

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

STUDIUM VLIVU ÚPRAVY POVRCHU NA KVALITU  
SPOJE KOV-PLAST

**AUTOR:** Filip Jeník

**STUDIJNÍ PROGRAM:** Teoretický základ strojního inženýrství

**VEDOUCÍ PRÁCE:** prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.

**PRAHA 2017**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jeník** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **439003**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Studium vlivu úpravy povrchu na kvalitu spoje kov-plast**

Název bakalářské práce anglicky:

**Influence of the Surface Treatment on the Plastic-Metal Adhesive Join**

Pokyny pro vypracování:

Zásady pro vypracování:

Cíl: experimentálně stanovit vliv povrchové úpravy na pevnost lepeného spoje

Postup:

1. literární rešerše týkající se lepení a adheze
2. volba metody vhodné povrchové úpravy
3. vybrat metodu testování vhodnou k aplikaci v laboratořích UMI a provést experiment
4. diskuse a závěr

Rozsah průvodní zprávy: 25 - 30 stran

Rozsah grafických prací: dle potřeby

Seznam doporučené literatury:

- [1] Handbook of Adhesives and Sealants (McGraw-Hill Handbooks), Second Edition. Edward M. Petrie. McGraw-Hill Education; 2 edition (January 2, 2007) ISBN-13: 978-0-07-147916-5  
[2] EBNEAJJAD, Sina a Cyrus EBNEAJJAD. Surface treatment of materials for adhesive bonding. Second edition. Elsevier, 2014. ISBN 9780323264358.  
[3] ČSN EN 1465: Lepidla - Stavování pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav. ÚNMZ, 2009.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


**prof. RNDr. Petr Špatenka CSc., ústav materiálového inženýrství FS**


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


Datum zadání bakalářské práce: **24.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: \_\_\_\_\_

  
Podpis vedoucí(ho) práce

  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

28.4.2017  
Datum převzetí zadání

Filip Jeník  
Podpis studenta

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce prof. RNDr. Petru Špatenkovi, CSc., za přátelský přístup, cenné rady a připomínky, které mi předal a hlavně děkuji za umožnění práce na zajímavém tématu.

Dále bych rád poděkoval ing. Karlu Zikešovi za laskavou úpravu vzorků plazmatem a ing. Haně Šourkové za nezištnou pomoc při měření kontaktních úhlů.

Rád bych také poděkoval ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D., za obětavou pomoc při provádění mechanických zkoušek a za věcné rady, které mi poskytovala. Zároveň děkuji všem ostatním, kteří se podíleli na vzniku mé bakalářské práce, či těm, kteří mě v jejím vytváření podporovali.

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a použil jsem literárních pramenů a informací, které uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů informací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu

§ 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

Podpis

## **Abstrakt**

Lepení je významná technologická operace, kterou lze dosáhnout spojení dvou materiálů. Výsledná kvalita a pevnost spoje závisí nejenom na typu použitého lepidla a druhu slepovaných materiálů, ale také na případné povrchové předúpravě. Tato práce se zabývá vlivem předúpravy povrchu plazmováním na změnu jeho vlastností a vlivem předúprav na vytvořený lepený spoj. V experimentální části jsou porovnány spoje s plazmovou úpravou a bez plazmové úpravy při použití dvou naprosto odlišných lepidel. Změny vlastností povrchu jsou posuzovány pomocí kritického povrchového napětí, které je zjištěno na základě měření kontaktních úhlů.

## **Klíčová slova:**

lepení polyolefinů, povrchové napětí, smáčivost, plazma, klouzavý výboj

## **Abstract**

Joining is important technological process, whereby we can reach interlock two materials. Final quality and toughness of join depends not only on type of used adhesive and kind of materials, but also on surface pre-treatment. In this thesis is studied influence of plasma pre-treatment surface to the change of its quality. Also influence to the created join is found. In experimental part are observed joins with plasma treatment and without plasma treatment. Joins are created with two different adhesives. Changes of quality surface are assessed by critical surface tension, which are found by measurement of contact angles.

## **Key words:**

joining polyolefins, surface tension, wetting, plasma, glidarc

## Seznam zkratk:

<b>ACFP</b>	adhezní a kohezní porušení	
<b>AF</b>	adhezní porušení	
<b>CF</b>	kohezní porušení	
<b>DP190</b>	epoxidové lepidlo s označením DP190 od společnosti 3M	
<b>DP8005</b>	akrylátové lepidlo s označením DP8005 od společnosti 3M	
<b>F<sub>m</sub></b>	síla potřebná k přetržení	[N]
<b>P50</b>	označení vzorků s povrchem upraveným plazmou rychlostí 50 mm.s <sup>-1</sup>	
<b>P100</b>	označení vzorků s povrchem upraveným plazmou rychlostí 100 mm.s <sup>-1</sup>	
<b>P150</b>	označení vzorků s povrchem upraveným plazmou rychlostí 150 mm.s <sup>-1</sup>	
<b>P200</b>	označení vzorků s povrchem upraveným plazmou rychlostí 200 mm.s <sup>-1</sup>	
<b>PE</b>	polyethylen	
<b>PP</b>	polypropylen	
<b>S</b>	plocha spoje	[mm <sup>2</sup> ]
<b>SCF</b>	speciální kohezní porušení	
<b>ZD</b>	označení vzorků s povrchem zdrsňeným brusným papírem	
<b>ZD+P50</b>	označení vzorků s povrchem zdrsňeném a plazmovaném rychlostí 50 mm.s <sup>-1</sup>	
<b>ZS</b>	označení vzorků s povrchem v základním stavu	
<b>ϑ</b>	kontaktní úhel	[°]
<b>σ</b>	povrchové napětí	[N.m <sup>-1</sup> ]
<b>σ<sub>12</sub></b>	povrchové napětí na rozhraní fází kapalná a plynná	[N.m <sup>-1</sup> ]
<b>σ<sub>13</sub></b>	povrchové napětí na rozhraní fází plynná a pevná	[N.m <sup>-1</sup> ]
<b>σ<sub>23</sub></b>	povrchové napětí na rozhraní fází kapalná a pevná	[N.m <sup>-1</sup> ]
<b>σ<sub>K</sub></b>	kritické povrchové napětí	[N.m <sup>-1</sup> ]
<b>τ</b>	pevnost spoje ve smyku	[MPa]

## Obsah

1. Úvod.....	9
A. Teoretická část.....	10
2. Lepení.....	10
2.1. Dělení lepidel.....	11
2.2. Mechanické zkoušky lepených spojů .....	13
2.2.1. Stanovení pevnosti ve smyku .....	13
2.2.2. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje .....	14
3. Povrch a jeho adheze.....	15
3.1. Povrchové napětí .....	15
3.1.1. Kontaktní úhel.....	16
3.1.2. Kritické povrchové napětí .....	19
3.1.3. Dělení materiálů dle velikosti povrchového napětí.....	20
3.2. Smáčení .....	20
3.3. Význam drsnosti.....	22
3.4. Mechanická teorie.....	22
3.5. Elektrostatická teorie .....	24
3.6. Difuzní teorie.....	24
4. Úpravy povrchů materiálů .....	25
4.1. Čištění a odmašťování .....	25
4.2. Plazmové úpravy povrchu .....	26
B. Experimentální část.....	28
5. Provedení lepeného spoje .....	28
5.1. Použité materiály a lepidla .....	28
5.1.1. Polypropylen .....	28
5.1.2. Hliník .....	28

5.1.3.	Lepidlo DP 190 .....	29
5.1.4.	Lepidlo DP 8005 .....	29
5.2.	Předúpravy povrchu .....	29
5.2.5.	Broušení .....	29
5.2.6.	Čištění .....	30
5.2.7.	Plazmování .....	30
6.	Testování vzorků .....	31
6.1.	Zkouška tahem .....	31
6.1.1.	Spoje vytvořené lepidlem DP190.....	32
6.1.2.	Spoje vytvořené lepidlem DP8005.....	37
6.2.	Posouzení druhu porušení spoje.....	37
6.3.	Měření kritického povrchového napětí .....	39
7.	Diskuze výsledků .....	43
8.	Závěr .....	45
9.	Bibliografie .....	46
10.	Přílohy .....	47



## 1. Úvod

Plazmová úprava materiálu může způsobit velké změny vlastností jeho povrchu. Snahou při používání této úpravy je vylepšení vlastností a chování povrchu oproti povrchu materiálu, který je v neupraveném stavu. Upravování povrchu tímto způsobem je smysluplné hlavně u materiálů s nízkou povrchovou energií, tedy především některých typů plastů. Po použití úpravy je např. možné materiál popisovat či vytvářet lepené spoje. Lepení, těchto materiálů v neupraveném stavu by možné buď vůbec nebylo anebo bylo, ale za použití např. speciálních (tedy dražších) lepidel.

Důležitým parametrem plazmovací trysky je její pracovní rychlost pohybu nad upravovaným povrchem. Tato rychlost je klíčová pro úspěšnost konkrétní trysky při zavádění v praxi. Poptávka je samozřejmě po tryskách, které umožní i velkou rychlost úpravy tak, aby byl čas potřebný k vyrobení výsledného produktu co nejkratší.

Předmětem této práce je vypracování teoretického shrnutí poznatků o technologické operaci lepení. Popsat její výhody a nevýhody, poukázat na různá úskalí s ní spojená. Hlavní pozornost je věnována významu povrchového napětí a smáčivosti, ve spojitosti s jejich vlivem na účinnost lepení.

Experimentální část bude věnována přípravě kombinovaných lepených spojů, vytvořených z polypropylenu a hliníku. Polypropylen bude podroben různé povrchové předúpravě. Především bude zkoumána závislost účinnosti plazmové úpravy na rychlosti pohybu trysky. Vliv předúprav bude zkoumán za použití dvou lepidel. Bude zjišťována pevnost ve smyku přeplátovaných lepených spojů pomocí tahové zkoušky.

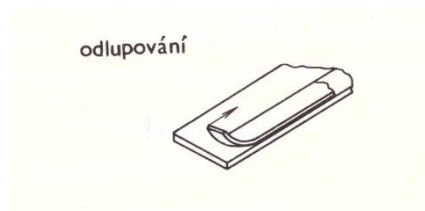
Další metodou použitou pro zjištění vlivu plazmování na povrch polypropylenu je měření kontaktních úhlů. Kontaktní úhly budou naměřeny jak na neupraveném, tak na upravených površích pomocí dvou testovacích kapalin. Z těchto hodnot bude vypočteno kritické povrchové napětí povrchů polypropylenu.

Zjištěné hodnoty budou statisticky zpracovány a bude vyhodnocen jejich vliv na lepený spoj.

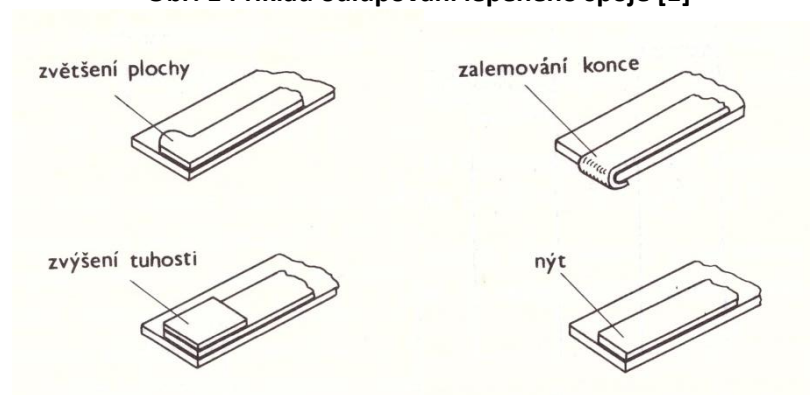
## A. Teoretická část

### 2. Lepení

Lepení je dnes již zavedeným postupem pro spojování materiálů, které přináší proti konvenčním metodám, jako jsou svařování či šroubové a nýtové spoje, řadu výhod. Mezi tyto výhody patří: odlehčení celkové hmotnosti konstrukce, možnost spojování různých materiálů, izolační vlastnosti spoje, neovlivnění spojovaného materiálu, tlumení vibrací a v neposlední řadě cena. Lepení samozřejmě neprovázají pouze samé výhody. Zásadní nevýhodou lepených spojů je jejich špatná odolnost proti odlupování viz Obr. 1. Ta se řeší pomocí speciálních úprav konstrukce spoje. Příklady úprav jsou uvedeny na Obr. 2.



Obr. 1 Příklad odlupování lepeného spoje [1]



Obr. 2 Úpravy konstrukce lepeného spoje pro dosažení lepší odolnosti proti odlupování [1]

Dalším problémem omezující použití lepených spojů je malá teplotní odolnost lepidel. Pro teplotně náročnější aplikace je tedy využívání lepených spojů naprosto nevhodné. Nevýhodou se také ukazuje potřeba povrchových předúprav materiálů, které mají zásadní vliv na kvalitu a odolnost spoje. Při nedodržení přesných technologických postupů (při broušení, otryskávání, čištění, oplachování, moření atd.) hrozí významný pokles pevnosti spoje. Tyto předúpravy komplikují a prodlužují celý technologický proces. Výrobní čas je

v případě lepení prodloužen i z důvodu vytvrzování spoje, které se často musí kombinovat s přetlakem či zvýšenou teplotou.

