

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera

Vliv jakosti povrchu kovu na pevnost lepeného spoje

Bc. Jan Petr

Diplomová práce

2011

University of Pardubice
Jan Perner Transporting Faculty

**Influence of Surface Quality of Material to Strength of Glue
Joint**

Bc. Jan Petr

Diploma thesis

2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan PETR**
Osobní číslo: **D09907**
Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**
Studijní obor: **Provozní spolehlivost dopravních prostředků a infrastruktury - ochrana životního prostředí v dopravě**
Název tématu: **Vliv jakosti povrchu na pevnost lepeného spoje**
Zadávací katedra: **Katedra dopravních prostředků a diagnostiky**

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

Úvod

- 1 Technologie lepení
- 2 Dělení lepidel, základní typy konstrukčních lepidel, dělení dle způsobu aplikace
- 3 Základní typy lepených spojů, dle typu spoje, dle způsobu zatěžování
- 4 Základní charakteristiky povrchu, úpravy povrchu
- 5 Optická mikroskopie
- 6 Praktická část

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

1. Ptáček L.: **Nauka o materiálu I., II., CERM Brno, 2001**
2. Mleziva J., Šňupárek J.: **Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití, Sobotáles, Praha 2000**
3. Mainsah, E.; Greenwood, J.A.; Chetwynd, D.G.: **Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Springer - Verlag, 2001**
literatura na www.knovel.com

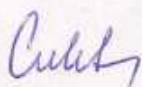
Vedoucí diplomové práce:

Ing. Pavel Švanda, Ph.D.

Katedra mechaniky, materiálů a částí strojů

Datum zadání diplomové práce: **25. února 2011**

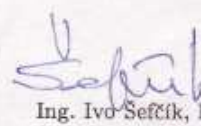
Termín odevzdání diplomové práce: **23. května 2011**



prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.



Ing. Ivo Seřek, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 25. února 2011

Prohlašuji:

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

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

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 30.11. 2011

Bc. Jan Petr

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Pavlu Švandovi, Ph.D. za odborné rady, cenné připomínky a strávený čas, který mi věnoval při tvorbě této diplomové práce.

ANOTACE

Diplomová práce se věnuje možnostem stanovení drsnosti povrchu pomocí optické metalografie s využitím obrazové analýzy. Jsou zde rozebrány jednotlivé typy lepených spojů a jejich vhodnost k použití. V práci je použit software pro obrazovou analýzu AnalySiS docu five, kdy jsou používány základní operace s digitalizovaným obrazem. Využití vyhodnocení drsnosti povrchu tímto způsobem je předpokládáno pro aplikaci lepidel či jiných povrchových vrstev, kde je důležitá přesná charakterizace profilu drsnosti povrchu. Výsledkem měření je profil relativní drsnosti povrchu. Konečné vyhodnocení vlivu jakosti na lepený spoj se provede podle jednotlivých vzorků a jejich naměřených hodnot. Konečné hodnocení dává přehled o vhodnosti úpravy povrchu kovu před lepením.

KLÍČOVÁ SLOVA

drsnost, pevnost, lepidla, měření, profil, materiál.

TITLE

Influence of Surface Quality of Material to Strength of Glue Joint.

ABSTRACT

This thesis is devoted to the possibilities of determination of surface roughness using optical metallography using image analysis. There are analyzed different types of adhesive joints and their suitability for use. The paper is used for image analysis software analySiS docu five, when used with the basic operation of digitized images. Using the evaluation of surface roughness in this way is supposed to apply adhesives or other surface layers is important accurate characterization of surface roughness profile. This measurement is the relative surface roughness profile. Final evaluation of the impact on the quality of bonded joints is carried out according to the samples and their measured values. The final assessment provides an overview of the Suitability of the metal surface treatment before bonding.

KEYWORDS

roughness, strength, glue, measurement, profile, material

Obsah	
Úvod.....	1
1 Technologie lepení.....	2
1.1 Dělení lepidel.....	2
1.1.1 Základní typy konstrukčních lepidel.....	2
1.1.2 Dělení dle způsobu aplikace.....	3
1.2 Lepení kovových materiálů.....	5
1.2.1 Vhodná lepidla ke spojování kovů.....	5
1.2.2 Úpravy lepidel před procesem lepení.....	7
1.2.3 Postup lepení kovových materiálů.....	7
1.3 Epoxidové pryskyřice.....	8
1.3.1 Použití epoxidových pryskyřic jako lepidel.....	8
1.3.2 Lepidlo Epoxy 1200.....	9
1.3.3 Vlastnosti vytvrzené pryskyřice.....	9
1.4 Správné zásady postupu volby lepidla.....	10
1.4.1 Význam pevnosti lepených spojů při výběru lepidla.....	10
2 Základní typy lepených spojů.....	11
2.1 Hlavní zásady navrhování lepených spojů.....	11
2.2 Struktura lepeného spoje.....	12
2.3 Typy konstrukčních spojů.....	12
2.3.1 Rozdělení dle typu spoje.....	12
2.3.2 Rozdělení dle způsobu zatěžování.....	13
2.4 Význam pevnosti u lepených spojů.....	14
2.4.1 Vlivy působící na pevnost lepeného spoje.....	14
2.4.2 Rozložení napětí ve spojích.....	14
2.5 Doporučení pro návrh lepených spojů.....	15
2.6 Přednosti a nedostatky lepených spojů z hlediska pevnosti a technologie.....	16
3 Základní charakteristiky povrchů.....	19
3.1 Charakteristika drsnosti povrchu.....	19
3.1.1 Význam drsnosti povrchu pro pevnost lepeného spoje.....	19
3.2 Charakteristika vlnitosti povrchu.....	19
3.3 Příprava povrchu materiálu před lepením.....	20
3.4 Posuzování drsnosti povrchu materiálu.....	22
3.4.1 Definice veličin pro posuzování drsnosti povrchu.....	24
3.4.2 Příklad měření drsnosti povrchu pomocí filtru profilu.....	24
3.4.3 Volba filtru.....	25

4	Optická mikroskopie.....	26
4.1	Optické mikroskopy.....	26
4.2	Světelný mikroskop pro laboratorní účely.....	27
4.3	Zviditelnění struktury pomocí optických metod.....	27
4.3.1	Světlé pole.....	28
4.3.2	Tmavé pole.....	28
4.3.3	Polarizované světlo.....	28
4.3.4	Fázový a interferenční kontrast.....	29
4.4	Obrazová analýza.....	29
4.5	Příprava metalografického vzorku.....	30
4.5.1	Odebrání vzorku.....	30
4.5.2	Způsob odebrání vzorku.....	31
4.5.3	Označení vzorku.....	31
4.6	Hrubé zbroušení.....	31
4.7	Preparování vzorku.....	31
4.8	Zbroušení.....	32
4.9	Leštění vzorku.....	32
5	Zkouška tahem.....	34
5.1	Zkušební zařízení.....	34
5.2	Závislost napětí - deformace.....	34
5.2.1	Smluvní diagram napětí – deformace.....	34
5.2.2	Smluvní mez pevnosti.....	35
5.2.3	Mez kluzu.....	36
6	Příprava vzorků pro experimentální měření drsnosti povrchu.....	37
6.1	Volba úpravy povrchu vzorků.....	37
6.1.1	Proces přípravy povrchu lepených ploch.....	37
6.1.2	Čištění povrchu ploch před lepením.....	40
6.1.3	Příprava a nanášení lepidla na lepené plochy.....	40
6.2	Mechanická zkouška tahem.....	41
6.2.1	Vyhodnocení tahové zkoušky.....	44
6.3	Metalografický výbrus.....	45
7	Experimentální měření drsnosti odlišně upraveného povrchu materiálu.....	47
7.1	Mikroskopické zobrazení povrchu experimentálních vzorků.....	47
7.2	Postup při zaměření vzorku pod mikroskopem.....	48
7.3	Měření drsnosti v kolmých řezech k povrchu.....	48
7.3.1	Měření drsnosti povrchu tryskaného.....	50
7.3.2	Měření drsnosti povrchu broušeného kotoučovou bruskou.....	50

7.3.3	Měření drsnosti povrchu broušeného brusným papírem drsností P60.....	51
7.3.4	Měření drsnosti povrchu broušeného brusným papírem drsností P120.....	51
7.3.5	Měření drsnosti povrchu broušeného brusným papírem drsností P400.....	52
8	Vyhodnocení výsledků experimentálního měření drsnosti povrchu materiálu.....	53
8.1	Definice parametrů struktury povrchu dle normy.....	53
8.1.1	Definice povrchu.....	53
8.1.2	Definice délek	53
8.1.3	Názvy parametrů geometrických	53
8.1.4	Parametry profilu povrchu a jejich definice.....	54
8.2	Postup vyhodnocení naměřených dat.....	54
8.2.1	Odečítání hodnot z naměřených dat.....	54
8.3	Vyhodnocení povrchu tryskaného keramickým abrazivem.....	55
8.4	Vyhodnocení povrchu broušeného kotoučovou bruskou s keramickým pojivem...56	
8.5	Vyhodnocení povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P60	58
8.6	Vyhodnocení povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P120	59
8.7	Vyhodnocení povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P400	61
9	Hodnocení vlivu stavu povrchu kovu na pevnost lepeného spoje	63
9.1	Výsledné hodnocení vlivu drsnosti povrchu na pevnost spoje	63
9.2	Souhrnný vztah hodnot drsnosti a pevnosti	65
9.3	Doporučení pro vhodnou úpravu povrchu kovu při lepení.....	66
10	Závěr	67
11	Literatura.....	69
12	Seznam použitých symbolů a zkratk.....	71
13	Seznam obrázků	72
14	Seznam tabulek	74
15	Seznam grafů	75
16	Seznam příloh	76

Úvod

Technologie spojování dvou materiál pomocí lepidla je významnou konstrukční metodou používanou v mnoha odvětvích výrobního průmyslu. Umožňují spojení rozdílných materiálů bez výraznějšího vlivu na lepený materiál. Tato metoda spojování se postupně vyvíjí a může nahrazovat jiné metody spojování dvou materiálů. Spojování materiálů pomocí lepidla lze využít především tam, kde je nevhodný přístup pro sváření a tam, kde by teplo vnesené při sváření mohlo poškodit strukturu materiálu.

O kvalitě lepeného spoje rozhoduje především stav povrchu adherendů před lepením. Základními parametry rozhodujícími o kvalitě lepeného spoje je jakost (drsnost) povrchu a jeho předúprava. Oba tyto parametry rozhodují o adhezní pevnosti lepidla. Chemická předúprava zlepšuje chemické spojení mezi lepidlem a adherendem, při její aplikaci nedochází ke změně geometrie povrchu. Reliéf povrchu na mikroskopické úrovni má značný vliv na mechanické zakotvení lepidla na povrch adherendu, ale do značné míry ovlivní i smáčivost povrchu adherendu lepidlem. Kromě spojování materiálů jsou i lepidla, která slouží k potlačení hluku, těsnící a k vyrovnání nerovností.

Vlastní diplomová práce se věnuje různým povrchům kovu z hlediska drsnosti. Hlavním záměrem mé práce bude vyhodnotit vliv předúpravy povrchu kovu na pevnost lepeného spoje. V práci se zabývám také technologií lepení, charakteristikami lepidel a různými typy konstrukčních spojů.

Výsledkem této práce je teoretický rozbor lepení kovových spojů. Další část této práce obsahuje praktické měření prováděné v prostorách Dopravní fakulty Jana Pernera za odborné asistence. Výsledkem je obrazová analýza drsnosti pěti vzorků s odlišným povrchem. Po provedeném měření je uvedeno vlastní doporučení při volbě povrchu materiálu.

1 Technologie lepení

Lepení je technologie spojování materiálů, která se uskuteční nanesením lepidla mezi dvě čisté plochy a po následném vytvrzení vznikne požadovaný spoj.

Lepení je důležitým doplňkem tradičních metod spojování, ne jejich výlučnou náhradou. Umožňuje zesílit a vyztužit především konstrukce bez nákladného strojního obrábění. Svařování nemůže být nahrazeno lepením, ale často je nutné jejich společné využití. Lepení by mělo řešit především problematiku možností spojování. Používá se v případech, kdy nelze použít jiné metody spojování (např. svaření, nýtování).

Obecně lze tvrdit, že lepení je vhodnější při průmyslové výrobě u velkých sérií, při lepení velkých, nebo naopak velice malých ploch.

1.1 Dělení lepidel

1.1.1 Základní typy konstrukčních lepidel

1) Epoxidová

Dlouhou dobu jediné dostupné technické strukturní lepidlo a stále nejpoužívanější. Epoxidová lepidla jsou termosetové pryskyřice, která tuhne polymerizací. Pokud jsou jednou vytvrzená, při vyšších teplotách pouze měknou, ale již se zpětně netaví. Jsou buď dvousložková (vytvrzená smícháním) nebo 1 složková (vytvrzení startováno teplotou). Velmi vysoká pevnost ve stříhu a jsou tuhá s malou smrštitivostí.

2) Polyuretanové

Dvousložková lepidla, která jsou pružná i za nízkých teplot. Dostačující smyková pevnost, vynikající odolnost proti vlhkosti. Druhá složka je použita jako reakční na bázi glykolů. Nevytvrzený materiál je náchylný na teplotu a vlhkost.

3) Anaerobní

Vytvrzení se startuje nedostatkem kyslíku, nevytvrzuje předčasně. Na bázi akrylových polyesterů s viskozitou od kapaliny po pastu. Vysoká kohezní pevnost, nízká adhezní přilnavost, nevhodné na propustné materiály. Špatně vyplňují spáry, používané pro pojišťování závitů [1].

4) Kyanoakrylátové (vteřinová lepidla)

Lehce aplikovatelné a extrémně rychlé vytvrzení. Nízkoviskózní lepidla tvořená na bázi akrylových monomerů. Lepí plasty, gumy a kovy. Mají vysokou pevnost ale špatnou rázovou odolnost, lehce poškoditelná vlhkostí a rozpouštědly. Vhodná při lepení pouze malých ploch, špatně vyplňují spáry.

5) Akrylátová

Méně závislá na stavu povrchu (vhodné i na málo čisté povrchy). Mají vyšší pevnost ve stříhu než epoxidová lepidla a dobrou odolnost proti odlupu a rázu. Dvoukomponentní, 1 složka jeden povrch, 2 složka druhý povrch (možná prodleva před slepením).

6) Tavná

Tyto lepidla rychle vytvrzují (80% pevnosti během 10 až 20 vteřin), umožňují lepení savých i nesavých materiálů. Vyžadují kvalitnější přípravy povrchu. Nejsou náchylná na vlhkost a rozpouštědla, měknou při vyšších teplotách.

6) Metakrylátová

Dvousložková lepidla založená na bázi metyl metakrylátového monomeru. Řízeně vytvrzována smísením dvou složek. Dobrá odolnost proti stříhu, odlupu a výborná odolnost proti rázům. Mají odolnost proti vodě, vlhkosti a rozpouštědlům [10].

1.1.2 Dělení dle způsobu aplikace

1) Teplem vytvrzovaná lepidla

Všechna lepidla, která musí být ohřána na určitou teplotu, aby došlo k vytvrzení.

2) Přidržovací lepidla

Jde o lepidla, která jsou používána pro dočasné spojení dvou dílů dohromady. Pevnost nebývá příliš vysoká. Typickým příkladem je lepicí páska.

3) Teplem tavitelná lepidla

Tyto lepidla jsou aplikována v roztaveném stavu a po následném vychladnutí ztvrdnou. Typickým příkladem je tavná tyčka.

4) Vteřinová, minutová lepidla

Všechna lepidla, která vytvrzují během několika vteřin až minut.

5) Pojišťovací lepidla

Pojišťovací lepidla nebo tmely jsou používány pro zajištění šroubových spojů proti případnému povolení.

6) Tlakově citlivá lepidla

Toto lepidlo je aktivováno tlakem. Tlakově citlivé lepidlo je používáno na samolepicích obálkách a oboustranných páskách.

7) Zajišťovací lepidla

Používají se jako ochrana proti prokluzování a smýkání nezávitových dílů. Velmi podobná pojišťovacím lepidlům, ale jsou používána na nezávitové spoje.

8) Těsnící lepidla

Těsnící lepidlo je používáno jako prevence proti únikům vzduchu, vody, oleje a mezi dvěma povrchy. Typický příklad je těsnící tmel pro lepení oken.

9) Strukturní lepidla

Strukturní lepidla jsou schopna přenášet značné zatížení. Termín „značné zatížení“ nebyl dosud definován, ale znamená to schopnost lepidla přenést značné napětí. V praxi to znamená vznik trvalého spojení dvou materiálů s neomezenou životností (v případě absence neúměrného vnějšího zatížení) [1].

10) UV lepidla

Všechna lepidla vytvrditelná pomocí působení UV světla.

1.2 Lepení kovových materiálů

Lepení kovových materiálů (adherendů) je proces spojování, při kterém se dosahuje trvalého spojení stejných, popř. různých materiálů prostřednictvím lepidel. Lepidlo na kovy je možné definovat jako látku, která utvoří pevné a trvalé spojení mezi dvěma kovovými materiály. Uvedená schopnost látky závisí na adhezi k povrchům lepených materiálů a na kohezi samotného lepidla.

Lepení kovů má v porovnání s jinými technologiemi spojování materiálů velké výhody. Jako jsou např. vysoká pevnost, těsnost spojů, odolnost vůči korozi, možnost spojování různých kovových materiálů navzájem, možnost spojování velmi tenkých kovových materiálů, výroba lepených spojů s velmi dobrou zvukovou, tepelnou a elektrickou izolací ale také s možnou elektrickou vodivostí. Lepené spoje se často využívají při spojování slitin lehkých kovů a lepení neželezných kovů. Lepené spoje kovových materiálů mají v porovnání se svarovými spoji v některých případech i vyšší pevnost. Lepení má strukturu, která je mechanicky stejná nebo i silnější než běžné spojování materiálů a má nižší hmotnost, a to za nižší náklady [14].

1.2.1 Vhodná lepidla ke spojování kovů

Při výběru lepidla pro lepení kovů musíme brát v úvahu to, že jde o materiály zcela nepropustné. Z tohoto důvodu lze použít jen taková lepidla a metody lepení, které zaručují, že se v průběhu lepení neuvolní těkavé látky, které by snížily kohezi a adhezi filmu lepidla. Výjimkou jsou kontaktní lepidla na bázi chloroprenového a polyuretanového kaučuku [12]. Tato lepidla se nanášou na obě lepené plochy a až jsou na první dotek téměř nelepivá, přitlačí se k sobě mírným tlakem. Pro lepení kovů se používají také lepidla reaktivní.

V této době se používají hlavně epoxidová reaktivní lepidla, která se velmi dobře hodí jak pro opravy a renovační technologie, tak i pro konstruování. Epoxidová lepidla jsou jako jednosložková, dvousložková a vícesložková. V běžné praxi se používají především epoxidová lepidla dvousložková, vhodná pro konstrukční spoje a epoxidová lepidla plněná práškovými plnivými, vhodná především pro opravy a renovační technologie. Při lepení a opravách malých ploch se používají epoxidová lepidla, která dosahují manipulační pevnosti po 2 až 10 min., pro konstrukční spoje a renovace se používají epoxidová lepidla s dobou zpracovatelnosti 30 minut až 3 hodiny a manipulační pevnosti je dosaženo po 5 až 6 hodinách, funkční pevnosti je většinou dosaženo po 24 hodinách.

Teplotní odolnost epoxidových lepidel neplněných je od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, plněných od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12]. Při výběru epoxidového lepidla k lepení kovů je důležitý údaj o pevnosti (smyková pevnost v tahu). Pevnost lepidel pro domácí použití bývá kolem 13–15 MPa [12]. Lepidla o pevnosti více jak 20 MPa jsou označována jako vysokopevnostní. S těmito hodnotami se počítá u oceli a chemicky upravených hliníkových slitin.

U barevných kovů a jejich slitin jsou pevnosti poněkud nižší. Další lepidla pro lepení kovů jsou dvousložková reaktivní polyuretanová lepidla. Jsou zpracovatelná i při nižších teplotách, lepené spoje jsou pevné a odolné dynamickému namáhání. Jsou odolné proti povětrnostním vlivům, vodě. Smyková pevnost v tahu je cca 16 MPa a teplotní odolnost do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [12]. Velmi moderní pro konstrukční lepení kovů jsou dvousložková lepidla na bázi methakrylátových esterů, která vykazují vysokou smykovou pevnost v tahu až 24 MPa, vysokou rázovou pevnost, tepelnou (od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$) a chemickou odolnost [12]. Tato lepidla vykazují velké pevnosti při lepení oceli a hliníku a také jsou výborná pro kombinační lepení zejména s plasty.

Pro lepení malých povrchů kovů se používají jednosložková reaktivní kyanoakrylátová (vteřinová) lepidla. K těsnění a stabilizaci polohy rozebíratelných dílců jsou akrylátová lepidla. Slouží pouze k lepení kovů. Vytvrzují po zamezení přístupu vzduchu do spoje. Hlavní oblast použití akrylových lepidel je zajišťování šroubových spojů proti vibracím a korozi, těsnění závitových spojů, upevňování ložisek na hřídele a do otvorů. Akrylátová lepidla se dodávají v několika pevnostních kategoriích od 5 do 40 MPa a v několika viskózních třídách, od kapilárních typů s maximální šířkou spáry 0,08 mm [12].

Pro plošné a elastické lepení kovů se v současné době používají lepidla na bázi MS polymerů, která patří mezi ty nejmodernější a mají velké uplatnění zejména v automobilovém, leteckém, lodním průmyslu a strojírenství. Jsou vhodná i pro kombinační lepení zejména s plasty, pěnovým polystyrenem, sklem, zrcadly, keramikou apod. MS polymery vykazují vysokou pevnost a elasticitu, nepotřebují podkladový nátěr, mají výbornou tepelnou a chemickou odolnost [12].

1.2.2 Úpravy lepidel před procesem lepení

Ve všech případech je důležité dodržet předpis výrobce lepidla. Jednosložková lepidla zpravidla není třeba před samotným lepením upravovat. U dvousložkového lepidla je nutné obě složky dobře promíchat. V současné době již existují systémy pro přesné a automatické mísení dvousložkových epoxidů (automatický mísicí systémem pro epoxidová lepidla), které je výhodné používat při konstrukčních aplikacích především v průmyslu a řemeslné výrobě. U epoxidových lepidel je závislý druh použitého tvrdidla na teplotě vytvrzení.

1.2.3 Postup lepení kovových materiálů

Podle teorie lepení můžeme stanovit tyto základní podmínky pro tvorbu požadovaného lepeného spoje:

- správná volba lepidla a lepeného materiálu.
- vhodný návrh konstrukce spoje.
- vhodná úprava povrchu materiálu.
- dodržení předepsaného pracovního postupu při lepení.
- vytvoření fyzikálně-chemických podmínek vzniku pevných vazeb.

