštění zkoušky, výsledky zaznamenával software v PC.

Vzorky slepené vteřinovým lepidlem AR 011 se oddělily již při upnutí do stroje, před samotným zahájením zkoušky, nebylo tedy možné získat žádná data, ale lze konstatovat, že spoj dvou skleněných vzorků lepidlem AR 011 nedosahoval vysokých hodnot pevnosti. Analýzou oddělených vzorků bylo zjištěno, že k oddělení došlo adhezním porušením v lepidle AR 011.

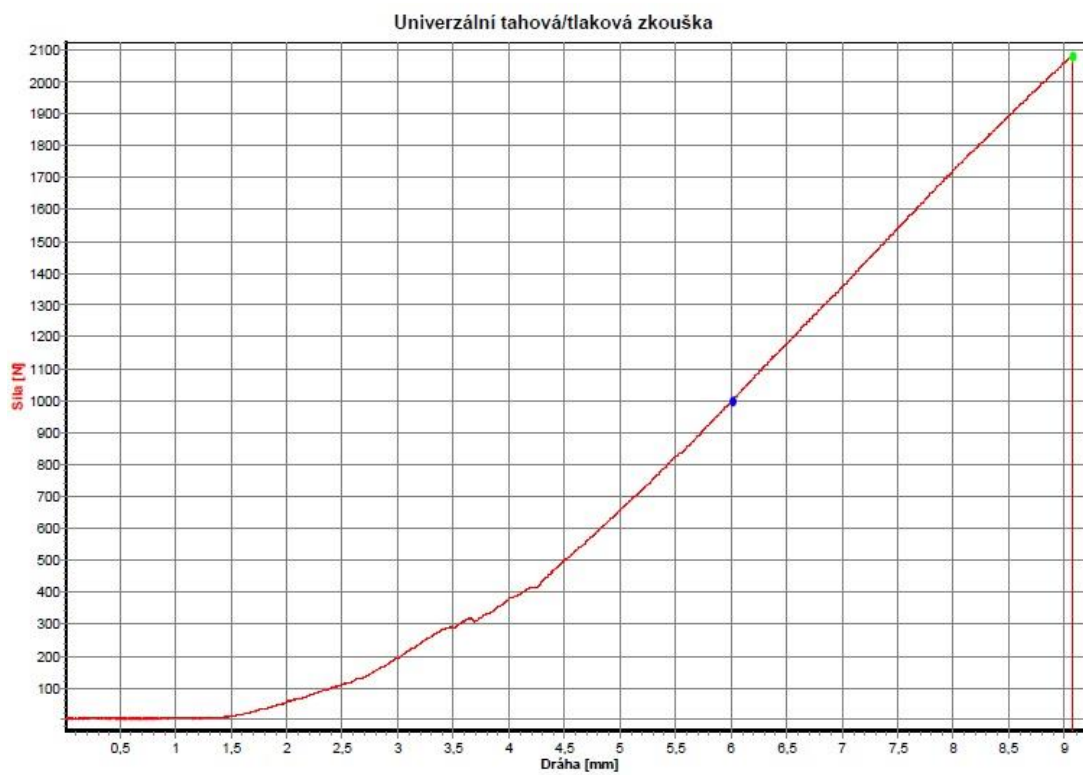


Obrázek 40 - Porušení vzorků slepených lepidlem AR 011

V případě lepidel EA 9455 a AR 708 stejný problém nenastal a bylo možné zkoušku provést v zamýšleném rozsahu. Průběhy zkoušek jsou zobrazeny na následujících grafech.