## 2.1. Dělení lepidel

Na trhu se vyskytuje veliké množství typů a druhů lepidel, pracujících na rozličných principech, produkovaných mnoha výrobci. Lze je dělit dle nejrůznějších kritérií. Prvním a asi nejzásadnějším kritériem vůbec je princip vytváření lepeného spoje. Lepidla proto mohou být: **roztoková** nebo **disperzní** – tuhnou vsáknutím a odpařením rozpouštědel, **citlivá na tlak** – lepicí pásky apod., **tavná** – spoj vznikne ztuhnutím taveniny a **lepidla vytvrzující chemickou reakcí**. Posledně jmenovaná jsou z konstrukčního hlediska nejzajímavější, proto se v dalších částech budeme zabývat právě jimi. Na Obr. 3 jsou uvedeny jednotlivé typy reakcí, které během vytvrzování lepidla probíhají, zároveň jsou uvedeny i podmínky vytvrzování. Dle této podmínky můžeme lepidla dělit na vytvrzované za tepla a za studena. [1]

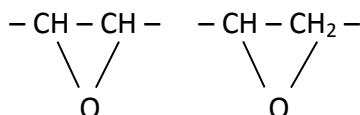
Možné rozdělení je i dle formy dodání lepidla:

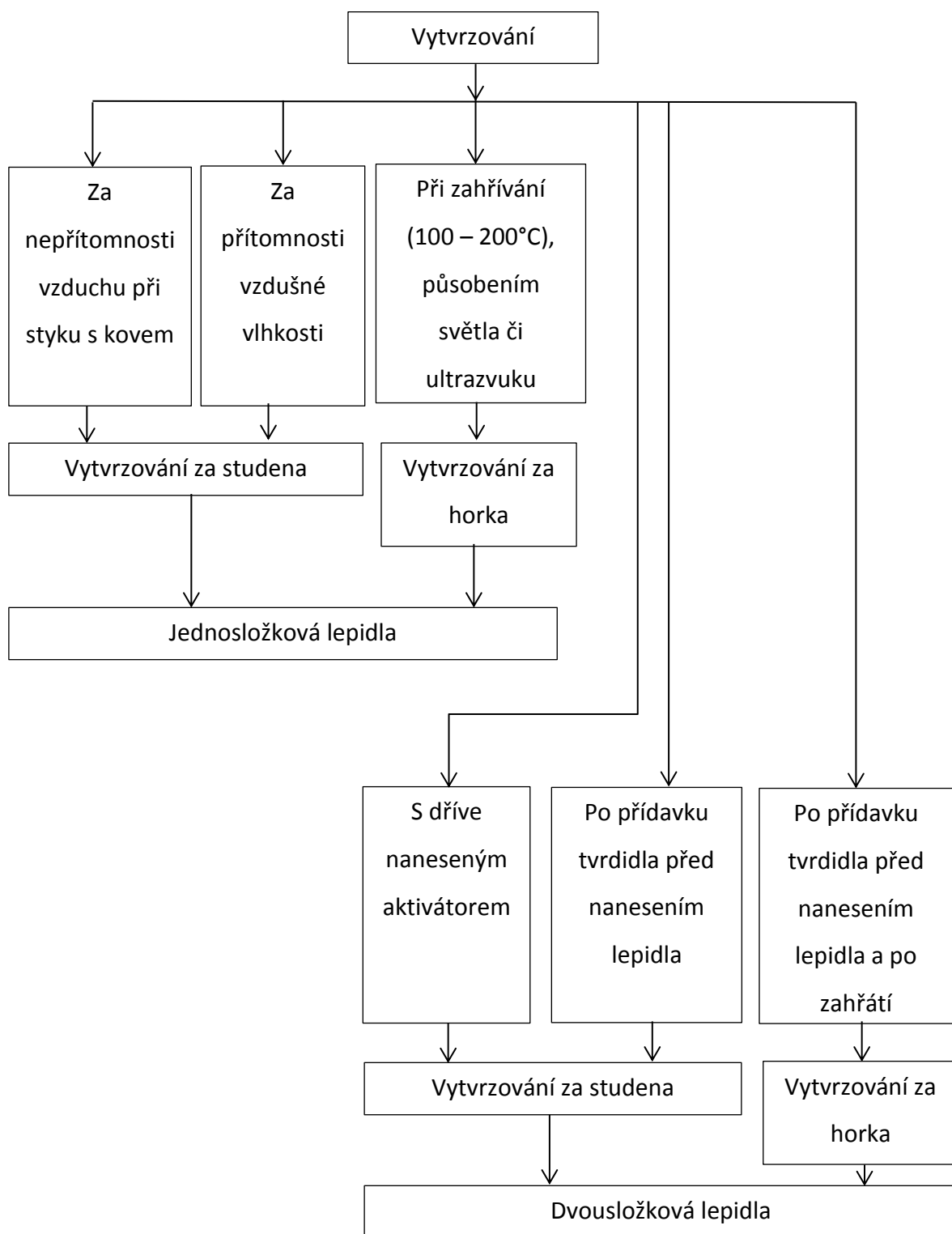
- Jednosložková lepidla, která se dodávají ve formě prášků, tyčinek, past nebo roztoků. Výhodou je technologická jednoduchost aplikace. Mezi jednosložková lepidla řadíme také lepicí fólie.
- Dvousložková a vícesložková lepidla, která mají nejširší uplatnění z lepidel chemicky vytvrzovaných. Nevýhodou je citlivost na přesný poměr složek.

Oblíbeným a využívaným systémem dělení je dle druhu pryskyřice, tvořícím základ lepidla. Takovou skupinou lepidel jsou např.:

- Epoxidová lepidla

Epoxidem se považuje taková pryskyřice, která v nevytvrzeném stavu má v molekule dvě a více epoxidových (ethylenoxidových, oxiranových) skupin:





**Obr. 3 Rozdělení lepidel dle způsobu vytvrzování [1]**

Rozhodující vlastností epoxidové skupiny je schopnost reagovat s látkami, které obsahují pohyblivý vodík (aminokyseliny, hydroxylové skupiny alkoholů apod.) při vzniku sekundárního hydroxyly. Tím se dosáhne vytvrzení epoxidu. Tyto látky nazýváme tvrdidla, existuje jich veliký počet a jsou klíčová pro výsledné vlastnosti lepidla. Mezi užívaná tvrdidla

patří především různé druhy polyaminů. Jinou možností jak dosáhnout vytvrzení je metoda polymerace, k jejímu dosažení je potřeba katalyzátor. Za tímto účelem se používají nejrůznější látky např: aminy, ethylenglykol či voda. [1]

## 2.2. Mechanické zkoušky lepených spojů

Evropské normy uvádějí několik zkoušek určených k testování kvality lepeného spoje například normy:

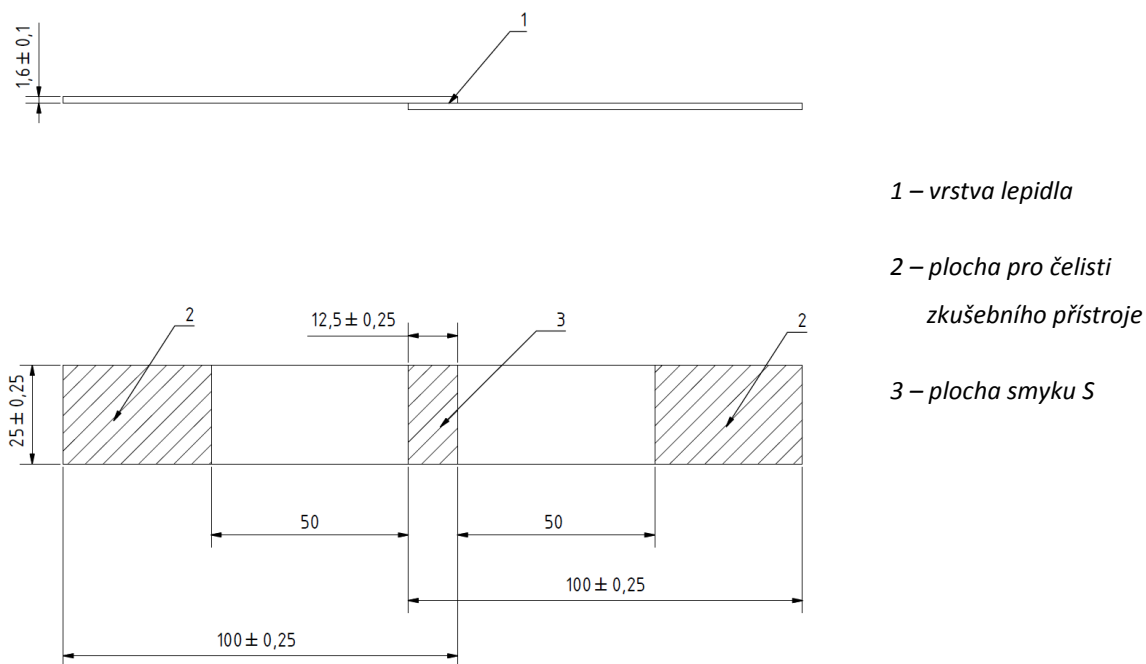
- EN ISO 11339 pro zkoušení odlupování
- EN 1966 pro zkoušení lepených spojů ohybem
- EN ISO 13445 pro zkoušení smyku
- EN 15865 pro zkoušení krutu

Jejich důkladný popis je uveden v [2]. V této práci jsou lepené spoje zkoumány dle českých norem ČSN EN 1465 a ČSN ISO 10365, tyto jsou popsány v následujících podkapitolách.

### 2.2.1. Stanovení pevnosti ve smyku

Parametry provádění této zkoušky jsou definovány dle normy ČSN EN 1465 Lepidla – Stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených soustav. Podstatou této zkoušky je zatěžování připraveného vzorku tahovou silou (rovnoběžnou s plochou lepeného spoje), která vyvodí smykové namáhání na lepený spoj. Vzorek upnutý do čelistí měřicího přístroje je zatěžován silou, která je zaznamenávána, za konstantní rychlosti posuvu čelistí. Vzorek se zatěžuje do chvíle ztráty soudržnosti vzorku. K přetržení by mělo dojít 60±25 s od zahájení zkoušky. Největší zaznamenaná síla ( $F_m$ ) se považuje za sílu potřebnou k přetržení. Pevnost ( $\tau$ ) přeplátovaného spoje ve smyku se poté vypočítá dle vztahu (1), kde S je plocha slepeného přeplátovaného spoje. Schématický náčrt zkušebního vzorku je na Obr. 4.

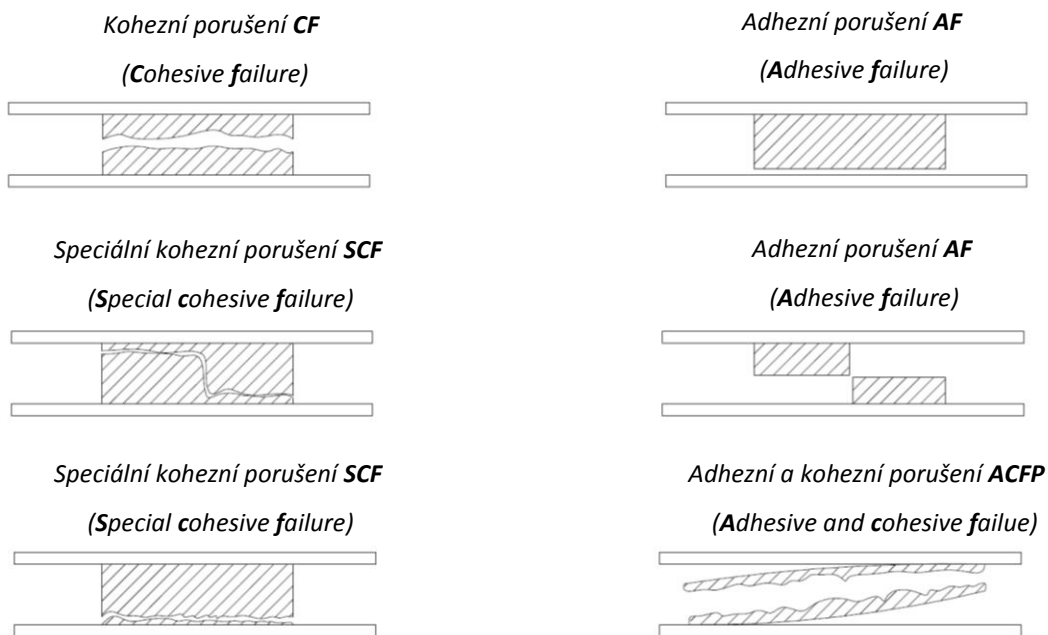
$$\tau = \frac{F_m}{S} [MPa] \quad (1)$$



Obr. 4 Schéma provedení přeplátovaného lepeného spoje [3]

### 2.2.2. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje

Norma ČSN ISO 10365 Lepidla. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje, zavádí klasifikaci jednotlivých typů porušení. Typy porušení jsou schematicky znázorněny a určují se podle Obr. 5.



Obr. 5 Typy porušení lepených spojů [4]

### 3. Povrch a jeho adheze

Povrch materiálů lepeného spoje (adherendů) je jeden z klíčových parametrů pro budoucí kvalitu a pevnost spoje. Uplatňuje se několik přístupů pro vysvětlení adheze mezi lepidlem a adherendy. Už samotný pojem adheze není úplně přesně definován. Základní představou je, že představuje soudržnost dvou spojovaných ploch. Dle [5] adheze je stav, kdy dvě odlišné části jsou drženy u sebe těsným kontaktem. Mezipovrchové síly drží u sebe dvě fáze a jejich původ je např.: mechanické ukotvení, působení van der Waalsových sil, chemické působení, nebo elektrostatická přitažlivost.

Mechanická pevnost systému není určena pouze mezipovrchovými silami, ale také mechanickými vlastnostmi povrchové zóny a velikostí fází. Primární funkcí adheze je držet části pohromadě. Toho je dosahováno přerozdělováním napětí mezi jednotlivé členy. Přerozdělování je zde rovnoměrnější než u mechanických spojení (např. nýtů). Spojování využívající adhezi je v principu efektivnější než konvenční způsoby, často přináší menší náklady a nižší hmotnost [6]. V následujících podkapitolách jsou uvedeny teorie, které se pokoušejí vysvětlit principy adheze a také základní poznatky o povrchovém napětí.