Pokud volíme materiál na lepení, pak se hledí na jejich chemickou povahu (chemické složení), polaritu, mechanické, povrchové, fyzikální a chemicko-fyzikální vlastnosti. V případě lepidel to je chemická povaha, viskozita lepidla, povrchové napětí, způsob vytvrzování, tepelná roztažnost a mechanické vlastnosti. Princip lepení a jeho pracovní postup je všeobecně složen z přípravy povrchu lepených materiálů, přípravy lepidla, nanášení lepidla, montáže spoje o vytvoření pevného spoje (např. vytvrzování).

Jakost lepeného spoje lze ovlivnit způsobem nanášení lepidla, tloušťkou nanesené vrstvy, podmínkami při vytvrzování (teplota, tlak, čas), použitím ultrazvuku, tepelného ovlivnění lepidla různými zdroji ohřevu (např. laserový paprsek), přípravou povrchu materiálu a úpravou lepidla na dané použití.

1.3 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice jsou sloučeniny, které obsahují v molekule více než jednu epoxidovou skupinu. Tato skupina je reaktivní a na její reaktivitě s velkým počtem látek, mířící k makromolekulárním produktům, spočívají aplikace těchto pryskyřic jako lepidel. Při vytvrzování se neodštěpují vedlejší produkty a dochází pouze k menšímu smrštění. Vytvrzené produkty mají velmi dobrou přilnavost na kovy, sklo aj. mají výborné chemické a elektroizolační vlastnosti v široké oblasti teplot, dobrá je i jejich odolnost vůči vodě.

Epoxidové pryskyřice lze rozdělit na dvě skupiny:

- typy, které obsahují glycidylové skupiny.
- typy, které obsahují epoxidové skupiny.

1.3.1 Použití epoxidových pryskyřic jako lepidel

Použití epoxidových pryskyřic je zaměřeno především na ty obory, kde vlastnosti levnějších pryskyřic nejsou dostačující. Velmi výhodné je použití epoxidových pryskyřic jako lepidel k nejrůznějším materiálům, jako jsou kovy, keramika, sklo a plasty. Velmi dobrá adheze ke kovům spolu s dobrými mechanickými, tepelnými a elektroizolačními vlastnostmi způsobila, že epoxidy mají důležité postavení mezi elektroizolačními materiály.

Pro většinu aplikací je významná lepidlost makromolekulárních látek, tzn. schopnost spojovat různá tělesa na stykových plochách. Při již zmíněném spojování materiálů lepidly jsou důležité pojmy adheze a koheze. Jedna z možných adhezí je mechanická (vyvolaná zateklým lepidlem v pórech lepeného materiálu).

O pevnosti spoje způsobenou vrstvou lepidla rozhoduje jak adheze (přilnavost lepidla k materiálu), tak i koheze (soudržnost mezi částicemi lepidla). Základem pro lepení je vždy smočení spojovaných ploch lepidlem. Důležitým aspektem je adheze v místě lepených ploch a velikost, v jakém jí lepidlo a adherend ovlivňují [14].

Dle způsobu tuhnutí lepidla ve spoji a podle vlastností vzniklého spoje možno lepidla rozdělit na více druhů, lepidla tuhnoucí vlivem vsáknutí a vypaření rozpouštědla. Dále lepidla tuhnoucí následkem chemické reakce (jednosložková vytvrzující většinou při teplotě 100 až 160 °C a vícesložková, kde se jednotlivé složky mísí krátce před použitím

a vytvrzení probíhá za normální teploty). Mimo fyzikálně tuhoucích lepidel, která obsahují rozpouštědla nebo vodu, existují také tavná lepidla, která musí být před nanesením na lepený povrch roztavena.

Lepidla termoplastická se využívají ve formě roztoků nebo tavenin. U lepidel reaktivních je vznik lepeného spoje doprovázen chemickou reakcí. U každého lepidla, používaného v rozpuštěné formě, se musí po vzniku lepeného spoje odstranit použité rozpouštědlo (např. voda). Epoxidová lepidla s výbornou adhezí k různým materiálům se využívají jako systémy vytvrzující za tepla nebo chladu. Stále častěji se používají i lepidla polyuretanová, která umožňují spojování i při teplotě pod 0 °C.

1.3.2 Lepidlo Epoxy 1200

Je dvousložkové epoxidové lepidlo s tvrdidlem P11. Povrch by měl být před nanášením suchý, odmaštěný a zbavený mechanických nečistot (prach po broušení), případně zdrsňený.

Slouží k přípravě lepicích kompozic, stěrkových hmot a tmelů. K lepení kovů, skla, keramiky, dřeva, apod. Před aplikací nesmí být kompozice zředována přídavkem jakéhokoliv ředidla nebo rozpouštědla. Obsahuje epoxidovou pryskyřici. [10]

Příprava samotného lepidla je taková, že pryskyřice se smísí s Tvrdidlem P11 v hmotnostním poměru: 100 hm. dílů pryskyřice 1200 : 7 hm. dílů tvrdidla P11. Směs se nanáší na suchý, odmaštěný a případně obroušený povrch. Je třeba dodržet mísící poměr a nepřipravovat větší množství směsi, než které se stačí zpracovat do 30 min. při teplotě 15-20°C. Připravená pryskyřice se nanese na lepené plochy a následně přitiskne k sobě tak, aby po celé délce dobře přilehly lepené spoje, které se zafixují (tlakem asi 0,02 MPa). Optimální tloušťka nánosu lepidla je přibližně 0,1 mm. Vytvrzuje se při normální či zvýšené teplotě do 60°C. Vytvrzení pryskyřice proběhne přibližně do 48 hod.

1.3.3 Vlastnosti vytvrzené pryskyřice

Vytvrzený spoj dobře odolává 30% kyselině sírové a chlorovodíkové, 5–10% hydroxidu sodnému, 30% hydroxidu amonnému (čpavku), benzínu, oleji. Vytvrzený spoj částečně poškozují voda, alkoholy, aromatické uhlovodíky. Vytvrzený spoj narušují aceton, chlorové uhlovodíky [11].

1.4 Správné zásady postupu volby lepidla

Před navrhováním lepených spojů je třeba vzít v úvahu některé zásady:

- 1) Jaké pevnosti lepených spojů jsou nejdůležitější při výběru lepidla z hlediska pevnosti.
- 2) Které technologické vlastnosti jsou rozhodující z hlediska použití lepidla.
- 3) Shrnout charakteristické vlastnosti lepidel.

1.4.1 Význam pevnosti lepených spojů při výběru lepidla

1) Pevnost v odlupování

Význam této zkoušky je dvojitý. Jednak jako zkoušky pro zjištění dodržení správné technologie lepení a jednak pro výběr lepidla na danou aplikaci.

2) Pevnost ve smyku a pevnost při dlouhodobém zatížení za zvýšené teploty

Druhou důležitou vlastností lepených spojů, která rozhoduje o vhodné použitelnosti lepidla v dané konstrukci, je jejich tepelná odolnost při zatížení, charakterizovaná pevností ve smyku při požadované teplotě [1].

3) Vliv okolí na pevnost lepených spojů

Rozhodující jsou hodnoty získané přímým vystavením vzorků vlivu okolí. Pokud nejsou k dispozici, lze hodnotit lepidla podle zkoušek urychleného stárnutí, nebo dle zkoušek vystavení vlivu destilované vody [1].

2 Základní typy lepených spojů

2.1 Hlavní zásady navrhování lepených spojů

Lepenou konstrukci je třeba rozdělit na části co nejméně složité a k lepení vhodné. Lepení se nehodí pro díly, které jsou při montáži vystaveny odlupujícím silám. Nevhodné jsou spoje s malým přeplátováním, umístěné mezi těžkými díly. K lepení se nehodí díly s velkým a složitým zakřivením [2]. Spoje a výztuhy musí být uspořádány tak, aby se dal vyvodit tlak při vytvrzování a zajistilo se přiblížení lepených ploch na vzdálenost maximálně 0,4 mm. Lepení dílů se složitým zakřivením se dá zajistit, ale přípravy jsou v tomto případě složitější a většinou se prodlužuje výrobní čas lepení [2].

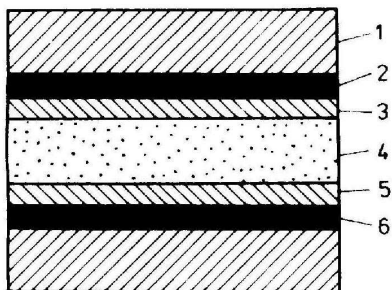
Mělo by se volit takové lepidlo, jehož tuhost je menší než tuhost lepených dílů. Lepené spoje je potřeba namáhat ve směru jejich největší pevnosti. Nejběžnější jsou jednoduše přeplátované spoje, tento spoj je neúčinnější, budou-li mít adherendy vyšší modul pružnosti než lepidlo a budou-li tak silné, aby odolávaly ohybu.

Většinou není těžké dosáhnout vysoké bezpečnosti spojů u dílů z tenkých plechů, určených pro běžné teploty. Obtížnější je dosáhnout bezpečnosti u dílů lepených ze silného plechu, zvláště jsou-li vystaveny vyšším teplotám nad 60°C [2]. Zásadně je třeba se snažit převést namáhání lepených spojů na namáhání ve smyku a vyhnout se většímu odlupujícímu zatížení [2].

Při lepení je třeba dodržet technologický předpis a vyhnout se dvojitému lepení. Lepší hodnoty z hlediska pevnosti se dosahují u tenkých plechů. Lepidlo si konstruktér volí dle požadavků na pevnost spoje, podle technologie zpracování a také podle ceny.

2.2 Struktura lepeného spoje

Podle vnitřní struktury lze každý konstrukčně pevný a dostatečně odolný lepený spoj dvou základních materiálů považovat za skupinu tří hlavních vrstev a dvou mikrovrstev, viz. obr. 1.



Obr. 1 Znárodnění struktury lepeného spoje [13]

Popis obrázku 1:

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

2.3 Typy konstrukčních spojů

Při návrhu lepeného spoje je důležité rozlišovat dva hlavní aspekty:

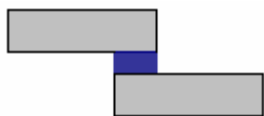
1. Typ spoje
2. Způsob zatěžování spoje

Jak už bylo zmíněno výše, pro strojírenský průmysl se nejčastěji používá jednoduchý přeplátovaný spoj. Pro přesnější slícování jednotlivých dílů se používá drážkový spoj, který usnadní spojení dvou dílů. Dvojitý přeplátovaný spoj je vylepšením jednoduchého přeplátovaného spoje. Přeplátovaný spoj se zářezem a spoj symetrický je určen k návaznosti lepených dílů tak, aby mezi nimi nevzniklo převýšení.

2.3.1 Rozdělení dle typu spoje

Typ spoje má vliv na mechanické vlastnosti lepeného spoje, a proto ovlivňuje jeho kvalitu.

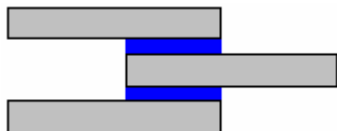
Podle typu spoje lze charakterizovat následující spoje:



Obr. 2 Obyčejný přelátovaný spoj [1]



Obr. 3 Přelátovaný spoj se zářezem [1]



Obr. 4 Dvojitý přelátovaný spoj [1]



Obr. 5 Drážkový spoj [1]



Obr. 6 Přelátovaný spoj symetrický [1]

2.3.2 Rozdělení dle způsobu zatěžování

Způsob zatěžování je druhý hlavní aspekt, který ovlivňuje pevnost lepeného spoje.

Podle způsobu zatěžování lze charakterizovat následující typy:



Obr. 7 Tahové zatěžování [1]



Obr. 8 Tlakové zatěžování [1]



Obr. 9 Stříhové zatěžování [1]



Obr. 10 Namáhání štěpením [1]



Obr. 11 Odlupovací namáhání [1]

Namáhání na obr.11 je podobné případu na obr.10 (tuhé substráty), při použití poddajných substrátů. Případ na obr.11 a na obr.10 je kombinací základních typů namáhání na obr.7 a obr.9.

2.4 Význam pevnosti u lepených spojů

Nosnost a v některých případech i deformace lepených spojů závisí na mechanických vlastnostech slepu a napěťovo-deformačních stavů lepeného spoje. Tento napěťovo-deformační stav lepených spojů je neobvykle nerovnoměrný a lom spoje má začátek v zóně, ve které napětí dosahuje pro daný spoj kritické hodnoty. Z tohoto důvodu experimentální hodnocení pevnosti slepu ve většině případů vede k určení lomového namáhání lepeného spoje a nebo určení střední pevnosti tím, že se lomové namáhání dělí lepenou plochou [13].

2.4.1 Vlivy působící na pevnost lepeného spoje

Pevnost spoje je charakterizována v podstatě jako soubor pevností nebo složek pevnosti, jako jsou pevnosti stanovené krátkodobými zkouškami, dále pevnosti spoje při dlouhodobém statickém či dynamickém zatěžování a pevnosti při zvýšených či snížených teplotách.

U většiny konstrukčních spojů je nejznámější charakteristikou mez pevnosti v tahu. Pevnost lepidla je ve srovnání s pevností kovů podstatně menší. Aby mohlo být využito pevnosti kovového adherendu, musí být lepená plocha velká a převážná část zatížení musí působit v rovině lepené plochy tak, aby byl spoj namáhán nejvíce smykovým napětím.

Rozdělení napětí v lepeném spoji je značně ovlivněno geometrií daného spoje, vlastnostmi a zejména pak deformačními vlastnostmi adherendu a lepidla. Respektování vlivu těchto faktorů na pevnost je zároveň hlavním předpokladem správného návrhu lepeného spoje.

2.4.2 Rozložení napětí ve spojích

Příčiny nerovnoměrného rozdělení jsou dvojí:

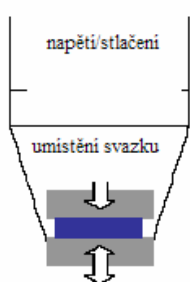
První příčina má původ ve vytvrzování lepidla. Rovnoměrné roztahování či smršťování dokonale homogenního tělesa, např. změnou teploty, nemůže způsobit vnitřní pnutí. Jestliže dilatují dvě tělesa navzájem více či méně pevnostně spojená, vzniknou zbytková napětí. Při procesu vytvrzování se použité lepidlo smršťuje. Určitá část smrštění vznikne ještě před ztuhnutím lepidla a tím neovlivní nepříznivě rozložení napětí ve spoji.

Podstatná část smrštění nastane až po ztuhnutí lepidla a je hlavní příčinou zbytkových napětí v nezatíženém lepeném spoji.

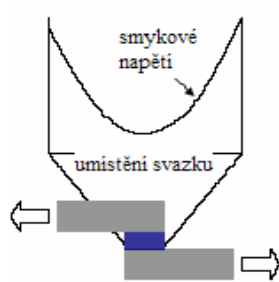
Druhá příčina vzniku nehomogenity napětí spočívá v zatížení spoje. V důsledku nerovnoměrné deformace neideálně tuhého kovu dochází k rozdílné deformaci lepidla, která je nejvyšší na koncích překlátování.

Vlivem nesymetricky působících sil je lepený spoj ještě namáhán ohybovými silami, které vyvolávají na koncích překlátování ve vrstvě lepidla napětí, které výslednou pevnost snižují a způsobují u delších překlátování ohýbání konců plechů. Napětí v materiálu je definováno převážně jako vnitřní napětí, nebo jako intenzita napětí v materiálu. Znalost těchto napětí je důležitá pro správné provedení lepeného spoje [14].

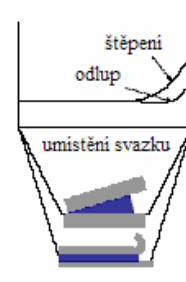
Při zatěžování tahem nebo tlakem je rozložení napětí u tuhých adherendů rovnoměrné (obr. 12). Při zatěžování smykem je rozložení napětí nerovnoměrné, okraje jsou zatěžovány výrazněji než střed (obr. 13). Při zatěžování odlupem nebo štěpením je extrémně zatěžován jen okraj spoje, zbytek bývá nevyužit (obr. 14) [16].



Obr. 12 Tah –tlak [1]



Obr. 13 Střih [1]



Obr. 14 Střih [1]

2.5 Doporučení pro návrh lepených spojů

Při navrhování spojů je důležité porozumět principu rozložení napětí ve spoji při jeho provozním zatížení. Následující body uvádějí základní doporučení pro konstrukční návrh lepených spojů:

1) Maximalizovat stříh / minimalizovat odlup, štěpení

Odlup a štěpení vykazují výrazně větší napěťové špičky a větší nerovnoměrnost rozložení napětí ve spoji než při smykovém zatěžování [16].

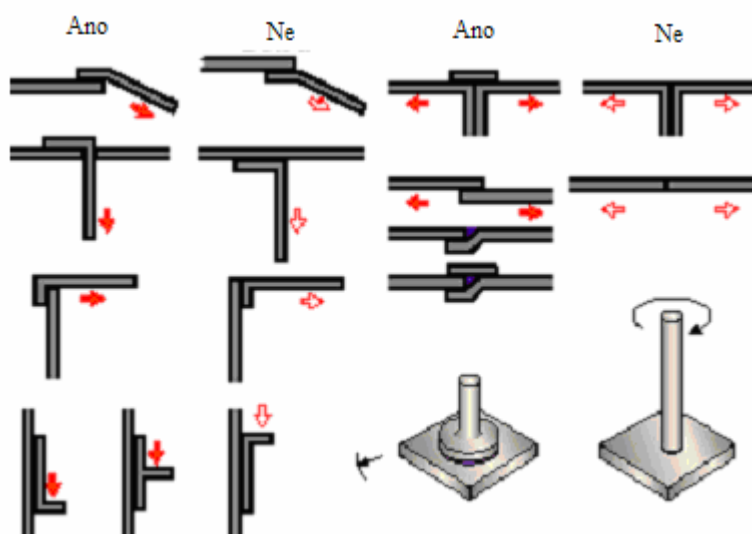
2) Maximalizovat tlak / minimalizovat tah

U většiny lepidel je tlaková pevnost vyšší než pevnost tahová.

3) Pro zvýšení pevnosti spoji zvětšovat raději šířku spoje než délku

Pokud zvětšujeme délku přeplátování, dochází k větší nerovnoměrnosti v rozložení napětí ve spoji. Změna pevnosti je lineárně závislá na změně šířky přeplátování nikoliv však na délce přeplátování [16].

Na obr.15 jsou znázorněny konstrukční lepené spoje, které se doporučují k použití ve strojírenském průmyslu. Při spojování se doporučené spoje zásadně dodržují.



Obr. 15 Doporučení pro konstrukční použití lepených spojů [1]

2.6 Přednosti a nedostatky lepených spojů z hlediska pevnosti a technologie

Jako všechny technologie spojování má i lepení své přednosti a nedostatky.

Přednosti lepení:

1. Zvýšení bezpečnosti při poruše.
2. Snížení výrobních nákladů.
3. Těsnost spoje, zvýšená odolnost proti korozi.
4. Možnost spojovat různé materiály.
5. Hladké vnější povrchy.
6. Možnost spojovat tenké materiály.

7. Možnost spojení velkých ploch.
8. Útlum vibrací.
9. Zmenšení hmotnosti.

Nedostatky lepení:

1. Malá odolnost proti zvýšené teplotě a odlupování.
2. Potřeba úpravy ploch před lepením.
3. Dlouhé vytvrzovací doby.

Tyto přednosti a nedostatky udávají konstrukci vhodnou pro lepení a často omezují použití lepidel jen pro určité případy.

Nejdůležitější výhodou lepených spojů je ve srovnání se spoji jinými zvýšení celkové pevnosti vhodně konstruovaného spoje. Pevnostní výhody lepených spojů oproti svařování nejsou vždy úplně jednoznačné. Kromě konstrukčního uspořádání a druhu zatížení má velký význam použitý spojovaný materiál. Často se lepené spoje uplatní lépe u lehkých slitin a u neželezných kovů než u oceli.

K samotnému zlepšení pevnosti lepených spojů ještě přispívá vysoká bezpečnost lepené konstrukce při poruše. Zvýšení bezpečnosti při poruše spočívá v tom, že vrstva lepidla odděluje a zmenšuje účinek vrubu. Příznivou vlastností lepených spojů je také to, že se trhlina u většiny konstrukčních lepidel ze začátku šíří velmi pomalu a zpravidla ji lze zjistit včas, než se trhlina stane nebezpečnou [1].

Lepení lze spojovat téměř všechny druhy materiálů. To platí hlavně pro materiály, které se spolu nedají svařit, nebo které po svaření mají nevyhovující pevnost. Na konec to platí pro materiály, které se nedají vůbec, nebo jen těžko, mechanicky obrobít [1].

Pouze lepení má schopnost zajistit rovnoměrné rozdělení síly po celé ploše spoje a umožnit použití materiálů, které by se při jiném způsobu spojování vůbec nedaly použít.

Na životnost spoje má velký vliv použití různých druhů spojovacích lepidel. Jsou lepidla, která mají pastovitou konzistenci, dovolující vzájemný styk lepených ploch prakticky bez použití vytvrzovacích přípravků. Tato lepidla zajišťují velmi dobré pevnosti spojů i pro tloušťky vrstvy lepidla 3 mm a více. To znamená, že lepené díly nemusí být přesně slícovány.

Lepený spoj zvyšuje vzhledem ke svému plošnému charakteru tuhost konstrukce a značně omezuje vibrace. Tlumení vibrací je dáno druhem použitého lepidla. Rovnoměrnost rozdělení napětí dovoluje použít u lepené konstrukce tenčích materiálů, což přináší úspory na hmotnosti výrobku. Lepení umožňuje zmenšení počtu a zjednodušení dílčích montážních celků a umožňuje spojovat kovy s nekovy.

Kromě výhod má lepení i své nevýhody. Při konstrukci je potřeba zajistit takové podmínky, aby nevýhody lepení měly podřadný význam. Není-li to možné, je lepší použít některou tradiční metodu spojování.

Další z nevýhod je nutnost úpravy ploch před lepením, která je většinou nutná a pro pevnost spoje rozhodující. Její složitost je závislá na druhu adherendu a na požadované pevnosti. Délka vytvrzovací doby většinou vzrůstá s nároky na pevnost, které se na spoj kladou. Ve většině případů je vytvrzovací doba dána teplotou, na kterou můžeme díl zahřát. Obecně lze říci, že čím vyšší je vytvrzovací teplota, tím kratší je doba potřebná pro vytvrzení [1].

Přechod na lepené spoje většinou vyžaduje použití jiné konstrukce, protože lepidlo se samo o sobě nevyrovná pevnosti adherendu a navíc je potřeba vyloučit odlupující síly. Konstrukční uspořádání lepených spojů vyžaduje hlubší znalost vlastností lepidla a způsobu spojování.

Lepení vyžaduje přísné dodržování výrobní technologie, jako je směšovací poměr, tlak, teplota a doba vytvrzení. Není-li technologický postup dodržen, může mít odchylka mnohem závažnější následky než u jiných metod spojování. U každého konstrukčního lepidla je třeba zjistit jeho náchylnost ke stárnutí vlivem působení okolí, vody a různých kapalin [1].