Graf 7 - Závislost síly na dráze pro vzorky lepené lepidlem Loctite EA 9455



Graf 8 - Závislost síly na dráze pro vzorky lepené lepidlem Auratech AR 708

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce:

Lepidlo	Síla při porušení [N]
Loctite EA 9455	2108,90
Auratech	2082,70

Tabulka 22 - Hodnoty síly při porušení slepených vzorků

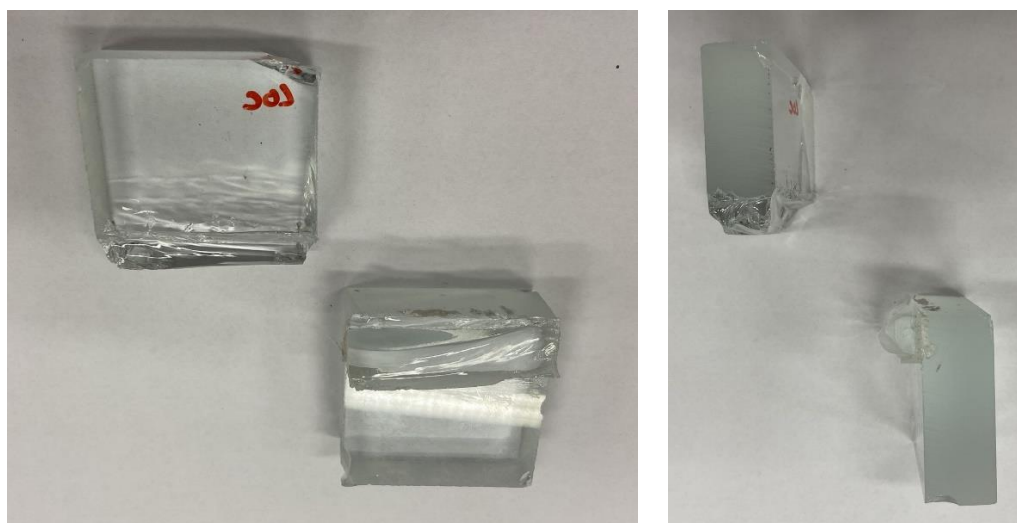
Hodnoty síly při porušení jsou pro obě lepidla velmi podobné, téměř identický byl i způsob porušení, kdy došlo ke koheznímu lomu ve skle, lepený spoj zůstal neporušen. Zdá se tedy, že bylo dříve dosaženo limitu vzorku skla, než se mohl porušit samotný lepený spoj.

Na obrázku 32 je patrný moment porušení vzorků slepených lepidlem EA 9455, kvůli koheznímu porušení ve skle lze sledovat odletující střepy. Zkouška byla natočena mobilním telefonem z bezpečné vzdálenosti od stroje, aby nedošlo k zasažení a poranění odletujícími střepy.

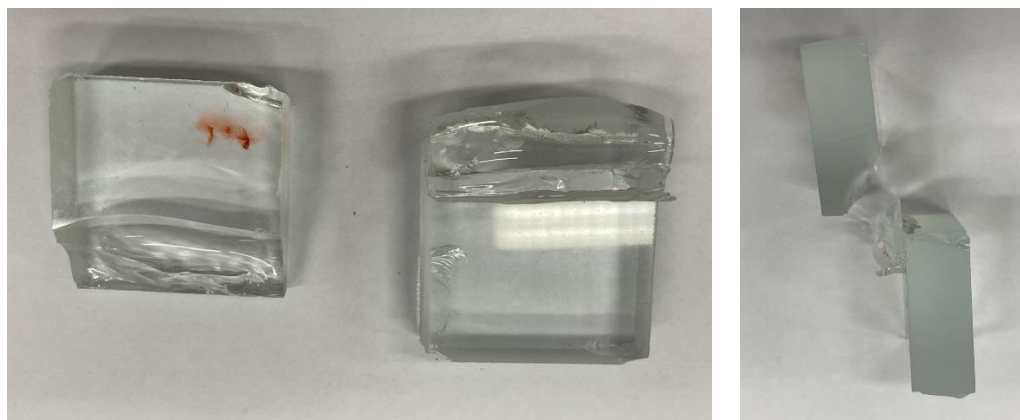


Obrázek 41 - Moment porušení při střihové zkoušce, lepidlo EA 9455

Obrázky 33 a 34 detailněji zobrazují poškození skleněných vzorků po zkoušce stříhem.