#### 3.1. Povrchové napětí

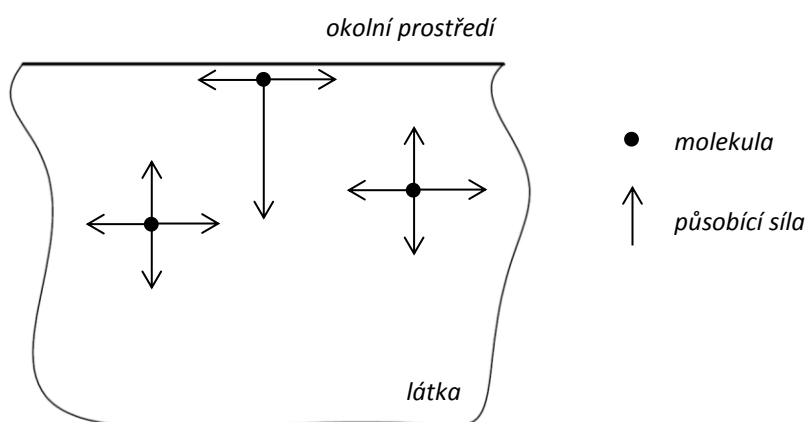
Povrchové napětí  $\sigma$  je definováno jako síla, která působí kolmo k délce myšleného řezu povrchem, dělená touto délkou, a ležící v rovině tečné k povrchu kapaliny (pevné látky) ve vyšetřovaném místě [7]. Toto napětí je definováno vztahem (2), kde  $f$  je vzájemná působící síla kolmá na úsečku délky  $l$ .

$$\sigma = \frac{f}{l} \quad (2)$$

Ze vztahu (2) vyplývá, že jednotkou povrchového napětí je  $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ . Povrchové napětí také můžeme považovat za plošnou hustotu příslušného potenciálu (energie) povrchu. Z toho hlediska jsou jednotky  $\sigma$  také  $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$  ( $\frac{\text{J}}{\text{m}^2} = \frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{m}\cdot\text{m}}$ ).

Existenci tohoto napětí lze vysvětlit asymetrií povrchu. Molekula nacházející se uvnitř látky (kapalně nebo pevně) je obklopena ze všech stran ostatními molekulami, proto síly, kterými

působí tyto sousedé na molekulu, jsou navzájem vyrušeny. Zatímco molekule, která je na povrchu, chybí sousedé v celém jednom poloprostoru viz Obr. 6.



**Obr. 6 Schéma příčin vzniku povrchového napětí [7]**

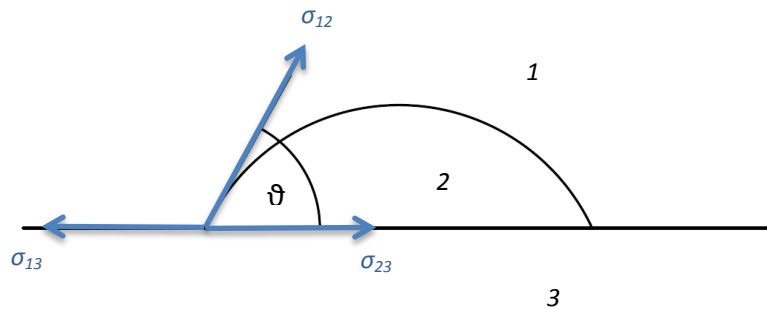
Síly, které na molekulu působí od sousedů z látky, tak nejsou vyrušeny a výslednice mezimolekulárních sil je nenulová, působí kolmo do látky (k rovině tečné k jejímu povrchu) a po vztážení na plochu představuje kohezní tlak. Naopak povrchové napětí, které je kohezním tlakem způsobeno, působí tečně k povrchu látky.

Z hlediska původu je možné jej rozložit na dvě složky polární a disperzní. **Polární** složku tvoří mezimolekulární vazby tzv. permanentní dipóly a jsou jimi hlavně vodíkové můstky, které jsou z těchto typů vazeb nejsilnější a dále také polarizované původně neutrální vazby (indukované dipóly). Síly stojící za vznikem **disperzní** složky povrchového napětí jsou van der Waalsovy a především Londonovy síly, které jsou vyvolány pohybem elektronů a které způsobí velice malou polarizaci. [8] [6]

### 3.1.1. Kontaktní úhel

Kontaktní úhel  $\theta$  (v literatuře též označovaný jako krajový úhel) charakterizuje smáčivost dané kapaliny k pevné látce za přítomnosti plynné fáze. Chování systému je naznačeno na Obr. 7.





Obr. 7 Schéma styku plynné 1, kapalné 2, pevné látky 3 a vyznačení kontaktního úhlu  $\theta$  [7]

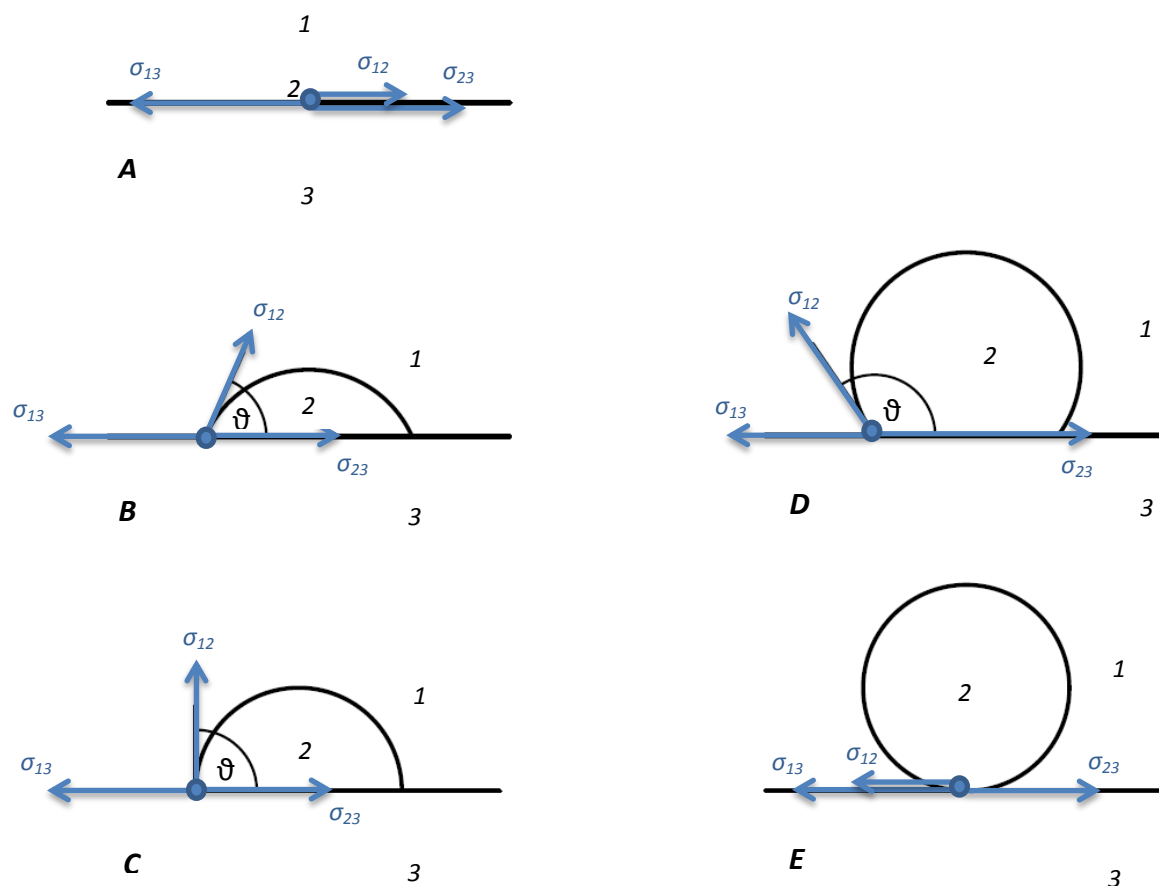
Rovnici (3) lze sestavit při rovnováze systému na Obr. 7. Na základě ní lze vyjádřit povrchové napětí povrchu  $\sigma_{13}$  (povrchové napětí na rozhraní fází pevné a plynné).

$$\sigma_{13} = \sigma_{23} + \sigma_{12} \cdot \cos\theta \quad (3)$$

odkud plyne

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{23}}{\sigma_{12}}$$

V případě krajových úhlů  $\theta < 90^\circ$  tedy úhlů ostrých, hovoříme o tom, že kapalina povrch smáčí. Naopak v případě úhlů  $\theta > 90^\circ$  se jedná o případ, kdy kapalina povrch nesmáčí. Významné případy kontaktních úhlů jsou uvedeny na Obr. 8.



**Obr. 8** Jednotlivé typy smáčivosti a kontaktních úhlů [7]

**A:** Kapalná fáze 2 smáčí v prostředí plynné fáze 1 tuhou fází 3 dokonale

$$\sigma_{13} \geq (\sigma_{23} + \sigma_{12})$$

**B:** Kapalná fáze 2 smáčí v prostředí plynné fáze 1 tuhou fází 3 nedokonale

$$\sigma_{23} < \sigma_{13} < (\sigma_{23} + \sigma_{12})$$

**C:** Mezní případ mezi situacemi kdy, kapalná fáze 2 smáčí v prostředí plynné fáze 1 tuhou fází 3 resp. nesmáčí

$$\sigma_{13} = \sigma_{23}$$

**D:** Kapalná fáze 2 nesmáčí v prostředí plynné fáze 1 tuhou fází 3

$$(\sigma_{23} - \sigma_{12}) < \sigma_{13} < \sigma_{23}$$

**E:** Kapalná fáze 2 vůbec nesmáčí v prostředí plynné fáze 1 tuhou fází 3

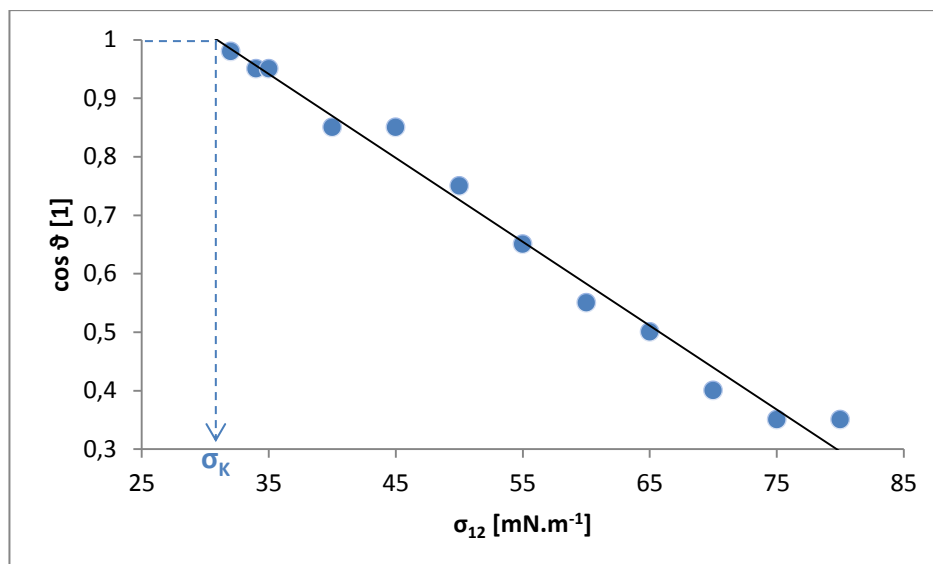
$$\sigma_{13} < (\sigma_{23} - \sigma_{12})$$

Uvedené vztahy pro jednotlivé případy smáčení nám ukazují, že zásadní roli pro zlepšení smáčivosti povrchu, tedy zmenšení kontaktního úhlu  $\vartheta$ , lze dosáhnout buď snížením povrchového napětí kapalné látky, či zvýšením povrchového napětí povrchu pevné látky.

### 3.1.2. Kritické povrchové napětí

Rovnice (3) udává vztah pro výpočet povrchového napětí (označeného  $\sigma_{13}$ ). Při prozkoumání tohoto vztahu však zjistíme, že jeho výpočet nejsme schopni provést z důvodu neznalosti členu vyjadřujícího napětí na fázovém rozhraní kapalina – pevná látka  $\sigma_{23}$ . Toto napětí nejsme schopni zjistit, na rozdíl od členu  $\sigma_{12}$ , který vyjadřuje napětí kapaliny na rozhraní s plynnou látkou. Povrchové napětí kapalin (při styku s plynnou látkou – udává se nejčastěji se vzduchem) jsme schopni zjistit přímo metodami: kroužkovou dle Du Noüy či talířovou dle Wilhelmy. Hodnoty takto získané jsou pro většinu kapalin běžně dostupné. Obě zkoušky spočívají v odtrhávání daného předmětu z hladiny kapaliny při zjišťování potřebné síly k tomuto procesu.

Z výše uvedeného vyplývá, že ani rovnicí (3) ani přímé odtrhací metody nemůžeme k nalezení povrchového napětí pevné látky použít. Po výzkumu probíhající v 50. letech minulého století přišli pánové Zisman a Fox s postupem měření pro zjišťování kritického povrchového napětí. Pro jeho určení se využívá několik měřících kapalin se známým povrchovým napětím  $\sigma_{12}$ . Změří se kontaktní úhly  $\vartheta$  smáčivosti těchto kapalin na zkoumaném povrchu. Graficky se vynese závislost mezi povrchovým napětím  $\sigma_{12}$  a zjištěným úhlem  $\vartheta$  (respektive  $\cos \vartheta$ ). Vynesenými body se proloží přímka a v místě kde protne hodnotu  $\cos \vartheta = 1$  (tedy  $\vartheta$  položíme rovno 0) je námi hledaná hodnota kritického povrchového napětí  $\sigma_K$ . Graficky je metoda znázorněna na Obr. 9. [6]



Obr. 9 Graf sloužící k zjištění kritického povrchového napětí  $\sigma_K$

Pro měření je nutno použít homogenní řadu kapalin, v opačném případě se vynesnými hodnotami nepodaří proložit přímkou a odečíst hodnotu  $\sigma_K$ . Zjištěná hodnota kritického povrchového napětí  $\sigma_K$  bude vždy menší než skutečná hodnota povrchového napětí pevné látky  $\sigma_{12}$ .