3 Základní charakteristiky povrchu

3.1 Charakteristika drsnosti povrchu

Jsou to nejmenší nerovnosti vznikající v procesu výroby, např. působením řezného nástroje nebo brousícího zrna. Drsnost znázorňuje kvantitativní měřítko stop výrobního procesu nového povrchu a dalších složek, které tvoří texturu povrchu, např. struktura materiálu. Řezný nástroj zanechává na povrchu stopy [9]. Uspořádání stop má periodický nebo náhodný charakter. Působením odtrhávání mikročástic materiálu při obrábění, zbytků nárůstků na břitu a malých vad na špičce nástroje vznikají i jemnější složky struktury povrchu [9]. V žádném případě nesmí být drsnost zaměňována s nerovnostmi o větších vlnových délkách [9].

Pro přesné stanovení drsnosti existuje definice parametrů drsnosti povrchu, která je dána v mezinárodních standardech.

3.1.1 Význam drsnosti povrchu pro pevnost lepeného spoje

Úprava povrchu před lepením úzce souvisí s drsností povrchu. Důvodem, proč by měla být při spojování technických materiálů používána lepidla, je skutečnost, že plochy určené k lepení nikdy nedosahují dokonalé hladkosti. Lepidlo má za úkol nerovnosti vyplnit a přiblížit se na molekulární vzdálenost k povrchu adherendu.

Výhoda povrchové rovnosti oproti zdrsnění se může projevit jen tehdy, dojde-li k přiblížení lepených povrchů na takovou vzdálenost, která odpovídá rozměrům molekul nebo v takovém případě, že povrch o menší drsnosti je z hlediska lepení tvarově vhodnější.

3.2 Charakteristika vlnitosti povrchu

Většinou je způsobována kmitáním nebo deformací obrobku, příp. vnitřním pnutím v materiálu součásti. Vlnitost je přisuzována především vlastnostem obráběcího stroje, (např. nevyvážeností brousícího kotouče, nepřesností vodících šroubů, nedostatečné tuhosti, apod.) nebo s tvarem (úchytky tvaru vznikají bez ohledu na drsnost a vlnitost; nejčastěji jsou způsobeny nedostatečně tuhým upnutím obráběné součásti nebo

úchylkami přímosti vodících ploch strojů, příp. deformacemi součásti při vyšších teplotách řezání) [9].

3.3 Příprava povrchu materiálu před lepením

Příprava povrchu na lepení se skládá z dělení, obrábění, čištění, odmašťování a slícování lepených dílců. Cílem přípravy povrchu je dosáhnout maximální adheze a zabránit zoxidování lepidla. Povrchová úprava adherendu je jednou z nejdůležitějších činností při lepení. Navrhuje se podle druhu a stavu lepeného materiálu, druhu použitého lepidla, provozních požadavků a životnosti spoje a únosnosti výrobních nákladů.

Odstranění všech stop znečištění, jako je např. olej z lepeného podkladu či jiná znečištění, má zásadní význam pro vytvoření pevného spoje. Je-li povrch adherendu znečištěn, nebo je-li na povrchu vrstva, která není pevně spojena s jádrem adherendu, musí se povrch obrousit nebo metodou tryskání zdrsnit. Jinak není možné dosáhnout požadované pevnosti spoje ani nejlepšími lepidly.

Povrchová úprava před lepením by měla umožnit využití všech předností lepidel. Cílem úpravy povrchu je, aby adhezní pevnost byla vyšší než pevnost kohezní. Jedním z úkolů povrchové úpravy před lepením je odstranit absorbovaný film a nahradit ho povrchovou vrstvou, která je pro lepení vhodná a která není rychle znečišťována atmosférou [12].

Úprava povrchu adherendu před lepením se většinou skládá z předběžného čištění a odmašťování a z vlastní úpravy povrchu adherendu. Stav povrchu adherendu určeného k lepení kovů může být odlišný. V případě vhodného obrobení povrchu kovu jsou lepené plochy bez potřeby jakékoliv úpravy, v jiných případech často postačí jednoduché odmaštění a v nejčastějších případech se plochy musí upravit vhodnými metodami broušení.

Pro úpravu dílů k lepení je ovšem lepší klasické čištění a odmašťování. Samozřejmě, že při odmašťování nejde jen o odmaštění lepených ploch, ale o odmaštění celého lepeného dílu. Během dalších operací, především při vytvrzování za zvýšené teploty, by se mohla mastnota dostat do lepeného spoje a snížit jeho pevnost.

Na čištění a odmašťování se používají alkalická odmašťovadla a odmašťování v párách rozpouštědla. Vhodná odmašťovadla jsou např. IPA (isopropylalkohol) a technický aceton. Nevhodná jsou laková rozpouštědla a benzin [11]. Dost často se používá moření materiálů v různých kyselinách (hliník a jeho slitiny). V domácích podmínkách stačí moření ve 20% roztoku louhu sodného (NaOH). V případě moření se obvykle dosahuje vyšší pevnosti spojů než při mechanické úpravě povrchu [12].

Z hlediska kvality lepených spojů je důležitá již zmíněná drsnost povrchu lepených ploch. V běžných podmínkách si vystačíme s ocelovým kartáčem a smirkovým plátnem se zrnitostí 100 až 120, v průmyslové výrobě viz. Tab. 1.

Tab. 1 Příklady použití povrchové úpravy kovových materiálů před lepením [12]

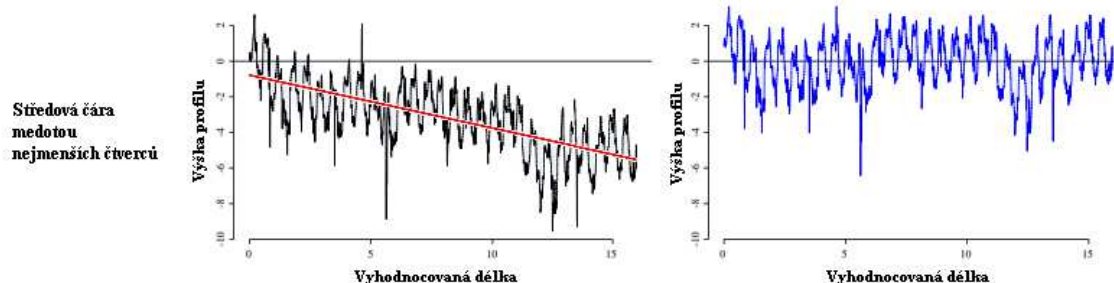
Materiál	Odmašťovadlo	Povrchová úprava materiálu před lepením	Vlastní lepení po povrchové úpravě materiálu do oxidace materiálu
Hliník a jeho slitiny	MEK, aceton, IPA	Broušení smirkem zrnitosti 320–400 anebo pískování oxidem hlinitým anebo chemické moření (vysoká pevnost).	do 1 hod.
Litina	MEK, aceton,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

3.4 Posuzování drsnosti povrchu materiálu

V dřívějších dobách se drsnost materiálu posuzovala většinou pohmatem. Později, když byly k dispozici mechanické profiloměry se hodnoty vynášely do grafů a zkušený technik rozhodl, jaká data ignorovat a kudy vést středovou čáru vynesným profilem [6].

V současné době se profilová data zpracovávají a vyhodnocují statistickými a topografickými metodami na počítačích. Prvním krokem po digitalizaci profilových dat je filtrace šumu. Odstraňují se velmi vysoké frekvence (krátké vlnové délky), které jsou obvykle do měření zavlečeny různými artefakty používané techniky [6]. U mikroskopických snímků to jsou velmi ostré hrany na povrchovém reliéfu, které je potřeba odstranit vhodným filtrem. Tak dostaneme upravená vstupní data a ty se dále zpracovávají.

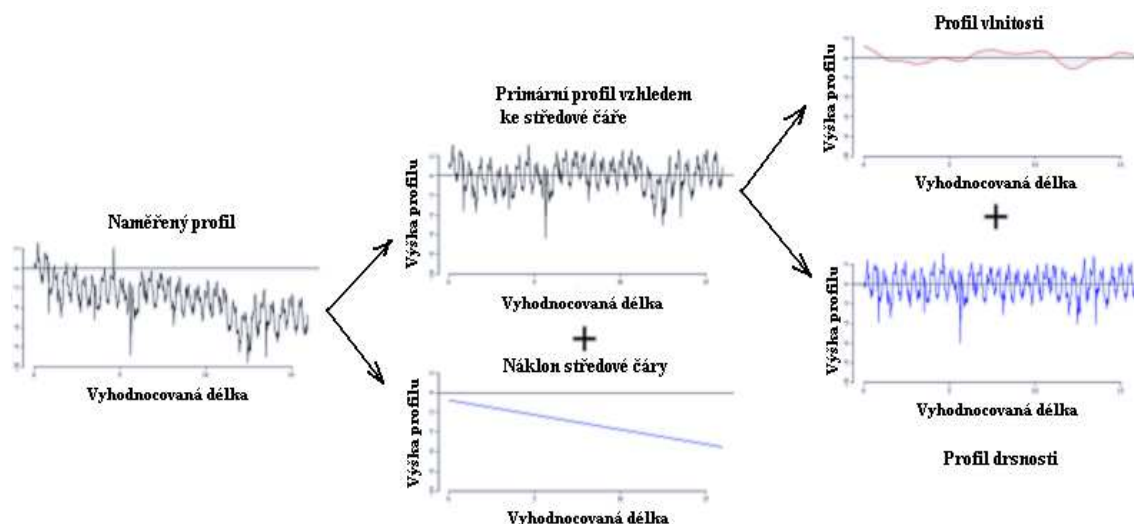
Dalším krokem je vytvoření primárního profilu, který se vytvoří jako sekvence odchylek od středové čáry profilu. Osazení středové čáry se získá lineárním proložením dat pomocí metody nejmenších čtverců viz. obr.16. Odchytky od středové čáry vytvářejí primární profil, ze kterého se získávají profilové parametry P [6].



Obr. 16 Osazení středové čáry profilu [6]

Pokud je stanoven primární profil, mohou se z něj získávat filtrační profily drsnosti a vlnitosti. Profil drsnosti se získá použitím filtru, který odstraňuje z primárního profilu dlouhovlnnou složku a zanechává krátkovlnnou (vyšší frekvence) viz. obr.17. Z profilu drsnosti se získávají parametry R [6]. Profil vlnitosti se obdrží z primárního profilu filtrací krátkovlnné složky, přičemž zůstává dlouhovlnná složka (nízké frekvence) viz. obr.17. Z profilu vlnitosti se získají parametry W [6]. Hraniční hodnota mezi krátkovlnnou a dlouhovlnnou složkou primárního profilu, tj. hranice mezi oblastí drsnosti a vlnitosti, se značí λ_c .

Kromě parametrů profilu drsnosti a vlnitosti (P , R , W), které se vztahují ke křivkám, existují také parametry, které se vztahují k plošné drsnosti, tj. přímo k povrchovému reliéfu, který představuje plochu ve trojrozměrném prostoru, tj. funkci. Tyto parametry se označují S [6].



Obr. 17 Filtrování primárního profilu - vznik profilů drsnosti a vlnitosti [6]

Pokud jde o praktické použití hodnot křivkových parametrů P , R a W , lze říci, že každý z nich byl zaveden z určité potřeby praxe, zejména strojírenské, a to k posuzování vhodnosti či nevhodnosti povrchů obroběných materiálů ke konkrétním účelům – např. tření v ložiscích, rovinatost čelistí mechanických měřidel, obrobky pro přesné formy [6]. Topografická analýza povrchů je důležitá zejména ve strojním průmyslu.


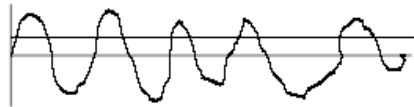
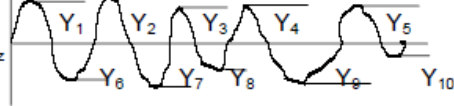
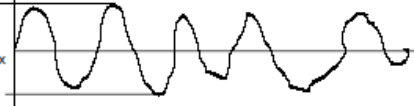
Uveďme tento příklad:

Povrchy s velkými hodnotami parametru R_a nebo s kladnou hodnotou R_{sk} se vyznačují velkými třecími silami a rychle se opotřebovávají. Má-li profil drsnosti hlubší prolákliny, pak je vhodný pro udržení maziva na třecích plochách [6].

3.4.1 Definice veličin pro posuzování drsnosti povrchu

Pro posuzování drsnosti povrchu je potřeba znát následující definice veličin uvedené v Tab.2.

Tab. 2 Základní definice veličin R_y , R_a , R_z , R_{max} [5]

Aritmetický průměr R_y	plocha nad aritmetickým průměrem sa rovná ploše pod čarou aritmetického průměru	
Aritmetická odchylka od profilu R_a	Aritmetický průměr absolutních hodnot skutečného profilu	
R_z $R_z=(4-6)R_a$	Průměrná hodnota z absolutních hodnot 5 maxim a 5 minim profilu křivky $R_z=(Y_1+Y_2+.....Y_9+Y_{10})/5$	
Maximální výška profilu R_{max}	rozdíl mezi maximem a minimem profilu drsnosti	

3.4.2 Příklad měření drsnosti povrchu pomocí filtru profilu

Základní prvek procesu měření parametrů struktury povrchu je filtr profilu, který ovlivňuje hodnoty výsledků měření. Filtr dělí profily na krátkovlnné a dlouhovlnné složky a zajišťuje vyloučení vlnových délek, které jsou pod nebo nad konkrétní frekvencí. V přístrojích pro měření drsnosti povrchu, vlnitosti a základního profilu jsou používány tři filtry, definované v ČSN EN ISO 11562, které rozčlení strukturu povrchu na složky podle rozteče nerovnosti [9].

Dle normy uvedené výše filtry profilu udávají rozhraní takto:

Filtr λ_s - rozhraní mezi drsností a kratšími složkami vln na povrchu [9].

Filtr λ_c - rozhraní mezi drsností a vlnitostí [9].

Filtr λ_f - rozhraní mezi vlnitostí a delšími složkami vln na povrchu [9].

Správná volba filtrů je základem pro objektivní měření. Vlastní měřicí systém vytváří a zobrazuje mechanický filtr profilu a software zajišťuje matematickou filtraci profilu.

3.4.3 Volba filtru

Obecně je doporučováno použít Gaussův filtr, jako fázově vhodného a dostatečně rychlého. Jejich význam je hlavně v zajištění kompatibility s výsledky měření na starších přístrojích. Způsob filtrace úzce souvisí s rozsahem zpracovávaných dat profilu povrchu.

Podstatou procesu filtrace je zkreslení jednoho nebo obou konců záznamu dat profilu. Toto zkreslení je třeba odstranit, aby bylo zajištěno, že do analýzy budou zařazena jen data skutečného profilu [9]. Jelikož se u Gaussova filtru projevuje efekt zkreslení jsou z analýzy vynechána data jen z poloviny základní délky na všech koncích filtrovaných dat.

Mechanický měřicí systém přístroje působí rovněž jako filtr, který ovlivní výsledky měření. Z tohoto důvodu je třeba při výběru měřicí techniky brát v úvahu i její schopnost zajistit vhodnou míru přesnosti reprodukce skutečného profilu povrchu [9].

4 Optická mikroskopie

Vědecká disciplína, která se zabývá pozorováním a měřením velmi malých předmětů pomocí různé zvětšovací techniky se nazývá mikroskopie.

4.1 Optické mikroskopy

Schéma běžného optického mikroskopu se skládá ze dvou optických prvků, objektivu a okuláru umístěných ve vzájemné konstantní vzdálenosti nazývané optický interval. Pozorovaný předmět je umístěn ve velmi malé vzdálenosti před předmetové ohnisko objektivu, který vytváří jeho zvětšený obraz. Tento obraz je pak pozorován neakomodovaným okem ve svazku paprsků rovnoběžném ve výstupní pupile okuláru. Celkové zvětšení mikroskopu je dáno součinem zvětšení objektivu a okuláru, který je v tomto uspořádání používán jako lupa [4].

Mechanická konstrukce mikroskopu je ovlivněna především typem pozorovaného vzorku, pro který je mikroskop určen a také způsobem jeho osvětlení. Mimo klasických typů mikroskopů jsou také invertované typy mikroskopů, kde je vzorek pozorován shora. U obou konstrukcí je možné zvolit způsob, jakým je osvětlen vzorek na průchod nebo na odraz.

Způsob osvětlení vzorku má rozhodující vliv na kvalitu kontrastu jeho zobrazení a na pozorovatelnost jeho detailů. Kvůli tomu byly kromě osvětlení ve světlém poli, kdy je kromě předmetových paprsků pozorováno i rozptýlené osvětlovací záření, zavedeny i další metody osvětlení předmětu.

Nejsnazší způsob zvýšení kontrastu správný pro povrchově strukturované vzorky je použití mimoosého nebo šikmého osvětlení. Tím se posune optická přenosová funkce soustavy a ve směru osvětlení dojde k většímu rozlišení pozorovaného vzorku v důsledku protažení stínu povrchových detailů. Opačnou metodou k osvětlení ve světlém poli je metoda osvětlení předmětu v poli tmavém. U tohoto případu není předmět osvětlen v kuželu odpovídajícímu numerické apertuře mikroskopu, ale naopak v části kuželu mimo ni tak, aby se do roviny obrazu předmětu dostaly pouze předmetové paprsky [4].

Kontrast pozorovaného předmětu lze také zvýšit použitím monochromatického záření zařazením barevných nebo interferenčních filtrů do optické soustavy osvětlovače nebo

mikroskopu. Kombinací konstrukce osvětlení v poli temném, kde jsou jednotlivé části clony nahrazeny vhodnými barevnými filtry, je možno získat barevně selektivní osvětlení.

4.2 Světelný mikroskop pro laboratorní účely

K základním vybavením každé metalografické laboratoře patří světelný mikroskop. Zobrazovací systém je soustava čoček umístěná tak, aby bylo dosaženo požadovaného zvětšení, vysokého kontrastu částí struktury a vysoké rozlišovací schopnosti. Mikroskop je složen z objektivu a okuláru, což jsou dvě soustavy čoček.

Pozorovaný předmět je uložen mezi dvojnásobnou ohniskovou vzdáleností a ohniskem objektivu. Objektiv je umístěn ve velmi malé vzdálenosti od sledovaného předmětu a paprsky, které jím projdou tvoří skutečný, zvětšený, převrácený obraz daného předmětu. Tento obraz je potom zobrazen okulárem a vytváří se neskutečný, zvětšený a přímý obraz pozorovaného předmětu.

4.3 Zviditelnění struktury pomocí optických metod

Pro dosažení kvalitního obrazu struktury a vysoké rozlišovací schopnosti je požadavek dostatečný kontrast a správné množství odraženého světla od jednotlivých částí ve struktuře. Důležitou roli pro zvýšení kontrastu má příprava vzorku, především způsob vyvolání struktury.

K dosažení vysokého kontrastu však byly vypracovány i vhodné optické metody [3]. Základní optické metody pomocí kterých se získává obraz struktury jsou následující:

- světlé i tmavé pole
- polarizované světlo
- fázový kontrast
- interferenční kontrast

Realizování těchto metod je závislé na technické úrovni používaných metalografických mikroskopů, jinak řečeno mikroskopů stavěných pro pozorování neprůhledných vzorků a vybavených požadovaným příslušenstvím.

4.3.1 Světlé pole

U této optické metody přichází světlo z externího zdroje, iluminátoru a odráží se od polopropustné desky směrem do objektivu. Objektivem prochází světlo na povrch zkoumaného vzorku od kterého se odráží zpátky do objektivu (od kolmých ploch k dopadajícím paprskům). Druhá možnost je mimo objektiv (od šikmých ploch). Odražené světlo do objektivu projde polopropustnou deskou a vstupuje do okuláru. Šikmé plochy na povrchu vzorku se zobrazují jako tmavé a vodorovné plochy jako světlé.

Další případ použití světlého pole může být šikmé osvětlení přes objektiv. Šikmé osvětlení je jednostranné a dosahuje se ho pomocí odrazového hranolu se zrcadlovou plochou. Světlo ze zdroje se odráží na hranolu a vstupuje do objektivu.

Poslední případ je šikmé všestranné osvětlení, kde je zastíněna pomocí prstencové clony střední část osvětlovacího svazku. Světlo odražené od pozorovaného povrchu vzorku se od rovin kolmých k dopadajícímu svazku odráží zpět do objektivu [3]. Tyto roviny se zobrazují jako zářivě bílé, od ploch šikmých se odráží z části do objektivu a z části mimo objektiv. Tím dochází ke zvýšení kontrastu a vytvoření požadovaného prostorového vjemu zkoumané struktury.

4.3.2 Tmavé pole

U této optické metody je přicházející světlo ze zdroje odraženo kovovým zrcadlem na paraboloidní kondenzor a osvětluje povrch vzorku šikmým osvětlením symetrickým k optické ose objektivu. Paprsky se od vodorovných ploch povrchu vzorku odrážejí mimo objektiv a paprsky odražené od šikmých ploch směřují do objektivu. Celkový vjem zobrazuje zářivé hranice zrn a dalších objektů odkloněných od ideální roviny výbrusu.

4.3.3 Polarizované světlo

U metalografické mikroskopie se využívá lineární polarizace viditelného světla. Světlo je elektromagnetické záření, u kterého vektor intenzity elektrického a magnetického pole kmitají kolmo na směr šíření a zároveň kolmo navzájem [3].

U polarizovaného světla jsou kmity omezeny na jednu rovinu procházející paprskem (tzv. lineární polarizace). Polarizace vzniká odrazem světla nebo absorpcí.

4.3.4 Fázový a interferenční kontrast

Tyto optické metody zvětšení kontrastu jsou založeny na interferenci fázově posunutých světelných vln. Rozdíly ve výšce na povrchu naleptaného vzorku způsobují fázová posunutí sousedních odraženého světla. Tento jev má vliv na změny intenzit, které lze pomocí zde popisovaných metod zviditelnit.

Pomocí metod fázového kontrastu je možno pozorovat rozdíly převýšení na povrchu vzorku v mezích 1 až 5 nm (např. povrchový reliéf při deformaci aj.) [3].

Interferenční mikroskopie se zakládá na hodnocení interference mezi odraženým paprskem od sledovaného povrchu vzorku a odraženým paprskem od povrchu srovnávacího etalonu.

4.4 Obrazová analýza

Obrazová analýza má za úkol získávat kvantitativní informace o různých geometrických parametrech částic (např. údajů o počtu, ploše), o jejich celkovém plošném podílu. Tyto informace lze použít přímo pro hodnocení izolovaných částic a taky jako podkladu pro další analýzu. Kvantitativní hodnocení charakteristických parametrů povrchu je velmi důležitou součástí posuzování vztahů mezi podmínkami provozu a způsobem, intenzitou nebo pravidelností opotřeбенí ploch. Využití výpočetní techniky a vhodného softwaru usnadňuje práci s digitálním obrazem, lze provádět mnoho operací, umožňujících např. měnit kontrast, jas, či jiné parametry snímku, eliminovat obrazové objekty menší než zvolený limit, třídít objekty do tříd podle zvolených znaků apod.

Kvalitní a správné výsledky samozřejmě lze během zpracování optických informací získat pouze za předpokladu:

- 1) věrohodného zobrazení v mikroskopu.
- 2) dostačující výraznosti obrazu.
- 3) správné identifikování objektů.