Obrázek 42 - Porušení vzorků slepených lepidlem EA 9455



Obrázek 43 - Porušení vzorků slepených lepidlem AR 708

5 Technicko – ekonomické zhodnocení

Při úvaze nad nejvhodnější kombinací předúpravy povrchu a lepidla je třeba zohlednit několik faktorů. Mezi ty patří časová náročnost povrchových předúprav, finanční náklady na provedení předúpravy a cena samotných lepidel.

Nejlevnější variantou použitých předúprav bylo odmaštění, neboť zbylé dvě metody se skládaly jak z odmaštění, tak i z dalších úkonů. Náklady na leptané vzorky byly srovnatelné s náklady na vzorky odmaštěné, pořizovací cena za leptací pastu (50ml) byla 188 Kč a odhadem by vystačila na pokrytí minimálně 20 vzorků z obou stran. Oproti vzorkům pouze odmaštěným následoval ještě oplach tekoucí vodou před vložením vzorků do ultrazvukové čističky. Proces

leptání si pro 9 leptaných vzorků vyžádal přibližně 1 hodinu práce navíc oproti vzorkům odmaštěným.

Nejnákladnější předúpravou je tryskání, kde je třeba zohlednit náklady na abrazivo a náklady na provoz tryskacího zařízení. Jedná se zároveň i o metodu časově nejnáročnější, neboť uvedení zařízení do provozu a následná individuální manipulace se vzorky celý proces značně prodlouží. I přes to, že samotné tryskání na jednu stranu vzorku bylo prováděno pouze po dobu 30 sekund, při započtení výše zmíněného byl celý proces o 2 hodiny delší než v případě vzorků odmaštěných a o 1 hodinu delší než v případě vzorků leptaných.

Vzorky tryskané zároveň vykazovaly nejvyšší rozdíly v naměřených hodnotách drsnosti a z výsledků odtrhové zkoušky je patrné, že u vzorků předupravených tryskáním bylo třeba nejnižších napětí pro odtržení panenky od vzorku.

V případě lepidel se uvažuje především pořizovací cena, dále se zohledňuje i skladovatelnost. Ne všechna lepidla jsou dodávána ve stejném objemovém množství, proto je třeba při nákupu ověřit i množství lepidla, nikoliv jen cenu za produkt. Náklady na pořízená lepidla byly následující:

- Loctite EA 9455: 511 Kč za 50 ml (= 10,22 Kč za 1 ml)
- Auratech AR 011: 402,93 Kč za 20 ml (= 20,15 Kč za 1 ml)
- Auratech AR 708: 794,97 Kč za 50 ml (= 15,90 Kč za 1 ml)

6 Závěr

Cílem práce bylo zhodnotit vliv předúprav povrchu na vlastnosti vybraných lepených spojů. Z výsledků práce vyplývá, že nejvhodnější předúpravou pro použité vzorky bylo leptání. Při odtrhové zkoušce bylo u naleptaných vzorků potřeba průměrně nejvyšší napětí pro odtržení panenky z povrchu vzorku, výjimku tvoří pouze lepidlo AR 011, u kterého však docházelo ke koheznímu lomu ve vzorku u všech provedených předúprav.

Předúpravy tryskáním a odmaštěním dosahují napříč vzorky podobných průměrných hodnot napětí potřebného k odtržení. V případě tryskaných vzorků je však třeba zdůraznit, že vykazovaly největší rozdíly v hodnotách drsnosti povrchu a zároveň touto předúpravou došlo k výraznému narušení původního vzhledu skleněného vzorku. Pokud by se uvažovala situace, kdy je žádoucí zachovat lesklý a průhledný / průsvitný vzhled skla, není tryskání vhodnou

volbou. V takovém případě je vhodnější zařadit pouze předúpravu odmaštěním, což je zároveň i předúprava nejméně časově a finančně nákladná.

