

# **Možnosti ovlivnění pevnosti lepených spojů u vybraných typů materiálů**

Bc. Petra Kovářová

---

Diplomová práce  
2016

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta technologická

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2015/2016

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petra Kovářová**  
Osobní číslo: **T14579**  
Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní inženýrství**  
Forma studia: **kombinovaná**

Téma práce: **Možnosti ovlivnění pevnosti lepených spojů u vybraných typů materiálů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární studie na dané téma
2. Příprava zkušebních vzorků pro experimentální část
3. Provedení experimentu
4. Vyhodnocení naměřených výsledků

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **EBNESAJJAD, Sina. Surface treatment of materials for adhesion bonding.** Norwich, NY, U.S.A.: William Andrew Publishing, c2006, xvi, 260 s. ISBN 0-8155-1523-5.
2. **BROCKMANN, Walter. Adhesive bonding: materials, applications and technology.** Weinheim: Wiley-VCH, c2009, xviii, 414 s. ISBN 978-3-527-31898-8.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Bednařík, Ph.D.**  
Ústav výrobního inženýrství

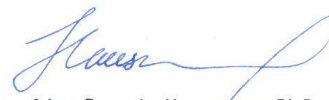
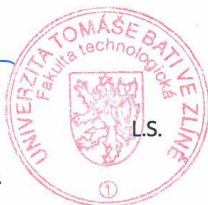
Datum zadání diplomové práce: **8. ledna 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **13. května 2016**

Ve Zlíně dne 27. ledna 2016



doc. Ing. František Buňka, Ph.D.  
*děkan*



prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

Příjmení a jméno: Petra Koubřová

Obor: Výrobní inženýrství

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby <sup>1)</sup>;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 <sup>2)</sup>;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 <sup>3)</sup> odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 9.5.2016

Koubřová

<sup>1)</sup> zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

<sup>2)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacímu zařízení (školní dílo).

<sup>3)</sup> zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výdělku jim dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlídí k výši výdělku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

## **ABSTRAKT**

Diplomová práce se zabývá problematikou lepení polymerů se zaměřením na vliv plazmové úpravy povrchu na výslednou únosnost lepených spojů. Práce je rozdělena do dvou částí. První část, která je rešeršního charakteru, se zabývá tématy: teorie lepení, rozdělení a charakteristika lepidel, úprava povrchu lepeného materiálu, vlastnosti ovlivňující výslednou pevnost lepeného spoje.

V druhé, experimentální části se práce zabývá vyhodnocením vlivu modifikace povrchu materiálu plazmou na pevnosti lepeného spoje spolu s vyhodnocením naměřených výsledků. Nejprve byly popsány základní vlastnosti použitých lepidel a materiálů. Dále vliv plazmové úpravy na povrchové vlastnosti zkoumaných materiálů (smáčivost, kontaktní úhel, volná povrchová energie) a v neposlední řadě také vliv plazmy na výslednou pevnost lepených spojů.

Klíčová slova: Lepené spoje, lepení, pevnost lepeného spoje, lepidlo, HDPE, LDPE, PP, PC, polymery, úpravy polymerů, zkoušky pevnosti, smáčivost, kontaktní úhel smáčení, volná povrchová energie, plazma.

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with an issue of bonding strength for selected materials. The thesis is divided into two parts. The first theoretical part deals with following topics: theory of bonding, classification and characteristics of adhesives, preparation of material surfaces, characteristics influencing resulting bonding strength.

In the second experimental part the thesis aims on evaluation how a bonding strength depends on modification of a bonded surface with plasma together with evaluation of measured results. At first it describes basic characteristics of tested adhesives and materials. Then it continues with influence of plasma on wettability and contact angle of bonded samples. Finally it analyses resulting bonding strength.

Keywords: Bonded joints, bonding, bonding strength, adhesive, HDPE, LDPE, PP, PC, polymers, polymers modification, strength testing, wettability, contact angle of wetting, excess free energy, plasma.

Tímto bych chtěla velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Bednaříkovi, Ph.D. za pomoc, cenné rady, ochotu a vynaložený čas. Dále bych ráda poděkovala společnosti Zlín Precision s.r.o. za pomoc a provedení plazmové modifikace zkušebních těles.

A v neposlední řadě celé mé rodině a přáteli, kteří mě po celou dobu mého studia bezmezně podporovali.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.



# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
<b>1 ZÁKLADY LEPENÍ .....</b>	<b>13</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY V TEORII LEPENÍ .....	13
1.1.1 Adheze a koheze.....	13
1.1.2 Teorie adheze .....	14
1.2 NÁVRH LEPENÉHO SPOJE .....	15
1.2.1 Minimalizace zatížení loupáním a štěpením .....	16
1.3 POŽADAVKY NA LEPENÍ PLASTŮ .....	18
1.3.1 Vliv povrchové vrstvy plastu .....	18
1.3.2 Plasty s přísadami s nízkou molekulární vahou .....	18
1.3.3 Vnější a vnitřní separátory forem.....	18
1.4 DRUHY A VLASTNOSTI LEPIDEL .....	19
1.4.1 Vlastnosti lepidel.....	19
1.4.2 Klasifikace lepidel.....	20
1.4.3 Skladování lepidel .....	22
<b>2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PEVNOST LEPENÉHO SPOJE.....</b>	<b>24</b>
2.1 VÝBĚR VHODNÉHO LEPIDLA .....	24
2.2 ÚPRAVA LEPENÝCH PLOCH .....	24
2.3 TYP ZATĚŽOVÁNÍ.....	25
2.4 DRSNOST POVRCHU .....	26
2.5 DOBA VYTVRZOVÁNÍ.....	27
2.6 VADY VE VRSTVĚ LEPIDLA .....	27
2.7 VLIV TEPLoty NA PEVNOST LEPENÝCH SPOJŮ .....	29
2.7.1 Teplotní roztažnost.....	29
2.8 VLIV VLHKOSTI NA PEVNOST LEPENÉHO SPOJE .....	29
2.9 POLARITA .....	29
2.10 OBSAH PLNIV.....	30
2.11 OBSAH ZMĚKČOVADEL .....	30
2.12 SOUDRŽNOST POVRCHU.....	30
2.13 ČISTOTA POVRCHU .....	30
<b>3 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ, POVRCHOVÁ ENERGIE A KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ.....</b>	<b>31</b>

3.1	FÁZOVÁ ROZHRANÍ.....	31
3.2	POVRCHOVÉ NAPĚTÍ .....	32
3.3	POVRCHOVÁ ENERGIE .....	33
3.4	KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ.....	33
3.5	KAPKA KAPALINY NA POVRCHU PEVNÉ LÁTKY .....	34
3.6	SMÁČIVOST .....	36
3.7	VYUŽITÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU SMÁČENÍ .....	36
3.8	MĚŘENÍ KONTAKTNÍHO ÚHLU SMÁČENÍ.....	37
3.8.1	Měření úhlu smáčení na přisedlé kapce nebo přilnaví bublině .....	37
3.8.2	Měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce.....	38
3.8.3	Faktory ovlivňující kontaktní úhel smáčení .....	38
<b>4</b>	<b>POVRCHOVÉ ÚPRAVY POLYMERŮ .....</b>	<b>39</b>
4.1	ÚPRAVA POVRCHU KORÓNOVÝM VÝBOJEM.....	39
4.2	ÚPRAVA POVRCHU PLAMENEM.....	40
4.3	ÚPRAVA POVRCHU PLAZMOU .....	40
4.4	CHEMICKÁ MODIFIKACE PLAZMATEM.....	42
4.4.1	Morfologická modifikace povrchu.....	42
4.5	ÚPRAVA POVRCHU CHEMICKÝM LEPTÁNÍM .....	42
4.6	ÚPRAVA POVRCHU ULTRAZVUKOVÝM ČIŠTĚNÍM .....	42
4.7	ÚČINNOST POVRCHOVÝCH ÚPRAV .....	43
4.7.1	Povrchové napětí kapalin .....	43
4.7.2	Kontaktní úhel smáčení.....	43
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>44</b>
<b>5</b>	<b>CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE .....</b>	<b>45</b>
<b>6</b>	<b>PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES, LEPENÍ, MODIFIKACE A ZKOUŠKY PEVNOSTI.....</b>	<b>46</b>
6.1	VOLBA MATERIÁLU .....	46
6.2	VOLBA LEPIDLA.....	48
6.3	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ .....	50
6.3.1	Modifikace lepených povrchů plazmou .....	51
6.4	PROVEDENÉ ZKOUŠKY .....	52
<b>7</b>	<b>VÝSLEDKY PRÁCE .....</b>	<b>53</b>
7.1	KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ.....	53
7.1.1	Výsledky u HDPE .....	54
7.1.2	Výsledky u LDPE.....	56
7.1.3	Výsledky u PC.....	57
7.1.4	Výsledky u PP .....	59

7.2	VOLNÁ POVRCHOVÁ ENERGIE.....	60
7.2.1	Materiál HDPE.....	60
7.2.2	Materiál LDPE .....	62
7.2.3	Materiál PC .....	64
7.2.4	Materiál PP.....	65
7.3	PEVNOST LEPENÝCH SPOJŮ .....	67
7.3.1	Pevnost základního, nerostříhaného a nelepeného materiálu .....	67
7.3.2	Pevnost lepeného spoje při použití kyanoakrylátového lepidla SUREFIX 4401 .....	68
7.3.3	Pevnost lepeného spoje při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla CYBERBOND A806 .....	72
7.3.4	Pevnost lepeného spoje při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla ZYROBOND 2K-MMA 7306.....	75
7.3.5	Pevnost lepeného spoje při použití 2-komponentního epoxidového lepidla SUREFIX EPOXY .....	79
7.3.6	Pevnost lepeného spoje při použití lepidla SUREFIX 4401 a Primeru LOCTITE 7239 .....	82
<b>8</b>	<b>DISKUZE VÝSLEDKŮ.....</b>	<b>84</b>
8.1	VLIV MODIFIKACE PLAZMOU NA POVRCHOVÉ VLASTNOSTI.....	84
8.2	VLIV MODIFIKACE PLAZMOU NA ÚNOSNOST LEPENÉHO SPOJE.....	85
8.2.1	Materiál HDPE.....	85
8.2.2	Materiál LDPE .....	86
8.2.3	Materiál PP.....	87
8.2.4	Materiál PC .....	88
8.3	POROVNÁNÍ ÚNOSNOSTI SPOJŮ U MATERIÁLŮ MODIFIKOVANÝCH PLAZMOU A U MATERIÁLŮ AKTIVOVANÝCH PRIMEREM.....	89
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>90</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>93</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>95</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>98</b>