A proto je nezbytné používat kvalitní a výkonnou přístrojovou a výpočetní techniku. Při hodnocení mikroskopických snímků umožňuje použití obrazové analýzy provést kvantitativní určení parametrů zkoumaných částic rychle a přesně, bez subjektivního

ovlivnění osobou provádějící hodnocení [15]. Zároveň tato metoda dává možnost získat informace nejen o základních parametrech částic, ale i takové údaje, které by při klasickém způsobu hodnocení bylo možné získat jen velmi obtížně, nebo by byly zcela nedostupné [15]. V experimentálních oborech souvisejících s vyhodnocením konstrukčních materiálů používaných v dopravě lze efektivně využít analýzu obrazu získaného prostřednictvím sestavy mikroskopu a digitálního fotoaparátu.

4.5 Příprava metalografického vzorku

Světelná mikroskopie dává o struktuře jasné informace a je tedy podkladem pro rozhodnutí jaké metody použít pro další zkoumání struktury povrchu. Příprava metalografického vzorku má určitá pravidla, která mají zajistit, aby se struktura vzorku v průběhu přípravy nezměnila a nebyla danými operacemi ovlivněna.

4.5.1 Odebrání vzorku

Místo odběru vzorku je potřeba důkladně zvážit, protože toto místo bude důležité pro objektivní posouzení struktury lepeného spoje. Je hlavní dodržet zásadu, že vzorek během odběru nesmí být zahřán na teplotu fázových přeměn a nesmí být plasticky zdeformován. Velikost odebraného vzorku je dána způsobem přípravy výbrusu (automatická, poloautomatická, automatická). Volí se obvykle 1 až 2 cm² [3].

Není-li lepený spoj strukturně homogenní, je nutné odebrat vzorků z exponovaných míst více.

Zásady pro odběr vzorku ve třech bodech:

- 1) Vzorek je třeba odbírat z takových míst, aby bylo dosaženo co nejvěrohodnějšího vystižení celkové struktury materiálu.
- 2) Způsob odběru vzorku nesmí zapříčinit změnu struktury materiálu.
- 3) U tvářených výrobků se zohledňuje směr toku materiálu. Podle záměru se směřuje rovina výbrusu kolmo na vlákna, rovnoběžně s vlákny nebo do míst, kde se předpokládá výskyt technologických vad.

4.5.2 Způsob odebrání vzorku

U měkkých a lehce obrobitelných materiálů lze pro odběr vzorku použít řezání nebo odfrézování. Tvrdé a obtížně obrobitelné materiály je možno odlomit nebo odříznout rozbroušením. Nejméně vhodný způsob je řezání kyslíkem nebo obloukem vzhledem k tepelnému ovlivnění struktury [3].

4.5.3 Označení vzorku

Pro správné rozpoznání vzorků, které jsou zpracovávány a zkoumány je velmi důležité označení vzorku. Po jejich záměně by mohlo dojít k nesprávnému vyhodnocení. V tomto případě jsem vzorky označoval písmeny nebo hodnotami zrnitosti použitého brusného papíru. Pro označení jsem použil lihový fix.

4.6 Hrubé zbroušení

Po odříznutí vzorku a jeho rozřezání do vhodných rozměrů, které chceme zkoumat, vyrovnáme do rovinného tvaru hrubým zbroušením ručním nebo pomocí brusného kotouče na plocho. Při tomto broušení je potřeba dodržet, aby se vzorek menších rozměrů nevyhřál na vyšší teplotu.

4.7 Preparování vzorku

Vzorek pro ruční zpracování musí mít takový tvar a velikost, aby se dobře udržel v ruce při broušení. Pokud je vzorek menších rozměrů, pak se zalévá nebo zalisuje do pryskyřic, které se samovolně vytvrdí. V současné době jsou již dobře zpracovány metody zalévání vzorků za studena a za tepla [3].

U vzorků, kde nehrozí nebezpečí ovlivnění struktury zvýšenou teplotou nebo tlakem se používají lisy, u kterých se vzorky zalisují za tepla do umělých pryskyřic. Pryskyřice používané pro zalisování vzorků jsou akrylové, epoxidové, bakelitové aj [3].

4.8 Zbroušení

Správně zbroušený vzorek by měl být rovnoměrně drsný s minimální povrchovou nerovností a aby nedošlo broušením ke změně struktury vzorku. Při zbroušení vzniká na povrchu vzorku vrstva plasticky deformovaného materiálu. Její tloušťka závisí na vlastnostech zpracovávaného materiálu a podmínkách broušení (na velikosti brusného zrna ,tlaku a rychlosti při broušení).

Od původního broušení za sucha se stále častěji přechází k broušení za mokra [4]. Tento způsob je čistší, rychlejší a při současném chlazení vodou se méně změní struktura materiálu. Obrus, neboli vytrhaná zrna brusiva a částice vzorku jsou odplavovány z povrchu brusného kotouče či papíru. Proces broušení začíná hrubým broušením a dále se přechází na jemnější brusné papíry. Jako brusivo se používá karbid křemíku a přírodní korund, které mohou být uloženy v prostředí tuhém (brusné papíry), polotuhém (brusné pasty) nebo kapalném (brusné suspenze) [3].

Při ručním broušení a na mechanických bruskách se vzorkem příliš nehýbe a všechny broušené stopy jsou téměř rovnoběžné. Při přechodu na jemnější brusivo se očištěný vzorek pootočí o 90° a brousí se do té doby, dokud nezmizí stopy vybroušené na předchozím brusném papíru.

4.9 Leštění vzorku

Broušení a leštění je nejobtížnějším stupněm přípravy vzorku pro jakýkoliv metalografický mikroskop. Pomocí leštění se docílí kvalitní rovný a zrcadlový povrch, zmizí rýhy po posledním nejjemnějším broušení.

Leštění se provádí těmito způsoby:

- mechanicky
- chemicky
- elektrolyticky
- kombinací uvedených metod

Rozdíl mezi mechanickým broušením a mechanickým leštěním je v tom, že při leštění už není materiál vzorku odebírán. Dochází jenom ke srovnání reliéfu povrchu vzorku účinkem leštícího prášku (např. vodní suspenze oxidu hlinitého).

Přednosti poloautomatické a automatické přípravy výbrusu je dosažení stejné kvality výbrusu u více vzorků. Nedochozí k jednosměrnému ovlivnění struktury, je zachována rovina a je také možno v krátké době připravit preparáty i ze špatně zpracovatelných materiálů (např. olovo, cín). Další výhodou pro opakovatelnost kvality preparace je možnost nastavení téměř přesných a stabilních pracovních podmínek (rychlosti otáček, přítlačné síly).

Pro všechny poloautomatické a automatické metalografické přístroje jsou zpracovávány pracovní postupy pro řadu materiálů [3].

Pracovní postup pro automatickou přípravu vzorku obsahuje:

- vybroušení rovinných ploch.
- jemné broušení.
- leštění.

Pro broušení rovinných ploch se používá pro vzorky střední a vysoké tvrdosti (ocel) oxidu hlinitého o drsnosti 60 až 150. Při jemném broušení se používají brusné papíry převážně s karbidem křemíku o zrnitosti 4000 (velikost částic 5 μm). Leštění je další operace po broušení za účelem dosažení co nejideálnějšího povrchu vzorku (tzn. povrch bez rýh). Podle leštěného materiálu je možno použít k leštění různé prostředky.

5 Zkouška tahem

5.1 Zkušební zařízení

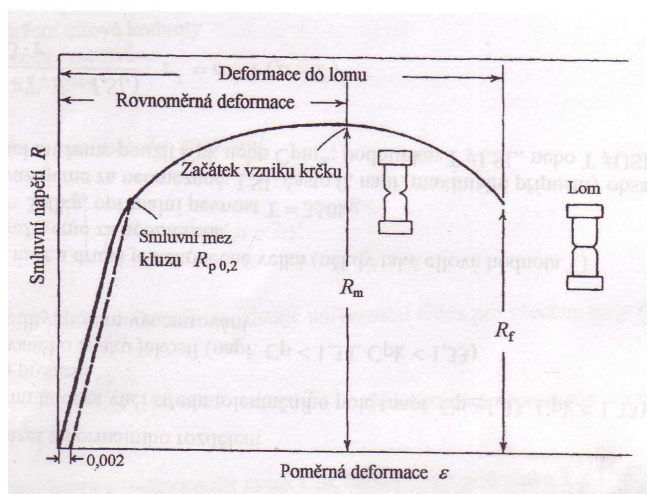
Stroj je tvořen pevným rámem, kde v horní části je umístěn dynamometr (zařízení pro měření síly). Zkušební vzorek je jedním koncem uchycen k dynamometru a druhým koncem k pohyblivému příčnicku. Tento příčník je uváděn do pohybu motorem, přes vřeteno a převodovou skříň. Postupným pohybem příčnicku dochází ke stupňovitému zatěžování a deformaci zkoušeného vzorku. Tato deformace vzorku je zaregistrována průtahoměrem.

5.2 Závislost napětí - deformace

Tato závislost se určuje experimentálně zkouškou tahem hladkých těles. Zkušební těleso (nejčastěji kruhového nebo obdélníkového průřezu) se uchytí do čelistí zkušebního stroje a na těleso se nasadí průtahoměr. Během zkoušky se do paměti počítače ukládá závislost působící síly F (zatížení snímané dynamometrem) na prodloužení zkušebního tělesa (snímané průtahoměrem).

5.2.1 Smluvní diagram napětí – deformace

Závislost síla – prodloužení, získané na zkušebních tělesech různých velikostí, zhotovených z jednoho materiálu, je možné přepočítat na jedinou závislost a to smluvní napětí – poměrná deformace [3]. Znázorněno na obr.18.



Obr. 18 Smluvní diagram napětí – deformace [3]

První úsek diagramu je přímka a odpovídá elastické deformaci. Pokud je prodloužení snímáno snímačem umístěným na zkušební vzorku, pak tato přímka je popsána Hookovým zákonem $R = E \times \epsilon$. Pokud je prodloužení zkušební vzorku odvozeno jen z posuvu příčnicku zkušební stroje, potom sklon počátečního úseku tahového diagramu obsahuje kromě elastické deformace zkušební vzorku i elastické deformace zkušební stroje (dynamometr, rám stroje). Elastická deformace zkušební stroje je řádově větší ve srovnání s elastickou deformací zkušební vzorku. Proto z takového záznamu nelze modul E vyhodnotit [3].

V další části diagramu dochází k odklonu od přímky (z důvodu vzniku plastické deformace), zvětšení napětí v závislosti na deformaci postupně klesá až na nulovou hodnotu. Až do této chvíle se měrná část zkušební vzorku deformuje rovnoměrně. Další deformace je tvořena poklesem napětí a vznikem krčku na měřené části zkušební vzorku.

V praxi se na základě průběhu závislosti smluvní napětí - poměrná deformace vyhodnocují dvě napěťové materiálové charakteristiky, smluvní mez pevnosti a mez kluzu [3].

5.2.2 Smluvní mez pevnosti

Mez pevnosti R_m je maximální napětí dosažené ve smluvním diagramu, což znamená poměr hodnot maximální síly dosažené při zkoušce a původního průřezu zkušební vzorku.

$$R_m = F_{\max}/S_0 \text{ [MPa]}$$

Mez pevnosti u tvárných materiálů je dána hodnotou smluvního napětí, při kterém se začíná vytvářet na zkušební vzorku krček. K lomu dojde při smluvní napětí R_f (lomové napětí) po vzniku krčku. V případě, že k porušení zkušební tělesa dojde po malé nebo nulové plastické deformaci, pak hodnota R_m odpovídá napětí v okamžiku lomu R_f , což je lomové napětí [3].

Smluvní mez pevnosti se nejčastěji uvádí jako základní mechanická charakteristika určená zkouškou tahem. Ve skutečnosti tato veličina nevystihuje předně pevnost materiálu [3]. Pro tvárné materiály vyjadřuje smluvní mez pevnosti takové zatížení, které

materiál přenesení za přísných podmínek jednoosé napjatosti. Tato veličina však nevystihuje skutečnou únosnost materiálu, který je vystaven působení víceosé napjatosti.

V současné době se používá mnohem racionálnější přístup v případě tvárných materiálů a to je přístup napěťové charakteristiky – meze kluzu.

5.2.3 Mez kluzu

Tato mez kluzu zobrazuje napětí, při kterém začíná vznikat plastická deformace. Podle smluvního diagramu by se za mez kluzu mělo považovat napětí, při kterém dochází k odklonu diagramu od přímky. Takto zjištěná hodnota meze kluzu by však byla závislá na citlivosti snímače prodloužení [3]. Z tohoto důvodu se zavádí smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$, což je napětí, které způsobí plastickou deformaci o velikosti $e_p = 0,002$ (0,2%). Hodnota meze kluzu se určí následujícím postupem. Na ose poměrné deformace vyznačíme hodnotu deformace 0,2 %. Z tohoto bodu vedeme rovnoběžku s přímkou tahového diagramu. Bod, kde se protne rovnoběžka závislost napětí - deformace značí napětí smluvní meze kluzu $R_{p0,2}$.

6 Příprava vzorků pro experimentální měření drsnosti povrchu

6.1 Volba úpravy povrchu vzorků

Pro vyhodnocení drsnosti byly použity vzorky z adherendu z uhlíkové oceli s odlišně upraveným povrchem. Pro zkoušení pevnosti jednoduše přeplátovaných spojů byly použity vzorky s broušeným povrchem pomocí tryskání, kotoučovou bruskou a ručního broušení brusnými papíry různé drsnosti. Lepení bylo prováděno na čerstvě obroušených vzorcích lepidlem *Epoxy 1200*. Při použití brusiva s různou zrnitostí byly získány spoje s různou pevností.

Pro hodnocení vlivu drsnosti povrchu na pevnost lepených spojů byly použity adherendy z uhlíkové oceli o rozměrech 30x100mm a tloušťky 2mm, s přeplátováním v délce 25 mm.

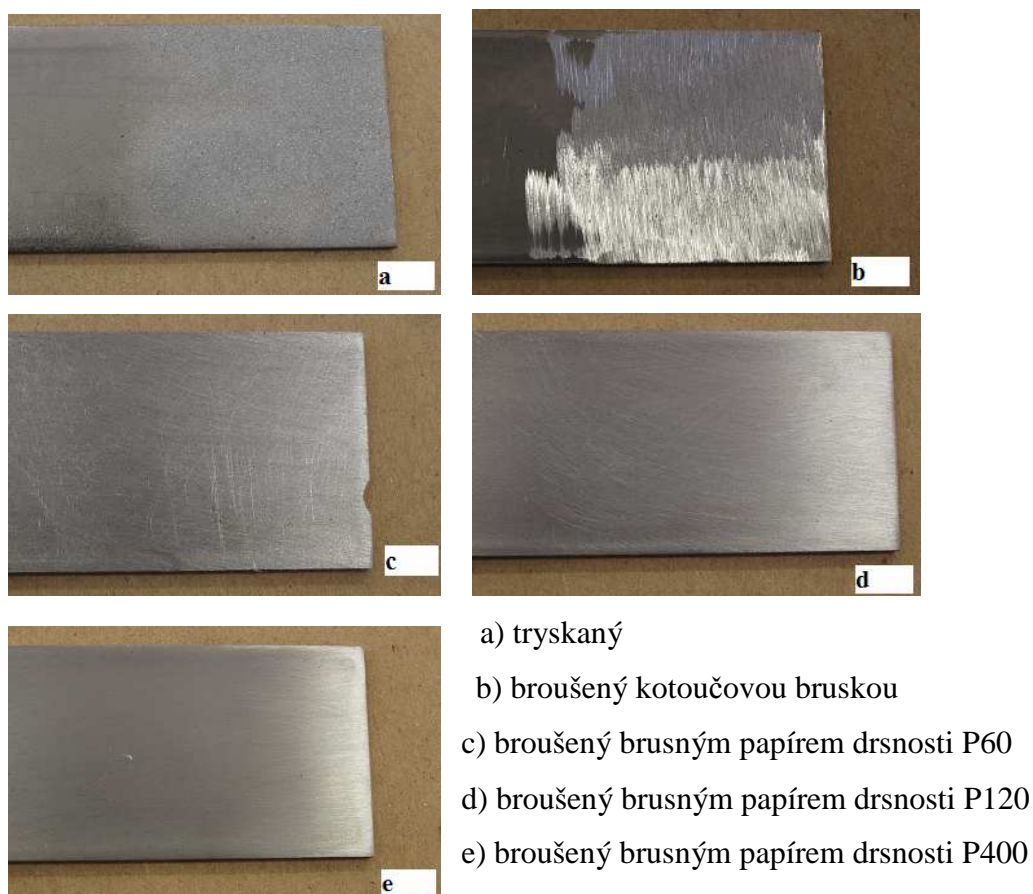
Zkoušeno bylo celkem pět různých druhů povrchu:

- tryskaný (pískovaný) keramickým abrazivem
- broušený kotoučovou bruskou (kotouč s keramickým pojivem, pro velký úběr)
- ručně broušený brusným papírem o drsnosti P60
- ručně broušený brusným papírem o drsnosti P120
- ručně broušený brusným papírem o drsnosti P400

6.1.1 Proces přípravy povrchu lepených ploch

Dva ocelové pláty o rozměrech 30x100mm jsem na jedné straně zdrsnil pomocí dané technologie. Zbroušení bylo provedeno na všech vzorcích v celé šířce a v rozmezí 25 až 30 mm do délky. První vzorek byl vytvořen pomocí přístroje na tryskání. Tento způsob zdrsnění povrchu je nejrychlejší a za všech použitých technologií nejjednodušší. Následovala příprava povrchu pomocí kotoučové brusky. Tato technologie vyžaduje určitou manuální schopnost a to proto, že zbroušený povrch by měl být po celém povrchu co nejrovnoměrnější. Při pozdějším zkoumání drsnosti by mohly vzniknout velké rozdíly v jednotlivých místech měření. Tento způsob přípravy je poměrně rychlý a v praxi běžně využitelný. Jako poslední jsem použil technologii broušení pomocí brusných papírů o různé drsnosti. Volba hodnoty drsnosti byla P60, P120 a P400. Drsnosti byly zvoleny na základě nejčastějšího používání v praxi. Ruční broušení brusnými papíry je časově nejnáročnější a také vyžaduje značnou fyzickou námahu.

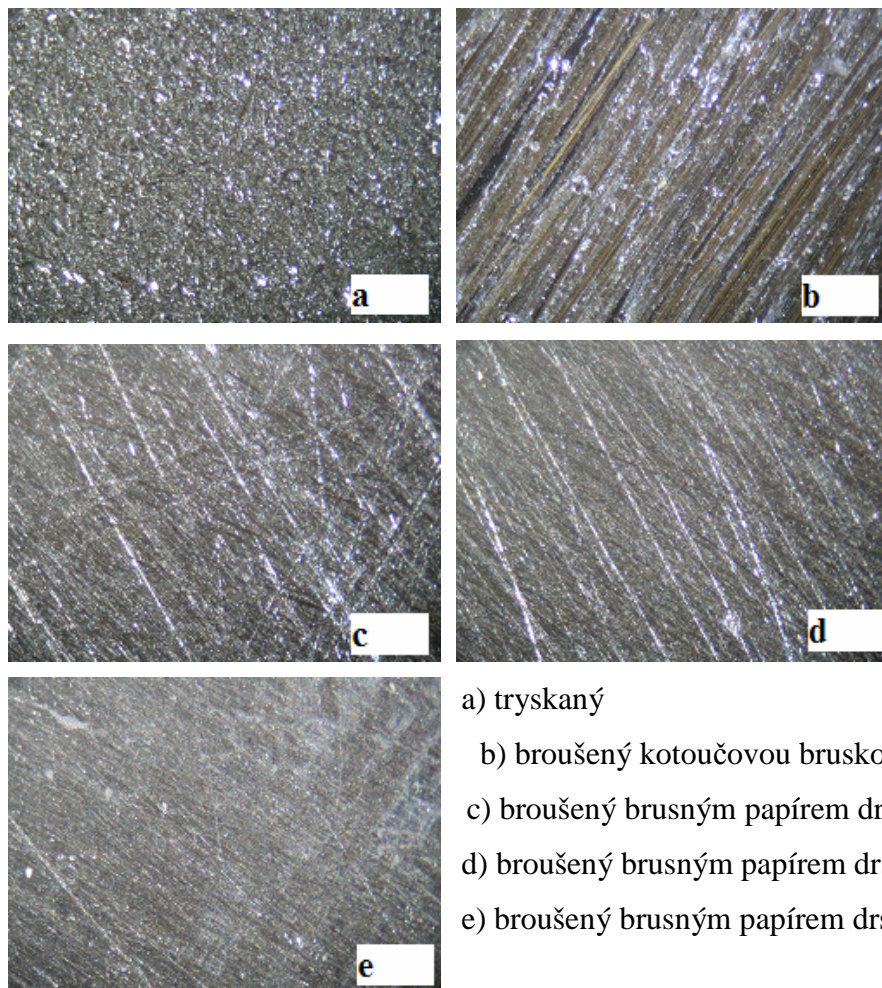
Obrázek 19 ukazuje již zbrošené povrchy, které byly použity k provedení měření drsnosti. Povrchy dalších zbrošených vzorků daným způsobem byly obdobné.



Obr. 19 Vzorky s upraveným povrchem k lepení

Povrch tryskaný a povrch broušený kotoučovou bruskou měl dle vizuálního pohledu největší drsnost. Další vzorky broušené ručně vykazovali povrch dle pohledu téměř stejný. I přesto se jejich drsnosti značně odlišovali a vliv na pevnost spoje byla také rozdílná.

Na obrázku 20 lze vyzorovat odlišnou strukturu povrchu u jednotlivých vzorků upravených již známými metodami v mikroskopickém zvětšení. Opět jsou zde uvedeny pouze vzorky vybrané k měření drsnosti. U dalších stejně zbrošených vzorků byly jejich povrchy velmi podobné.



- a) tryskaný
- b) broušený kotoučovou bruskou
- c) broušený brusným papírem drsnosti P60
- d) broušený brusným papírem drsnosti P120
- e) broušený brusným papírem drsnosti P400

Obr. 20 Povrchy vzorků zvětšený 40x pod lupou

Povrch tryskaný je výrazně odlišný od povrchu broušeného. Tryskání je prováděno kolmo k povrchu a proto nejsou na tomto povrchu žádné čáry ani jiné stopy po mechanickém zásahu do povrchu. Z tohoto důvodu se povrch jeví jako nejrovnoměrěji zdrsňený ze všech uvedených metod zdrsňení povrchu.

U povrchu broušeného kotoučovou bruskou jsou zanechány největší stopy po broušení. Bylo použito kotouče pro velký úběr a z toho důvodu jsou rýhy po broušení nejvíce rozpoznatelné. Dle směru, jakým míří stopy po broušení lze poznat, v jaké poloze byl vzorek uchopen při broušení. V tomto případě byl vzorek zbroušen kolmo ke směru roztržení vzorku.