Z hlediska lepidel se jako nejlepší ukázalo lepidlo Auratech AR 708, u spojů s tímto lepidlem bylo průměrně potřeba nejvyšší napětí pro odtržení panenky z povrchu vzorku. Celková průměrná hodnota napětí potřebného pro odtržení panenky přilepené lepidlem Auratech 708 je o 13% vyšší než v případě lepidla Loctite EA 9455 a o 34% vyšší než v případě lepidla Auratech AR 011. Druhých nevyšších průměrných hodnot napětí potřebného pro odtržení dosahovalo lepidlo Loctite EA 6455 (průměrně o 19% vyšší hodnoty než pro Auratech AR 011), které bylo zároveň ze všech zkoušených lepidel nejlevnější v přepočtu na cenu 1 ml lepidla. Dvousložková lepidla se v experimentální části ukázala jako vhodnější pro lepený spoj sklo – kovová panenka. V případě vzorků lepených lepidlem Auratech AR 011 docházelo převážně ke koheznímu porušení ve skle. V dalším výzkumu by bylo vhodné se zaměřit na zkoumání vlivu chemického složení lepidla AR 011 na strukturu skla a prověřit, zda lepidlo na bázi ethylesteru kyseliny kyanoakrylátové má schopnost narušit povrchové a vnitřní struktury skla a tím způsobit kohezní poškození.

Během druhých sérií odtrhů se vyskytlo výrazně větší množství poškození vzorků, v několika případech došlo k jejich zničení. Tento jev lze přisuzovat křehkosti skla a náročnosti zkoušky, kdy patrně v mnoha případech došlo v první sérii odtrhů k narušení vnitřní struktury, což následně při dalších odtržích způsobilo výraznější porušení vzorků. Tento trend byl patrný u všech měřených lepidel, nejčastěji však v případě lepidla Auratech AR 708, u kterého bylo potřeba průměrně nejvyššího napětí pro odtrh a tím pádem docházelo k největšímu namáhání struktury vzorku. V případě dalšího zkoumání na vzorcích stejných rozměrů se jeví jako vhodnější způsob lepit a odtrhávat pouze jednu panenku z každé strany, aby se předešlo zkreslení výsledků kvůli narušení vnitřní struktury skla.

V práci byl rovněž zkoumán vliv cínové a vzduchové strany vzorku na výsledky měření. V případě leptání a tryskání nelze tento vliv uvažovat, neboť zvolenou předúpravou byla původní povrchová vrstva zničena. Vliv je možné vyhodnocovat pouze v případě vzorků odmaštěných. Zde byly naměřeny průměrně vyšší hodnoty drsnosti pro cínovou stranu (o 53% v případě parametru Ra a o 42% pro parametr Rz). U odtrhové zkoušky byly naměřeny průměrně vyšší hodnoty napětí pro cínovou stranu u lepidla Loctite EA 9455 (průměrně o přibližně 20%, v případě lepidel Auratech AR 011 a Auratech AR 708 byly naměřeny průměrně vyšší hodnoty napětí pro odtrh panenky na vzduchové straně, konkrétně o necelých 19% pro lepidlo AR 011 a o 13,5% v případě lepidla AR 708. Bylo by vhodné provést více měření, aby

bylo možné tato data o vlivu cínové strany na drsnost povrchu a napětí potřebné k odtrhu statisticky ověřit.

Dalším z cílů byl pokus o vytvoření metodiky pro zkoušku pevnosti dvou, s přesahem slepených, vzorků skla ve stříhu. Byl navrhnut přípravek, který umožňuje efektivní opakování takových měření. Na stříh byly zkoušeny 3 dvojice vzorků, které byly předupravené odmaštěním. V případě dvousložkových lepidel došlo ke koheznímu porušení ve skle při téměř identických hodnotách zatížení, stejným způsobem lomu. V případě vteřinového lepidla nebyla zkouška stříhem změřena kvůli porušení lepeného spoje již při upínání do laboratorního zařízení. S ohledem na způsob porušení vzorků při odtrhové zkoušce je překvapivé, že u vzorků připravených na zkoušku stříhem došlo k adheznímu porušení v lepidle.