## ÚVOD

Lepený spoj je nerozebíratelné spojování dvou a více součástí ze stejných či různých materiálů za použití lepidla. Tato metoda spojování materiálů doznala za poslední dobu velkého rozmachu a to především v automobilovém průmyslu. Díky mnoha výhodám, lepení vytlačuje jiné metody spojování, jakožto svařování, pájení, nýtování a spojování pomocí šroubů. Oproti těmto metodám má lepení více možností a umožňuje dosáhnout spojů s vlastnostmi, které by nebylo možno jinými metodami spojování dosáhnout. Lepené spoje jsou na rozdíl od nýtových a šroubových spojů nepropustné pro kapaliny či plyny. Lepený spoj rozvádí při dynamickém namáhání vzniklé pnutí mnohem rovnoměrněji nežli mechanický spoj. Lepením lze spojovat jak velké plochy, tak i mnoho malých součástek.[1,6]

I přes to, že některá lepidla, jako jsou například epoxidová lepidla, mají velký rozsah využití, nelze je považovat za univerzální. Každý lepený materiál má své specifické vlastnosti, a proto neexistuje žádné univerzální lepidlo. Jen s určitými druhy lepidel, na konkrétních materiálech a za určitých podmínek, je možno dosáhnout spoje s optimálními vlastnostmi. Lepidlo se vybírá podle lepeného materiálu tak, aby byl lepený spoj co nejkvalitnější a nejpevnější. Na pevnost lepeného spoje má velký vliv předběžná úprava lepených ploch, která je velmi důležitá především u materiálu se špatnými adhezními vlastnostmi.[1,6]

# **I. TEORETICKÁ ČÁST**

# 1 ZÁKLADY LEPENÍ

Lepení se zakládá na použití lepidel (adheziv) ke spojení více pevných součástí. Lepidlo se dostane mezi nerovnosti lepeného materiálu (adherendu) a vypudí tak z mikropórů většinu plynů a par. Lepený spoj tak vzniká za působení koheze a adheze. Síly, vyvolávající přilnavost adherendu a adheziva, se nazývají adheze. Vlastní soudružnost ztuhlého či vytvrzeného filmu lepidla se pak nazývá koheze. [8]

## 1.1 Základní pojmy v teorii lepení

### 1.1.1 Adheze a koheze

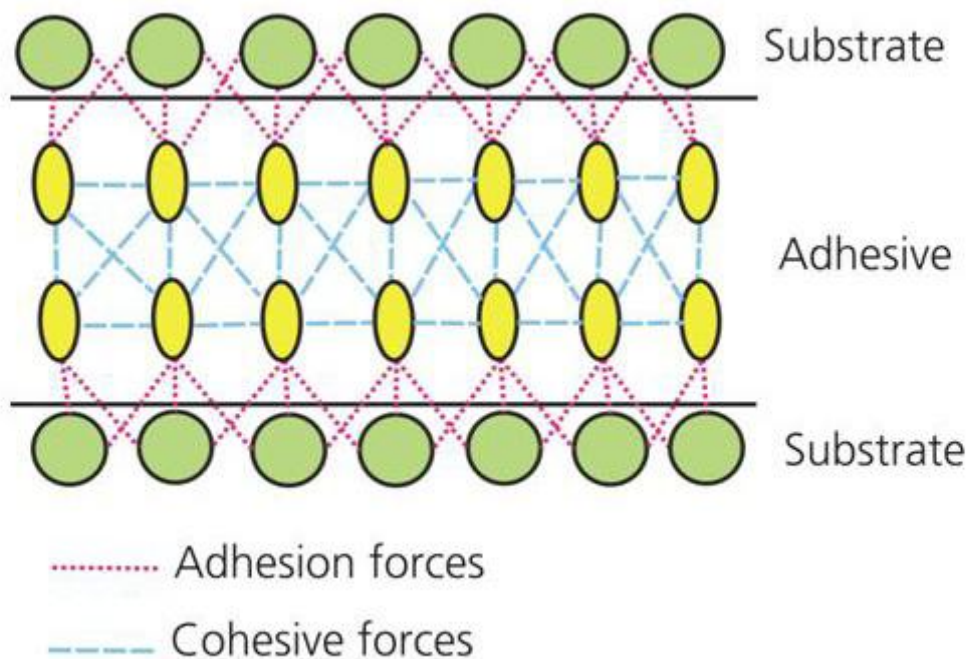
Adheze je základní předpoklad úspěšného lepení. Nepřilne-li lepidlo dostatečně pevně k materiálu, spoj nedrží a dochází k rozlepení. V takovém případě je vnitřní soudržnost lepidla (koheze) i vlastní pevnost materiálu vyšší než přilnavost (adheze). [8]

K tomu, aby se mohly uplatnit adhezivní síly, je nutný dokonalý styk lepidla a povrchu lepené hmoty. Adhezivní vazba nevznikne, není-li lepidlo rovnoměrně a dokonale rozprostřeno po povrchu. Adheze souvisí s molekulovou strukturou. Z toho plyne, že při adhezi se budou mezi molekulami uplatňovat:

- fyzikální síly,
- chemické vazby,
- mezimolekulární síly.

Je dokázáno, že molekulárně rovné povrchy hmot se vyznačují velkou vzájemnou adhezí, a to i bez použití lepidla. Tím pádem budeme hledat hlavní podíl adheze v adhezi specifické, nikoliv v mechanické. Na specifické adhezi se podílejí především primární chemické vazby. [9]

Koheze je souhrn sil, které drží částice adheziva působením mezimolekulárních a valenčních sil pohromadě. Velikost koheze je udávána tzv. kohezní energií. To je velikost energie, které je potřeba pro odtržení jedné částičky lepidla od ostatních. Někdy se koheze nazývá jako soudržnost, nebo taky vnitřní adheze. [10]



Obr. 1. Adheze a koheze ve spoji. [10]

### 1.1.2 Teorie adheze

V současné době se nejčastěji používají následující teorie adheze:

- Molekulová (absorpční) teorie,
- elektrostatická teorie,
- difúzní teorie,
- reologická teorie,
- chemická teorie. [11]

#### *Molekulová teorie (absorpční)*

Základem adheze je vzájemné působení molekul adherendu a lepidla, pro které je nevyhnutelné, aby oba druhy molekul měly polární funkční skupiny schopné vzájemného působení. [11]

### ***Elektrostatické teorie***

Tato teorie předpokládá dvojitou vrstvu vytvořenou dotykem dvou rozdílných substancí ve spoji jako základ pro vznik adheze. Vytvářejí se elektrické síly v podobě elektrické dvojvrstvy, které jsou tvořeny na rozhraní lepidla a lepeného materiálu. Tato teorie se získala při pozorování elektrického výboje při odlupování lepidla z povrchu. Avšak, při podrobnějších studiích nebyla rozpoznána korelace mezi velikostí povrchového elektrického náboje a pevností odpovídajících adhezních spojení. [11]

### ***Difúzní teorie***

Dle této teorie vzniká pevnost spoje vzájemnou difúzí polymerů, nebo jiných materiálů, napříč rozhraní. Difúzní teorie je použitelná tehdy, kdy lepidlo a lepený materiál jsou polymery s relativně dlouhými řetězci molekul, které jsou schopny pohybu. [11]

### ***Chemická teorie***

K získání pevného spoje, který nebude vykazovat adhezivní povrch, ale jen kohezivní lom, je dle této teorie potřebné, aby materiály, které se mají spojit, navzájem reagovaly vytvořením primárních chemických vazeb napříč rozhraním. Adhezní vazby se vytváří povrchovými chemickými silami. Vodíkové, iontové a kovalentní vazby jsou mezi lepeným materiálem a lepidlem mnohem silnější než disperzní přitažlivé síly.

Mezi nejsilnější a nejodolnější vazby se řadí kovalentní chemické vazby, ale vyžadují existenci vzájemně reaktivních chemických skupin.[5]

### ***Reologická teorie***

Je nejnovější teorií. Pevnost lepeného spoje je dána zásadně fyzikálně-mechanickými a reologickými vlastnostmi materiálů, které vytvářejí lepený systém. [9]

## **1.2 Návrh lepeného spoje**

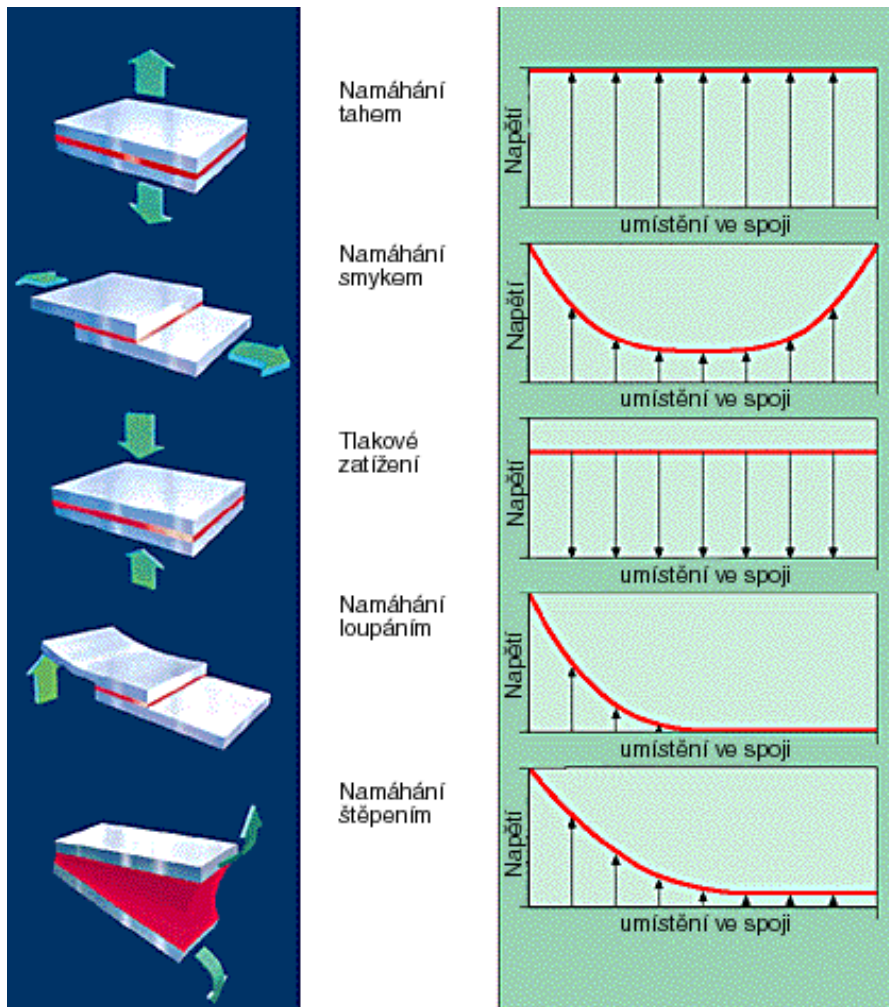
Cílem optimálního lepeného spoje je, aby bylo napětí rozloženo rovnoměrně. Proto se musí správně určit, jaké bude napětí v lepeném spoji, který se bude nacházet pod působením různých vnějších sil. Existuje mnoho faktorů, které se musím brát při lepení v potaz.[13]