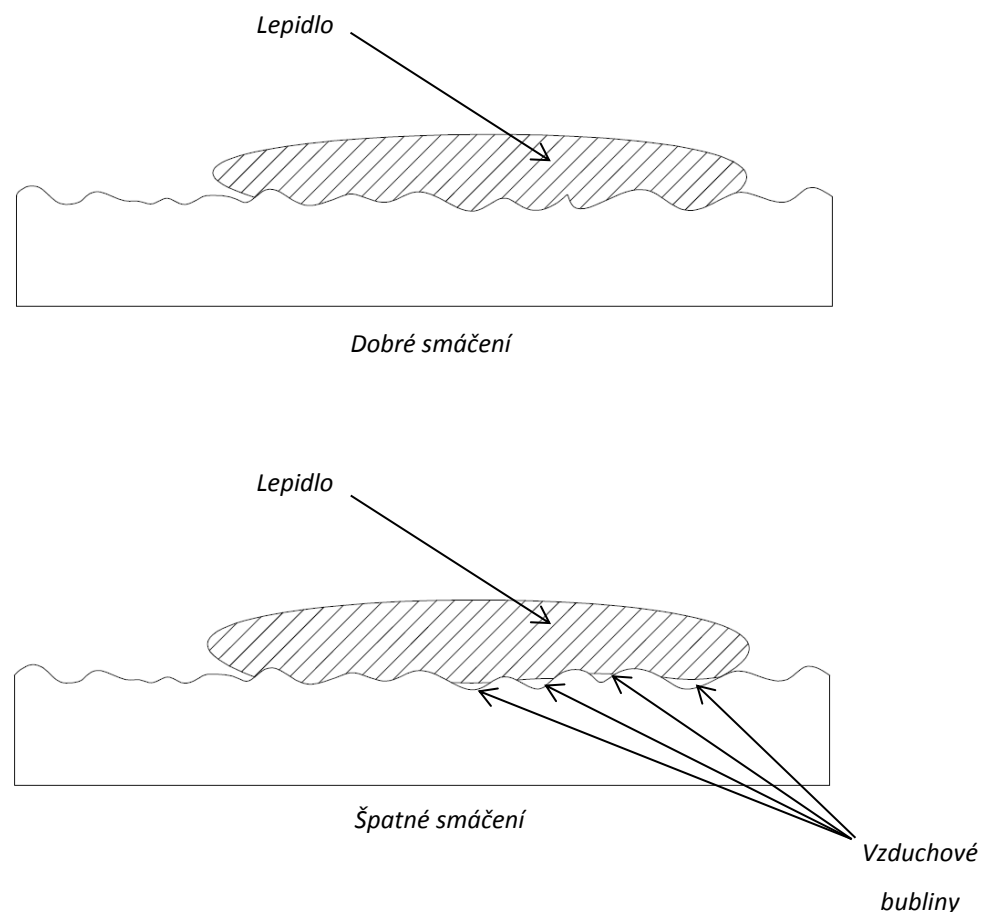
### 3.1.3. Dělení materiálů dle velikosti povrchového napětí

Materiály můžeme rozdělit dle velikosti jejich povrchového napětí na dvě základní skupiny. Materiály s velkým povrchovým napětím s hodnotou  $\sigma_K$  200 – 500 mN.m<sup>-1</sup> a materiály s malým kritickým povrchovým napětím s hodnotou  $\sigma_K$  pod 100 mN.m<sup>-1</sup>. Mezi materiály s velkým povrchovým napětím řadíme např. oxidy a nitridy. Z materiálů s nízkým povrchovým napětím nás zajímají hlavně polymery. Ty můžeme dále rozlišit na polymery s nízkým kritickým napětím 10 – 30 mN.m<sup>-1</sup>, se středním kritickým povrchovým napětím 30 – 40 mN.m<sup>-1</sup> a na polymery s vysokým kritickým povrchovým napětím nad 40 mN.m<sup>-1</sup>. [6]

## 3.2. Smáčení

Proces tvorby stálého kontaktu mezi lepidlem a adherendem se nazývá smáčení – wetting. Jedná se o základní předpoklad kvalitního spojení dvou materiálů. Adheze je výsledkem kontaktu dvou materiálů a povrchových sil, které mezi nimi vznikly. Charakteristickou vlastností ovlivňující proces smáčení je povrchové napětí materiálu, z jeho hodnot je možno odhadovat výsledky smáčení (tedy i celého spojování). Zkušenost ukazuje, že dobrého smáčení je dosaženo za podmínky, kdy lepidlo má menší hodnotu povrchového napětí než je

kritické napětí smáčeného povrchu, což je základním důvodem a podnětem pro povrchové úpravy plastů (zvláště těch s nízkou hodnotou povrchového napětí). Této teorii odpovídají i výsledky spojů provedených pomocí organických lepidel (např. epoxidy) s kovy a neupravenými plasty. Kovy vykazují výborné hodnoty adheze, zatímco u plastů jako polyethylen, polypropylen a fluoroplasty jsou výsledky nevalné. Úplné a neúplné smáčení povrchu je na Obr. 10. Při dobrém smáčení adhesivum vyplní všechny prohlubně a nerovnosti povrchu, kdežto při špatném smáčení jsou nerovnosti a dutinky na povrchu adhesivem překlenuty, tím se sníží celková plocha spoje, což má za následek menší pevnost a odolnost spojení [6].



**Obr. 10 Příklad úplného a neúplného smáčení povrchu [6]**

### 3.3. Význam drsnosti

Další faktor ovlivňující kvalitu spoje je drsnost povrchu. Výzkum probíhající v této oblasti ukázal, že ideální povrch pro utváření spojů by byl povrch dokonale hladký. Respektive, jehož nerovnosti nepřesáhnou vzdálenost  $2 \cdot 10^{-9}$  m. Výzkum byl prováděn na destičkách slídy, které byly získány štípáním, a proto na nich byla dosažena tato hladkost. Vzdálenost  $2 \cdot 10^{-9}$  m je právě velikostí parametru krystalové mřížky. Při styku dvou těchto destiček byla naměřena adhezní pevnost 20 MPa, bez použití jakéhokoli lepidla. Důvodem této pevnosti je fakt, že povrchy destiček se k sobě přiblížily natolik, že mezi molekulami odlišných povrchů začaly působit mezimolekulární síly. [1]

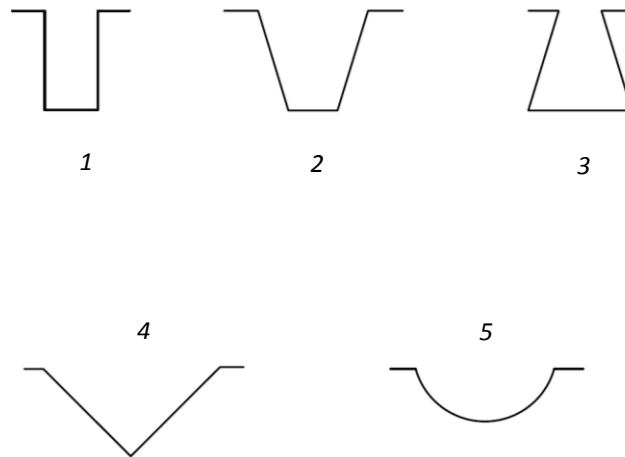
Problémem, který při uplatňování této znalosti nastává, je technologická neschopnost dosažení takové hladkosti povrchu, která by umožňovala přiblížení povrchů na vzdálenost krystalové mřížky. I za použití nejpřesnějších dokončovacích metod nejsme schopni dosáhnout drsnosti lepší než  $10^{-7}$  až  $10^{-8}$  m, tedy nerovnosti na povrchu nám znemožní dostatečné přiblížení povrchů a mezimolekulární síly na tuto delší vzdálenost nepůsobí. Ideální lepidlo by proto mělo vyplnit všechny nerovnosti povrchů a zprostředkovat mezimolekulární síly mezi adherendy.

Z výše uvedeného bychom mohli vyvodit závěr, že nejlepších výsledků při lepení bude dosahováno při použití co nejhladších povrchů. Zkušenosti ukazují, že tomu tak není, v četných případech je daleko lepších pevností dosahováno při zdrsnění povrchů.

### 3.4. Mechanická teorie

Další principy fungování adheze se objevují v mechanické teorii adheze. Přímo navazuje na výše uvedenou problematiku drsnosti. Podle této teorie je adheze dosaženo pomocí proniknutí (penetrace) adheziva do dutinek, pórů a dalších nerovností povrchu spojovaného materiálu. Lepidlo tímto způsobem se jaksi zaklíní, mechanicky propojí a dokáže přenášet napětí. Při dobré smáčivosti se také předpokládá zvětšení skutečného povrchu spoje, což by také mělo mít pozitivní vliv na jeho pevnost. Je zřejmé, že teorie předpokládá zákonitě dosahování lepších výsledků s pórovitými a drsnými povrchy, což praxe vyloučila. Dobrých výsledků spojení je dosahováno i při hladkých površích. Plošné univerzální použití této myšlenky tedy není možné.

Dle [1] má vliv na výslednou pevnost tvar zdrsňeného mikropovrchu. Ukazuje se, že některé nerovnosti jsou vhodnější než jiné. Základní typy nerovností ukazují Obr. 11.



**Obr. 11 Typy nerovností lepených ploch [1]**

Za nejvhodnější tvar nerovnosti je považován typ 4 – kónická plochá nerovnost, z důvodu dobrého zatečení a smáčení lepidla v nerovnosti. V případě tohoto typu nerovnosti se po zdrsnění materiálu účinný povrch lepené plochy zvýší a mělo by dojít k zlepšení pevnosti spoje. Ostatní typy nerovností nejsou z hlediska smáčivosti a zatečení lepidla vhodné. Při lepení není celá dutina nerovnosti řádně vyplněna lepidlem – vznikají vzduchové bubliny a účinná plocha je menší, spoj vykazuje znaky neprolepení. Vysvětlením zlepšení pevnosti spoje po mechanickém zdrsnění povrchu může být tvar vzniklých nerovností, který po většině úprav (mechanickém zdrsnění) je typu 4. Naopak neupravené povrchy, respektive povrchy po běžných strojírenských technologiích, vykazují nevhodné nerovnosti povrchu. Například po broušení je povrch materiálu tvořen nerovnostmi typu 5. [1]

Hodnoty ukazující zlepšení pevnosti spoje po zdrsnění povrchu mohou být vysvětleny nejenom mechanickým propojením, ale také určitým vyčištěním povrchu, zvětšením plochy styku adhezivo – adherend nebo vytvořením reaktivnějšího povrchu. Zatím na úrovni debat je, který z důvodů má na výslednou adhezi větší vliv. Některé výsledky ukazují na pozitivní vliv zdrsnění povrchu spojů, jiné naopak vykazují se zvyšováním drsnosti klesající trend pevnosti spoje. Další nevýhodou je zdrsňování jako takové. Vnášení mikro trhlin do nosných

částí konstrukcí je samozřejmě nevýhodné. Použití této technologie se tedy může ukázat v některých případech jako nevhodné [6].

### 3.5. Elektrostatická teorie

Teorie je založena na elektrostatických jevech mezi adherendem a lepidlem. Elektrostatické síly ve formě elektronové dvojité vrstvy způsobují jistou odolnost proti oddělování. Teorii podporuje měření, které ukázalo, že při odstraňování lepidla z podkladu byly skutečně zaznamenány elektrické výboje. Tento mechanismus vysvětluje adheze kovu s polymery. Naopak při spojení nekovových materiálů se adheze, zakládající se na tomto principu, ukázala být zanedbatelná [6].

### 3.6. Difuzní teorie

Základem této teorie je schopnost některých materiálů mezi sebou difundovat, tedy pronikání molekul mezi látkami. Pevnost spojení vzniká právě vzájemnou difuzí a závisí zejména na konkrétních látkách adherendu a lepidla, teplotě a času lepení. Dobře difundují polymery s poměrně dlouhými řetězci a s velkou ohebností molekul. Záleží také na vzájemné snášenlivosti polymerů, tu je možno posuzovat z hustoty kohezní energie **CED** podle vztahu (4).

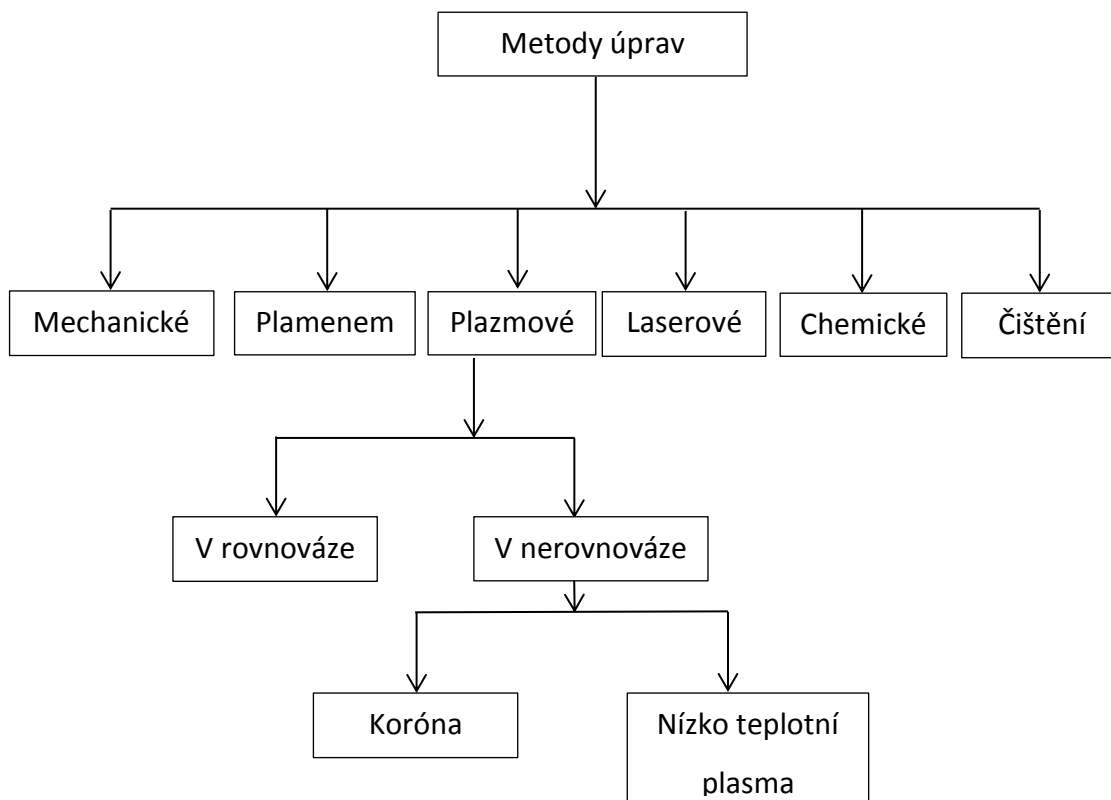
$$CED = \frac{E_{coh}}{V} \quad (4)$$

$E_{coh}$  je množství energie potřebné k oddělení molekuly a  $V$  molární objem. Hodnoty **CED** se nesmí lišit u jednotlivých spojovaných materiálů více než v řádu jednotek  $J \cdot cm^{-3}$ . Velice důležitým parametrem pro průběh difuze je teplota při spojování. Příkladem je spojování polyethylenu (PE), či polypropylenu (PP) s butylovou pryží při běžné laboratorní teplotě 23°C jsou hodnoty pevnosti spoje špatné z důvodu malé aktivity při difuzi. Naopak když lepení probíhalo při teplotách 135°C (PE) a 175°C (PP) byla výsledná pevnost spojení téměř 3 krát větší [6] [1].