Pro další výzkum by bylo vhodné porovnat vliv dalších způsobů předúprav jak pro zkoušku odtrhem, tak pro zkoušku stříhem a otestovat další vzorky lepidel pro vyhodnocení nejlepší kombinace předúpravy a lepidla pro průmyslové i komerční využití a to jak z pohledu technologického, tak z pohledu ekonomického.

Bibliografie

- [1] POKORNÝ, Jiří. Lepení a tmelení v dílně i domácnosti: [dřevo, kovy, plasty, sklo, další materiály a výrobky]. Praha: Grada, 2000. 104 s. ISBN 80-7169-857-1.
- [2] OSTEN, Miloš. Práce s lepidly a tmely. Praha: Grada, 1996. 129 s. ISBN 80-7169-338-3.44
- [3] PETERKA, Jindřich. Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství. Praha: SNTL, 1980. 788 s.
- [4] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. BUDYNAS a Miloš VLK. Konstruování strojních součástí. Brno: VUTIUM, 2010. 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [5] VÁLEK, V. CHRÁST, V. Technologie lepení kovů v opravárenství. Disertační práce. MZLU v Brně, 2006. 99 s.
- [6] BURCHARDT, Bernd a Kurt DIGGELMANN, A.g. BLUNDEN. Elastic Bonding: The basic principles of adhesive technology and a guide to its cost.effective use in industry. 2. Munich, Germany: abavo GmbH, 2006. ISBN 3-937889-35-3.
- [7] TRHOŇ, Vojtěch. Analýza lepidel ve všeobecném strojírenství. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.
- [8] MACHALICKÁ, Klára. Lepené spoje v nosných konstrukcích ze skla namáhané smykem. Praha, 2015. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Martina Eliášová, CSc.
- [9] ZELA, Vladimír. Úprava reologie lepidla určeného pro lepení materiálů na bázi dřeva s cílem omezení sedimentace plniv. Brno, 2006. Diplomová práce. Univerzita v Brně. Vedoucí práce Ing. Daniela Tesařová.
- [10] EBNEAJJAD, Sina. Surface Treatments of Materials for Adhesive Bonding: Second Edition [online]. 2nd ed. Oxford: Elsevier Science & Technology Books, 2014. ISBN 978-0-323-26435-8. [cit. 2023-06-15] Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/cvut/detail.action?docID=1495678>.
- [11] KREIBICH, Viktor a Karel HOCH. Koroze a technologie povrchových úprav. 2. vyd. Praha: ČVUT v Praze, 1991.

- [12] RUDAWSKA, Anna. Surface Treatment in Bonding Technology. Lublin: Elsevier Science & Technology Books, 2019. ISBN 978-0-12-817010-6.
- [13] PETRIE, Edward M. Handbook of Adhesives and Sealants: Third Edition. 3rd Edition. The McGraw-Hill Companies. ISBN 978-1260440447
- [14] KRAUS, Václav. Povrchy a jejich úpravy. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2009. ISBN 978-80-7082-668-3.
- [15] BOUTAR, Yasmina. Assessment of the mechanical behavior of bonded glass-to-glass transparent epoxy adhesive joint at elevated temperatures for load-bearing elements [online]. International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 127, 2023 103526, ISSN 0143-7496. [cit. 2023-06-27] Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143749623002063>
- [16] OSOULI-BOSTANABAD, Karim. The influence of pre-bond surface treatment over the reliability of steel epoxy/glass composites bonded joints [online], International Journal of Adhesion and Adhesives, Volume 75, 2017, Pages 145-154, ISSN 0143-7496. [cit. 2023-06-29] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749617300568>
- [17] ZIKMUNDOVÁ, Martkéta. Influence of Elevated Temperature on the Mechanical Properties of Transparent Adhesive Glass-Glass Joints [online]. Challenging Glass 8, Volume 8, 2022. [cit. 2023-06-29] Dostupné z:
<https://proceedings.challengingglass.com/index.php/cgc/article/view/439/363>
- [18] MICHALICKÁ, Klára V. Influence of various factors to mechanical properties of glued joint in glass [online]. Structures and architecture, 2013, ISBN 9780429159350. [cit.2023-06-30] Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/299943194_Influence_of_various_factors_to_mechanical_properties_of_glued_joint_in_glass/citations#fullTextFileContent
- [19] Pasta na leptání skla Pentart 50ml. <https://allegro.cz/> [online]. [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: <https://a.allegroimg.com/s720/11b320/43d5f1ab487c86bfe2467b8b3640/Pasta-na-leptani-skla-Pentart-50ml>
- [20] Střední aritmetická úchylka profilu - Ra (CLA, AA) [online]. [cit. 2023-12-16]. Dostupné z:
<https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/cs/cs/sluzeb/povlakovani/lesteni/>