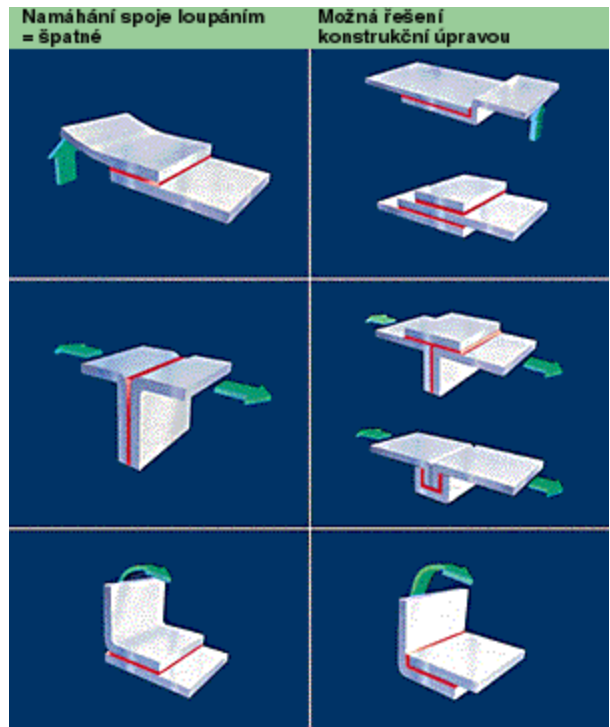
### 1.2.1 Minimalizace zatížení loupáním a štěpením

U lepeného spoje se nejčastěji setkáváme se zatížením smykem, loupáním a štěpením. Při namáhání loupáním nebo štěpením vzniká napětí jen na jedné straně spoje. Cílem konstruktéra tedy je eliminace napět'ových špiček a tedy co nejrovnoměrnější zatížení a minimalizace zatížení štěpením a loupáním. [13]

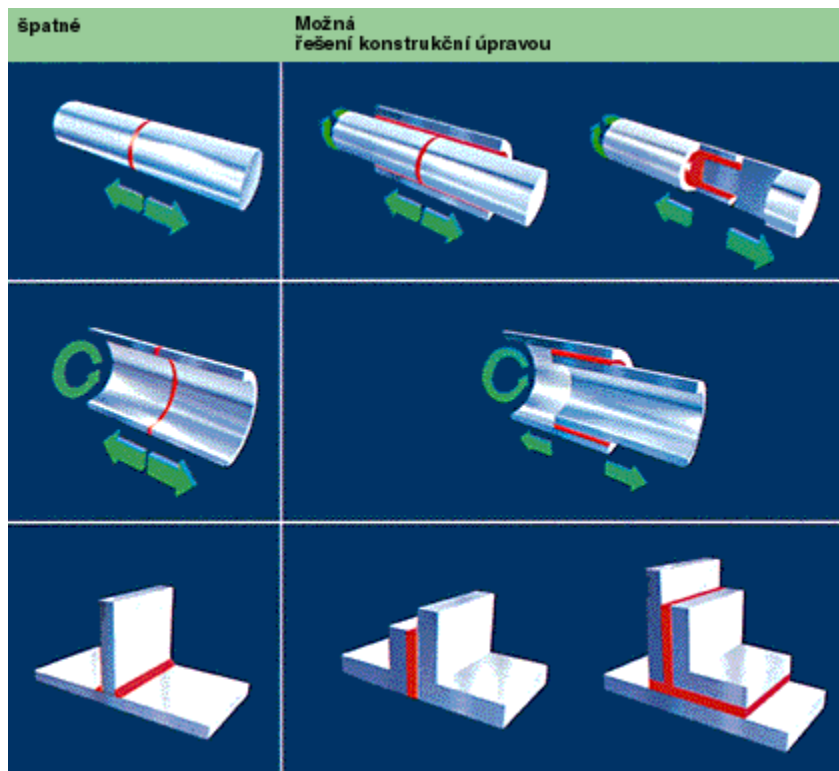
Na Obr. 2 jsou uvedeny některé varianty, jak změnit konstrukci lepeného spoje tak, aby nebyl namáhán na loupání nebo štěpení, ale byl, namáhám přijatelnějšími způsoby. [13]



Obr. 2 Nejčastější druhy zatížení a rozložení napětí v lepeném spoji. [13]



Obr. 3 Namáhání spoje loupáním a návrh na konstrukční úpravu. [13]



Obr. 4 Příznivá a nepříznivá zatížení lepených sestav. [13]

### **1.3 Požadavky na lepení plastů**

Pro posouzení lepitelnosti jednotlivých plastů je důležité znát jejich chemické složení a výsledné fyzikální vlastnosti. Tak jako u všech lepených materiálů, tak i u plastů musí být splněny dva předpoklady:

- Lepidlo musí plast dostatečně smáčet, tj. povrchová energie plastické hmoty musí být větší nebo alespoň stejná jako povrchová energie lepidla.
- Povrch lepeného materiálu musí mít vhodné adhesivní vlastnosti, aby došlo ke spojení s lepidlem, tj. plast a lepidlo musí v místě styku na sebe chemicky a fyzikálně reagovat.

Nelze-li jednu z těchto podmínek dodržet, není plast vhodný k lepení. A nelze-li splnit ani jedna z podmínek, není plast lepitelný bez předběžných úprav.[13]

#### **1.3.1 Vliv povrchové vrstvy plastu**

Často narážíme na problém, že objemové vlastnosti polymeru neodpovídají jeho povrchovým vlastnostem. Důvodem většinou bývá složení plastu nebo výrobní postup. Slabá povrchová vrstva pak může mít za následek malou pevnost spoje a to bez ohledu na výběr lepidla. [13]

#### **1.3.2 Plasty s přísadami s nízkou molekulární vahou**

Plasty často obsahují složky s nízkou molekulární vahou. Mezi tyto složky se řadí zbytky rozpouštědla, nereaktivní komponenty, změkčovadla, stabilizátory a různá plniva. Je-li některá z těchto složek na povrchu, může lepení ovlivnit. Řada z nich má tendenci se vzlínat k povrchu a hromadit se zde. Tím vzniká na povrchu lepeného materiálu samostatná vrstva, která značně snižuje pevnost lepeného spoje či dokonce slepení úplně zabrání.[13]

#### **1.3.3 Vnější a vnitřní separátory forem**

Vnější a vnitřní separátory se používají za předpokladu, že je nutno zajistit snadné uvolnění plastových součástí litých pod tlakem nebo lisovaných ve formě. Separátory jsou označovány za vnitřní, jsou-li již přimíchány do granulí a projeví se až během zpracování plastu. Často se vytvoří povrch, který je obtížné nebo dokonce nemožné slepit. Separátory

jsou v celém lepeném materiálu rozptýleny tak, že dokonce ani broušení povrchu nemusí být účinné. [13]

Vnější separátory se vstříkují do otevřené formy. Základním separátorem je parafin, oleje a mýdla. Dle způsobu úpravy se vnější separátory mohou vyskytnout nejen na povrchu lepeného materiálu, ale taky ve vrstvách pod povrchem. Nejvhodnější úpravou takových povrchů je mechanické zdrsňení povrchu, jako je např. broušení. [13]

## **1.4 Druhy a vlastnosti lepidel**

Lepidlo je látka, která je schopna spojovat k sobě povrchy tuhých látek adhezními a kohezními silami. V dnešní době je na trhu celá řada lepidel od různých výrobců. K výrobě se používají syntetické a přírodní suroviny. Kvůli lepší orientaci se lepidla třídí nejčastěji podle chemického složení. [1]

V minulosti bylo jen malé množství živočišných a rostlinných surovin na výrobu lepidel. Avšak v této oblasti přinesla chemie velký pokrok. Byla objevena lepidla na bázi přírodního kaučuku a lepidla syntetická. [9]

Od prvních olejových lepidel se vývoj posunul k lepidlům roztokovým a tuhým, objevila se lepidla vulkanizační, reaktivní, jednosložková či vícesložková, lepidla na papír, textil, dřevo, sklo, gumu, plasty, kovy atd. [9]

Počet druhů lepidel se rozrostl natolik, že bylo nutno vytvořit systém, který by umožnil systematický a cílevědomý výběr lepidla pro konkrétní použití. [9]

### **1.4.1 Vlastnosti lepidel**

Lepidlo lze definovat jako látku, kterou lze spojit dva a více materiálů za pomoci povrchových sil. Tato schopnost však není vnitřní vlastností lepidla (adheze), ale vzniká jen za určitých podmínek a za podstatného přispění adherendu. [2, 9]

- Spoj mezi povrchy vytváří lepidlo pomocí účinku adheze.
- Díky adhezivním a kohézním silám je lepidlo schopno držet povrchy tuhých látek při sobě.

Lepidlo není jednoduchá látka, jedná se o složitou směs tvořenou mnoha složkami. Hlavních složek lepidel můžeme vyjmenovat mnoho. [2, 9]

- **Adhezní základ** je látka, která dodává lepidlu a lepenému spoji požadované vlastnosti (pevnost a odolnost).
- **Nosné médium** – dle použitého lepidla to může být rozpouštědlo, fólie, papír nebo textil.
- **Katalyzátory a tvrdidla** jsou činidla, která nemusí být v každém lepidle. Jejich funkcí je zabezpečit vytvrzovací reakci.
- **Retardéry, urychlovače a inhibitory** – látky, které kontrolují vytvrzovací proces a nachází se v jednosložkových i vícesložkových lepidlech.
- **Modifikační přísady** – přísady, které mění technologické vlastnosti, použití nebo výsledné vlastnosti spoje. Spadají sem plniva, změkčovadla, barviva, nadouvadla, pigmenty, stabilizátory atd. [2,9]

#### 1.4.2 Klasifikace lepidel

Existuje mnoho způsobů, jak rozdělit lepidla, avšak většina z nich je omezena na dvě základní kritéria. Základním rozdělením lepidel je na organické a anorganické. Organické lepidla se potom dále dělí na přírodní, vzniklá přírodou a syntetická, vytvořená člověkem. Syntetická lepidla se dělí na reaktoplastická a termoplastická. Novodobá lepidla, přicházející na trh, se velmi špatně zařazují. [2,9]

Nejznámější klasifikační systémy lepidel vychází z následujících kritérií:

- Chemického složení,
- druhu vazby,
- nosného média,
- fyzikálního stavu,
- tekutosti,
- způsobu vytvrzování,
- lepivosti,
- odolnosti,
- použití.