## 4. Úpravy povrchů materiálů

Úpravy povrchů spojovaných materiálů jsou stěžejní pro budoucí kvalitu lepeného spoje. Důkladné vyčištění je dnes již naprostým základem, další úpravy lze rozdělit např. na chemické, tepelné, abrazivní atd. Schéma typů povrchových úprav je zobrazeno na Obr. 12.



Obr. 12 Klasifikace úprav povrchů [6]

V následujících kapitolách jsou uvedeny typy předúprav povrchů, u kterých byl zkoumán jejich vliv na pevnost a vlastnosti lepeného spoje.

### 4.1. Čištění a odmašťování

Znečištěné povrchy lepených materiálů dramaticky sníží pevnost spoje. Důkladné odstranění jakýkoliv nečistot by mělo být samozřejmou předúpravou před samotným lepením či jinou úpravou povrchu. K odstranění mechanických nečistot se nejčastěji používá tryskání, pískování či broušení. Mořicí lázně slouží hlavně k eliminaci mastnoty. Používají se alkalické lázně, které bývají pro větší účinnost zahřívány na teploty okolo 80°C. Mezi využívané alkalické soli patří např.: metakřemičitan sodný, orthokřemičitan sodný, fluorokřemičitan

sodný a jiné. Při některých aplikacích se k odmašťování používají i rozpouštědla. Ta se aplikují parami, oplachem nebo tamponováním. Mezi vhodná rozpouštědla patří např: aceton, metyl – alkohol, izopropylalkohol a další. [1]

## 4.2. Plazmové úpravy povrchu

Plazma dle je [9]: „*Plazma je kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic, které vykazuje kolektivní chování.*“ Kolektivní chování znamená pohyby plazmatu, které nezávisí pouze na nejbližších podmínkách, ale také na vzdálenějších podmínkách v plazmatu. Důvodem tohoto chování je fakt, že části plazmatu se navzájem ovlivňují (působí na sebe silami) i na velké vzdálenosti. Pojmem kvazineutrální se rozumí stav, kdy hustota nabitých částic  $n_i$  odpovídá hustotě celého plazmatu  $n$ , tedy  $n_i \cong n$ . V plazmatu musí být dostatek neutrálních částic, v případě nerovnováhy vzniklý systém nebude plazmatem. [9]

Významným rozdílem mezi plasty a kovovými materiály z hlediska lepení je jejich povrchová energie. Polymery obecně mají nižší povrchovou energii než kovy, což způsobuje horší smáčení jejich povrchů lepidlem. Horší smáčení zapříčiní problém s adhezí a ten vyústí v menší pevnosti spoje.

Důležitým parametrem pro úpravy povrchů plazmatem je hustota toku iontů. S rostoucí hustotou roste i efektivita celého procesu. Tato hustota je závislá na celé řadě parametrů např: typ a tlak pracovního plynu, uspořádání a velikost aparatury, metoda buzení plazmatu atd. Dnes často užívaným typem je úprava plazmatem za atmosférického tlaku.

### Úpravy pomocí plazmatického výboje za atmosférického tlaku

Výboj plazmatu za atmosférického tlaku se s výhodou používá při konstruování a provozování trysek na úpravu povrchů. Výboj je proud nabitých částic - elektronů a iontů, které jsou urychleny elektrickým polem. Vytvoření plazmatu lze docílit vysokým napětím (desítky kilovoltů), které působí elektrodami. Do mezery mezi elektrody se vpouští vzduch (či jiný plyn), důsledkem velkého napětí v prostředí mezi elektrodami vznikne řetězová reakce, při které se neutrální molekuly přeměňují na ionty. Případem reakce probíhající v plazmatu je rozpad molekul kyslíku na atom kyslíku a ozon, probíhající dle (5). [6]



Atom kyslíku je velmi nestabilní a při dopadu na upravovaný povrch např. polypropylenu, reaguje s vodíkem a uhlíkem. Společně vytvářejí –OH a C=O skupiny, které výrazně mění povrchové vlastnosti – zvyšují hydrofilitu. Ta výrazně ovlivňuje adhezi pojiva k povrchu. Potřebné dimenzování plazmového zařízení se provádí na základě vztahu (6) dle [6].

$$D = \frac{P}{CB \times V} \quad (6)$$

Kde **D** představuje dávku plazmatu [ $\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}$ ], **P** výkon [W], **CB** šířku upravovaného povrchu [mm] a **V** rychlost posunu [ $\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ].

Účinnost metody a velikost změny povrchových vlastností ovlivňuje celá řada faktorů, mezi nejvýznamnější patří upravovaný materiál jako takový (jeho chemické složení), elektrické parametry trysky, množství protékajícího plynu a také rychlost úpravy, respektive čas, po který výboj působí na povrch. Pro úspěšnou modifikaci povrchu by tento čas měl být vyšší než minimální čas, který ještě umožní aktivaci povrchu.

## **B. Experimentální část**

### **5. Provedení lepeného spoje**

Účinnost použitých povrchových úprav byla zkoušena pomocí lepených spojů, konkrétně pomocí vzorků, připravených dle doporučení v [3]. Byly spojovány vzorky z plastových a kovových desek dvěma různými lepidly. První vybrané lepidlo není určeno pro lepení materiálů s nízkou povrchovou energií, zatímco druhé lepidlo je speciálně vyvinuto i pro takto těžko lepitelné materiály. Při takto odlišně zvolených lepidlech by měla být dobře pozorovatelná funkčnost a uplatnitelnost povrchových úprav.

#### **5.1. Použité materiály a lepidla**

Lepidla byla volena na základě předcházejících zkušeností, které jsou zpracovány v [2]. Byla použita lepidla od společnosti 3M, ta je zavedenou značkou v oblasti spojovacích materiálů.

##### **5.1.1. Polypropylen**

Polypropylen (PP) patří mezi skupinou plastů nazývaných polyolefinů. Vzorky byly nařezány na rozměr 25 x 100 mm, tedy jak je doporučeno v normě [3] z polypropylenové desky PP-H (NATURAL) o tloušťce 5 mm. Desky byly opatřeny oboustrannou ochrannou fólií. Větší tloušťka vzorků byla zvolena na základě předcházejících zkušeností uvedených v [2]. V rámci této práce byly také zkoušeny lepené spoje a byly použity vzorky z polyethylenu (PE) o tloušťce 2 mm. Při zkouškách lepených spojů byly spoje právě porušeny v plastu. Produktový list polypropylenové desky je uveden v příloze.

##### **5.1.2. Hliník**

Pro přípravu vzorků byly použity plechy dodané firmou ALUPLUS a.s. o tloušťce 1,5 mm a specifikaci:

- Slitina: EN AW-1050A (Al99,5)
- Chemické složení: EN 485-1
- Tolerance: EN 485-4
- Stav: H24 polotvrdý

Vzorky byly z plechů nastříhány na rozměr 25 x 100 mm, tedy jak je doporučeno v normě [3], odchýlením od této normy je použití vzorku o jiné tloušťce. Norma doporučuje tloušťku 1,6 mm.

### 5.1.3. Lepidlo DP 190

Šedé epoxidové dvousložkové lepidlo, vyráběné společností 3M, vytvrzované při pokojové teplotě. Lepidlo je dodáváno v dvoukomorové kartuši, směšovací poměr složek je 1:1, nanáší se pomocí aplikační pistole a směšovací trysky. Doba vytvrzování pro dosažení úplné pevnosti je 7 dní. Lepidlo je vhodné k lepení kovů, dřeva, zdiva, řady druhů plastů a pryží. Lepidlo není vhodné k lepení plastů s nízkou povrchovou energií (tedy např. PP). Produktový list lepidla je uveden v příloze.

Cena lepidla:

Za balení (50 ml)	Za 1 ml
536 Kč	10,72 Kč

### 5.1.4. Lepidlo DP 8005

Konstrukční lepidlo na bázi akrylátu, vyráběné společností 3M, vytvrzované při pokojové teplotě. Lepidlo je dodávané v dvoukomorové kartuši, směšovací poměr složek je 10:1, nanáší se pomocí aplikační pistole a směšovací trysky. Doba vytvrzování pro dosažení úplné pevnosti je 24 hodin. Lepidlo je především určeno pro spojování polyolefinů, tedy plastů s nízkou povrchovou energií. Produktový list lepidla je uveden v příloze.

Cena lepidla:

Za balení (38 ml)	Za 1 ml
772 Kč	20,32 Kč

## 5.2. Předúpravy povrchu

Předúpravy povrchu byly provedeny, jak je doporučováno výrobcem nebo v rámci našeho experimentu.

### 5.2.5. Broušení

Připravené vzorky z hliníku byly v části přeplátovaného spoje zdrsňeny brusným papírem o zrnitosti 80. Se vzorky z polypropylenu bylo nakládáno čtyřmi různými způsoby. První sada vzorků byla ponechána v základním stavu, druhá sada byla zdrsňena stejným brusným

papírem jako vzorky z hliníku, třetí sada byla zdrsňena a zároveň oplazmována (rychlostí  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ), čtvrtá sada vzorků byla pouze plazmována (různými rychlostmi).

### 5.2.6. Čištění

Připravené vzorky o daných rozměrech byly čištěny pomocí isopropylalkoholu pomocí tampónů.

### 5.2.7. Plazmování

Plazmování bylo provedeno tryskou model GVN1k-2011 od firmy SurfaceTreat viz Obr. 13.



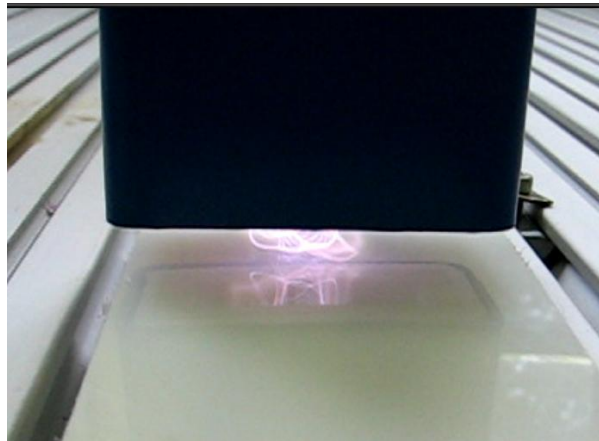
**Obr. 13** Tryska pro plazmovou úpravu [10]

Zařízení generuje plazma za atmosférického tlaku a pracovním plynem je vzduch. Jedná se o neizotermické plazma, které je vytvářeno klouzavým elektrickým výbojem – tzv. GlidArc. Tento výboj je generován v dvojici elektrod, které se rozšiřují se směrem proudění plynu. Po připojení pracovního napětí, v místě minimální vzdálenosti mezi elektrodami vznikne elektrický průraz – výboj, který je unášen proudem pracovního plynu směrem k upravovanému povrchu. V určitém místě se vlákno výboje přerušuje a nové se vytváří opět v oblasti minimální elektrodové vzdálenosti. Tento děj se periodicky opakuje po celou dobu provozu trysky.

Plazmování probíhalo ve vzdálenosti 10 mm od povrchu vzorků z polypropylenu. Průtok pracovního plynu – tedy vzduchu - byl nastaven na  $11,8 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ . Tyto hodnoty jsou firmou SurfaceTreat odzkoušené a osvědčené. Tryska je napájena vysokonapěťovým zdrojem

o frekvenci 50 Hz a výstupním napětím 10 kV. Proměnným parametrem byla rychlost plazmování – rychlost projíždění vzorků pod tryskou. Rychlost, která byla brána jako referenční, je  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ , při ní je kvalita úpravy praxí odzkoušena. Účelem experimentů bylo zjistit, zda je možné použít i vyšší rychlosti plazmování při zachování dostatečné účinnosti úpravy. Možnost použití vyšších rychlostí by znamenalo zefektivnění celého procesu i případné širší využití této předúpravy v průmyslu. Použité rychlosti byly voleny 100, 150 a  $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  a referenční byla  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Tryska v procesu plazmování je zobrazena na Obr. 14.