- [21] Kvalita povrchu. <https://cuttingtools.ceratzit.com/cz/cs> [online]. [cit. 2023-12-18]
Dostupné z: [html https://cdn.plansee-group.com/is/image/planseemedia/Oberfl%C3%A4cheng%C3%BCte-Rauwert-Ra?dynamic=true&wid=1610&fmt=webp-alpha&fit=fit,1](https://cdn.plansee-group.com/is/image/planseemedia/Oberfl%C3%A4cheng%C3%BCte-Rauwert-Ra?dynamic=true&wid=1610&fmt=webp-alpha&fit=fit,1)
- [22] LOCTITE EA 9455 - 50ML, DVOUSLOŽKOVÝ EPOXID. <https://www.lepidla-online.cz/> [online] [cit. 2023-12-19]. Dostupné z: https://www.lepidla-online.cz/eshop/p/loctite-ea-9455-50ml-dvouslozkovy-epoxid/?gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAkeSsBhDUARIsAK3tied4SuKcjS_VvLiJ6D0Y3KF T4CSZstWRiWsvgHdQtXsoTpy_UnEYdeoaAtMDEALw_wcB#1829
- [23] LOCTITE 96001 - PISTOLE RUČNÍ PRO DVOJKARTUŠE 50 ML 1:1, 2:1,10:1. <https://www.lepidla-online.cz/> [online] [cit. 2023-12-19]. Dostupné z: https://www.lepidla-online.cz/data/storage/thumbs/1600x1600-scaleshrink-ke/storage-image_jpeg-20170830012936-0147-96001-lepidla-online-cz.jpg
- [24] VTEŘINOVÉ LEPIDLO - AR 011 - 20g – univerzální. <https://www.technicke-lepeni.cz/> [online] [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: https://www.technicke-lepeni.cz/ar-011-vterinove-lepidlo-20g?gclid=Cj0KCQiAkeSsBhDUARIsAK3tiefdwyfs47lmzOozGjzydmUZVrwFfk9pVgYlninDpvTw92OMdUpI9P8aArZeEALw_wcB
- [25] AR 708 - KONSTRUKČNÍ LEPIDLO - 50ml. <https://www.technicke-lepeni.cz/> [online] [cit. 2023-12-20]. Dostupné z: <https://www.technicke-lepeni.cz/ar-708-konstrukcni-lepidlo-50ml>
- [26] ČSN EN ISO 4624:2016, Nátěrové hmoty – Odrhová zkouška přilnavosti.
- [27] Praktická příručka – Hodnocení přilnavosti nátěru | ATRYX s.r.o. Nátěrové hmoty | ATRYX s.r.o [online]. Copyright © 2018 ATRYX, s.r.o. Všechna práva vyhrazena.. Designed by [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: <https://atryx.cz/prakticka-prirucka/16-hodnoceni-prilnavosti>
- [28] Elcometer 510 Automatický odtrhoměr. <https://www.gamin.cz/> [online]. [cit. 2023-12-27]. Dostupné z: https://www.elcometer.cz/fileadmin/user_upload/Automaticky_odtrhomer_Elcometer_510.pdf