Klasifikační systémy musí být všeobecné, aby se do nich daly zahrnout nově vzniklé lepidla. Nejvšeobecnějším parametrem je chemické složení.

U všeobecné klasifikace je nutno počítat s určitými kompromisy, protože lepidla mohou mít společné jedno kritérium, ale v ostatních se mohou lišit. Čím užší kritérium použijeme pro klasifikaci, tím více tolerancí musíme připustit. [2,9]

### ***Rozdělení lepidel dle chemického složení***

- organická lepidla (glutinová lepidla, kaseinová lepidla, albuminová lepidla, škrobová lepidla, dextrinová lepidla atd.)
- anorganická lepidla a lepidla minerálního původu (vodní sklo, asfaltová lepidla, metalická lepidla, fosfátová lepidla, keramická lepidla atd.) [9]

### ***Rozdělení lepidel dle složení***

- lepidla jednosložková – jsou lepidla smíchána s ředidlem, k vytvrzení dochází na vzduchu po odpaření ředidla, či odebrání kyslíku, teplem nebo vlhkostí vzduchu; lepené plochy se spojí až po zaschnutí lepícího filmu.
- lepidla dvousložková – až po smíchání obou složek (lepidla a tužidla) začínají působit a nastává rychlá reakce; lepidlo je nutno zpracovat během předepsané doby. [9]

### ***Rozdělení dle principu tuhnutí ve spoji***

- Lepidla tuhnoucí vsáknutím a odpařením vody
  - alespoň jeden z materiálů musí být pórovitý a propustný
  - spoje nejsou odolné vůči vodě
  - lepidla kaseinová, klišová, škrobová, na bázi derivátů celulózy, na bázi polyvinylalkoholu, z arabské gummy, vodního skla, cementu, sádry atd. [9]
- Disperzní lepidla tuhnoucí odpařením vody a vsáknutím (latexy)
  - i při velkém obsahu sušiny (50% hm) se vyznačují nízkou viskozitou
  - obsahují jen malé množství organický rozpouštědel

- ředitelné vodou
- zpracovává se za normální teploty, ale ne za nižší nežli je minimální filmotvorná teplota – teplota, při které vzniká ještě souvislý polymerní film
- jeden z materiálů musí být propustný pro vodní páru a pórovitý
- asfaltové emulze, kaučukové latexy, polyakrylátové disperze, polyvinylacetátové disperze [9]
- Reaktivní lepidla tuhnoucí vlivem zvýšené teploty
  - Využívají se v průmyslovém měřítku na bázi epoxidových, močovinoformaldehydových, fenolformaldehydových a melanminformaldehydových pryskyřic [9]
- Reaktivní lepidla tuhnoucí vlivem vlhkosti
  - silikonová lepidla (tmely), které se vyznačují výbornou přilnavostí k odmaštěným a čistým povrchům [9]
- Reaktivní lepidla tuhnoucí přidáním tvrdidel
  - epoxidová, zde je nutno dodržet poměr míšení pryskyřice s tvrdidlem
  - jsou plnitelná anorganickými práškovými plnivými až do obsahu cca 40% hmotnosti základní pryskyřice
  - polyesterová, polymetalkrylátová, fenolformaldehydová, polyuretanová, močovinoformaldehydová [9]
- Lepidla stále lepivá a citlivá na tlak
  - Štítky, samolepící pásy, fólie atd. [9]

### 1.4.3 Skladování lepidel

Lepidla se skladují dle doporučení výrobce, avšak neuvádí-li se jinak, tak se skladují v suchých místnostech do teploty max. 28 °C, ne v blízkosti topení a ne na přímém slunci. Výše uvedené požadavky na skladování platí především pro lepidla ve formě roztoku.

Mnoho lepidel má předepsanou skladovací teplotu do 5 °C. Tento předpis je nutno dodržovat především u kyanoakrylátových nebo fenolformaldehydových lepidel, kde může při skladování dojít k znehodnocení již za krátkou dobu. [2]



## **2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ PEVNOST LEPENÉHO SPOJE**

### **2.1 Výběr vhodného lepidla**

V současnosti existuje celá řada lepidel s velkým rozsahem materiálových vlastností a cen. Například v automobilovém průmyslu se nejčastěji používají lepidla epoxidová, polyuretanová akrylová a kryanoakrylátová lepidla. Do těchto lepidel se dle potřeby přidávají přísady, kterými se zlepšují nejen materiálové vlastnosti, jako je mez kluzu, mez pevnosti nebo mez odolnosti proti různým druhům zatěžení, ale i odolnost proti rozpouštědlům a negativním vlivům. Výběr vhodného lepidla je dán lepeným materiálem a požadovanými vlastnostmi lepeného spoje. [12]

Faktory ovlivňující výběr lepidla:

- Povrch, tvrdost a pórovitost lepeného materiálu,
- požadované mechanické vlastnosti výsledného spoje,
- teplota potřebná k vytvrzení lepidla,
- teplota použití,
- odolnosti vůči chemikáliím, povětrnostním vlivům, UV záření,
- estetické nároky – lesk, barva,
- cena.

Výše uvedené faktory jsou zohledněny nejen při výběru lepidla, ale jsou taky užívány při vývoji nového polymerického řetězce a následného výběru aditiv. [12]

### **2.2 Úprava lepených ploch**

Často se vedou spory, jak ovlivní úprava povrchů spojovaných ploch pevnost lepeného spoje. Byla provedena celá řada experimentů s mnoha adherendy při různých povrchových úpravách. Výsledkem bylo, že nevhodná povrchová úprava může úplně znehodnotit celý lepený spoj. Není tedy pravda, že jen samotné výborné lepidlo zaručí kvalitní lepený spoj. [3, 12]

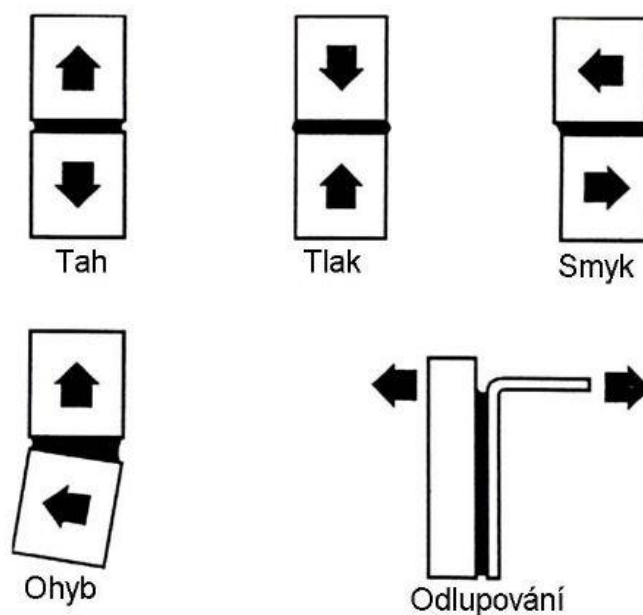
Proto jsou úpravy lepených ploch důležité pro dosažení maximální pevnosti spoje. Hlavním cílem, je odstranit všechny látky, který by mohly vytvářet slabé vazební vrstvy. Způsoby úprav povrchů je možno rozdělit na fyzikální a chemické operace. [3, 12]

Mezi fyzikální operace patří mechanické opracování (broušení, kartáčování, pískování a obrábění) a mezi nemechanické operace pak odmašťování, čištění ultrazvukem, sušení, ozařování UV zářením, působením doutnavého výboje, iontové bombardování nebo polarizace oxidačním plamenem. [3, 12]

Mezi chemické operace se řadí moření, anodická oxidace nebo použití nátěrů reaktivními látkami. Uvedené chemické operace se používají především při lepení kovů. Největší vliv na pevnost lepeného spoje u lepení kovů má moření. U plastů není moření až tak běžné a používá se zejména u lepení obtížně lepitelných materiálů (polyolefinů a fluoroplastů). [3, 12]

### **2.3 Typ zatěžování**

Lepidla bývají zatěžována dynamicky nebo staticky a jejich materiálové vlastnosti se určují především pro tři základní typy zatížení: tah, smyk a odlup. Tlak se neuvádí, protože únosnost lepeného spoje v tlaku je mnohem vyšší než u ostatních druhů namáhání a jen zřídka kdy jí bývá dosaženo. Tyto druhy namáhání bývají většinou v různých kombinacích: tak – smyk, odlup – tah atd. Jen ve speciálních případech se setkáváme s těmito zatíženími samostatně: čistý tah nebo čistý smyk.[12]



*Obr. 5 Typy namáhání lepených spojů. [12]*

Namáhání na odlup je specifický zatěžovací stav, kde je lepený spoj namáhán na smyk a ohyb. Jedná se o kombinované namáhání. [12]

Výpočty bylo dokázáno, že hodnota ohybového napětí na koncích lepeného spoje může být několikanásobně vyšší, než hodnota smykového napětí ve spojovaných materiálech. Při nevhodné konstrukci lepeného spoje způsobuje tento typ namáhání tzv. loupání. [12]

V praxi se lepený spoj konstruuje tak, aby byl namáhán na smyk, protože lepené spoje vykazují nejvyšší únosnost při namáhání na smyk. Nižší pevnost pak mají při namáhání na tah a nejhorší pevnostní vlastnosti na odlup.[12]

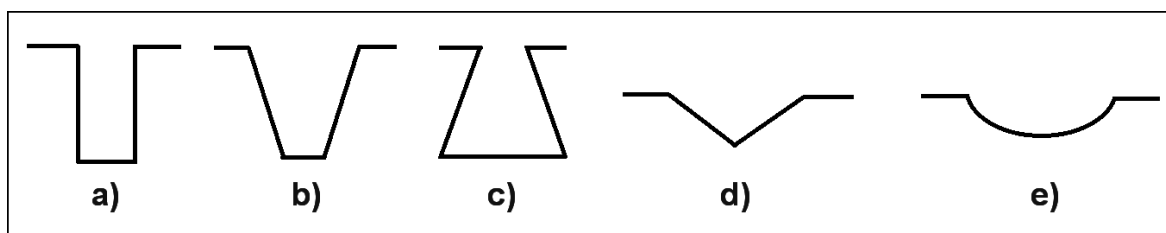
## 2.4 Drsnost povrchu

Vyšší pevnosti lepeného spoje dosáhneme tehdy, získáme-li větší mikropovrch lepených ploch a to úpravou drsnosti. Avšak neplatí vždy, že každé zdrsnění povrchu zvýší pevnost spoje. Rozhodující je účinný povrch a ne mikropovrch. Uvádí se, že nejvhodnější hloubka zdrsnění se pohybuje obvykle v rozmezí 1-6  $\mu\text{m}$ . U této drsnosti se dosahuje nejvyšší pevnosti spoje. [12, 15]

Dle druhu zatížení se určuje vhodnost tvaru nerovnosti. U smykového zatížení se hluboké nerovnosti s malým průměrem nepoužívají, protože by mohlo nastat snadné ostřížení. Při

nulové hloubce dochází k samovolné adhezi i bez použití lepidla. Nejvýhodnější tedy je molekulárně hladký povrch. Nerovnosti však najdeme i u leštěných ploch. [12, 15]

Z toho vyplývá, že na místo zdrsňování povrchu, je lepší se snažit o co nejmenší drsnost, což bývá problém, který lze částečně vyřešit ozvučením nevytvrzeného lepidla ultrazvukem. Lepidlo se zatlačí do prohlubní a to vede ke zvýšení pevnosti spoje. [12, 15]



Obr. 6 Základní typy nerovností lepených ploch.