Další broušené povrchy brusným papírem už nejsou příliš odlišné. U ručního broušení není povrch tak rovnoměrný jako u předchozích upravených povrchů. Nicméně i zde je vidět rozdílnost v použití tří různých drsností. U drsnosti P60 jsou stopy po broušení nejviditelnější. Vzorek broušený papírem o drsnosti P120 má také viditelné stopy po

broušení a drsnost velmi podobnou jako u vzorku předchozího. U posledního vzorku broušeného papírem o drsnosti P400 jsou stopy po broušení nejméně viditelné. Tato hodnota drsnosti slouží k velmi jemnému zdrsnění povrchu. U všech ručně broušených vzorků je broušení ovlivněno silou přítlačku brusného papíru k povrchu a také směrem, kterým je povrch broušen. Broušení bylo provedeno ve stejné rovině jako byl směr roztržení vzorků.

6.1.2 Čištění povrchu ploch před lepením

Po provedeném broušení povrchů následovalo zbavení povrchu mechanických nečistot a následné odmaštění. K odmaštění bylo použito komerční odmašťovací prostředek *WEICON*. Odmaštění bylo provedeno bezprostředně před lepením, aby byl zajištěn suchý a čistý povrch lepených ploch. Tím byly dokončeny veškeré úpravy povrchu před lepením.

6.1.3 Příprava a nanášení lepidla na lepené plochy

K lepení vzorků jsem použil konstrukční epoxidové lepidlo Epoxy 1200. Do připravené nádoby jsem smíchal toto epoxidové lepidlo s vytvrzovací složkou v poměru 20 : 1,7. Po smíchání jsem ve velmi krátké době nanesl na vzorek vrstvu lepidla v tloušťce 0,5 mm. Po nanesení na obě lepené plochy jsem vzal oba pláty a překryl přes sebe v délce přeplátování 25 až 27 mm. Slepěný vzorek jsem položil tak, aby oba pláty byly ve stejné rovině a mezi lepenými plochami nevznikly mezery, kterými by mohl vniknout vzduch. Přes tento vzorek jsem položil folii, aby se zabránilo slepení dalšího položeného vzorku. Takto jsem postupoval u všech dalších vzorků.

Následně jsem všechny vzorky naskládané na sobě zatížil ocelovým závažím o zatížení cca 0,1 MPa. Vytvrzení probíhalo po dobu 24 hodin. Tímto skončil proces lepení.

6.2 Mechanická zkouška tahem

Již slepené a zatvrzelé vzorky byly připraveny k přetržení na zkušebním stroji.

Mez pevnosti ve smyku jednoduše přeplátovaných spojů byla provedena na univerzálním zkušebním stroji ZD 10/90 se sběrem dat a jejich vyhodnocením v PC. Při uchycení vzorku do čelistí stroje a následném spuštění tahové zkoušky bylo zjištěno, že v uchycení vzorku není dostatečná síla na to, aby byl vzorek přetržen. Z tohoto důvodu se všechny vzorky musely v místě uchycení zbrousit kotoučovou bruskou a tím získat větší drsnost povrchu pro zachycení potřebných sil při upnutí vzorku ve stroji. Tím mohla tahová zkouška pokračovat.

Vzhledem k použitému lepidlu *Epoxy 1200*, které má poměrně nízkou adhezi k chemicky neupravenému ocelovému povrchu, došlo k adheznímu porušení všech lepených spojů. Pevnosti lepených spojů dosahovali hodnoty kolem 10 MPa u povrchu broušeného kotoučovou bruskou a povrchu tryskaným. Vzorky broušené ručně brusnými papíry s různou zrnitostí vykazovaly pevnost nižší.

Následující tabulka 3 udává hodnoty meze pevnosti v MPa, které byly naměřeny pomocí tahové zkoušky na zkušebním stroji a následně vyhodnoceny příslušným softwarem v PC.

Tab. 3 Přehled hodnot naměřených při tahové zkoušce

Povrch vzorku		Rm [MPa]	Rozměr a [mm]	Rozměr b [mm]
Trysaný keramickým abrazivem	Vzorek 1	11,814	30,2	25,5
	Vzorek 2	9,478	30,2	25,4
Broušený kotoučovou bruskou	Vzorek 1	10,226	30,2	26,9
	Vzorek 2	11,185	30,2	26,4
Ručně broušený P60	Vzorek 1	6,724	30,2	27,4
	Vzorek 2	6,260	30,2	27,2
Ručně broušený P120	Vzorek 1	7,805	30,2	27,2
	Vzorek 2	7,642	30,2	27,3
Ručně broušený P400	Vzorek 1	7,443	30,2	27,4
	Vzorek 2	7,525	30,2	27,4

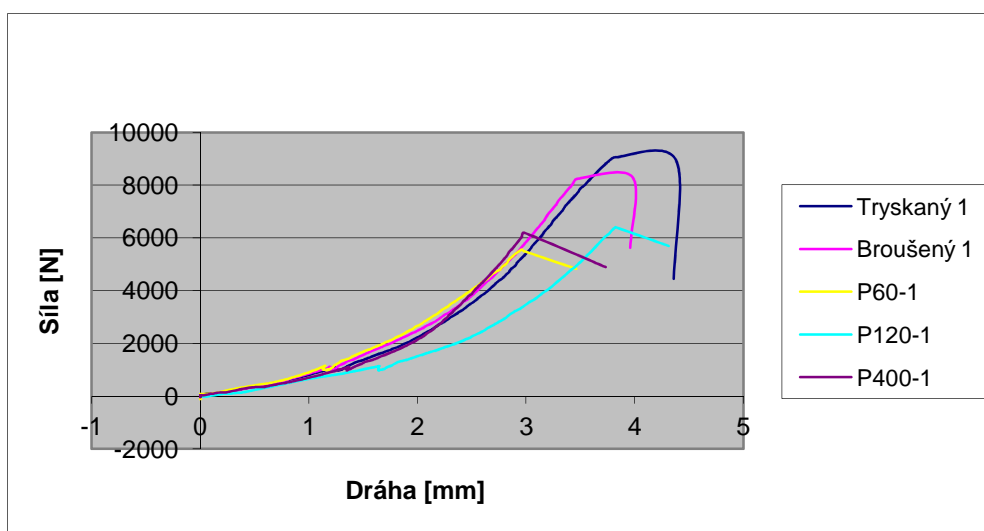
Legenda k tabulce 3: Rm – mez pevnosti

a – šířka přeplátování

b – délka přeplátování

Následující graf 1 zobrazují průběh tahové zkoušky provedené u pěti vzorků. Graf 1 zobrazuje prvních 5 vzorků s odlišně upraveným povrchem. Na vodorovné ose je zobrazena dráha, kterou vzorek urazil od začátku tahové zkoušky do okamžiku přetržení. Na svislé ose je zobrazena síla, při které byl vzorek přetržen. Přetržením daného vzorku byla zkouška ukončena.

Z grafu 1 lze vyčíst, že největší pevnost vykazoval vzorek s upraveným povrchem pomocí metody tryskání keramickým abrazivem. Zároveň měl tento vzorek nejdelší dráhu do úplného roztržení vzorku. Zde se jeví tryskaný povrch jako nejvíce vhodný pro lepení dvou kovů dohromady. Naopak vzorek broušený brusným papírem o drsnosti P60 vykazoval pevnost nejmenší. Ačkoli byla očekávána pevnost vyšší než u vzorků broušených jemnějším brusným papírem, bylo tomu naopak. Z tohoto důvodu je nutné, aby byla drsnost následně měřena a vyhodnocena. Výsledek by měl prokázat skutečnou příčinu vlivu úpravy povrchu před lepením dvou kovů.



Graf 1 Záznam výsledků tahové zkoušky vzorků 1

Na níže uvedených obrázcích jsou ukázány vzorky po roztržení na zkušebním stroji. Tmavé stopy na těchto vzorcích ukazují zachycené lepidlo na povrchu materiálu a světlé místa znamenají, že lepidlo nemělo dostatečnou adhezi pro zachycení na povrchu vzorku.

Obrázek 21 ukazuje vzorky s povrchem tryskaným keramickým abrazivem. U každého z těchto dvou vzorků je rozdílná adheze lepidla. Tmavé stopy na těchto vzorcích ukazují na správnou přilnavost lepidla k povrchu. Rozdílnost v množství zachyceného lepidla na obou plochách vzorku může být způsobena několika příčinami. Jedna příčina je v množství naneseného lepidla na jednotlivé plochy, druhá může být špatné sesazení

dvou plátů na sebe a tím vznik mezery mezi slepenými plochami a třetí příčina může být rozdílnost v úpravě povrchu, v tomto případě množství naneseného abraziva.



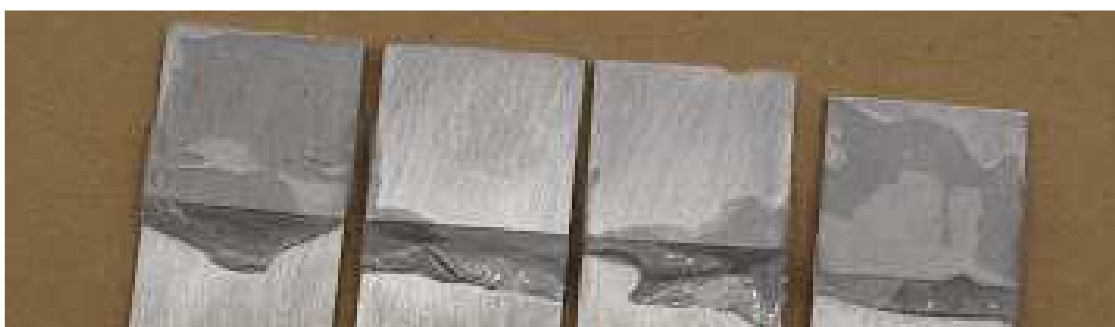
Obr. 21 Vzorky tryskané keramickým abrazivem po zkoušce tahem ve smyku

Obrázek 22 ukazuje vzorky s povrchem broušeným na kotoučové brusce. V tomto případě je vidět, že adheze lepidla je poměrně rovnoměrná. Na obou vzorcích je lepidlo rozděleno na všech plochách téměř stejně, první polovina lepidla zůstala na jedné ploše a druhá polovina na ploše druhé. U těchto vzorků lze říci to, že příčina rozdělení lepidla mezi obě plochy je v nerovnoměrně zdrsněném povrchu nebo naneseném lepidlu.



Obr. 22 Vzorky broušené na kotoučové brusce po zkoušce tahem ve smyku

Obrázek 23 zobrazuje vzorky s povrchem ručně broušeným brusným papírem o drsnosti P60. U vzorků zdrsněným tímto způsobem je adheze lepidla téměř jednoznačně na jedné lepené ploše u obou vzorků. V tomto případě je příčina zřejmě v množství naneseném lepidlu na jednotlivé plochy a nebo v rozdílném zdrsnění povrchu.



Obr. 23 Vzorky broušené brusným papírem o drsnosti P60 po zkoušce tahem ve smyku

Obrázek 24 ukazuje vzorky s povrchem ručně broušeným brusným papírem o drsnosti P120. Tyto roztržené vzorky neukazují jasnou příčinu toho, jak bylo lepidlo rozděleno na obou plochách. Domnívám se, že to je způsobeno nerovnoměrně naneseným lepidlem na obě plochy.



Obr. 24 Vzorky broušené brusným papírem o drsnosti P120 po zkoušce tahem ve smyku

Obrázek 25 ukazuje vzorky s povrchem ručně broušeným brusným papírem o drsnosti P400. Tento případ je obdobný jako předchozí případ uvedený výše.



Obr. 25 Vzorky broušené brusným papírem o drsnosti P400 po zkoušce tahem ve smyku

6.2.1 *Vyhodnocení tahové zkoušky*

Z hodnot získaných při tahové zkoušce vyplývá, že pevnost všech vzorků se pohybovala od 6 do 12 MPa. Všechny ručně broušené vzorky měly nižší pevnost než vzorky broušené kotoučovou bruskou a vzorky tryskané keramickým abrazivem. Pevnost spojů zdrsněných metodou tryskání je podobná a liší se o 2,336 MPa. Podobnou pevnost měly i vzorky broušené kotoučovou bruskou, které se lišily mezi sebou o 0,959 MPa. Celková pevnost spojů u těchto dvou odlišně upravených povrchů je srovnatelná a pro pevnost spoje má značný význam.

Další vzorky zdrsněné brusným papírem s různou drsností vykazovali podstatně menší pevnost. Ta se pohybovala od 6 do 8 MPa. Vzorky broušené brusným papírem o drsnosti P60 měly nižší pevnost než vzorky broušené nejjemnějším papírem o hodnotě drsnosti P400. Vzorky broušené brusným papírem o hodnotě P120 měli též větší pevnost

než vzorky P60. Rozdíl mezi pevností u vzorků P120 a P400 byl velmi malý a proto lze jejich pevnost hodnotit jako shodnou.

Už podle tohoto měření lze usoudit, že drsnost povrch adherendu na pevnost lepeného spoje má značný vliv a proto si myslím, že je dobré se touto problematikou dále zabývat.

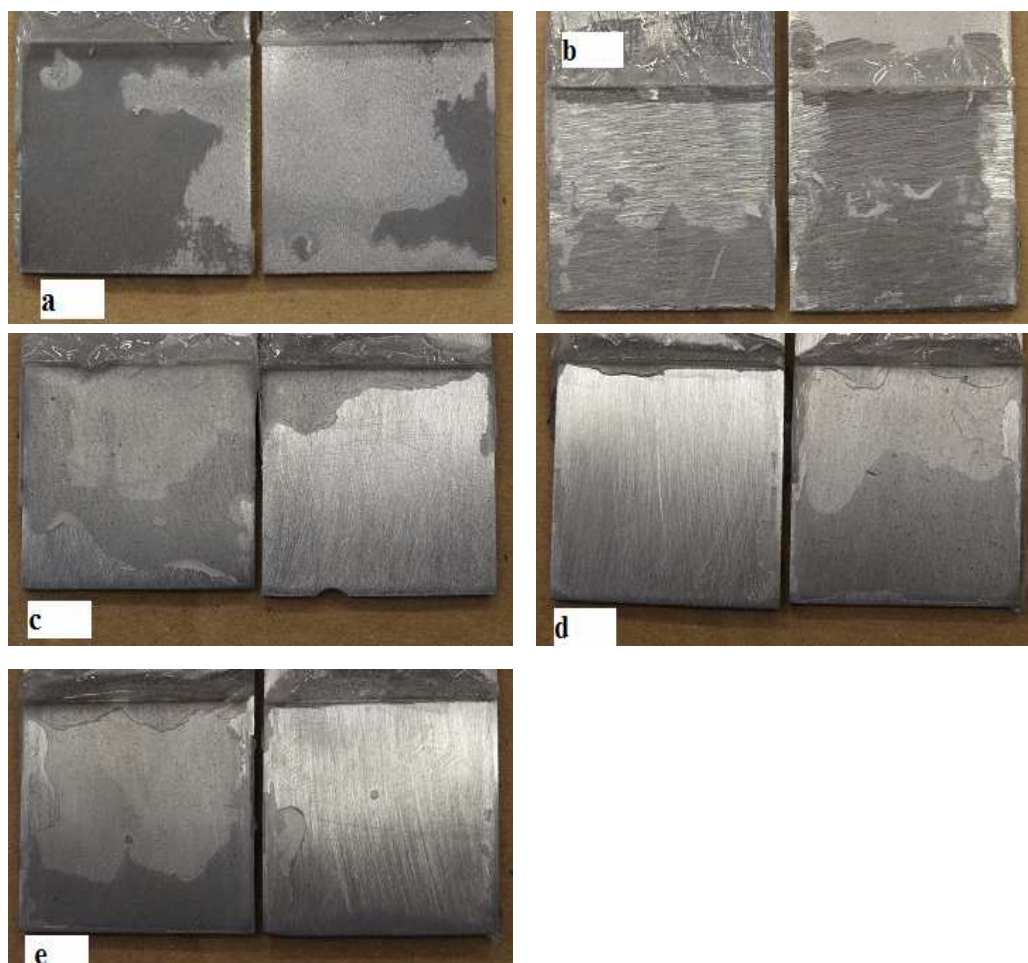
6.3 Metalografický výbrus

Aby bylo možné vzorek zkoumat pod optickým mikroskopem, bylo potřeba ze vzorků udělat metalografický výbrus. K věrohodnému vyhodnocení drsnosti stačilo pět povrchů s odlišně upraveným povrchem.

Postup metalografického výbrusu:

1. Rozřezání vzorků na požadovaný tvar
2. Obroušení na pásové brusce (hrubé broušení)
3. Broušení brusným papírem o drsnosti P400 a následně drsností P1000
4. Ruční leštění prováděné na rotační brusce Buehler Beta za působení Etanolu z důvodu zabránění koroze měřených vzorků.

Ke zkoumání pod mikroskopem a následnému hodnocení drsnosti byly vybrány níže uvedené vzorky. Vzorky připravené k metalografickému výbrusu.



- a) tryskaný
- b) broušený kotoučovou bruskou
- c) broušený brusným papírem drsnosti P60
- d) broušený brusným papírem drsnosti P120
- e) broušený brusným papírem drsnosti P400

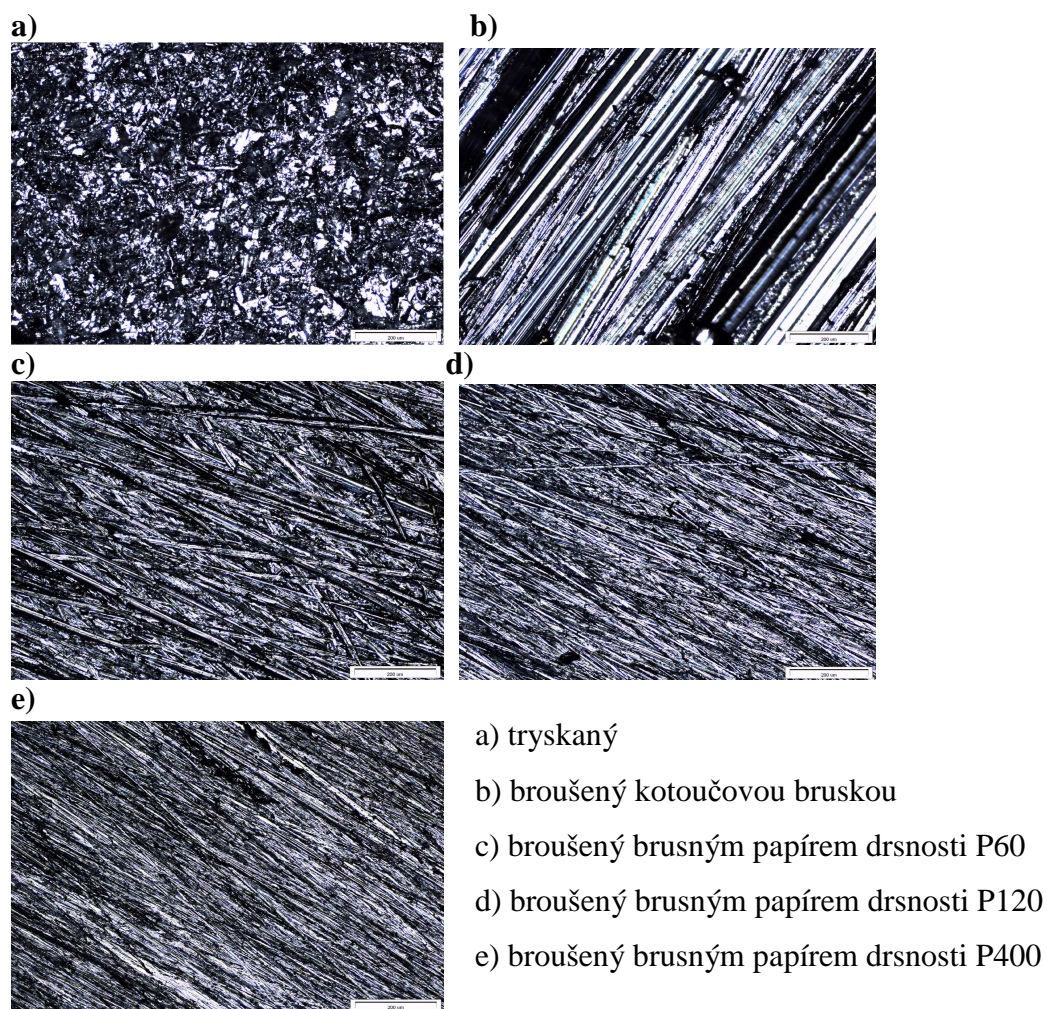
Obr. 26 Vzorky vybrané k měření

7 Experimentální měření drsnosti odlišně upraveného povrchu materiálu

7.1 Mikroskopické zobrazení povrchu experimentálních vzorků

Na příslušném obrázku 27 dole je ukázán povrch všech 5 pozorovaných druhů povrchů zvětšených 125x pod příslušným mikroskopem. Povrch tryskaný a broušený kotoučovou bruskou mají velmi odlišnou strukturu. Na těchto snímcích je zřetelně zobrazen způsob úpravy povrchu.

Zatímco povrchy broušené ručně brusným papírem o různé drsnosti mají strukturu povrchu velmi podobnou a proto způsob jejich úpravy není zcela zřetelný. I přesto se povrch broušený ručně s drsností P400 mírně liší od předchozích dvou a jeho povrch se jeví jako nejméně vhodný k lepení kovů.



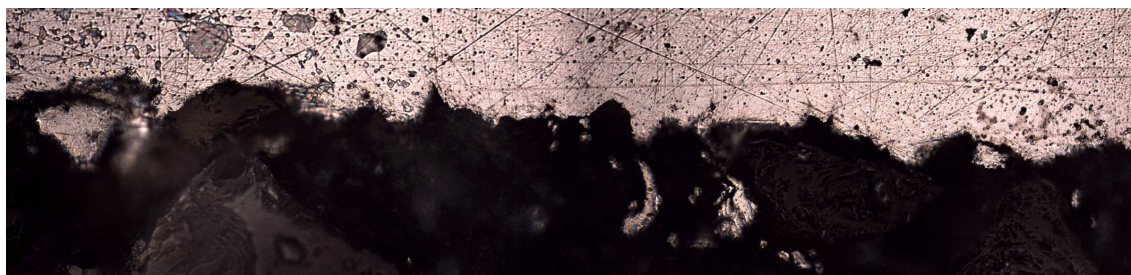
Obr. 27 Drsnost povrchu zvětšená 125x pod mikroskopem

7.2 Postup při zaměření vzorku pod mikroskopem

K pozorování vzorků byl použit mikroskop *Neophot 32* s 5 Mpix kamerou *Olympus*. Protože po metalografickém výbrusu bylo všech 5 vybraných vzorků utvořeno v jeden celek, bylo nutné při pokládání vzorku nad optické snímání mikroskopu dbát na větší opatrnost. Nastavování vzorku pro zkoumání daného jednoho druhu povrchu probíhalo tak, že jsem nadzdvihl pravou část vzorku a snažil se nastavit požadovaný povrch přímo nad světelný paprsek mikroskopu. Další nastavení jsem provedl posuvem stavitelných ploch dle potřeby svislým nebo podélným směrem.

Pro správné měření drsnosti byl zaostřen a vyfocen jeden snímek obrazu, poté jsem posuvem vzorku vlevo zaměřil, zaostřil a vyfotil další část navazujícího povrchu. Tento postup byl proveden ještě jedenkrát. Tím jsem dostal požadovanou délku povrchu adherendu složeného ze tří vyfocených povrchů.