- [29] MÁŠA, Vítězslav. Industrial use of dry ice blasting in surface cleaning. Journal of Cleaner Production [online]. 2021, 2021(329), 10 [cit. 2024-01-09]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621038087>
- [30] Jak se vyrábí suchý led?. In: Linde: making our world more productive [online]. Praha 9: Linde plc, c 2011-2022 [cit. 2024-01-09]. Dostupné z: <https://www.linde-gas.cz/cs/sluzby/dry-ice/produkty.html>
- [31] BALDWIN, Peter a Joseph WILLIAMS. Capturing CO₂: Gas Compression vs. Liquefaction. Power [online]. Bellevue, Washington, 2009, (1) [cit. 2024-01-09]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/capturing-co2-gas-compression-vs-liquefaction/>
- [32] MITAL, K.L. Adhesion measurement of films and coatings. CRC Press, 2018. ISBN 9789067643375.
- [33] PIZZI, A. Handbook of Adhesive Technology Third Edition. CRC Press, 2020. ISBN 9780367572396.

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Technické údaje drsnoměru MITUTOYO SURFTEST SJ-210 [22].....	48
Tabulka 2 - Klasifikace lomu dle ČSN ISO 4624 [26].....	55
Tabulka 3 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava odmaštěním	58
Tabulka 4 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava odmaštěním	58
Tabulka 5 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava tryskáním	59
Tabulka 6 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava tryskáním	59
Tabulka 7 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava leptáním.....	60
Tabulka 8 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Loctite EA 9455, předúprava leptáním	60
Tabulka 9 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava odmaštěním	61
Tabulka 10 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava odmaštěním.....	61
Tabulka 11 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava tryskáním	62
Tabulka 12 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava tryskáním	62
Tabulka 13 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava leptáním	63
Tabulka 14 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 011, předúprava leptáním	63
Tabulka 15 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava odmaštěním	64
Tabulka 16 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava odmaštěním.....	64
Tabulka 17 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava tryskáním	65
Tabulka 18 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava tryskáním	65
Tabulka 19 - Hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava leptáním	66
Tabulka 20 - Průměrné hodnoty přilnavosti pro lepidlo Auratech AR 708, předúprava leptáním	66
Tabulka 21 - Technická data stroje LabTest Model 5.100SP1.....	73
Tabulka 22 - Hodnoty síly při porušení slepených vzorků.....	75

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Rozdíl účinku vrubu na jednolitý díl a lepený díl [3].....	16
Obrázek 2 - Vztah mezi adhezí a lepeným materiálem [3]	17
Obrázek 3 - Smáčivost povrchu kapalinou [3]	20
Obrázek 4 -Vliv tloušťky lepené vrstvy na mechanické vlastnosti spoje. [18].....	40
Obrázek 5 - Vzorek skla typu "clear vision"	42
Obrázek 6 - Ultrazvuková čistička Kraintek K-2LE	43
Obrázek 7 - Horkovzdušná pistole Bosch GHG 660 LCD Professional.....	44
Obrázek 8 - Tryskací zařízení od S.A.F. PRAHA s.r.o.	44
Obrázek 9 - Vnitřní komora tryskacího zařízení	45
Obrázek 10 - Tryskaný vzorek ve stavu před prvním oplachem tekoucí vodou	45
Obrázek 11 - Leptací pasta Pentart Glass Etching Paste [19]	46
Obrázek 12 - Srovnání původního a naleptaného vzorku.....	46
Obrázek 13 - Střední hodnota drsnosti Ra [21]	47
Obrázek 14 - Střední hloubka drsnosti Rz [21]	47
Obrázek 15 - Drsnoměr Mitutoyo Surfetest SJ-210.....	48
Obrázek 16 - Schéma měření drsnosti vzorků.....	49
Obrázek 17 - Loctite EA 9455.....	51
Obrázek 18 - Ruční aplikační pistole pro dvojkartuše [23].....	51
Obrázek 19 - Lepidlo Auratech AR 011.....	52
Obrázek 20 - Lepidlo Auratech AR 708.....	52
Obrázek 21 - Vytvrzování lepidla - panenky přilepené lepidlem a zajištěné papírovou páskou	54
Obrázek 22 - Obecné schéma odtrhové zkoušky přilnavosti [27].....	55
Obrázek 23 - Odtrhoměr Elcometer 510	56
Obrázek 24 - Okroužení panenek pomocí vykrūžovacího vrtáku Starrett	56
Obrázek 25 - Odtrhoměr Elcometer 510 zajištěný na nalepené panence	57
Obrázek 26 - Adhezní lom v lepidle Loctite EA 9455, předúprava odmaštěním	58
Obrázek 27 - Adhezní lom v lepidle Loctite EA 9455, předúprava tryskáním.....	59
Obrázek 28 – Adhezní lom mezi vzorkem a lepidlem Loctite EA 9455, předúprava tryskáním	60
Obrázek 29 – Kohezní lom ve vzorku skla, lepidlo Auratech AR 011, předúprava odmaštěním	61