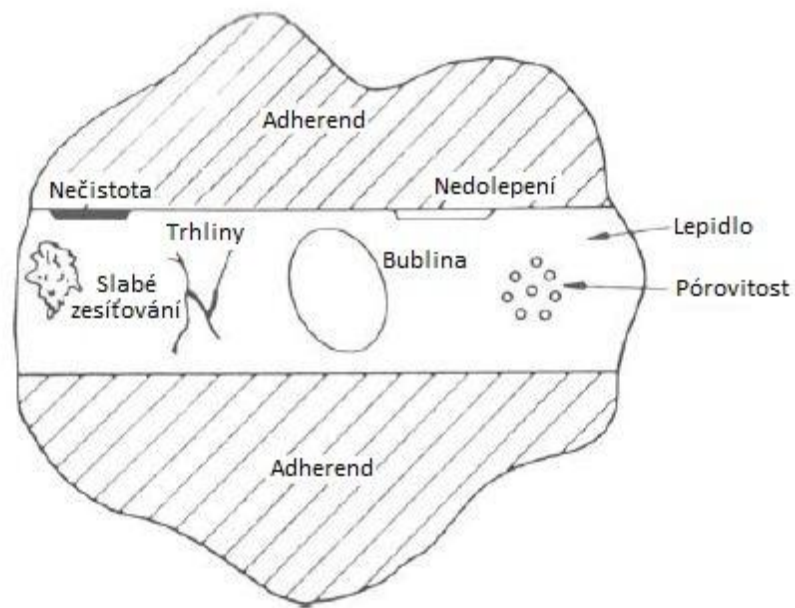
[a) válcová, b) kónická otevřená, c) kónická uzavřená, d) kónická plochá, e) kónická misková][15]

## 2.5 Doba vytvrzování

Doba nutná k vytvrzení je vždy závislá na použitém adhezivu a je udávána výrobcem. Doba potřebná k vytvrzení zpravidla roste spolu s nároky na pevnost spoje. Obecně platí, že čím vyšší vytvrzovací teplota, tím se doba, potřebná k vytvrzení lepeného spoje zkracuje. Vytvrzovací teplota bývá zpravidla limitována odolností spojovaných částí. Při delších vytvrzovacích časech je nutno většího množství přípravků. [12, 14]

## 2.6 Vady ve vrstvě lepidla

Při lepení je nutnost dodržet přesně technologický postup daný výrobcem. Dodržením technologického postupu dosáhneme nejen výrobcem deklarovaných mechanických vlastností, ale i námi požadovaných vlastností na lepený spoj a zároveň předejdeme vzniku nežádoucích vad. I malá vada může mít nežádoucí vliv na rozložení napětí ve spoji. Defekty ve spoji snižují maximální pevnost lepeného spoje, která je závislá na jeho ploše.[12]



Obr. 7 Vady vyskytující se v lepené vrstvě. [14]

K zjištění vady ve spoji se používá buď vizuální kontrola, nebo různé fyzikální metody. Vizuální kontrola zahrnuje prozkoumání spoje a jeho okolí. K fyzikálním metodám se řadí autistické emise nebo skenování ultrazvukem a infračerveným zářením. [12]

Tab. 1 Vady a metody jejich kontroly. [12]

Defekt	Příčina	Inspekční metoda
Pórovitost	Vniknutí plynů(vzduch, vodní pára)	Vizuální kontrola Infračervené záření Radiografie Ultrazvuk
Bubliny	Špatná aplikace lepidla Tečení lepidla Relativní posunutí adherendů	
Špatná koheze	Špatné promíchání jednotlivých složek Špatné skladování Špatná polymerace	Ultrazvuková spektroskopie Akustické emise
Trhliny	Špatná polymerace Tepelné diletace	
Špatná adheze	Kontaminace povrchu adhezive před lepením Nanášení lepidla po začátku procesu vytvrzování	Akustické emise

## **2.7 Vliv teploty na pevnost lepených spojů**

Není možné obecně určit vliv teploty na pevnost lepených spojů, avšak můžeme alespoň uvést přibližná pravidla, která platí pro běžně používané lepidla do nízkých teplot. [15]

U většiny lepidel pevnost ve smyku mezi teplotami 20 – 50 °C nejprve stoupá a poté začíná klesat. Mezi 60 – 100 °C je kritický interval teplot a zde pevnost u většiny lepidel klesá. Pevnost u odlupování se stoupající teplotou roste. Zpravidla pod teplotou 20 °C klesá. [15]

### **2.7.1 Teplotní roztažnost**

Děj, při kterém se během dodávaného tepla určitému tělesu mění délkové rozměry, a objem tělesa se nazývá teplotní roztažnost. Většina materiálů se při zahřívání rozpíná. Při následném ochlazování může dojít k tomu, že se těleso nevrátí do svého původního rozměru. To vše závisí na složení materiálů, jejich struktuře a tvaru. Při lepení dvou materiálů o různé tepelné roztažnosti může vznikat ve spoji vnitřní pnutí, které způsobuje deformaci spoje, odlupování či praskání lepeného spoje. Tomu se lze vyvarovat použitím lepidla, které vytváří pružný film, který vyrovnává pnutí mezi adherendy.[3, 15]

## **2.8 Vliv vlhkosti na pevnost lepeného spoje**

Při zkoumání závislosti pevnosti spoje na době ponoření ve vodě se došlo k závěru, že při ponoření spoje do vody předpokládáme její vliv za difúzi. Za určitý čas dojde v lepidle k rovnováze, tedy k maximálnímu nasycení. Tím pádem, poměr délky obnažené hrany spoje a jeho plochy má význam jen v určitém časovém období. [15]

Nastane-li vlivem pronikání vody do vrstvy k poruše pevnosti lepeného spoje, je tato změna nevratná a ani vysoušením spoje ji nelze odstranit. Dochází k porušení mezimolekulárních a chemických vazeb uvnitř lepidla a přilnavost spoje klesá, což způsobuje snižování únosnosti celého spoje. [15]

## **2.9 Polarita**

- Slabě polární až středně polární hmoty jsou polymery, které jsou lepitelné polárními lepidly stejného původu, jako je lepená hmota (polyvinylchlorid, celulozoid, polyestery, epoxidové hmoty, fenoplasty).

- Silně polárně hmoty jsou zejména polyamidy, hydratovaná celulóza některé polyuretanové hmoty. Jsou hůře lepitelné než slabě polární hmoty.
- Velmi těžce lepitelné jsou nepolární hmoty, jako je například polyetylén, polytetrafluóretylén, polypropylén a vysokomolekulární polyizobutylén. [9]

## **2.10 Obsah plniv**

Kromě sazí a grafitu je většina plniv obsažených v plastech (dřevěná moučka, azbest, celulóza, skleněná vlákna atd.) polárního charakteru, adhezi lepidel k povrchu zlepšují nebo alespoň nezhoršují. [9]

## **2.11 Obsah změkčovadel**

Pokud měkké plastické hmoty, folie nebo lehčené materiály obsahují větší množství změkčovadla (ftaláty, fosfáty atd.), mohou být lepeny pouze lepidly, které se s těmito přísadami nemísí. [9]

## **2.12 Soudržnost povrchu**

Pevnost lepeného spoje závisí na soudržnosti povrchové vrstvy. Při zpracování lehčených pěnových materiálů, kaširovaných vícevrstevných hmot, dekoračních materiálů elektrostaticky poprašovaných a skelných laminátů je tato vlastnost velmi důležitá. [9]

Zhoršit soudržnost spoje a pevnost může rozpouštědlo nebo tvrdidlo obsažené v lepidle. I nevhodným zdrsněním povrchu může dojít ke zhoršení soudržnosti povrchové vrstvy. [9]

## **2.13 Čistota povrchu**

Při lepení se předpokládá, že lepené plochy jsou zbaveny všech separačně působících látek, především mastnoty, korozních zplodin a absorbovaných plynů. [9]

### 3 POVRCHOVÉ NAPĚTÍ, POVRCHOVÁ ENERGIE A KONTAKTNÍ ÚHEL SMÁČENÍ

Důležitým odvětvím fyzikální organické chemie, která studuje vlastnosti a chování molekul na povrchu a v jeho těsné blízkosti či rozhraní, které se může tvořit mezi pevnými látkami, plyny, kapalinami nebo kombinací těchto stavů, je věda, která se zabývá povrchovými vlastnostmi. [11]

#### 3.1 Fázová rozhraní

Jednotlivé fáze jsou odděleny fázovým rozhraním. Pod pojmem fáze, si můžeme představit určitou část objemu zkoumaného systému, ve kterém jsou vlastnosti konstantní nebo se mění v prostoru. Pokud se tak systém chová v celém objemu, nazývá se homogenní systém, avšak obsahuje-li více fází, nazývá se heterogenním systémem. Z makroskopického hlediska se fázovým rozhraním rozumí oblast, kde se jedna či více vlastností systému mění skokem. Makroskopické vlastnosti a chování látek (výparné teplo, kondenzace plynů a neideální chování) i jevy na fázových rozhraních (smáčení, rozestírání, mezifázové napětí, adheze a koheze) jsou více, či méně ovlivněny silami, které mají původ v meziatomárních nebo mezimolekulárních interakcích.[11, 16]

Podle skupenského stavu rozlišujeme objemové fázové rozhraní:

- rozhraní kapalina/plyn (l/g)
- rozhraní kapalina/kapalina (l/l)
- rozhraní pevná látka/plyn (s/g)
- rozhraní pevná látka/kapalina (s/l)
- rozhraní pevná látka/pevná látka (s/s)

Různé typy rozhraní mají některé vlastnosti společné, avšak ve velkém množství vlastností se hodně liší. Největší rozdíly jsou v charakteru povrchu kapaliny a povrchu pevné látky.