Obr. 14 Tryska se zachyceným výbojem plazmatu [10]

## 6. Testování vzorků

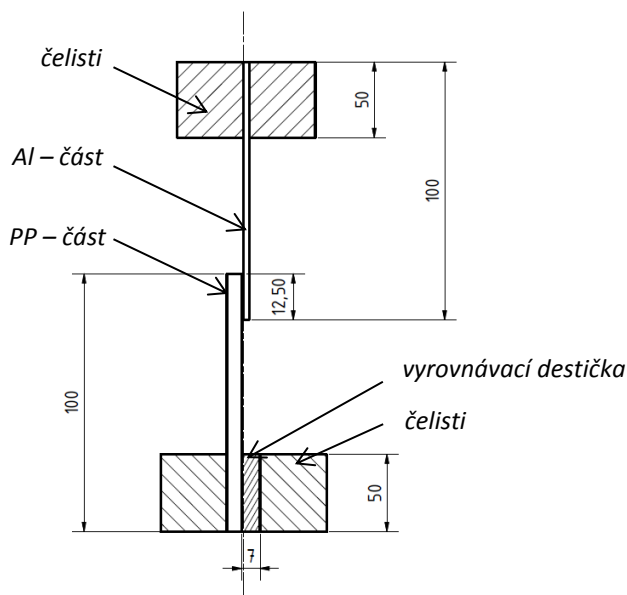
Testování probíhalo v laboratořích Ústavu materiálového inženýrství a firmy Surfacetreat. Vzorky byly kondicionovány a testovány za pokojové teploty tj. cca  $23\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Z naměřených hodnot byly vyřazeny ty, které byly zjištěny u vzorků se špatně provedeným lepeným spojem, z ostatních byl vypočten aritmetický průměr a zjištěna směrodatná odchylka. Počet vzorků v jedné sérii, které byly takto vyhodnoceny, byl vždy minimálně 10.

### 6.1. Zkouška tahem

Zhotovené slepené vzorky byly podrobené zkoušce tahem. Parametry zkoušky byly voleny tak, aby odpovídaly téměř všechny normě [3]. Odchylkou od předepsaných hodnot byl čas, který je potřebný k přetržení. Normou je daný čas  $60\pm 25 \text{ s}$ , tento je snadno ovlivnitelný rychlostí polohování čelistí trhačského stroje. Při snaze o dosažení předepsaného času byly voleny rychlosti 1, 5,  $10 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ , avšak vzorky prokluzovaly v čelistech zkušebního zařízení. Z tohoto důvodu musela být použita vyšší rychlost polohování čelistí – konkrétně  $20 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ . Při této rychlosti již k prokluzu vzorků docházelo jen sporadicky, ale čas

potřebný k přetržení se zkrátil přibližně na 15 s. Všechny vzorky byly zkoušeny za této rychlosti. Měření tedy neprobíhalo přesně dle normy, ale výsledky mezi sebou jsou plně porovnatelné. Pro zajištění působení síly na spoj pouze ve směru rovnoběžném se zátěžnou silou byla použita vyrovnávací podložka do čelistí, viz

Obr. 15. Díky tomu bylo namáhání lepeného spoje pouze smykového charakteru. Zkoušky byly prováděny na stroji ZD – 10.



Obr. 15 Schéma vzorku upnutého do čelistí zkušebního zařízení, s pomocnou vyrovnávací destičkou

### 6.1.1. Spoje vytvořené lepidlem DP190

Použité zkratky označující jednotlivé způsoby úpravy povrchu jsou uvedeny v Tab. 1

Tab. 1 Způsob značení úprav povrchu vzorků z PP

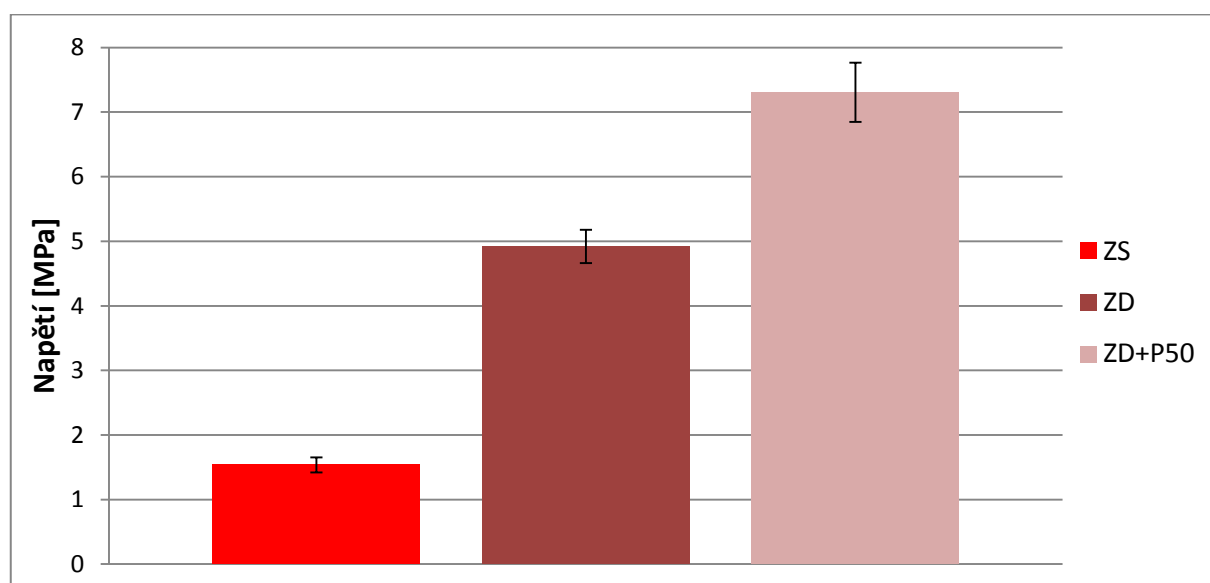
Označení	Způsob úpravy
ZS	Čištěno (základní stav)
ZD	Čištěno + zdrsňeno
ZD+P50	Čištěno + zdrsňeno + plazmováno rychlostí 50 mm.s <sup>-1</sup>
P50	Čištěno + plazmováno rychlostí 50 mm.s <sup>-1</sup>
P100	Čištěno + plazmováno rychlostí 100 mm.s <sup>-1</sup>
P150	Čištěno + plazmováno rychlostí 150 mm.s <sup>-1</sup>
P200	Čištěno + plazmováno rychlostí 200 mm.s <sup>-1</sup>



Testovány byly nejdříve spoje, ve kterých polypropylenové destičky nebyly podrobeny žádné úpravě – byly pouze vyčištěny. Dále vzorky, u kterých byly destičky z PP zdrsňeny a vyčištěny a poslední porovnanou a zkoušenou variantou byl spoj vytvořený z destiček, které byly zdrsňeny, vyčištěny a plazmovány rychlostí 50 mm.s<sup>-1</sup>. Výsledky z těchto zkoušek jsou zaneseny v grafu závislosti napětí při přetržení vzorků v základním stavu, se zdrsňeným a se zdrsňeným a oplazmovaným povrchem viz Obr. 16. Číselné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 2.

**Tab. 2 Hodnoty napětí při přetržení vzorků v základním stavu, se zdrsňeným a se zdrsňeným a zároveň plazmovaným povrchem**

Označení	ZS	ZD	ZS+P50
$\sigma$ [MPa]	1,5	5,0	7,3
směr. odchylka [MPa]	0,1	0,3	0,5
směr. odchylka [%]	7,6	6,9	6,3



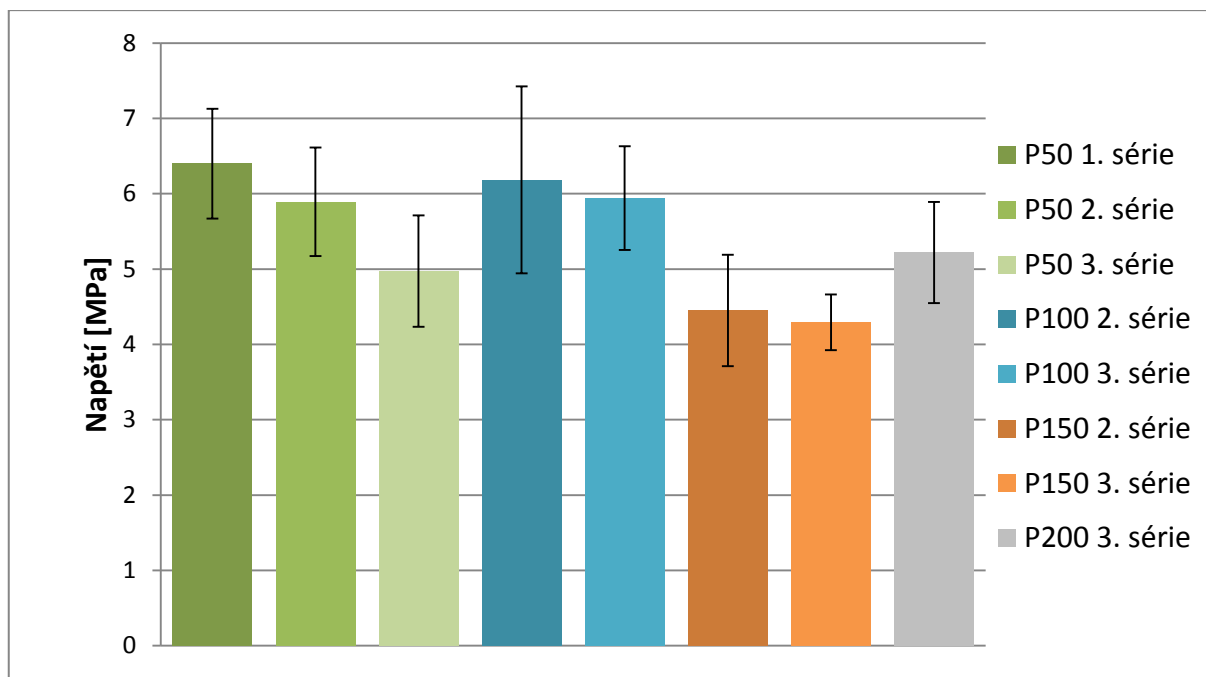
**Obr. 16 Graf hodnot napětí při přetržení vzorků v základním stavu, se zdrsňeným a se zdrsňeným a zároveň plazmovaným povrchem**

Z výše uvedeného je jasně patrné, že již pouhé zdrsňení povrchu desky z polypropylenu zlepší pevnost spoje více než 3x. V případě, že použijeme nejenom předúpravu zdrsňením ale i plazmováním, vzroste pevnost spoje téměř na pětinasobek původní hodnoty.

V následující části byly tahové zkoušky podrobeny vzorky připravené z polypropylenu, jehož povrch byl vyčištěn a plazmován při různých rychlostech. Předpokladem bylo, že se zvyšující se rychlostí pohybu trysky nad povrchem bude kvalita – účinnost úpravy povrchu klesat, což se projeví na menší odolnosti – pevnosti lepeného spoje. Tento předpoklad se příliš nepotvrdil. Byla prokázána funkčnost plazmové úpravy materiálu. Zlepšení pevnosti oproti neupravenému povrchu je přibližně čtyřnásobné. Problém, který se při zpracování dat objevil, je velké rozpětí hodnot, dosahovaných stejným typem lepeného spoje, který byl připravován naprosto identicky. Veliké nesoulady panují i při srovnání mezi jednotlivými zkoušenými sériemi lepených spojů, přestože si autor neuvědomuje jakékoli odlišnosti v postupu při přípravě lepených spojů. Výsledky jsou zpracovány v grafu na Obr. 17 a konkrétní hodnoty jsou uvedeny v Tab. 3.

**Tab. 3 Hodnoty napětí při přetržení vzorků s plazmovaným povrchem, při různých rychlostech (více sérií)**

Označení	P50	P50	P50	P100	P100	P150	P150	P200
Série	1.	2.	3.	2.	3.	2.	3.	3.
$\sigma$ [MPa]	6,4	5,9	5,0	6,2	5,9	4,5	4,3	5,2
sm. odchylka [MPa]	0,7	0,7	0,7	1,2	0,7	0,7	0,4	0,7
sm. odchylka [%]	11,4	12,3	14,8	20,0	11,6	16,7	8,7	12,9

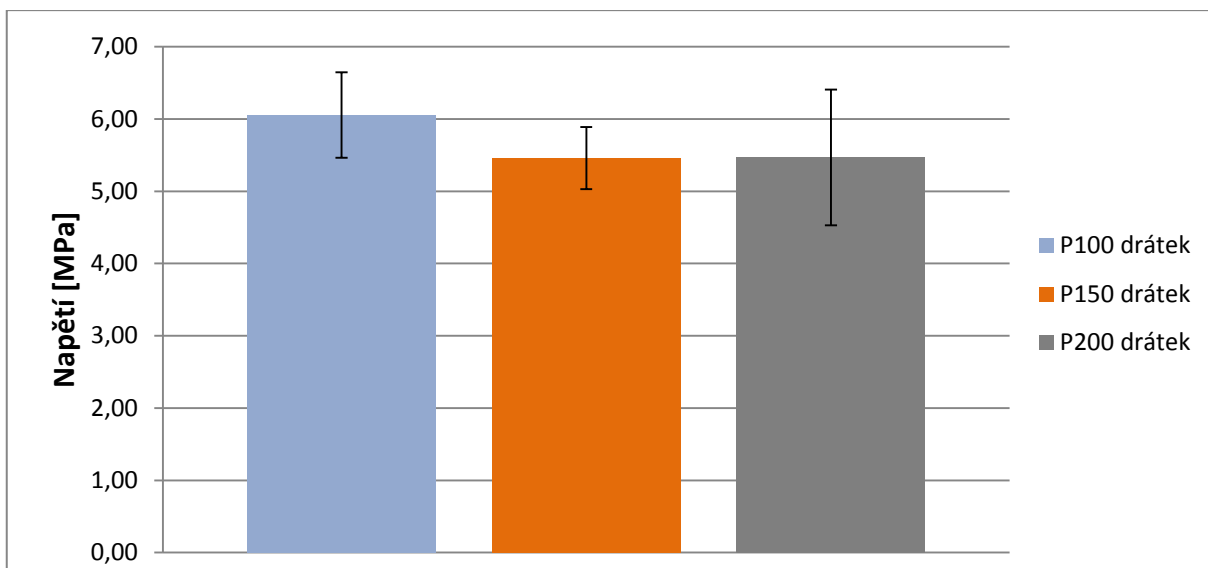


**Obr. 17** Graf hodnot napětí při přetržení vzorků s plazmovaným povrchem při různých rychlostech (více sérií)

Problém s rozptylem hodnot se autor snažil vyřešit pomocí zajištění stejné tloušťky vrstvy lepidla ve spoji. V normě [3] je doporučeno, při lepení do spoje vkládat drátek o průměru 0,2 mm a to rovnoběžně se směrem působení zátěžné síly. Zkoušeny byly vzorky připravené z PP, který byl plazmován třemi rychlostmi. Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 4 a graficky znázorněny na Obr. 18. Doporučení bylo při přípravě vzorků přesně dodrženo, kýžené zlepšení však nepřineslo. Rozptyl pevností je nadále veliký.