Obrázek 28 ukazuje příklad povrchu ocelového adherendu zvětšený 500x pod mikroskopem. Takto zvětšený a zaostřený povrch adherendu byl následně určen k měření.



Obr. 28 Povrch ocelového adherendu zvětšený 500x

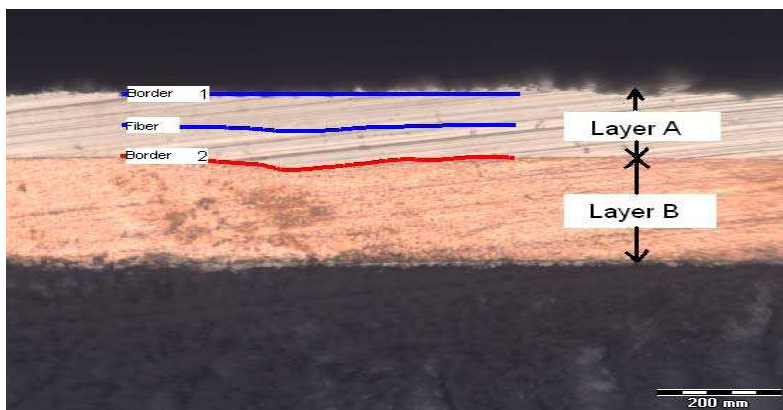
Následné měření drsnosti daných povrchů bylo prováděno pomocí software *Olympus AnalySiS docu Five*.

7.3 Měření drsnosti v kolmých řezech k povrchu

Ke stanovení drsnosti povrchu v kolmých řezech k povrchu byl použit již zmíněný optický mikroskop a software *Olympus AnalySiS docu Five*. S tímto programem jsem pracoval poprvé a proto mé první kroky vedly k měření, které nebylo úplně správné.

V prvním kroku byl učiněn pokus o charakterizaci povrchu modulu pro měření tloušťky vrstev. Na obrázku 29 je příklad, kdy se za pomoci ručně vykreslených hranic a následném vyhodnocení zobrazí střední vlákno (Fiber). Tato křivka udává hodnoty

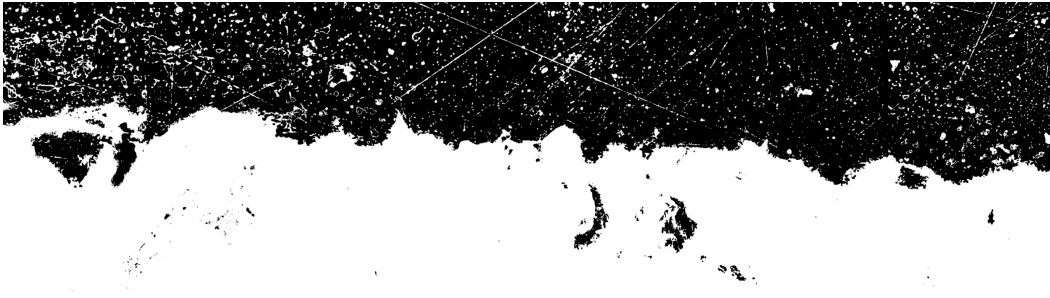
drsnosti na příslušném zvoleném úseku, který jsem vybral. Další zpracování naměřených hodnot je možno provádět v programu Microsoft Excel či jiných tabulkových editorech – program exportuje měření ve formě ASCII dat. Ovšem tento způsob se příliš neosvědčil. Měřený úsek je ohraničován manuálně, pro značně členitý povrch je manuální způsob ohraničení značně nepřesný. Z tohoto důvodu byly hledány další možnosti nalezení reliéfu povrchu.



Obr. 29 Modul pro měření tloušťky vrstev v programu AnalySIS. Docu

Jako vhodný bylo zvoleno měření vybraného úseku povrchu pomocí binarizace a automatického vyhodnocení. Pro binarizaci byl snímek přexponován pro snazší automatické nalezení kontrastu. Ukázka binarizovaného snímku je na obrázku 30. Nalezení rozhraní mezi ocelí (světlá část) a lepidlem je pak snadné. Nicméně díky značné členitosti je i v tomto případě ruční obkreslování reliéfu povrchu značně nepřesné. Proto byla pro zjištění drsnosti povrchu volena automatická metoda. Program neumí v naší používané konfiguraci automaticky vykreslovat hranice rozhraní. Proto byla hranice povrchu kovu stanovena pomocí vykreslení křivky jasů. Takto získaná křivka velmi dobře odpovídá profilu drsnosti – čím je v místě vyšší profil oceli, tím je vyšší pík jasů.

Pro přesné stanovení profilu drsnosti bylo ještě potřeba najít vhodnou metodiku pro stanovení výšky drsnosti. Tato výška byla změřena pomocí vertikální čáry ručně vynesené na vykreslené křivce jasů.

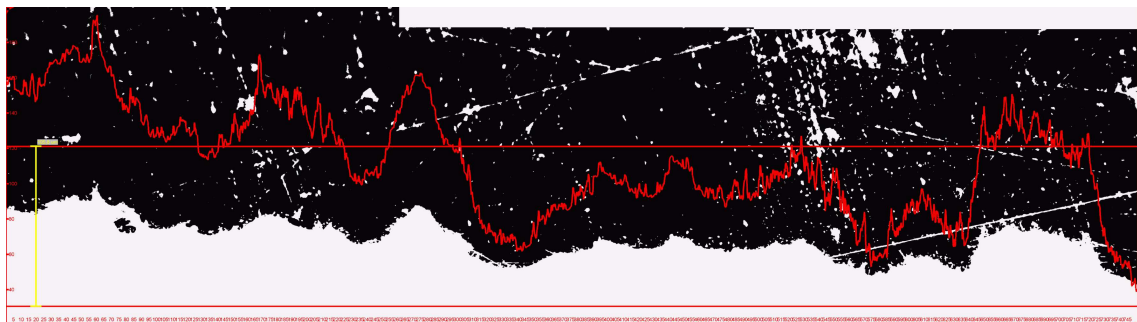


Obr. 30 Povrch ocelového adherendu, po binarizaci snímku

S těmito daty, kdy je výška profilu úměrná informaci o jasové složce obrazu, bylo dále pracováno v programu MS Excel. Díky tomu je možno stanovit střední čáru výškového profilu, od které je poté stanovována drsnost povrchu.

7.3.1 Měření drsnosti povrchu tryskaného

Po nalezení vhodného způsobu měření drsnosti bylo provedeno měření jednotlivých povrchů. Na obrázku 31 je zobrazena vybraná část tryskaného povrchu k měření. Oblast vykreslená pomocí křivky jasu je ohraničena obdélníkem v dolní části obrázku. Tato křivka ve své podstatě kopíruje měřený povrch a udává hodnoty, z kterých se vyhodnocuje daná drsnost. Svislá čára umístěná na levé straně udává výšku měřené drsnosti.



Obr. 31 Binarizovaný povrch vzorku tryskaného

7.3.2 Měření drsnosti povrchu broušeného kotoučovou bruskou

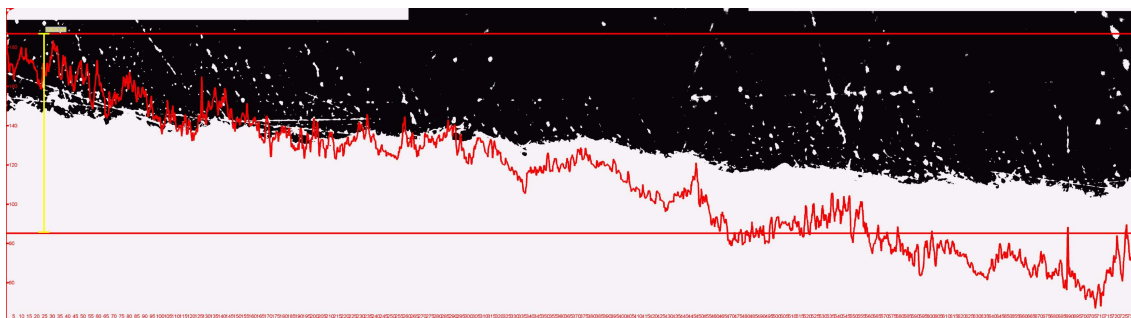
Obrázek 32 ukazuje povrch broušený kotoučovou bruskou zvolený k měření drsnosti. Křivka jasu vyobrazena pomocí ohraničení obdélníkem opět vykreslila reliéf povrchu a zaznamenala hodnoty potřebné k vyhodnocování drsnosti. Svislou čarou byla změřena výška měřené drsnosti.



Obr. 32 Binarizovaný povrch vzorku broušeného kotoučovou bruskou

7.3.3 Měření drsnosti povrchu broušeného brusným papírem drsností P60

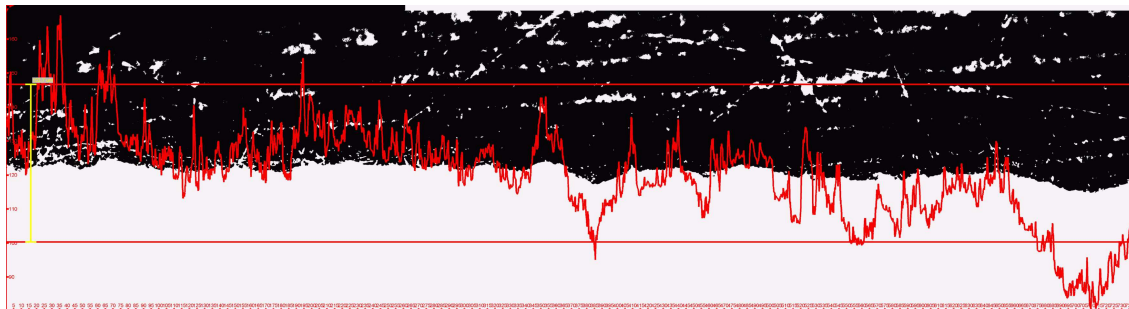
Obrázek 33 ukazuje vybraný úsek měřeného povrchu broušeného ručně brusným papírem o drsnosti P60. Jako v předchozích dvou případech i zde byly stejným způsobem změřeny a zaznamenány hodnoty drsnosti.



Obr. 33 Binarizovaný povrch vzorku broušeného brusným papírem drsností P60

7.3.4 Měření drsnosti povrchu broušeného brusným papírem drsností P120

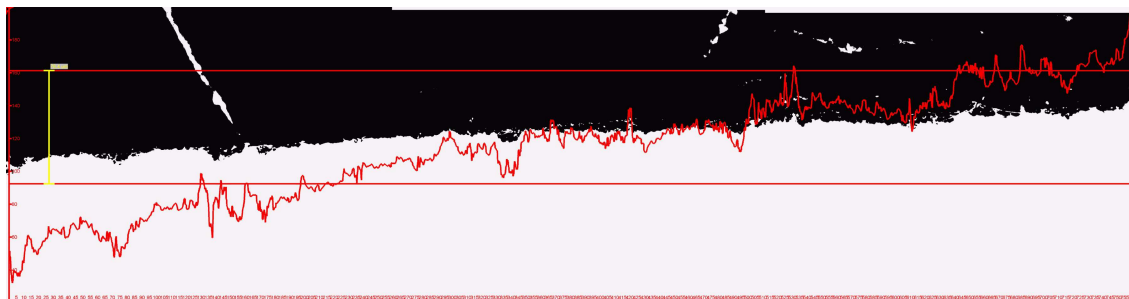
Na obrázku 34 je zobrazen vybraný úsek k měření povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P120. Opět stejný postup měření jako v předchozích případech. Podle použitého brusného papíru by tento povrch měl vykazovat menší drsnost oproti předchozímu vzorku. Přesto má dle vykreslené křivky hodnoty drsnosti vyšší. Tento fakt je potvrzen i hodnotou pevnosti při tahové zkoušce, která byla vyšší než u vzorku broušeného brusným papírem drsnosti P60.



Obr. 34 Binarizovaný povrch vzorku broušeného brusným papírem drsností P120

7.3.5 Měření drsnosti povrchu broušeného brusným papírem drsností P400

Obrázek 35 ukazuje poslední vybraný úsek měřeného povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P400. I tady byl postup úplně stejný jako ve všech předchozích případech. Podle vykreslené křivky a naměřených hodnot se drsnost u tohoto vzorku jeví jako nejmenší. I přes použití jemnějšího brusného papíru s drsností P400 měl vzorek při tahové zkoušce vyšší pevnost než vzorek broušený větší drsností P60.



Obr. 35 Binarizovaný povrch vzorku broušeného brusným papírem drsností P400

8 Vyhodnocení výsledků experimentálního měření drsnosti povrchu materiálu

Po všech předchozích přípravách vzorků k měření a samotnému měření drsnosti následovalo už samotné vyhodnocení drsnosti každého vzorku zvláště v tabulkovém editoru Excel.

8.1 Definice parametrů struktury povrchu dle normy

8.1.1 Definice povrchu:

1. skutečný povrch – povrch omezující těleso a oddělující ho od okolního prostředí [8].
2. profil povrchu – profil vzniklý jako průsečnice skutečného povrchu a dané roviny [8].
3. základní profil – je základem pro hodnocení parametrů [8].
4. profil drsnosti – profil odvozený ze základního profilu [8].

8.1.2 Definice délek:

1. základní délka – délka ve směru osy X, použitá pro rozpoznání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil [8].
2. vyhodnocovaná délka – délka ve směru osy X, použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu [8].

8.1.3 Názvy parametrů geometrických:

1. R – parametr: parametr vypočítaný z profilu drsnosti [8].
2. výstupek profilu – z povrchu ven směřující část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou X [8].
3. prohlubeň profilu – dovnitř směřující část posuzovaného profilu spojující dva přilehlé body na průsečíku profilu s osou X [8].
4. prvek profilu – výstupek profilu a přilehlá prohlubeň [8].
5. výška výstupku profilu (Z_p) – vzdálenost mezi osou X a nejvyšším bodem výstupku profilu [8].
6. hloubka prohlubně profilu (Z_v) – vzdálenost mezi osou X a nejnižším bodem prohlubně profilu [8].
7. výška prvku profilu (Z_t) – součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu [8].

8.1.4 Parametry profilu povrchu a jejich definice

1. největší výška výstupků profilu (R_p) – výška Z_p nejvyššího výstupku profilu v rozsahu základní délky [8].
2. největší hloubka prohlubně profilu (R_v) – hloubka Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [8].
3. největší výška profilu (R_z) – součet výšky Z_p nejvyššího výstupku profilu a hloubky Z_v nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [8].
4. průměrná výška prvků profilu (R_c) – průměrná hodnota výšek Z_t prvků profilu v rozsahu základní délky [8].
5. průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti (R_a) – aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic $Z(x)$ profilu drsnosti [7].
6. počet výstupků (R_{Pc}) – počet výstupků na úplnou vyhodnocovanou délku l_m [7].

8.2 Postup vyhodnocení naměřených dat

Pro správné hodnocení drsnosti povrchu bylo třeba stanovit vhodný způsob vyhodnocování povrchu. Vyhodnocení bylo provedeno z naměřených hodnot v programu *AnalySiS docu Five*. Získány byly hodnoty, ze kterých se musela pomocí metody trojčlenky získat skutečná výška obrazu každého bodu drsnosti. Z vypočtených dat byl sestrojen graf, který nám zobrazoval daný profil povrchu. Pro vytvoření primárního profilu, ze kterého se získávají profilové parametry, musel být graf osazen středovou čarou, která se získá lineárním proložením dat pomocí metody nejmenších čtverců. Tím byl vytvořen požadovaný graf ve vodorovné poloze.

8.2.1 Odečítání hodnot z naměřených dat

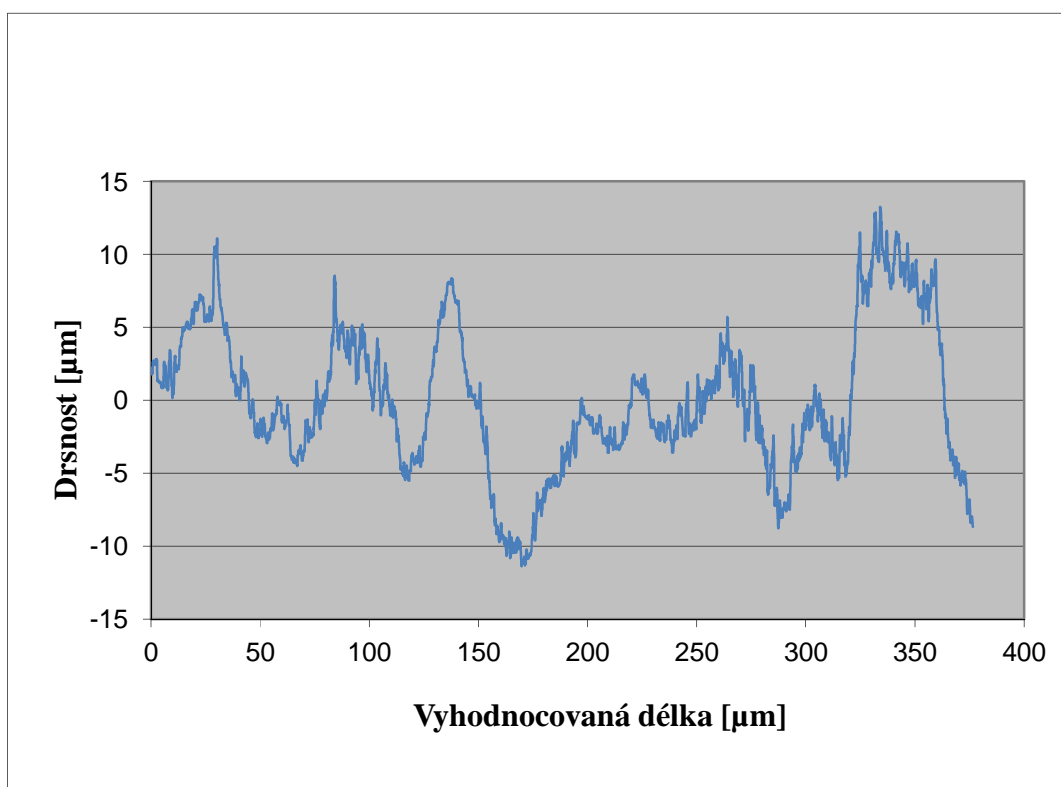
Z vytvořeného a upraveného grafu lze odečítat hodnoty potřebné k hodnocení daného povrchu. Pro věrohodné hodnocení povrchů byly vybrány a zjišťovány hodnoty dané normou ČSN ISO 4287:1998. Jsou to hodnoty R_p , R_v a Z_t . Hodnoty R_p a R_v jsou odečteny z grafu. Hodnoty Z_t jsou dány součtem hodnot R_p a R_v .

Další hodnoty vycházející opět z normy ČSN ISO 4287:1998, které jsou R_a , R_z a R_c vykazují hlavní výsledek o měřeném povrchu. Hodnota R_a je vypočtená z absolutních

hodnot pořadnic profilu drsnosti a udává jejich průměr v mikrometrech. Hodnota Rz byla získána sečtením nejvyšší hodnoty Zp a Zv. Poslední hodnota Rc byla vypočítána aritmetickým průměrem z hodnot Zt.

8.3 Vyhodnocení povrchu tryskaného keramickým abrazivem

Graf 2 zobrazuje povrch upravený metodou tryskání, který byl vybrán, měřen a poté vyhodnocován. Na vodorovné ose je zobrazena vyhodnocovaná délka vybraného vzorku. Tato délka odpovídá třem složeným obrázkům vyfoceným pod mikroskopem. Na svislé ose je znázorněna drsnost povrchu v mikrometrech.



Graf 2 Povrch tryskaný zobrazený v Excelu

Graf znázorňuje průběh měřené drsnosti vybrané části povrchu. Graf ukazuje, že hodnoty odpovídají profilu povrchu. Takto zjištěné hodnoty drsnosti povrchu velmi dobře shodují se skutečností. Z tohoto grafu lze vyčíst to, že drsnost povrchu je nejvyšší ze všech pozorovaných povrchů.

Tab. 4 Hodnoty odečtené z povrchu tryskaného

	Rp		Rv		Rc
Zp1	11,11	Zv1	-4,47	Zt1	15,58
Zp2	8,48	Zv2	-5,44	Zt2	13,92
Zp3	8,32	Zv3	-11,35	Zt3	19,67
Zp4	1,73	Zv4	-3,57	Zt4	5,3
Zp5	5,71	Zv5	-8,76	Zt5	14,47
Zp6	1,04	Zv6	-5,39	Zt6	6,43
Zp7	13,26	Zv7	-8,64	Zt7	21,9

Legenda k tabulce 4:

Rp = největší výška výstupku profilu, **Zp** = výška nejvyššího výstupku [8].

Rv = největší hloubka prohlubně profilu, **Zv** = hloubka nejnižší prohlubně[8].

Rc = průměrná výška prvků profilu, **Zt** = výška prvků profilu [8].

Jednotka - [μm]

Tab. 5 Hodnoty vypočtené z naměřených dat povrchu tryskaného.

Ra	3,97
Rz	24,61
Rc	13,90

Legenda k tabulce 5:

Ra = průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti [7].

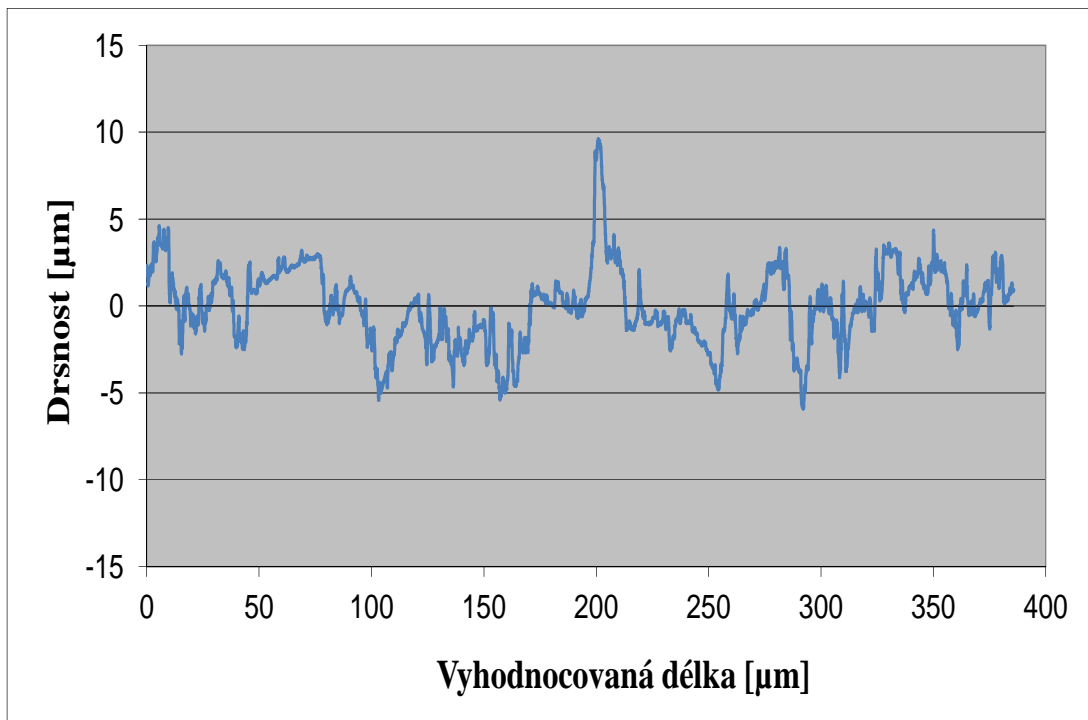
Rz = největší výška profilu[8].