Rozlišujeme skupenství:

- Plynné,
- kapalné,
- pevné,



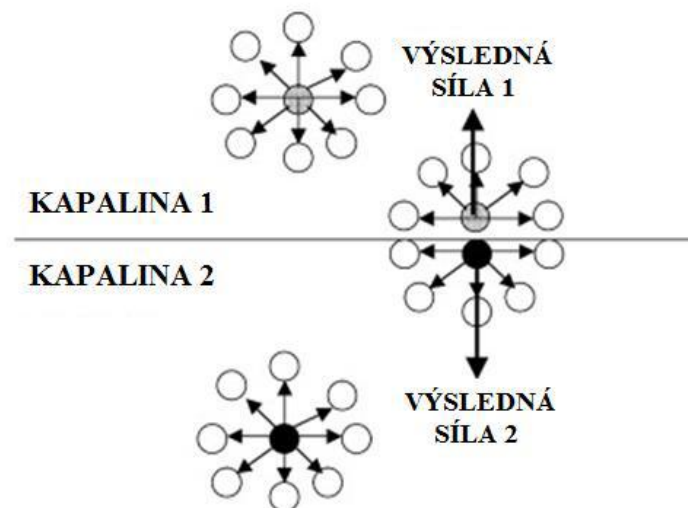
- plazma.

Změní-li se skupenství, látka odevzdává nebo přijímá od okolí skupenské teplo. Rozeznáváme následující změny skupenství:

- Tání a tuhnutí,
- vypařování, var a kondenzace,
- sublimace a desublimace.[11, 16]

### 3.2 Povrchové napětí

Pomocí přitažlivých sil jsou molekuly kapaliny drženy pohromadě. Součet všech přitažlivých sil na libovolné molekule, která je přítomná v objemu kapaliny, je v průměru nulový. Avšak v blízkosti rozhraní výslednice sil, jejichž hodnota je nenulová a směřuje dovnitř prostředí s vyšší kohezní energií, to neplatí. Kohezní silou, je označována síla, která působí proti zvětšení plochy povrchu a povrchovou energií je označována energie, která je tímto procesem spotřebovávána. [11, 16]



*Obr. 8 Rozhraní kapalina/kapalina a rovnováha sil na molekulách kapalin. [11]*

Povrchové napětí je práce, která je nutná k zvětšení plochy izotermicky reverzibilně. Můžeme ji charakterizovat jako povrchovou energii na jednotku plochy a popřípadě taky jako sílu na jednotku délky. V jednotkách práce nebo energie na jednotku plochy můžeme měřit povrchové napětí kapalin. [11]

Povrchové napětí u polymerů můžeme rozdělit do dvou složek: polární a disperzní. Zastoupení obou složek závisí na chemickém složení povrchu. Disperzní složka vychází z Londonových disperzních interakcí, kdež to polární složka vychází z polárních molekulárních interakcí, včetně vodíkové vazby a dipólové a indukční energie. Zmíněné složky jsou sčitatelné, z čehož plyne, že můžeme sečíst i jednotlivé komponenty povrchového napětí. [11]

### **3.3 Povrchová energie**

Pevná látka může být charakterizována jako hmota, která je tuhá a odolává působení napětí. Deformuje se účinkem vnější síly. Tvar je dán více historií, nežli povrchovými silami jako u kapalin. Podle hodnoty povrchové energie mohou být povrchy pevných látek rozděleny na povrchy s nízkou povrchovou energií a s vysokou povrchovou energií. Především kovy a anorganické sloučeniny, jako jsou oxidy, diamanty, nitridy atd., patří mezi materiály s vysokou povrchovou energií. Polymery se řadí mezi nízkoenergetické materiály. [11, 16]

Pevná látka většinou nemůže zaujmout tvar o nejmenším povrchu, protože za běžných teplot se atomy pevných látek nepohybují, ale pouze vibrují kolem svých rovnovážných poloh. Při rozměňování pevných látek (mletím, štípáním atd.), kdy dochází k zvětšování povrchu pevných látek, se projevuje existence povrchové energie. Na tento pochod je zapotřebí vyvinout mechanickou práci. U pevných látek probíhá vznik nového povrchu ve dvou krocích:

- Rozdělením materiálu vzniká nový povrch (rozštípnutím), kdy atomy zachovávají stejnou polohu, jakou by měly v objemové fázi.
- Přeskupení atomů v povrchové oblasti do jejich konečných rovnovážných poloh. [11, 16]

Pro určení povrchové energie nebo povrchového napětí neexistují v současnosti žádné přímo spolehlivé metody pro měření. [16]

### **3.4 Kontaktní úhel smáčení**

Jednou z mála přímo měřitelných vlastností fázového rozhraní pevná látka / kapalina / plyn je kontaktní úhel smáčení. Je to úhel, který svírá tečna k povrchu kapky, vedená v bodě

styku kapky s rozhraním. Tato metoda je poměrně levnou, jednoduchou a rozšířenou technikou pro charakteristiku polymerních povrchů, jako nástroj k výpočtu povrchové energie povrchu, avšak je citlivá na chemickou stavbu svrchní vrstvy molekul. Vlivem nehomogeneity povrchu může být měření z části zkresleno. [5, 11, 16]

Úhel smáčení (tvar kapky) závisí na mezipovrchových energiích tří existujících fázových rozhraní:

- mezi tuhou a kapalnou fází ( $\gamma_{sl}$ ),
- mezi tuhou a plynou fází ( $\gamma_{sg}$ ),
- mezi kapalnou a plynou fází ( $\gamma_{lg}$ ). [5, 11, 16]

### 3.5 Kapka kapaliny na povrchu pevné látky

Při umístění kapky kapaliny na povrch pevné látky, mohou nastat dva následující případy:

- Je-li povrchová energie pevné látky větší než součet povrchové energie kapaliny a mezifázové energie pevná látka / kapalina,  $\gamma_{sg} > \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$ , pak se kapalina rozestře po povrchu pevné látky do souvislé vrstvy. Fázové rozhraní pevná látka / plyn je pak nahrazena dvěma rozhraními, pevná látka / kapalina a kapalina / plyn, každý z nich o stejné ploše jako je původní rozhraní a výsledná energie je nižší. [4, 5, 11, 16]
- Naopak, jestliže platí  $\gamma_{sg} < \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$ , tak k rozestírání nedojde a kapka kapaliny zaujme na povrchu pevné látky rovnovážný tvar, který je charakterizován tzv. kontaktním úhlem smáčení. Úhel smáčení je úhel, který svírá tečna k povrchu kapky kapaliny s rozhraním pevná látka / kapalina v bodě linie smáčení. Velikost kontaktního úhlu je vypočtena z rovnovážné podmínky, známe jako Youngova rovnice: součet vektorů mezifázových napětí je nulový. [4, 11, 16]

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

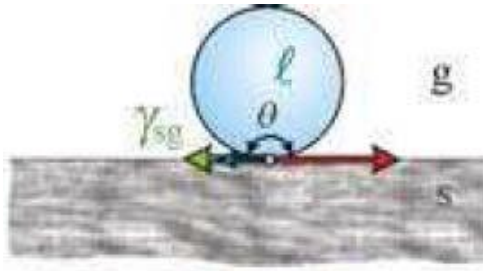
Pro úhel smáčení z Youngovy rovnice plyne:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sg} + \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad (2)$$

Dle velikosti úhlu smáčení může nastat následující:



- dokonalé nesmáčení ( $\theta = 180^\circ$ ).



Obr. 12 Dokonalé nesmáčení. [16]

Povrchy smáčené vodou se nazývají hydrofilní a povrchy nesmáčené vodou hydrofobní. [16]

### 3.6 Smáčivost

Lze ji charakterizovat jako vlastnost kapaliny přilnout k povrchu z některých pevných látek. Smáčivost lze zkoumat pomocí statických a dynamických metod na zařízení umožňující zobrazení a měření kontaktního úhlu na rozhraní. [16]

Rozlišujeme tři typy smáčení:

- rozestírací smáčení – zde dochází k šíření kapaliny, která je již v kontaktu s pevnou látkou. Oblast pevná látka / plyn se zmenšuje, ale oblast pevná látka / kapalina, kapalina / plyn se zvětšují,
- adhezní smáčení – zde kapalina není původně v kontaktu s pevnou látkou, vytvoří spojení a následně k ní přilne,
- imerzní smáčení – zde pevná látka není původně ve styku s kapalinou, ale je kompletně do kapaliny ponořena. Potom tedy plocha styku kapalina / plyn zůstává nezměněna. [16]

### 3.7 Využití kontaktního úhlu smáčení

Měření kontaktního úhlu smáčení nám poskytuje lepší porozumění mezi pevnými látkami a kapalinami, či kapalinami, které jsou nemísitelné. I přes to, že je těžké přesně změřit kontaktní úhel na pevné látce, existuje celá řada literatury zabývající se touto problematikou. Interakce mezi kapalinou a pevnou látkou je důležité pro porozumění chemickým a fyzikálním procesům v mnoha průmyslových odvětvích. Například u barev a nátěrů je velmi dů-

ležitě určit kontaktní úhel smáčení. Cílem je dosáhnout dlouhotrvající adheze mezi nátěrem a podkladem. Určení kontaktního úhlu smáčení je důležité v mnoha průmyslech (např. automobilovém, stavebním, kosmetickém, medicínském, farmaceutickém, potravinovém atd.). [4, 5, 16]

### 3.8 Měření kontaktního úhlu smáčení

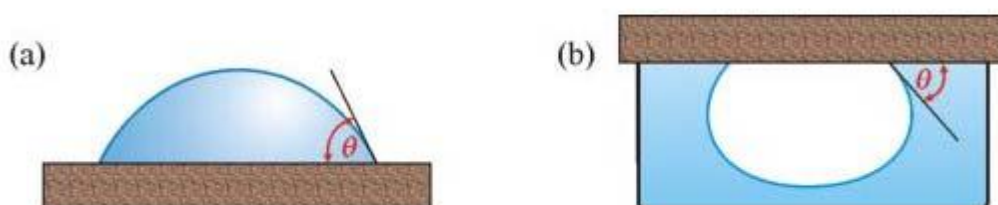
Měření kontaktního úhlu smáčení se může jevit jako poměrně jednoduché, avšak to může být zavádějící. Není-li substrát korektně připraven, není-li při vytváření kapky použita kapalina bez příměsí a bez některých významných technických vlastností (odpařování kapky), mohou být získané výsledky zkreslené a obecně nepoužitelné. Existuje mnoho různých měřících metod, avšak v dnešní době se používá jen pár. [5, 16]