**Tab. 4** Hodnoty napětí při přetržení vzorků s plazmovaným povrchem, při různých rychlostech za použití distančních drátků

Označení	P100 drátek	P150 drátek	P200 drátek
$\sigma$ [MPa]	6,1	5,6	5,5
směr. odchylka [MPa]	0,6	0,4	0,9
směr. odchylka [%]	9,8	7,9	17,3



**Obr. 18** Graf hodnot napětí při přetržení vzorků s plazmovaným povrchem, při různých rychlostech a za použití drátku v lepeném spoji

Největší problém při zkoumání výsledků pevností se ukázala být nesterodnost stejně připravených vzorků z různých sérií. Pro lepení byla použita stále stejná tuba lepidla DP190, které bylo skladováno v souladu s doporučením distributora – totiž v chladicím zařízení při teplotě cca 8°C. Přesto z hodnot pevností stejně upravených vzorků z různých sérií (zobrazeno na Obr. 17) byla vyslovena hypotéza o klesající pevnosti spoje v průběhu času. Pro ověření zda lepidlo skutečně během cca 6 měsíců skutečně zestárlo a zhoršily se jeho spojovací schopnosti, byly připraveny vzorky P50 a slepeny za stejných podmínek lepidlem DP190 původním, které bylo používáno cca 6 měsíců a zcela nově zakoupeným a otevřeným lepidlem. Hodnoty jsou uvedeny v Tab. 5

**Tab. 5** Hodnoty napětí při přetržení vzorků s plazmovaným povrchem, za použití starého a nového lepidla

Označení	P50 staré lepidlo	P50 nové lepidlo
$\sigma$ [MPa]	5,0	5,3
směr. odchylka [MPa]	0,5	0,7
směr. odchylka [%]	9,3	12,6

Ze zjištěných a výše uvedených hodnot žádná závislost mezi stářím lepidla a pevností spoje tedy nebyla zjištěna. Pevnost spojů vytvořených těmito různě starými lepidly byla téměř shodná.

### 6.1.2. Spoje vytvořené lepidlem DP8005

Pro zjištění účinnosti plazmové úpravy povrchu byly vytvořeny lepené spoje také pomocí lepidla DP8005, toto je speciálně vyvinuto pro lepení plastů s malým povrchovým napětím. Byly provedeny lepené spoje polypropylenu v základním stavu a polypropylenu upraveného plazmatem rychlostí  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dosažené hodnoty pevnosti spoje jsou uvedeny v Tab. 6.

**Tab. 6 Hodnoty napětí při přetržení vzorků v základním a plazmovaném stavu**

Označení	ZS	P50
$\sigma$ [MPa]	11,6	11,7
směr. odchylka [MPa]	0,6	0,3
směr. odchylka [%]	5,4	2,8

Z výše uvedeného vyplývá, že při použití lepidla DP8005 nemá předúprava plazmováním žádný zásadní význam. Hodnoty pevnosti lepeného spoje za použití plazmování jsou prakticky stejné, jako když tato předúprava použita nebyla.

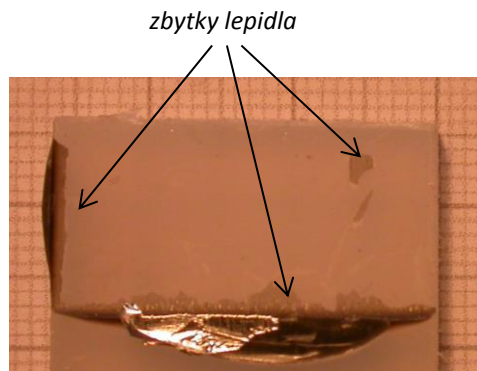
### 6.2. Posouzení druhu porušení spoje

Druhy porušení spojení byly posuzovány dle [4]. Nejlepším případem z hlediska odolnosti a pevnosti spoje je kohezní porušení. Toto porušení ukazuje, že na obou površích lepidlo drží stejnou, nebo podobnou adhezní silou. Povrchy polypropylenu a hliníku byly pohledem pozorovány, vyhodnoceny a vyfotografovány.

Obr. 19 zobrazuje polypropylenovou část lepeného spoje po zkoušce tahem, PP nebyl před lepením upraven plazmováním. Z obrázku je patrné, že použití nevhodného lepidla způsobí špatnou adhezi a tudíž porušení spoje je adhezivního charakteru. Zatím co na Obr. 20 je vzorek z PP po plazmové úpravě a po zkoušce tahem. Na fotografii jsou vidět zbytky lepidla, tedy porušení spoje lze považovat částečně za kohezní.

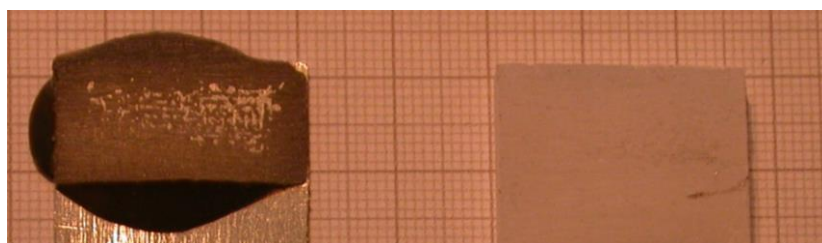


**Obr. 19** Vzorky z PP ZS po zkoušce tahem, lepidlo DP190



**Obr. 20** Vzorky z PP po plazmování po zkoušce tahem, lepidlo DP190

Obr. 21 zobrazuje lepený spoj po tahové zkoušce, polypropylen byl upraven zdrsněním brusným papírem. Spoj i přes tuto předúpravu povrchu vykazuje adhezní porušení.



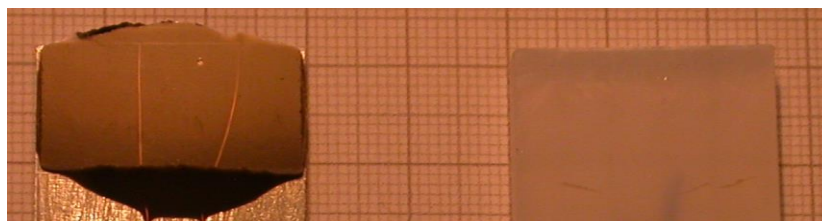
**Obr. 21** Vzorky po zdrsnění po zkoušce tahem, lepidlo DP190

Obr. 22 zobrazuje lepený spoj po tahové zkoušce, polypropylen byl upraven plazmováním, tloušťka spoje byla vymezena drátkou. Spoj byl porušen kohezním způsobem.



**Obr. 22** Vzorky po plazmování s vymezením tloušťky spoje drátky po zkoušce tahem, lepidlo DP190

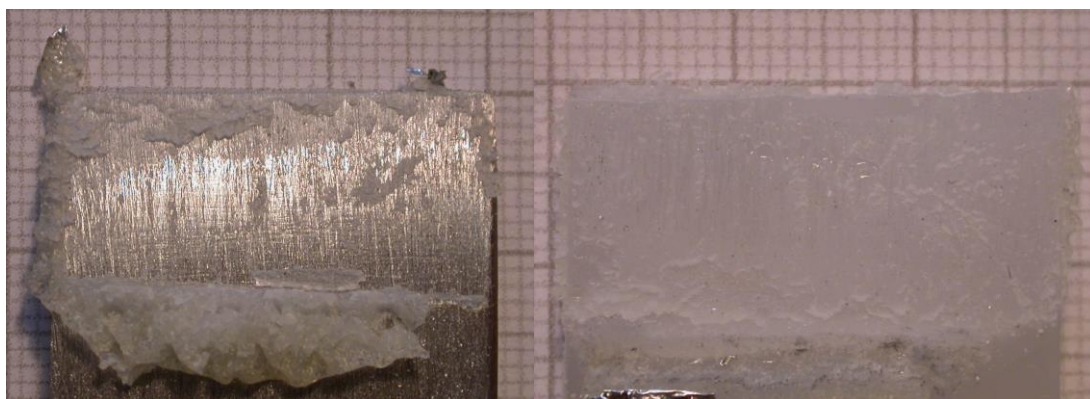
Obr. 23 zobrazuje také lepený spoj po tahové zkoušce, kde byl polypropylen upraven plazmováním a tloušťka spoje byla vymezena drátkou. Spoj však na rozdíl od předcházejícího případu vykazuje jednoznačně adhezivní porušení.



**Obr. 23 Vzorek po plazmování s vymezení tloušťky spoje drátky po zkoušce tahem, lepidlo DP190**

Většina ze zkoušených vzorků lepených lepidlem DP 190 vykazovala porušení adhezní na povrchu polypropylenu. Vzorků, kde došlo ke koheznímu porušení, byla menšina. Závislost mezi porušením kohezního charakteru a větší pevností spoje nebyla pozorována. Po plazmování však jednoznačně k lepší adhezi lepidla k PP dojde. I u vzorků porušených adhezně je možné na povrchu polypropylenu pozorovat jisté mapy, skvrny, či zbytky lepidla, což na povrchu neoplazmovaném nebylo zjištěno.

V případě použití lepidla DP 8005, tedy přímo lepidla určeného k lepení materiálů jako je PP, vykazuje spoj po zkoušce tahem jasně porušení kohezního charakteru. Toto zjištění dokládá Obr. 24. Typ porušení je zcela nezávislý na úpravě plazmováním, vykazuje kohezní charakter vždy.



**Obr. 24 Vzorek ZS po zkoušce tahem, lepidlo DP8005**

### **6.3. Měření kritického povrchového napětí**

Pro zjištění účinnosti plazmování při různých rychlostech bylo provedeno měření kritického povrchového napětí vzorků z polypropylenu. Měření bylo provedeno pomocí přístroje Krüss shape analyzer - DSA30. Na základě zkušeností s přístrojem byly použity dvě kapaliny: voda a diiodomethan. Na vzorky byly nanášeny kapky o objemu v případě vody přibližně 3  $\mu\text{l}$  a v případě diiodomethanu přibližně 2,5  $\mu\text{l}$ . Hodnoty kontaktních úhlů byly zjišťovány vždy na

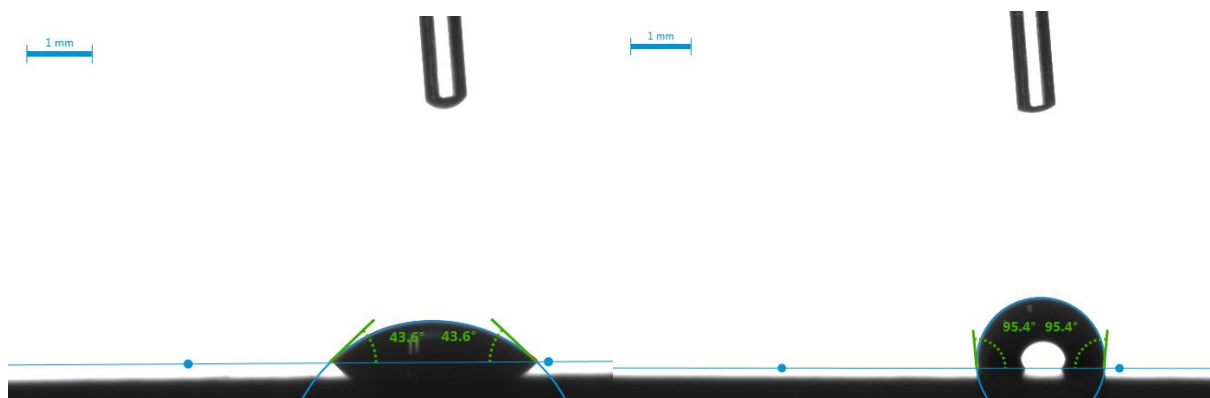
dvanácti kapkách, krajní (největší a nejmenší) zjištěné hodnoty byly vyřazeny, z ostatních byl udělán průměr a vypočtena směrodatná odchylka.

Měřicí přístroj pracuje na principu snímání kapky digitální kamerou, obraz z kamery zpracovává analytickým programem od výrobce přístroje. Program je schopen téměř bez zásahu obsluhy zjišťovat kontaktní úhly. Obsluha pouze upravuje hladinu roviny kontaktu a následně ukládá zjištěnou hodnotu. Uložené hodnoty program sám statisticky zpracuje a následně ihned i vyhodnotí kritické povrchové napětí měřeného povrchu. Vyhodnocení hodnot kontaktních úhlů zkušebních kapalin bylo programem vyhodnoceno na základě modelu SFE OWRK. Hodnoty kontaktních úhlů jsou uvedeny v Tab. 7.

**Tab. 7 Hodnoty kontaktních úhlů na povrchu PP**

Zkušební kapalina	Voda	Diiodo-methane
Povrch PP	Kontaktní úhel [°]	
ZS	96±1	53±1
P50	44±5	38±1
P100	48±4	41±1
P150	59±7	43±2
P200	61±5	41±1

Fotografie kapek z průběhu měření s vyznačenými kontaktními úhly jsou vyobrazeny na Obr. 25 a na Obr. 26. Na první pohled je patrná změna smáčivosti povrchu po plazmové úpravě i rozdílná smáčivost povrchu vodou a diiodomethanem. Rozdíl spočívá v odlišné hodnotě povrchového napětí kapalin. Voda má udávanou hodnotu  $72,8 \text{ mN.m}^{-1}$ , zatím co diiodo-methane  $50,8 \text{ mN.m}^{-1}$ .