Rc = průměrná výška prvků profilu[8].

Jednotka - [μm]

8.4 Vyhodnocení povrchu broušeného kotoučovou bruskou s keramickým pojivem

Na grafu 3 je zobrazen upravený povrch broušený kotoučovou bruskou, který byl vybrán, měřen a poté vyhodnocován. Na vodorovné ose je vyznačena délka, na které byl vzorek vyhodnocován. Tato délka je rovna třem složeným obrázkům vyfoceným kamerou pod mikroskopem. Na svislé ose je vynesena drsnost povrchu v mikrometrech.



Graf 3 Povrch broušený kotoučovou brusku zobrazený v Excelu

Graf 3 opět znázorňuje průběh měřené drsnosti vybrané části povrchu. Graf ukazuje, že hodnoty odpovídají profilu povrchu. Tyto zjištěné hodnoty drsnosti povrchu velmi dobře shodují se skutečností. Z tohoto grafu lze vyčíst to, že drsnost povrchu se výrazně liší od povrchu tryskaného.

Tab. 6 Hodnoty odečtené z povrchu broušeného kotoučovou brusku

Rp		Rv		Rc	
Zp1	4,49	Zv1	-2,65	Zt1	7,14
Zp2	2,58	Zv2	-2,4	Zt2	4,98
Zp3	2,51	Zv3	-1,06	Zt3	3,57
Zp4	3,08	Zv4	-5,35	Zt4	8,43
Zp5	1,61	Zv5	-3,29	Zt5	4,9
Zp6	1,26	Zv6	-4,48	Zt6	5,74
Zp7	9,53	Zv7	-5,34	Zt7	14,87
Zp8	2,01	Zv8	-1,37	Zt8	3,38
Zp9	3,33	Zv9	-2,38	Zt9	5,71
Zp10	3,45	Zv10	-4,79	Zt10	8,24
Zp11	4,2	Zv11	-5,78	Zt11	9,98
Zp12	2,24	Zv12	-4,04	Zt12	6,28
Zp13	3,01	Zv13	-2,29	Zt13	5,3

Legenda viz. tab. 4.

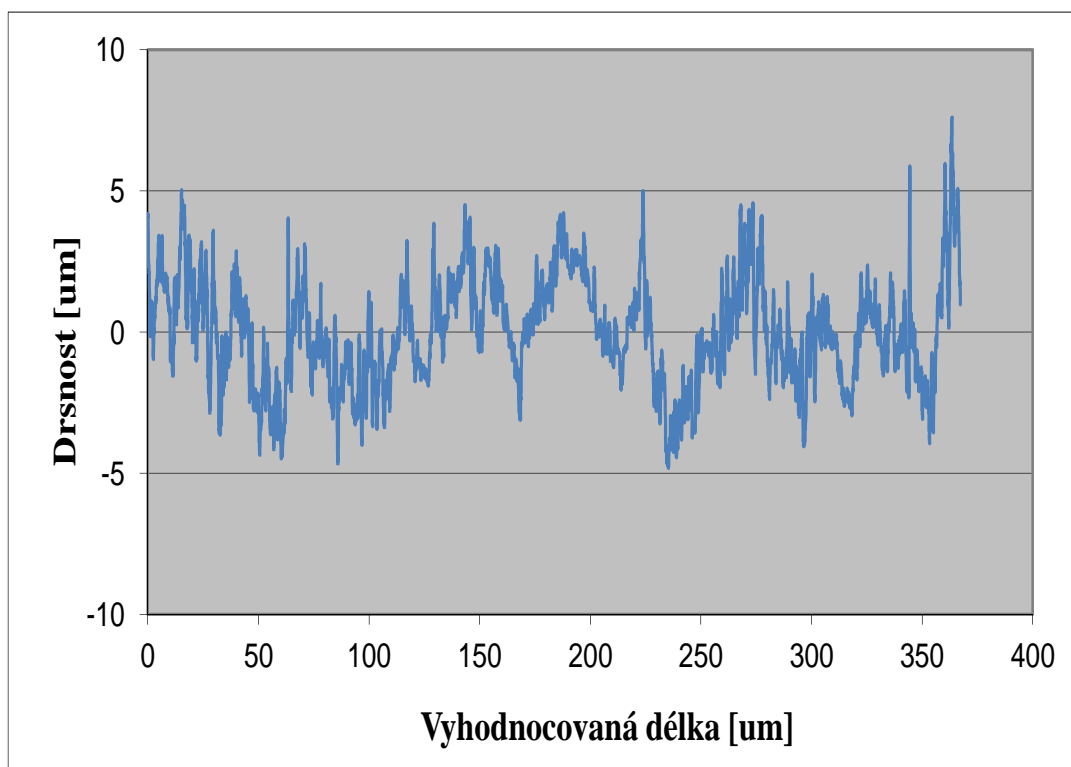
Tab. 7 Hodnoty vypočtené z naměřených dat povrchu broušeného kotoučovou brusku

Ra	1,67
Rz	15,31
Rc	6,81

Legenda viz. tab. 5

8.5 Vyhodnocení povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P60

Následující graf 4 ukazuje upravený povrch broušený ručně brusným papírem drsnosti P60, který byl vybrán k měření a následnému vyhodnocování. Vodorovná osa znázorňuje délku, na které byl vzorek měřen. Tato délka se rovná složení tří obrázků vyfocených kamerou pod mikroskopem. Na svislé ose je zobrazena drsnost povrchu v mikrometrech.



Graf 4 Povrch broušený brusným papírem drsnosti P60 zobrazený v Excelu

Graf 4 udává průběh měřené drsnosti vybrané části broušeného povrchu. Graf ukazuje, že hodnoty odpovídají skutečnému profilu povrchu. Tyto zjištěné hodnoty drsnosti povrchu se velmi dobře shodují se skutečností. Z tohoto grafu lze vyčíst, že počet výstupků povrchu je výrazně vyšší než u povrchu tryskaného a broušeného kotoučovou bruskou.

Tab. 8 Hodnoty odečtené z povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P60

Rp		Rv		Rc	
Zp1	3,4	Zv1	-1,51	Zt1	4,91
Zp2	5,03	Zv2	-1,01	Zt2	6,04
Zp3	3,58	Zv3	-3,63	Zt3	7,21
Zp4	2,86	Zv4	-4,34	Zt4	7,2
Zp5	4,02	Zv5	-2,21	Zt5	6,23
Zp6	1,6	Zv6	-4,61	Zt6	6,21
Zp7	1,42	Zv7	-3,43	Zt7	4,85
Zp8	3,22	Zv8	-1,83	Zt8	5,05
Zp9	4,49	Zv9	-0,62	Zt9	5,11
Zp10	2,95	Zv10	-3,09	Zt10	6,04
Zp11	4,21	Zv11	-2,04	Zt11	6,25
Zp12	4,99	Zv12	-4,7	Zt12	9,69
Zp13	4,56	Zv13	-3,89	Zt13	8,45
Zp14	2,04	Zv14	-2,89	Zt14	4,93
Zp15	7,59	Zv15	-3,94	Zt15	11,53

Legenda viz. tab. 4.

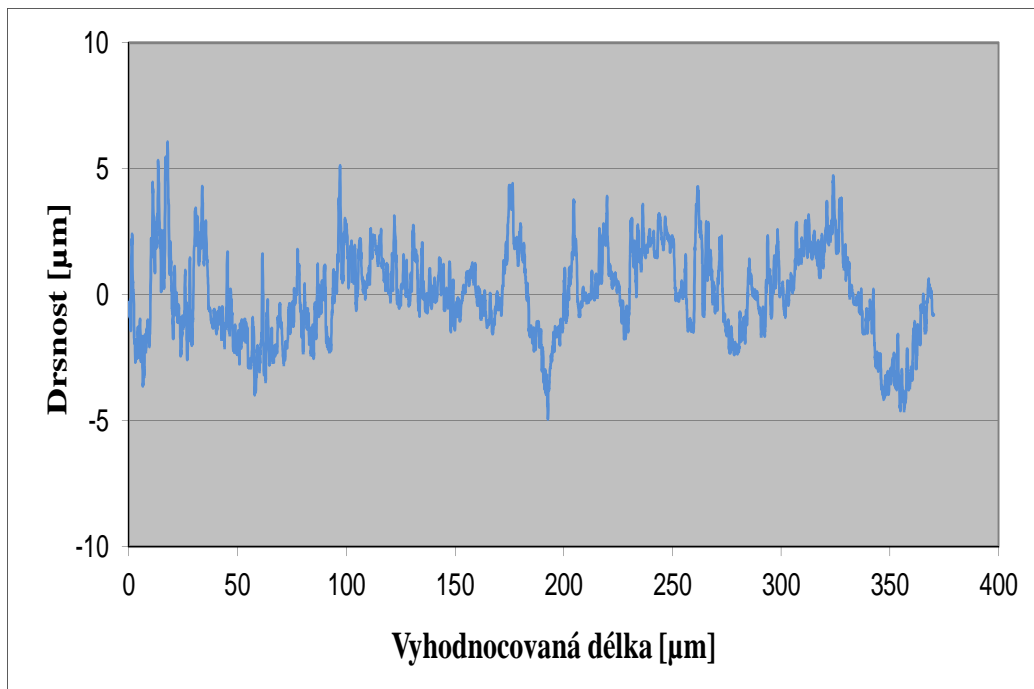
Tab. 9 Hodnoty vypočtené z naměřených dat povrchu broušeného brusným papírem P60

Ra	1,52
Rz	12,29
Rc	6,65

Legenda viz. tab. 5.

8.6 Vyhodnocení povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P120

Níže uvedený graf 5 ukazuje profil povrchu broušeného ručně brusným papírem drsnosti P120, který byl vybrán k měření a vyhodnocování. Vodorovná osa znázorňuje délku v mikrometrech, na které byl vzorek měřen. Délka se rovná složení tří obrázků vyfocených kamerou pod mikroskopem. Na svislé ose je zobrazena drsnost povrchu v mikrometrech.



Graf 5 Povrch broušený brusným papírem drsnosti P120 zobrazený v Excelu

Graf 5 ukazuje průběh měřené drsnosti vybrané části ručně broušeného povrchu. Tento graf ukazuje, že hodnoty odpovídají skutečnému profilu povrchu. Zjištěné hodnoty drsnosti povrchu se velmi dobře shodují se skutečností. Tento graf nám udává to, že drsnost povrchu je velmi podobná jako u vzorku broušeného brusným papírem o větší drsnosti P60. Počet výstupků povrchu je rovněž srovnatelný.

Tab. 10 Hodnoty odečtené z povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P120

Rp		Rv		Rc	
Zp1	6,05	Zv1	-2,57	Zt1	8,62
Zp2	4,29	Zv2	-3,98	Zt2	8,27
Zp3	1,77	Zv3	-2,42	Zt3	4,19
Zp4	5,1	Zv4	-0,57	Zt4	5,67
Zp5	2,59	Zv5	-1,48	Zt5	4,07
Zp6	1,22	Zv6	-1,49	Zt6	2,71
Zp7	4,4	Zv7	-4,94	Zt7	9,34
Zp8	3,74	Zv8	-0,85	Zt8	4,59
Zp9	3,89	Zv9	-1,7	Zt9	5,59
Zp10	3,46	Zv10	-1,38	Zt10	4,84
Zp11	4,22	Zv11	-2,37	Zt11	6,59
Zp12	1,4	Zv12	-1,64	Zt12	3,04
Zp13	4,6	Zv13	-4,6	Zt13	9,2

Legenda viz. tab. 4.

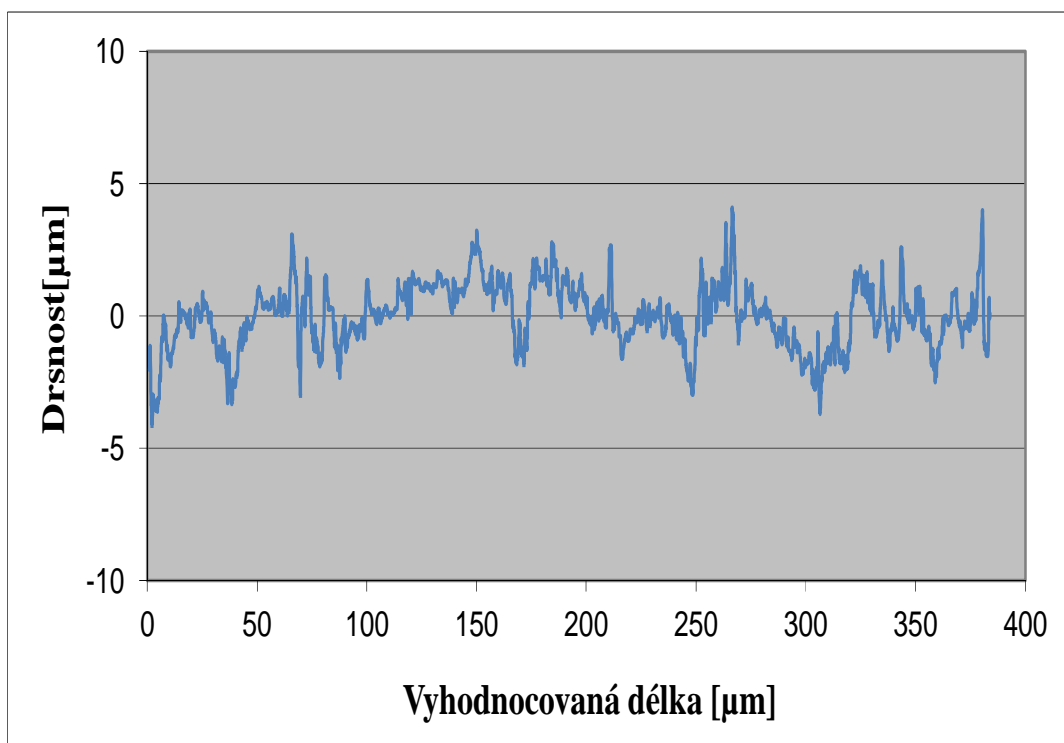
Tab. 11 Hodnoty vypočtené z naměřených dat povrchu broušeného brusným papírem P120

Ra	1,43
Rz	10,99
Rc	5,90

Legenda viz. tab. 5.

8.7 Vyhodnocení úpravy povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P400

Uvedený graf 6 ukazuje profil povrchu broušeného ručně brusným papírem drsnosti P400, který byl měřen a vyhodnocován. Na vodorovné ose je vynesena délka v mikrometrech, na které byl vzorek měřen. Délka se rovná složení tří obrázků vyfocených kamerou pod mikroskopem. Na vertikální ose je zobrazena drsnost povrchu udávaná v mikrometrech.



Graf 6 Povrch broušený brusným papírem drsnosti P400 zobrazený v Excelu

Na grafu 6 je zobrazen průběh měřené drsnosti vybrané části ručně broušeného povrchu drsností P400. Graf ukazuje, že hodnoty odpovídají skutečnému profilu povrchu. Naměřené hodnoty drsnosti povrchu se velmi dobře shodují se skutečností. Z grafu lze vyčíst, že drsnost tohoto povrchu broušeného nejjemnějším brusným papírem je nejmenší ze všech měřených vzorků.

Tab. 12 Hodnoty odečtené z povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P400

Rp		Rv		Rc	
Zp1	0,89	Zv1	-3,28	Zt1	4,17
Zp2	1,09	Zv2	0,01	Zt2	1,1
Zp3	3,05	Zv3	-2,98	Zt3	6,03
Zp4	2,1	Zv4	-1,78	Zt4	3,88
Zp5	1,52	Zv5	-2,35	Zt5	3,87
Zp6	1,23	Zv6	-0,28	Zt6	1,51
Zp7	3,16	Zv7	-1,77	Zt7	4,93
Zp8	2,69	Zv8	-0,66	Zt8	3,35
Zp9	2,65	Zv9	-1,47	Zt9	4,12
Zp10	0,56	Zv10	-2,88	Zt10	3,44
Zp11	4,03	Zv11	-0,9	Zt11	4,93
Zp12	1,37	Zv12	-3,64	Zt12	5,01
Zp13	1,76	Zv13	-2,5	Zt13	4,26
Zp14	3,99	Zv14	-1,47	Zt14	5,46

Legenda viz. tab. 4.

Tab. 13 Hodnoty vypočtené z naměřených dat povrchu broušeného brusným papírem P400

Ra	0,95
Rz	7,67
Rc	4,00

Legenda viz. tab. 5.

9 Hodnocení vlivu stavu povrchu kovu na pevnost lepeného spoje

Vliv stavu povrchu kovu na pevnost lepených spojů byl předpokládán ještě před začátkem všech měření a hodnocení. Už samotná úprava povrchů vzorků nám mohla podle vizuálního pohledu napovědět, jak velká bude drsnost jednotlivých povrchů. Ovšem po provedené tahové zkoušce se ukázalo, že vyšší drsnost povrchu není rozhodující pro větší pevnost povrchu. Z tohoto důvodu bylo potřeba provést měření drsnosti a následně ji vyhodnotit dle daných parametrů.

9.1 Výsledné hodnocení vlivu drsnosti povrchu na pevnost spoje

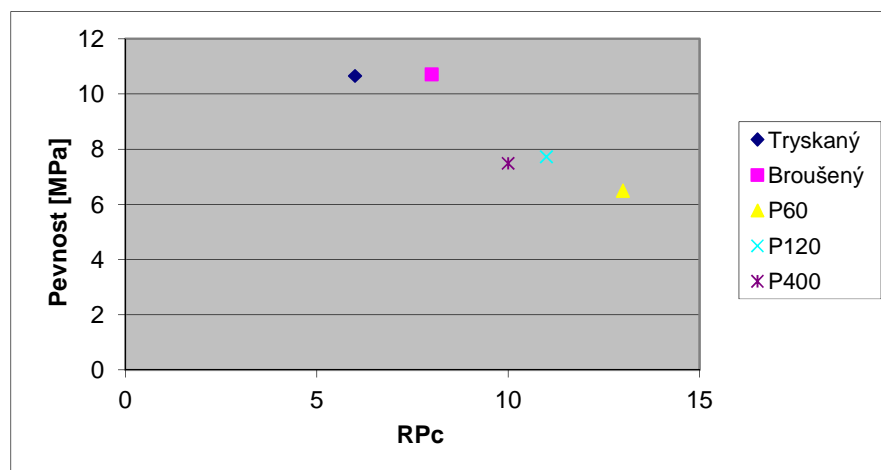
Pro celkový souhrn všech měření jsou naměřené hodnoty shrnuty v tabulce 14. Tato tabulka dává přehled všech naměřených hodnot meze pevnosti a hodnot vypočtených z drsnosti jednotlivých povrchů.

Tab. 14 Souhrnné porovnání hodnot meze pevnosti s vypočtenými hodnotami drsnosti

Povrch vzorku		Rm [MPa]	Průměr Rm [MPa]	Ra[μm]	Rz[μm]	Rc[μm]	RPc
Tryskaný keramickým abrazivem	Vzorek 1	11,814	10,646	3,97	24,61	13,9	6
	Vzorek 2	9,478					
Broušený kotoučovou bruskou	Vzorek 1	10,226	10,706	1,67	15,31	6,81	8
	Vzorek 2	11,185					
Ručně broušený P60	Vzorek 1	6,724	6,492	1,52	12,29	6,65	13
	Vzorek 2	6,26					
Ručně broušený P120	Vzorek 1	7,805	7,724	1,43	10,99	5,9	11
	Vzorek 2	7,642					
Ručně broušený P400	Vzorek 1	7,443	7,484	0,95	7,67	4	10
	Vzorek 2	7,525					

Měření a vyhodnocení drsnosti bylo provedeno na 5 z 10 vzorků roztržených při tahové zkoušce. Povrch ostatních 5 vzorků se považuje za velmi podobný a tím se předpokládají i obdobné hodnoty drsnosti jako u vzorků měřených.

Přestože hodnoty R_a , R_z a R_c jdou u všech vzorků sestupně dle nejvyšší drsnosti po nejnižší, je pevnost obou vzorků broušených brusným papírem drsnosti P60 nižší, než u vzorků broušených méně drsným brusným papírem drsnosti P120 a P400. Jedna z možných velmi pravděpodobných příčin tohoto rozdílu v hodnotách pevnosti je to, že počet výstupků profilu povrchu je vyšší než u vzorků P120 a P400. Lepidlo nanesené na povrch adherendu při větším počtu výstupků nezateče do všech prohlubní. Tímto zůstane a následně zatvrdne na vrcholcích výstupků. Mezi zatvrdlým lepidlem povrchem adherendu vzniknou vzduchové bubliny a důsledkem toho se pevnost spoje snižuje. Naopak při malém počtu vrcholků lepidlo nemá potřebnou adhezi pro zachycení na povrchu adherendu a tím dochází ke smáčivosti lepidla a snížení pevnosti spoje.



Graf 7 Vliv počtu výstupků na pevnost spoje

Legenda ke grafu 7:

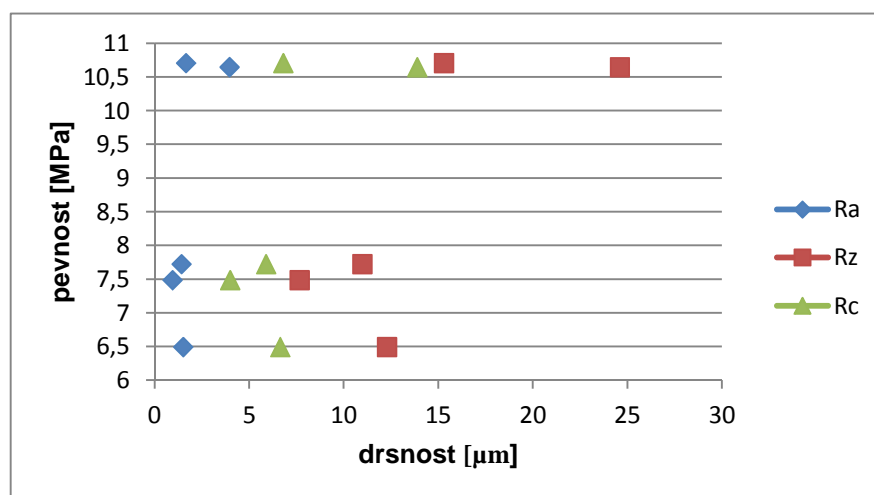
RPc - počet výstupků na jednotku délky 300 μm

Druhá důležitá příčina pro hodnocení je šířka prvků profilu mezi jednotlivými výstupky. Čím je větší šířka prvků profilu, tím má lepidlo větší možnost se dostat do prohlubní povrchu adherendu. Bude tím omezen vznik vzduchových bublin a zvýšena pevnost spoje. U povrchu tryskaného a broušeného kotoučovou bruskou je toto tvrzení dobře rozpoznatelné. Povrch tryskaný má šířku prvků profilu větší než povrch broušený a také větší počet výstupků profilu. Proto je jeho pevnost spoje nejvyšší. U tryskaného

vzorku 2 byla pevnost zase nižší než u obou vzorků broušených kotoučem. Důvodem budou zřejmě mírně odlišné hodnoty drsnosti Ra, Rz a Rc.