Obrázek 30 - Kombinace kohezního lomu ve vzorku a adhezního lomu mezi vzorkem a lepidlem, lepidlo Auratech AR 011, předúprava tryskáním.....	62
Obrázek 31 - Kombinace kohezního lomu ve vzorku a adhezního lomu mezi lepidlem a zkušebním tělesem, lepidlo Auratech AR 011, předúprava leptáním	63
Obrázek 32 - Kombinace adhezního lomu mezi vzorkem a lepidlem a adhezního lomu mezi lepidlem a zkušebním tělesem, lepidlo Auratech AR 708, předúprava odmaštěním.....	64
Obrázek 33 - Kombinace adhezního lomu mezi vzorkem a lepidlem a adhezního lomu mezi lepidlem a zkušebním tělesem, lepidlo Auratech AR 708, předúprava tryskáním	65
Obrázek 34 - Kombinace adhezního lomu mezi vzorkem a lepidlem a adhezního lomu mezi lepidlem a zkušebním tělesem, lepidlo Auratech AR 708, předúprava leptáním	66
Obrázek 35 - Schéma slepení vzorků [15]	70
Obrázek 36 - Slepé vzorky ve vyrobeném přípravku	70
Obrázek 37 - Schéma požadovaného zatížení	71
Obrázek 38 - 3D model poloviny přípravku pro zkoušku stříhem	72
Obrázek 39 - LabTest 5.100SP1.....	72
Obrázek 40 - Porušení vzorků slepených lepidlem AR 011.....	73
Obrázek 41 - Moment porušení při stříhové zkoušce, lepidlo EA 9455	75
Obrázek 42 - Porušení vzorků slepených lepidlem EA 9455.....	76
Obrázek 43 - Porušení vzorků slepených lepidlem AR 708.....	76

Seznam grafů

Graf 1 - Průměrné hodnoty Ra pro zvolené předúpravy	49
Graf 2 - Průměrné hodnoty Rz pro zvolené předúpravy	50
Graf 3 - Srovnání výsledků odtrhové zkoušky	67
Graf 4 - Zastoupení druhů porušení pro Loctite EA 9455.....	68
Graf 5 - Zastoupení druhů porušení pro Auratech AR 011	68
Graf 6 - Zastoupení druhů porušení pro Auratech AR 708	69
Graf 7 - Závislost síly na dráze pro vzorky lepené lepidlem Loctite EA 9455	74
Graf 8 - Závislost síly na dráze pro vzorky lepené lepidlem Auratech AR 708.....	74

Přílohy

Příloha A – Naměřené hodnoty drsností

Příloha B – Fotodokumentace zkoušky odtrhem

Příloha C – Technický list, Drsnoměr SJ210

Příloha D – Technický list, Automatický odtrhoměr Elcometer 510

Příloha E – Technický list, Loctite EA 9455

Příloha F – Technický list, Auratech AR 011

Příloha G – Technický list, Auratech AR 708