Existují dva preferované způsoby:

- měření statického kontaktního úhlu kapky na neporézním, rovném povrchu pevné látky za pomoci videokamery či goniometru,
- měření dynamického kontaktního úhlu pomocí měření napětí, což zahrnuje měření sil interakce, zatímco se destička ponoří do pokusné kapaliny. [5, 16]

#### 3.8.1 Měření úhlu smáčení na přisedlé kapce nebo přilnavící bublině

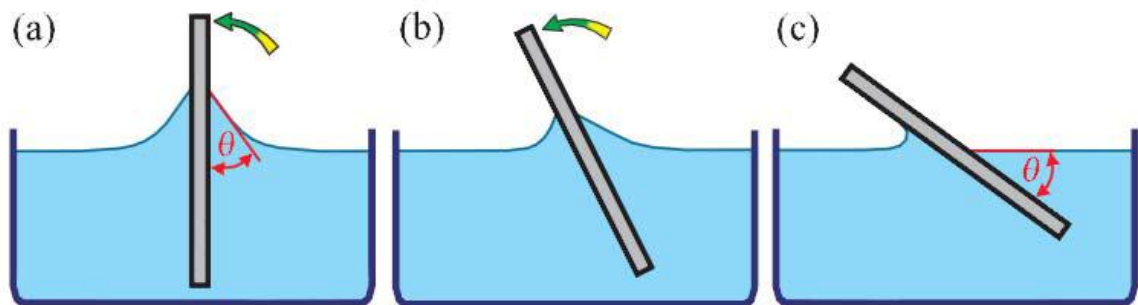
Pro rovné povrchy jsou nejčastěji používané metodiky na přisedlé kapce, případně přilnavící bublině k pevné látce. Kontaktní úhel je určen pouze tečnou kapky v místě kontaktu kapky s povrchem pevné látky. Výsledek je vyhodnocen pomocí videokamery, mikroskopu a PC. Výsledky mohou být subjektivní a závisí na přesnosti měření, zručnosti a zkušenostech obsluhy. [5, 11, 16]



Obr. 13 a) přisedlá kapka; b) přilnavící bublina. [16]

### 3.8.2 Měření úhlu smáčení na naklánějící se destičce

Zkoumaný vzorek – destička, z pevného materiálu je ponořena do kapaliny, poté nakláněna tak dlouho, až je povrch kapaliny na jedné straně destičky rovný až k čáře styku mezi deskou a kapalinou. V tom okamžiku svírá rovina destičky s hladinou kapaliny úhel  $\theta$ . [16]



Obr. 14 Měření kontaktního úhlu smáčení na nakláněné destičce. [16]

### 3.8.3 Faktory ovlivňující kontaktní úhel smáčení

Na tom, jak dobře kapalina smáčí povrchy pevných látek je závislá celá řada technologických procesů (např. čištění, barvení, lepení atd.) Kontaktní úhel smáčení může být ovlivněn mnoha faktory například kvalitou povrchu, drsností, vad a výskytu mikrotrhlin v materiálu, schopností rozestírání kapaliny po povrchu, hysterezí úhlu smáčení. Mezi tuhou látkou a kapalinou může dojít k různému ději (chemická reakce, rozpouštění tuhé látky kapalinou, popř. botnání tuhé látky atd.). [16]

## 4 POVRCHOVÉ ÚPRAVY POLYMERŮ

Důležitý rozdíl mezi plasty a kovy je jejich povrchová energie. Kovy mají podstatně vyšší povrchovou energii než polymery. Polymery mají tím pádem tendenci tvořit velmi nekvalitní adhezní vazby (pokud nejsou vhodně ošetřeny). [11]

V následující kapitole se budeme zabývat nejčastějšími metodami ošetření povrchů polymerů ke zvýšení adheze. Ne všechny metody jsou používány stejně, některé jsou omezeny rozsahem použití. [11]

Mezi základní metody úprav povrchů polymerů se řadí především ošetření korónovým výbojem, plamenem, plazmou a chemickým leptáním. Všechny výše zmíněné metody mají za úkol zvýšit povrchovou energii a zlepšit smáčivost, což vede ke zvýšení pevnosti a zlepšení kvality lepeného spoje. [11]

### 4.1 Úprava povrchu korónovým výbojem

Jedná se o jeden z nejpopulárnějších způsobů úpravy polymerních povrchů. Koróna je nestabilní plazma, která probíhá při atmosférickém tlaku. Metoda funguje na principu vysokofrekvenčního napětí mezi elektrodou a materiálem nebo mezi dvěma elektrodami. [11, 17, 18]

Kvalita upraveného povrchu závisí na celé řadě faktorů:

- Intenzita korónového výboje,
- druh materiálu,
- délka aplikace výboje,
- fyzikální vlastnosti povrchu,
- teplota a vlhkost.

Vytváří se v silném a nehomogenním elektrickém poli, hoří v okolí hrotů a vodičů vysokého napětí. Ionizační procesy probíhají v malém objemu, tzv. koronálním objemu. Ve větší vzdálenosti se projevuje pouze syčením a prskáním. Koróna může být anodová nebo katódová a proudy vedou kladné i záporné ionty. Korónový výboj se většinou vytváří při stejnosměrném napětí na elektrodách, avšak může hořet i při vysokofrekvenčním výboji. Do-



cháží k rozkladu plynů. Výboj vzniká na povrchu elektrod, kde je přivedeno vysoké napětí. [11, 17, 18]

### ***Vlastnosti korónového výboje***

- Podstata úpravy povrchu
  - Čištění povrchů od mechanických nečistot a povlaků pomocí kavitace
  - změna povrchových vlastností po fyzikální stránce. [18]
- Výhody
  - Nepoškozuje a nemění vlastností v objemu materiálu
  - působí i v malých dírách a otvorech,
  - odstraňuje z povrchu hrubé nečistoty a anorganické částice,
  - netřeba žádných toxických látek v lázni,
  - účinná metoda čištění povrchů. [18]
- Nevýhody
  - Vyšší pořizovací náklady,
  - musí se použít sušička,
  - nastavení musí být bedlivě sledováno. [18]

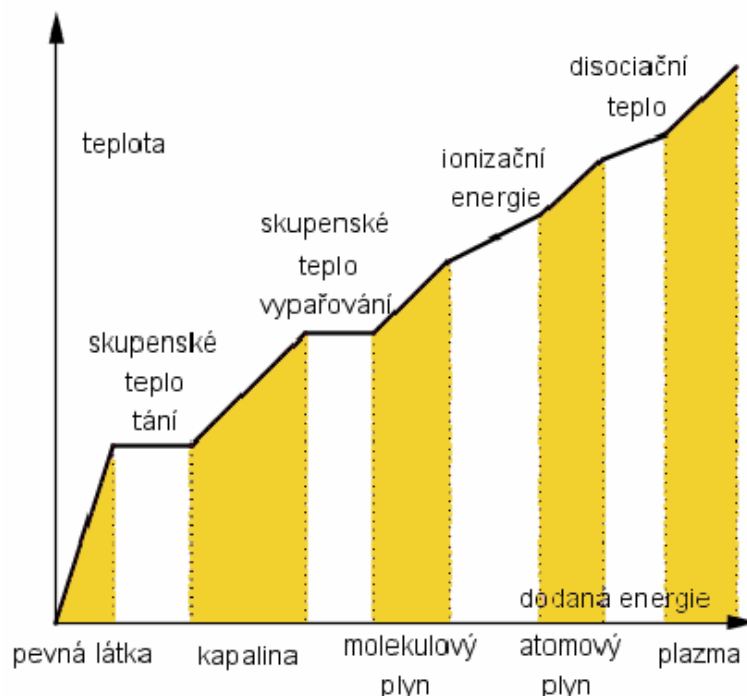
## **4.2 Úprava povrchu plamenem**

Používá se především pro zlepšení adhezních vlastností polyolefinů. Je to především komerční proces. Materiál je veden přes oxidační plamen, který je tvořen směsí uhlovodíkového plynu bohatého na kyslík. Proměnné, ovlivňující míru oxidace, zahrnují i samotné charakteristiky plamene i rychlost pohybu výrobku. [11]

## **4.3 Úprava povrchu plazmou**

Plazma je někdy označována za čtvrté skupenství látky. Vzniká při zahřívání pevné látky, kdy dojde nejdříve k roztavení na kapalinu a při ještě vyšších teplotách se kapalina mění na plyn. Při dodání ještě větší energie se plyn stane ještě více vodivým, přestože je celek neut-

rální. Můžeme tedy říct, že plazma je tedy směsí s převážně kladně nabitými ionty, elektrony a neutrálními částicemi. [11, 17]



Obr. 15 Závislost skupenství na množství dodané energie. [17]

Úpravu povrchu plazmou můžeme považovat za chemický proces, nikoliv za fyzikální. Chemická reakce vzniká mezi atomy, ze kterých se skládá substrát. Díky přítomnosti stejnosměrného napětí dochází na elektrodách k částečnému odprašování. Pro většinu procesů leptání můžeme tento faktor zanedbat. Úprava je založena na navázání nových funkčních skupin na povrch řetězce. Podstata procesu je tvorba aktivních částic (ionty, radikály, excitované atomy atd.) průchodem plynu plazmovým výbojem. Zmíněné částice vytvářejí vrstvy a vyvolávají chemické reakce. Požadovaným výsledkem je změna povrchové energie, což se projeví zvýšením smáčivosti, schopností disperze materiálu nebo zvýšením adhezivních vlastností polymeru k jinému materiálu. [18, 17] Samotný proces nepoškozuje a nemění vlastnosti a objem materiálu, neodstraňuje z povrchu velké množství materiálu a je šetrnější k životnímu prostředí. Nevýhodou je nutnost drahých plynů a vyšší cena zařízení. [18, 17]

## **4.4 Chemická modifikace plazmatem**

Protože se fyzika povrchu překrývá s chemií povrchu, je nutné vycházet z vazebních sil mezi atomy. Pod pojmem chemické vlastnosti si můžeme představit změny chemického složení či oxidačních prvků na mezifázovém rozhraní. [17]