9.2 Souhrnný vztah hodnot drsnosti a pevnosti

Názorné zobrazení vztahu hodnot pevnosti a vypočtených hodnot Ra, Rz a Rc je ukázáno na grafu 8. Na svislé ose je zobrazena průměrná pevnost (MPa) dvou stejně upravených povrchů. Počet hodnot pevností je pro každou hodnotu Ra, Rz a Rc roven 5. Na vodorovné ose je zobrazena drsnost (μm). Různě rozmístěné body v daných tvarech znázorňují výše zmíněné hodnoty drsnosti.



Graf 8 Vztah hodnot pevnosti a drsnosti

Legenda ke grafu 8:

Ra = průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti [7]

Rz = největší výška profilu [8]

Rc = průměrná výška prvků profilu [8]

Z grafu 8 lze vyčíst, že velikost drsnosti povrchu má význam pro pevnost spojů od hodnoty 15 μm výše u parametru Rz. Pro hodnocení drsnosti lze zvolit kterýkoli z těchto 3 parametrů. Každý z těchto 3 parametrů uvádí jinou hodnotu drsnosti a pro posouzení vlivu je vhodnější vzít průměrnou hodnotu Ra nebo Rc. Hodnota Rz nám říká pouze nejvyšší výšku profilu, která není vhodná k posouzení drsnosti povrchu. Dle zobrazení vztahu hodnot pevnosti a drsnosti lze říci, že čím více parametrů drsnosti by bylo měřeno a vyhodnocováno, tím by se zvyšovalo i objektivnější určení vztahu pevnosti a drsnosti.

9.3 Doporučení pro vhodnou úpravu povrchu kovu při lepení

Problematika úpravy povrchu kovu před lepením je poměrně rozsáhlá a ve strojírenském oboru velmi dobře využitelná. Po provedení tohoto experimentu mohu pouze doporučit vhodnou úpravu povrchu kovu před lepením. Z provedených metod úprav povrchu je nejvhodnější použití metody tryskání keramickým abrazivem. Jako druhý způsob úpravy povrchu bych zvolil broušení kotoučovou bruskou. Její účinek je rovněž dostačující, stejně jako u tryskaného povrchu.

U ručně broušených povrchů by se měla volit optimální drsnost brusného papíru. V tomto experimentu se ukázalo, že větší drsnost povrchu nezajistí vyšší pevnost. Optimální drsnost brusného papíru bych v tomto případě zvolil P120. Tento způsob úpravy povrchu je určitě nejdostupnější ale také nejpracnější.

10 Závěr

Vlastní diplomová práce se věnuje experimentálnímu hodnocení vlivu vybraných úprav povrchů na pevnost lepeného spoje.

První část je zaměřena na druhy lepidel, technologii lepení a zvláštní pozornost je věnována epoxidovému lepidlu, které bylo použito při lepení. Je výhodné požití epoxidových pryskyřic jako lepidel k nejrůznějším materiálům, především u kovů. Velmi dobrá adheze ke kovům spolu s dobrými mechanickými a tepelnými vlastnostmi způsobila, že epoxidy mají důležitou roli v lepení kovů.

Další část je věnována základním typům lepených spojů, jejich navrhování a významu pevnosti pro lepený spoj. Jako nejčastější spoj se používá jednoduchý přeplátovaný spoj. Nosnost lepených spojů závisí na mechanických vlastnostech. Pevnost spoje je charakterizována jako soubor pevností nebo složek pevnosti.

V další části práce se věnuji základním charakteristikám povrchu, především drsností a jejímu vlivu na pevnost spoje. Drsnost ukazuje kvantitativní měřítko stop výrobního procesu nového povrchu a dalších složek, které tvoří profil povrchu, např. struktura materiálu. Velice důležitý je i proces odmaštění povrchu před lepením. Dále se práce zabývá posuzováním drsnosti povrchu. V této době se profilová data zpracovávají a vyhodnocují statistickými a topografickými metodami na počítačích.

Jedna kapitola je zaměřena na samostatnou optickou mikroskopii, používané mikroskopy pro laboratorní účely a zviditelnění struktury pomocí různých optických metod. Pro pozorování je důležitá příprava metalografického vzorku, která má jistá pravidla, která musí zajistit, aby se struktura vzorku v průběhu přípravy nezměnila a nebyla danými operacemi ovlivňována. Krátká kapitola je věnována mechanické zkoušce tahem a určení meze pevnosti a meze kluzu.

Druhá část práce je zaměřena na provedení praktické části. Cílem experimentálního měření a vyhodnocování bylo zjistit vliv úpravy povrchu kovu na pevnost lepeného spoje. Měřeny a vyhodnocovány byly povrchy upraveny následujícími způsoby. Povrch tryskaný (pískovaný) keramickým abrazivem, broušený kotoučovou bruskou (kotouč s keramickým pojivem, pro velký úběr), ručně broušený brusným papírem o drsnosti P60,

ručně broušený brusným papírem o drsnosti P120 a ručně broušený brusným papírem o drsnosti P400.

Po úpravě povrchu a slepení dvou kovových adherendů nám vznikly požadované vzorky, které mohly být použity pro tahovou zkoušku. Mez pevnosti ve smyku jednoduše přeplátovaných spojů byla provedena na univerzálním zkušebním stroji ZD 10/90 se sběrem dat a jejich vyhodnocením v PC. Tím byly získány hodnoty meze pevnosti potřebné pro vyhodnocování vlivu drsnosti na pevnost spoje.

Ke stanovení drsnosti povrchu v kolmých řezech k povrchu byl použit optický mikroskop *Neophot 32* s 5 Mpix kamerou *Olympus* a software *Olympus AnalySiS docu Five*. Tento software nabízel více možností měření drsnosti a proto musel být nejprve nalezen vhodný způsob měření drsnosti. Jako vhodný bylo zvoleno měření vybraného úseku povrchu pomocí binarizace a automatického vyhodnocení. Tyto data, kdy je výška profilu úměrná informaci o jasové složce obrazu, byly dále zpracovávány v programu MS Excel.

V závěrečné části práce je vyhodnocení výsledků experimentálního měření drsnosti povrchu materiálu. Pro vyhodnocení jsem musel sestrojít požadovaný graf z naměřených hodnot každého povrchu zvlášť. Dále jsem si musel zvolit hodnoty pro hodnocení drsnosti uvedené v příslušné normě. Byly to hodnoty R_a (průměrná aritmetická úchylka profilu drsnosti), R_z (největší výška profilu) a R_c (průměrná výška prvků profilu). Tyto hodnoty jsem porovnal s hodnotami pevnosti a vyhodnotil vliv úpravy povrchu materiálu na pevnost spoje. Dle výsledků lze tvrdit, že největší význam z těchto 3 výše uvedených hodnot má R_z . Se stoupající hodnotou drsnosti bude mít vyšší pevnost. Za tohoto stavu lze říci, že by se vzrůstajícím počtem hodnot R_a , R_c a R_z vzrůstala i možnost objektivnějšího určení vztahu pevnosti a drsnosti.

V úplném závěru práce jsem uvedl doporučení pro použití nejvhodnějšího způsobu úpravy povrchu materiálu. Jako nejvhodnější pro lepení kovů se ukázal povrch tryskaný a nejméně vhodný byl povrch broušený ručně brusným papírem drsnosti P60. Doporučení vychází z experimentálního měření na malém počtu vzorků a pro praktické použití bude třeba závěry ověřit na větším počtu vzorků.

11 Literatura

- [1] PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. Vydalo SNTL – Nakladatelství technické literatury, n.p., Spálená 51, 113 02 Praha 1, v roce 1980. ISBN 80-89041-88-4.
- [2] MLEZIVA J., ŠŇUPÁREK J.: *Polymery, výroba, struktura, vlastnosti a použití*. Vydalo SOBOTÁLES, Praha 2000. ISBN 80-85920-72-7.
- [3] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. Vydalo akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno 2001. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] HOŠEK, Jan. *Přehled klasických a moderních mikroskopických metod*. [online]. [cit.2011-09-25]. Dostupné z: <<http://www.fsid.cvut.cz/cz/U2102/hosek/clanky/Mikroskopie.pdf>>.
- [5] *Drsnost povrchu*. [online]. [cit.2011-10-14]. Dostupné na: <http://wood.mendelu.cz/cz/sections/FEM/CFD/public/files/Pomocne/drsnost_povrchu.pdf>.
- [6] *Návody k laboratorním úlohám*. [online]. [cit.2011-10-02]. Dostupné na: <http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/Návody_k_laboratorním_úlohám_-_mikroskopie.pdf>.
- [7] ČSN EN 10049. *Měření průměrné aritmetické úchylnosti profilu drsnosti Ra a počtu vrcholů R_{Pc} plochých kovových výrobků*. Praha : Český normalizační institut, 2006. 12 s.
- [8] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha : Český normalizační institut, 1999. 24 s.
- [9] HOBSON, Taylor. *Precision Ltd*. [online]. [cit.2011-11-07]. Dostupné na: <http://www.imeco-th.cz/Download/Clanky/TH_News_Cut-off.pdf>.
- [10] KALCIK, Karel. *Epoxy 1200 známé – neznámé*. [online]. [cit.2011-10-18]. Dostupné na: <http://www.mo-na-ko.net/clanky3/123_Epoxyd/clanek.htm>.

[11] EPOXY 1200. *100G, Prolep, Lepidla, Tmely, Těsnění, Loctite*. [online].

[cit.2011-09-06]. Dostupné na:

<<http://www.prolep.cz/?p=productsMore&iProduct=440>>.

[12] GREGOR, Miroslav. *UHU - Lepení kovů*. [online]. [cit.2011-11-12]. Dostupné

na: <<http://www.uhu.cz/lepeni-kovu>>.

[13] GREGOR, Miroslav. *Lepidla – tmely, odborné poradenství*. [online].

[cit.2011-11-12]. Dostupné na: < <http://www.gluetechology.eu/4852/lepeni-lepenie/>>.

[14] PŘÍRUČKA LEPIDEL A PŘÍPRAVY POVRCHU, *technologie, aplikace a výroba*. Vydal: Ebnesajjad, Sina © 2011 Elsevier. [online]. [cit.2011-09-03].

Dostupné na:

<http://www.knovel.com/web/portal/browse/display?_EXT_KNOVEL_DISPLAY_bookid=4062>.

[15] MACHALÍKOVÁ J., CHÝLKOVÁ J., ŠELEŠOVSKÁ R.. *Tribotechnické aplikace vybraných instrumentálních metod*. Vědeckotechnický sborník ČD č.

21/2006. [online]. [cit.2011-11-21]. Dostupné na:

<<http://www.cd rail.cz/VTS/CLANKY/vts21/2112.pdf>>.

[16] PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu II*. Vydalo akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno 2002. ISBN 80-7204-248-2.

12 Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbols:

E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	síla	[N]
R _m	mez pevnosti	[MPa]
e _p	plastická deformace	[%]

Zkratky:

nm	jednotka délky v nanometrech
μm	jednotka délky v mikrometrech
cm ²	jednotka plochy v centimetrech čtverečních
mm	jednotka délky v milimetrech
min	jednotka času v minutách
hod	jednotka času v hodinách
hm	hmotnostní
MPa	jednotka tlaku v Mega Pascalech
N	jednotka síly v Newtonech
°C	jednotka teploty ve stupních Celsia
%	procento
PC	počítač
IPA	isopropylalkohol
NaOH	roztok louhu sodného
P60, P120, P400	hodnota drsnosti brusného papíru

13 Seznam obrázků

Obr. 1: Znázornění struktury lepeného spoje [13]	12
Obr. 2: Obyčejný přeplátovaný spoj [1]	13
Obr. 3: Přeplátovaný spoj se zářezem [1]	13
Obr. 4: Dvojitý přeplátovaný spoj [1].....	13
Obr. 5: Drážkový spoj [1]	13
Obr. 6: Přeplátovaný spoj symetrický [1].....	13
Obr. 7: Tahové zatěžování [1]	13
Obr. 8: Tlakové zatěžování [1]	13
Obr. 9: Stříhové zatěžování [1].....	13
Obr. 10: Namáhání štěpením [1].....	13
Obr. 11: Odlupovací namáhání [1]	13
Obr. 12: Tah –tlak [1]	15
Obr. 13: Stříh [1].....	15
Obr. 14: Stříh [1].....	15
Obr. 15: Doporučení pro konstrukční použití lepených spojů [1]	16
Obr. 16: Osazení středové čáry profilu [6]	22
Obr. 17: Filtrování primárního profilu - vznik profilů drsnost a vlnitosti [6].....	23
Obr. 18: Smluvní diagram napětí – deformace [3]	34
Obr. 19: Vzorky s upraveným povrchem k lepení.....	38
Obr. 20: Povrchy vzorků zvětšený 40x pod lupou.....	39
Obr. 21: Vzorky tryskané keramickým abrazivem po zkoušce tahem ve smyku.....	43
Obr. 22: Vzorky broušené na kotoučové brusce po zkoušce tahem ve smyku.....	43
Obr. 23: Vzorky broušené brusným papírem o drsnosti P60 po zkoušce tahem ve smyku.....	43
Obr. 24: Vzorky broušené brusným papírem o drsnosti P120 po zkoušce tahem ve smyku.....	44
Obr. 25: Vzorky broušené brusným papírem o drsnosti P400 po zkoušce tahem ve smyku.....	44
Obr. 26: Vzorky vybrané k měření	46
Obr. 27: Drsnost povrchu zvětšená 125x pod mikroskopem.....	47
Obr. 28: Povrch ocelového adherendu zvětšený 500x.....	48
Obr. 29: Modul pro měření tloušťky vrstev v programu AnalySIS. Docu	49

Obr. 30: Povrch ocelového adherendu, po binarizaci snímku	50
Obr. 31: Binarizovaný povrch vzorku tryskaného	50
Obr. 32: Binarizovaný povrch vzorku broušeného kotoučovou bruskou	51
Obr. 33: Binarizovaný povrch vzorku broušeného brusným papírem drsností P60	51
Obr. 34: Binarizovaný povrch vzorku broušeného brusným papírem drsností P120	52
Obr. 35: Binarizovaný povrch vzorku broušeného brusným papírem drsností P400	52

14 Seznam tabulek

Tab. 1: Příklady použití povrchové úpravy kovových materiálů před lepením [12].....	21
Tab. 2: Základní definice veličin R_y , R_a , R_z , R_{max} [5].....	24
Tab. 3: Přehled hodnot naměřených při tahové zkoušce	41
Tab. 4: Hodnoty odečtené z povrchu tryskaného.....	56
Tab. 5: Hodnoty vypočtené z naměřených dat povrchu tryskaného.....	56
Tab. 6: Hodnoty odečtené z povrchu broušeného kotoučovou brusku.....	57
Tab. 7: Hodnoty vypočtené z naměřených dat povrchu broušeného kotoučovou brusku.....	57
Tab. 8: Hodnoty odečtené z povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P60.....	59
Tab. 9: Hodnoty vypočtené z naměřených dat povrchu broušeného brusným papírem P60	59
Tab. 10: Hodnoty odečtené z povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P120.....	60
Tab. 11: Hodnoty vypočtené z naměřených dat povrchu broušeného brusným papírem P120	61
Tab. 12: Hodnoty odečtené z povrchu broušeného brusným papírem drsnosti P400.....	62
Tab. 13: Hodnoty vypočtené z naměřených dat povrchu broušeného brusným papírem P400	62
Tab. 14: Souhrnné porovnání hodnot meze pevnosti s vypočtenými hodnotami drsnosti.....	63

15 Seznam grafů

Graf 1: Záznam výsledků tahové zkoušky vzorků 1.....	42
Graf 2: Povrch tryskaný zobrazený v Excelu	55
Graf 3: Povrch broušený kotoučovou bruskou zobrazený v Excelu.....	57
Graf 4: Povrch broušený brusným papírem drsnosti P60 zobrazený v Excelu.....	58
Graf 5: Povrch broušený brusným papírem drsnosti P120 zobrazený v Excelu.....	60
Graf 6: Povrch broušený brusným papírem drsnosti P400 zobrazený v Excelu.....	61
Graf 7: Vliv počtu výstupků na pevnost spoje.....	64
Graf 8: Vztah hodnot pevnosti a drsnosti	65

16 Seznam příloh

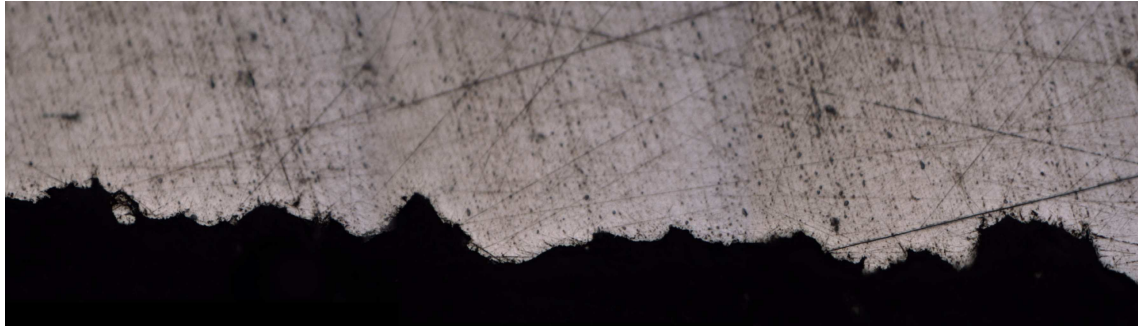
Příloha A: Ukázka profilů ocelových adherendů zvětšených pod mikroskopem.

Příloha B: Ukázka povrchů broušených vzorků.

Příloha A:

Ukázka profilů ocelových adherendů zvětšených pod mikroskopem

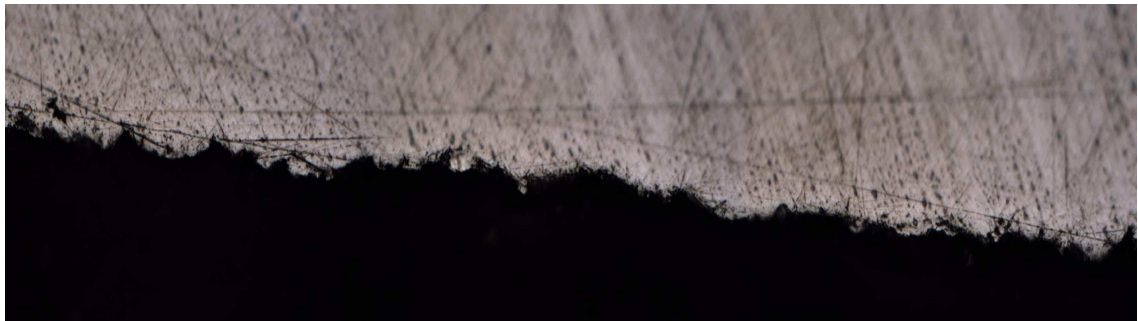
1) Tryskaný povrch ocelového adherendu zvětšený 500x



2) Povrch ocelového adherendu broušený kotoučovou bruskou zvětšený 500x



3) Povrch ocelového adherendu broušený ručně brusným papírem drsnosti P60 zvětšený 500x



4) Povrch ocelového adherendu broušený ručně brusným papírem drsnosti P120 zvětšený 500x



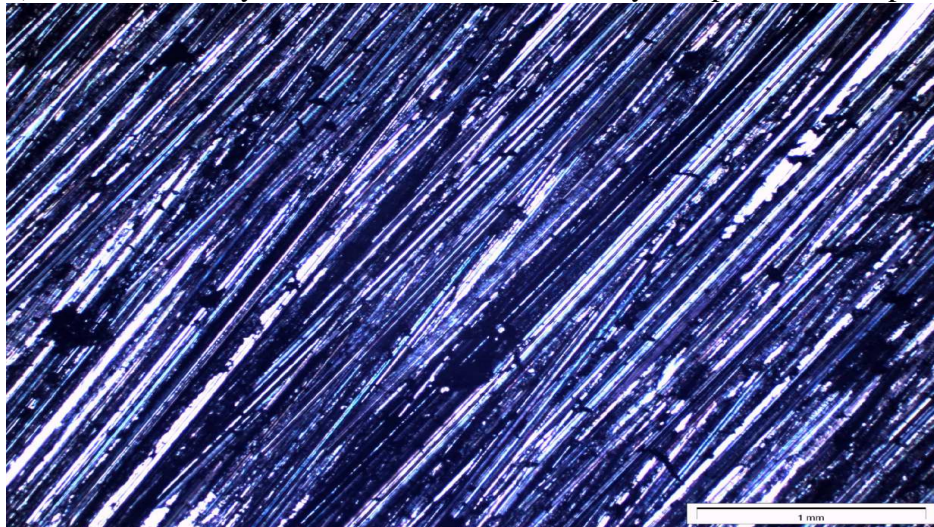
5) Povrch ocelového adherendu broušený ručně brusným papírem drsnosti P400 zvětšený 500x



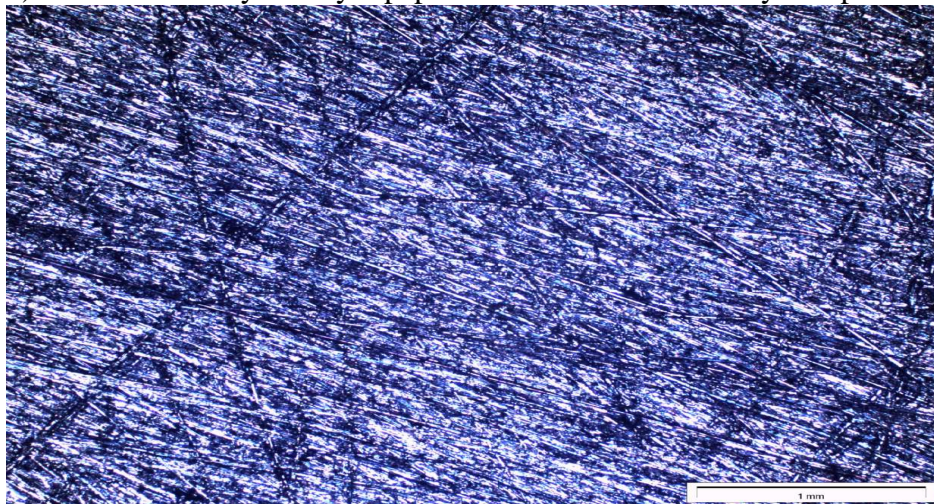
Příloha B:

Ukázka povrchů broušených vzorků.

1) Povrch broušený kotoučovou bruskou zvětšený 32x pod mikroskopem.



2) Povrch broušený brusným papírem drsností P60 zvětšený 32x pod mikroskopem



3) Povrch broušený brusným papírem drsností P400 zvětšený 32x pod mikroskopem