**Obr. 25 Porovnání velikostí kontaktních úhlů na vzorcích PP, vlevo P50, vpravo ZS, kapalina voda**



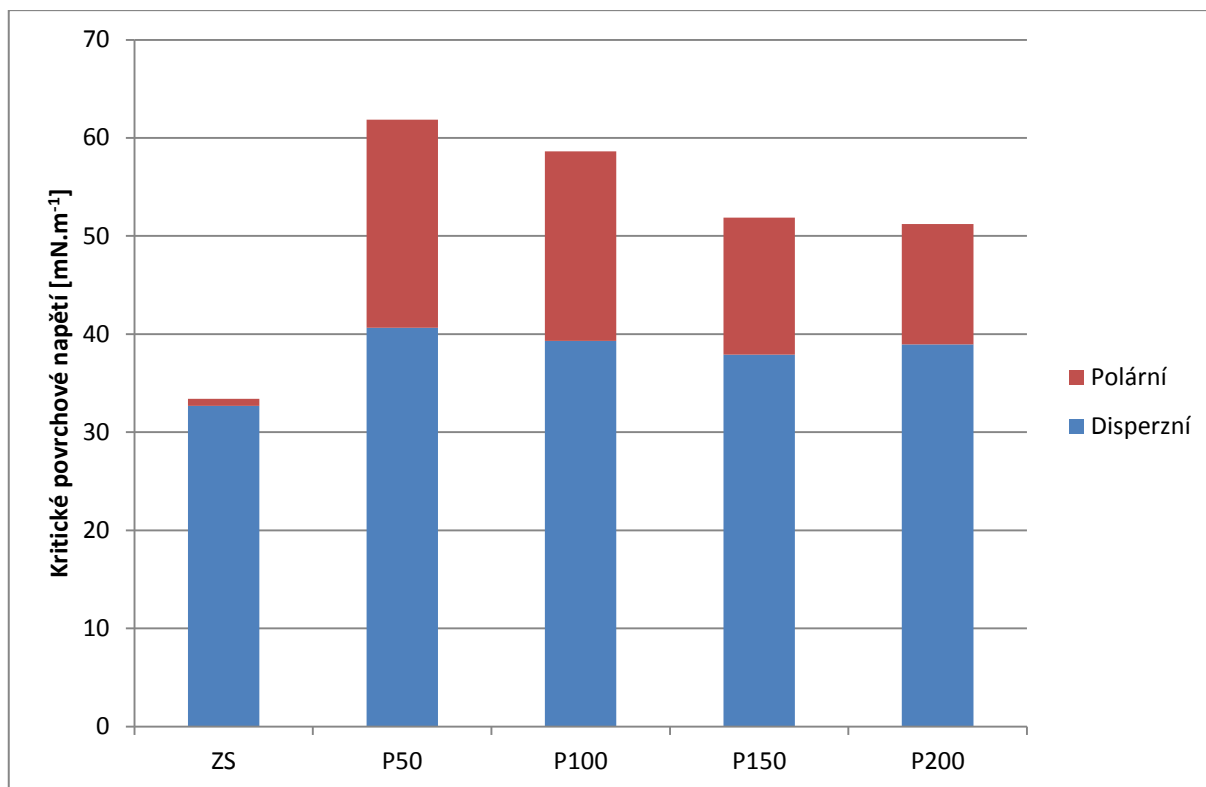


**Obr. 26** Porovnání velikostí kontaktních úhlů na vzorcích PP, vlevo P50, vpravo ZS, kapalina diiodo-methane

Předpoklad klesající účinnosti plazmové úpravy s rostoucí rychlostí pohybu trysky je tímto měřením podpořen. Nicméně na základě měření se nezdá být pokles kritického povrchového napětí nikterak dramatický, konkrétní vypočítané hodnoty jsou vyneseny v Tab. 6. V grafu jsou znázorněny i polární a disperzní složky viz Obr. 27.

**Tab. 8** Hodnoty kritického povrchového napětí vzorků PP, včetně polární a disperzní složky

	Disperzní složka [mN.m <sup>-1</sup> ]	Polární složka [mN.m <sup>-1</sup> ]	Kritické povrchové napětí [mN.m <sup>-1</sup> ]
ZS	32,7±0,3	0,7±0,2	33,4±0,5
P50	40,7±0,5	21,2±2,7	61,9±3,2
P100	39,3±0,6	19,3±2,4	58,6±2,9
P150	37,9±0,9	14,0±3,9	51,9±4,8
P200	39,0±0,8	12,3±2,8	51,2±3,5



**Obr. 27 Graf hodnot kritického polárního napětí vzorků PP, včetně polární a disperzní složky**

Zajímavými ukazateli jsou hodnoty disperzní a polární složky kritického povrchového napětí, zatímco neupravený povrch PP má polární složku téměř nulovou (což je logické - polypropylen patří do skupiny nepolárních termoplastů), tak plazmově upravené povrchy PP vykazují hodnoty v rozmezí 12 - 20 mN.m<sup>-1</sup>. Díky nárůstu polární složky se výrazně zvýší i celková hodnota kritického povrchového napětí a to až na dvojnásobek původní hodnoty neupraveného povrchu.

Měření kritického povrchového napětí bylo provedeno pouze na hladkých površích. Zjišťování kritického napětí touto metodou na drsném povrchu není validní, proto na zdrsněných vzorcích nebylo provedeno.

## 7. Diskuze výsledků

V rámci vypracování této práce byly posuzovány vlivy úprav povrchu polypropylenových desek plazmovou tryskou při různé rychlosti, prostým mechanickým zdrsněním povrchu a jejich kombinací při použití lepidla DP190. Pro srovnání byly vytvořeny a otestovány lepené spoje za použití lepidla DP8005 s plazmou úpravou a bez úpravy.

Výsledky potvrzují kvalitu lepidla DP8005, které je speciálně určené i k lepení materiálů jako polypropylen a polyethylen. Spoje vytvořené tímto lepidlem dosahovaly nejlepších hodnot pevnosti. Plazmová úprava již nepřinesla žádné významné zlepšení. Hodnoty pevností lepených spojů byly 11,6 MPa, v případě neupraveného povrchu, a 11,7 MPa, v případě povrchu plazmovaném. Velice dobrá se ukázala být i opakovatelnost výsledků (směrodatné odchylky jsou v řádech jednotek procent).

Použití lepidla DP190, které není doporučeno k lepení polyolefinů, se z hlediska zkoumání vlivu účinnosti plazmatické úpravy, ukázalo být vhodné. Na výsledcích pevností spojů vytvořených tímto lepidlem, je vliv plazmové úpravy dobře patrný. Autora práce však neuspokojují dosažené výsledky, hlavně z důvodu značného rozptylu naměřených hodnot. Nadále se výzkumem této problematiky hodlá zabývat. Problém, který způsobuje zjištěnou špatnou opakovatelnost, shledává autor buď v tom, že lepené spoje byly vytvářeny ručně či v nedostatečné předúpravě povrchu. Konkrétně čištění povrchu před plazmovou úpravou je pravděpodobně nedostatečné. Tamponování izopropylalkoholem nejspíše neodstraní veškeré nečistoty na povrchu. Tato rezidua mají pravděpodobně negativní vliv na kvalitu spoje. Zákonitá nahodilost těchto reziduí by mohla být odpovědí na značnou rozdílnost ve kvalitě jednotlivých spojů vytvářených jinak za stejných podmínek.

Posouzení vlivu rychlosti plazmování na kvalitu lepeného spoje je problematické. Hypotéza, která se logicky nabízí, že s rostoucí rychlostí úpravy plazmováním bude klesat pevnost lepeného spoje, se příliš nepotvrdila. Najít jakoukoli závislost mezi rychlostí plazmování a pevností spoje je znemožněno velkými odchylkami a rozdílnými hodnotami stejně připravených vzorků, které byly ale vytvořeny a otestovány v jiné sérii. Směrodatné odchylky se pohybují v intervalu od 10 do 20 %. Přesto se potvrdilo, že úprava plazmováním přinese zlepšení pevnosti lepeného spoje. Spoje s takto upraveným povrchem polypropylenových

desek dosahovaly pevnosti většinou 5 až 6 MPa. Uvedené hodnoty představují zlepšení oproti neupraveným vzorkům až čtyřnásobné.

Nejlepších výsledků při použití lepidla DP190 bylo dosaženo při kombinaci předúprav zdrsněním a plazmováním, tím průměrná hodnota pevnosti dosáhla 7,3 MPa. Při použití pouze předúpravy zdrsněním bylo dosaženo hodnoty 5,0 MPa. V obou případech nenastal ani problém s neopakovatelností výsledků, hodnota směrodatných odchylek se pohybuje v řádech jednotek procent.

Hodnoty zjištěného povrchového napětí na vzorcích v základním stavu byly  $33,4 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$  a na vzorcích plazmovaných rychlostí  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  byla zjištěna hodnota  $61,9 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , což ukazuje na téměř dvojnásobný nárůst. Závislost mezi rychlostí plazmování a velikostí kritického povrchového napětí byla nalezena a potvrdila předpoklad, že zvýšení rychlosti plazmování způsobí pokles kritického povrchového napětí. Rozdíl mezi rychlostí  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  činí 17 %.

Hodnoty pevností i kritických povrchových napětí ukazují, že tryska pro plazmovou úpravu GVN1k-2011 od firmy SurfaceTreat je použitelná i při větších rychlostech plazmování. Konkrétní hodnoty maximální použitelné rychlosti plazmové úpravy povrchu vždy závisí na materiálu daného povrchu, používaném lepidlu, požadavcích na únosnost spoje, dalších předúpravách povrchu a jiné.

Čistě teoreticky, za předpokladu, že pevnost plazmově upravených a slepených vzorků lepidlem DP190 by byla vyhovující, rozdíl ceny lepidla určeného pro lepení polyolefinů a lepidla DP190 by byl 9,60 Kč za 1 ml, tloušťka lepeného spoje by byla 0,2 mm a cena trysky by byla 150 000 Kč, tak by se investice do zakoupení trysky vrátila po slepení plochy  $78,125 \text{ m}^2$ . Pro představu bychom této lepené plochy dosáhli slepením 250 000 vzorků testovaných v této práci.

## 8. Závěr

Cílem bakalářské práce bylo experimentálně ověřit vliv povrchových předúprav povrchu polypropylenu na lepený spoj. Na základě zjištěných skutečností je možné konstatovat:

- 1) Za použití neupraveného polypropylenu byla pevnost lepeného spoje 1,5 MPa (slepeno lepidlem DP190).
- 2) Za použití plazmově upraveného povrchu se hodnota pevnosti spoje pohybovala od 5 do 6 MPa. Zlepšení oproti neupravenému polypropylenu tedy bylo přibližně čtyřnásobné (slepeno lepidlem DP190).
- 3) Jednoznačná závislost mezi rychlostí plazmování a pevností spoje nebyla prokázána. I vzorky plazmované nejvyšší testovanou rychlostí vykazovaly velmi dobrou pevnost.
- 4) Při použití předúpravy zdrsněním polypropylenu bylo dosaženo pevnosti 5 MPa. Když tato předúprava byla zkombinována s plazmováním, bylo dosaženo pevnosti dokonce 7,3 MPa (slepeno lepidlem DP190).
- 5) Spoje vytvořené speciálním lepidlem DP8005 dosahovaly pevnosti 11,6 MPa při použití neupraveného PP, respektive 11,7 MPa za použití PP plazmovaného.
- 6) Po prozkoumání vzorků podrobených tahové zkoušce bylo zjištěno, že všechny vzorky připravené z neupraveného PP vykazují adhezivní porušení spoje, zatímco některé vzorky připravené z plazmovaného PP vykazovaly částečně kohezivní porušení spoje (slepeno lepidlem DP190).
- 7) Při použití lepidla DP8005 vykazovaly všechny otestované spoje jednoznačně kohezivní porušení.
- 8) Měření kontaktních úhlů ukázalo téměř dvojnásobné zvětšení kritického povrchového napětí na plazmovaném povrchu oproti povrchu neupraveném.
- 9) Při zvyšování rychlosti plazmování klesá kritické povrchové napětí upravovaného povrchu PP. Při rychlosti  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  činí hodnota  $61,9 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ , zatímco při rychlosti  $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$  byla zjištěna hodnota  $51,2 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ .
- 10) Cíle práce byly splněny.

## 9. Bibliografie

- [1] PETERKA, Jindřich. *Lepení konstrukčních materiálů ve strojírenství*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980.
- [2] WEBEROVÁ, Zuzana. *Methods of adhesive bonding joints testing*. Praha, 2016. Bachelor Thesis. ČVUT. Vedoucí práce Prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
- [3] ČSN EN 1465: *Lepidla - Stavovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání přeplátovaných lepených sestav*. ÚNMZ, 2009.
- [4] ČSN ISO 10365: *Lepidla. Označení hlavních typů porušení lepeného spoje*. ÚNMZ, 1995.
- [5] WU, Souheng. *Polymer interface and adhesion*. 1. vydání. New York: M. Dekker, 1982. ISBN 0824715330.
- [6] EBNESAJJAD, Sina a Cyrus EBNESAJJAD. *Surface treatment of materials for adhesive bonding*. Second edition. Elsevier, 2014. ISBN 9780323264358.
- [7] FIALA, Jaroslav a Ivo KRAUS. *Povrchy a rozhraní*. 2. přepracované vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 9788001058817.
- [8] MEISSNER, Bohumil a Václav ZILVAR. *Fyzika polymerů: Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1987.
- [9] CHEN, Francis. *Úvod do fyziky plazmatu*. 1. Přeložil Karel ROHLENA. Praha: Academia, 1984.
- [10] *SurfaceTreat* [online]. Turnov, [cit. 2017-06-13].  
Dostupné z: <http://surfacetreat.cz/cs/domu/>

## **10. Přílohy**