### **4.4.1 Morfologická modifikace povrchu**

Jedná se o využití plazmatu k úpravě povrchových vlastností materiálů. Často jsou kombinovány dva procesy, depozice tenkých vrstev a plazmové leptání. Samotnou oblast tvoří plazmatická aktivace povrchů. Účinkem plazmatu dochází k narušení některých chemických vazeb. Díky tomu se povrch stane velmi reaktivní a je možno na něj nanášet plazmatickou nebo chemickou cestou různé látky, které se na povrch navážou. Takto je kupříkladu ovlivňována povrchová energie a smáčivost polymerů. Aktivovaný povrch je modifikován pouze po určitý čas. [17]

## **4.5 Úprava povrchu chemickým leptáním**

Jedná se o jednu z neúčinnějších metod úpravy povrchů plastů před lepením. Touto metodou můžeme změnit nejen chemické, ale i fyzikální vlastnosti povrchu. Chemická úprava se často používá před čištěním povrchu, za účelem odstranění nečistot z povrchu. [11]

První je povrch plastového dílu omyt mýdlem a roztokem detergentu a následně ponořen do ošetrující chemické lázně (kyseliny, oxidační látka a jiné aktivní chemikálie). Dále je plastový díl očištěn vodou a sušen při zvýšené teplotě. [11]

## **4.6 Úprava povrchu ultrazvukovým čištěním**

Tato metoda se používá pro čištění povrchů od nečistot. Sestava obsahující nádrž, ve které je kapalně médium, obvykle je to roztok s různými čistícími přísadami, dále obsahuje síť pro ponoření vzorků do čistící lázně, generátor střídavého napětí, topné tělísko a řídicí panel. Ultrazvuk dokáže čistit předměty bez poškození a lze jím čistit velmi členité předměty, které nelze běžnými konvenčními metodami. [18]

Vysokofrekvenční zvukové vlny jsou přiváděny do kapalného roztoku. Tyto vlny vytváří po celé kapalině oblasti s vysokým a nízkým tlakem. Tyto tlaky a teploty čistí povrch mate-

riálu. Největší vliv na úspěšnost celého procesu je správné nastavení provozní teploty. Pro dosažení požadované účinnosti by se měl proces skládat ze tří částí:

- Smočení materiálu,
- čištění pomocí kavitace,
- oplachování. [18]

## **4.7 Účinnost povrchových úprav**

U lepení může být efektivita lepeného spoje hodnocena například měřením pevnosti lepeného spoje a taky dle způsobu selhání spoje. [11]

### **4.7.1 Povrchové napětí kapalin**

U této metody se využívá kapalin o známém povrchovém napětí. Test spočívá na pozorování tvaru kapky (roztečení kapky na povrchu) umístěné na povrch ošetřeného materiálu. Tato metoda nám neposkytuje příliš přesné výsledky, avšak je to rychlý způsob jak nalézt způsob pro posouzení účinnosti povrchové úpravy. [11]

### **4.7.2 Kontaktní úhel smáčení**

Hodnotí se smáčivost, která je charakterizována měřením kontaktních úhlů mezi povrchem polymeru a kapkou kapaliny (např. destilovaná voda). Malé úhly značí, že kapalina účinně smáčí povrch, kdež to velké kontaktní úhly poukazují na špatné smáčení. [11]

## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 5 CÍL DIPLOMOVÉ PRÁCE

Tak jako u všech metod spojování materiálů se i u lepení polymerů setkáváme s nevýhodami. Za největší nevýhodu u lepení polymerních materiálů můžeme považovat nutnost úpravy lepených ploch u materiálů se špatnými adhezními vlastnostmi. Mezi takové materiály patří především polyetylen a polypropylen. Zmíněné materiály bez předchozí úpravy nelze v podstatě lepit. Aby se dosáhlo pevného lepeného spoje, musí se povrch aktivovat vhodnou metodou a tím zlepšit adhezní vlastnosti.

Cílem diplomové práce bylo zjistit a porovnat vliv modifikace plasmou na povrchové vlastnosti a výslednou pevnost lepeného spoje u vybraných druhů materiálů. Pevnost lepeného spoje byla zjišťována na trhacím stroji Zwick 1456 pomocí tahové zkoušky.

### *Postup vypracování diplomové práce:*

- Volba polymerních materiálů.
- Výroba a příprava zkušebních těles.
- Modifikace zkušebních těles plasmou.
- Měření kontaktního úhlu smáčení.
- Určení povrchové energie z kontaktního úhlu smáčení.
- Zkoušky pevnosti lepených vzorků.
- Porovnání pevnostních výsledků u jednotlivých materiálů.
- Vyhodnocení naměřených výsledků.

## 6 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES, LEPENÍ, MODIFIKACE A ZKOUŠKY PEVNOSTI

Pro experimentální část byly vybrány čtyři druhy polymerních materiálů, které se běžně používají v průmyslu, čtyři druhy lepidel (jednosložkové i dvousložkové) a primer. Jednotlivé vzorky byly vystříknuty, následně nastříhány, slepeny, nechaly se vytvrdit a provedla se zkouška pevnosti lepených spojů.

### 6.1 Volba materiálu

Jako materiály byli zvoleni tři zástupci skupiny polyolefinů (HDPE, LDPE a PP), které bez přechodí modifikace vykazují jen velmi nízkou únosnost lepeného spoje a dále jede typ polykarbonátu.

#### *Označení polymerů:*

- HDPE (DOW HDPE 25055E)
- LDPE (DOW LDPE 780 E)
- PC (Makrolon 2405)
- PP (TATREN IM 5580)

#### *Vysoko-hustotní polyetylen (HDPE)*

HDPE se často označuje jako lineární polyetylen, protože jeho struktura je převážně lineární. Výroba probíhá polyinzerčním mechanismem při nízkých nebo středních tlacích. [1]

Tab. 2 Vybrané vlastnosti DOW HDPE 25055 E. [20]

DOW HDPE 25055 E	
Hustota	0,955 g/cm <sup>3</sup>
Index toku taveniny (190°C/2,16 kg)	25 g/10 min
Smrštění	2,10%
Pevnost v tahu	27 MPa
Tvrdość Shore D	65
Rázová pevnost	55 kJ/m <sup>2</sup>
Teplota měknutí Vicat	124 °C

### ***Nízko-hustotní polyetylen (LDPE)***

Je nejstarší typ polyetylenů. Vyrábí se za vysokého tlaku. Je to měkký, ohebný a pevný druh polyetylenů. Využívá se pro pevné, poddajné součásti jako jsou např. víka a podobné výrobky. [24]

*Tab. 3 Vybrané vlastnosti DOW LDPE 780 E. [21]*

<b>DOW LDPE 780 E</b>	
Hustota	0,923 g/cm <sup>3</sup>
Index toku taveniny (190°C/2,16 kg)	20 g/10 min
Průměrné smrštění	2,30%
Pevnost v tahu	10,5 MPa
Tvrdość Shore D	49
Rázová pevnost	286 kJ/m <sup>2</sup>
Modul pružnosti	164 MPa
Protažení při přetržení	50%
Teplotní měknutí Vicat	93°C

### ***Polykarbonát (PC)***

Patří mezi termoplastické polymery. Snadno se zpracovává například vstřikováním nebo lisováním za tepla. Vyznačují se tepelnou odolností, odolností proti nárazu a dobrou optickou vlastností. [25]

*Tab. 4 Vybrané vlastnosti PC Makrolon 2405. [22]*

<b>PC Makrolon 2405</b>	
Hustota	1,2 g/cm <sup>3</sup>
Index toku taveniny (300°C/1,2 kg)	20 g/10 min
Modul pevnosti v ohybu	2,4 GPa
Pevnost v tahu	60 MPa
Tvrdość Rockwell M	75
Rázová pevnost	525 kJ/m <sup>2</sup>
Teplota měknutí Vicat	144 °C

### ***Polypropylen (PP)***

Polypropylen je termoplastický polymer ze skupiny polyolefinů. Patří mezi nejběžnější plasty, které se používají v mnoha odvětvích. Má podobné fyzikálně-chemické vlastnosti



jako polyetylen. Je odolný vůči olejům, organickým rozpouštědlům a alkoholům. Vyniká výbornou mechanickou a chemickou odolností. [26]

*Tab. 5 Vybrané vlastnosti PP TATREN IM 50 80. [23]*

<b>PP TATREN IM 50 80</b>	
Modul pružnosti v tahu	1500 MPa
Index toku taveniny (230°C/2,16 kg)	55 g/10 min
Modul pružnosti v ohybu	1450 MPa
Pevnost v tahu	23 MPa
Tvrdość Rockwell	82

## 6.2 Volba lepidla

### *Kyanoakrylátové lepidlo – SUREFIX 4401*

Jedná se o husté sekundové lepidlo. Lepené díly nemusejí spolu přesně lícovat. [27]

*Tab. 6 Vybrané vlastnosti (SUREFIX 4401). [27]*

<b>Kyanoakrylátové lepidlo – SUREFIX 4401</b>	
Základní složka	ethyl
Viskozita cPs při 25°C	80
Barva	čirá
Max. spára v mm	0,1
Pevnost v tahu na stříh N/mm <sup>2</sup>	15-26
Tepelná odolnost	-55°C - 80°C
Bod tání	160°C - 170°C
Plné vytvrzení	24 hod

### *2-komponentní metakrylátové lepidlo – CYBERBOND A806*

2-komponentní methyakrylátové lepidlo pro vysoce pevnostní spoje pro lepení kovů a plastů. Lepidlo je dynamicky zatížitelné, chemicky stálé a vysoce viskózní.[28]

Tab. 7 Vybrané vlastnosti (CYBERBOND A806). [28]

<b>2-komponentní metakrylátové lepidlo - CYBERBOND A806</b>	
A + B směs	tekutá
Základ lepidla	methylnmethakrylát a tvrdidlo
Barva po míšení	mléčná
Poměr míšení	1:1
Doba zpracovatelnosti	10 - 20 min.
Plné vytvrzení	24 hod
Teplota použití	-40°C až +40°C



Obr. 16 2-komponentní metakrylátové lepidlo – CYBERBOND A806. [28]

**2-komponentní metakrylátové lepidlo ZYROBOND 2K-MMA 7306**

Tab. 8 Vybrané vlastnosti (ZYROBOND 2K-MMA 7306). [29]

<b>2-komponentní metakrylátové lepidlo - ZYROBOND 2K-MMA 7306</b>	
Barva	bílá
Poměr míšení	1:1
Doba zpracovatelnosti	4-6 min
Plné vytvrzení	12-15 min
Teplota použití	-40°C až +120°C

### ***2-komponentní epoxidové lepidlo – SUREFIX EPOXY***

Dvousložkové epoxidové lepidlo s dobou zpracování mezi 3-5 minutami. Po vytvrzení lepidla se získá velmi pevný a houževnatý spoj. Lepené povrchy musí být suché, čisté, zbavené prachu a mastnoty. [30]

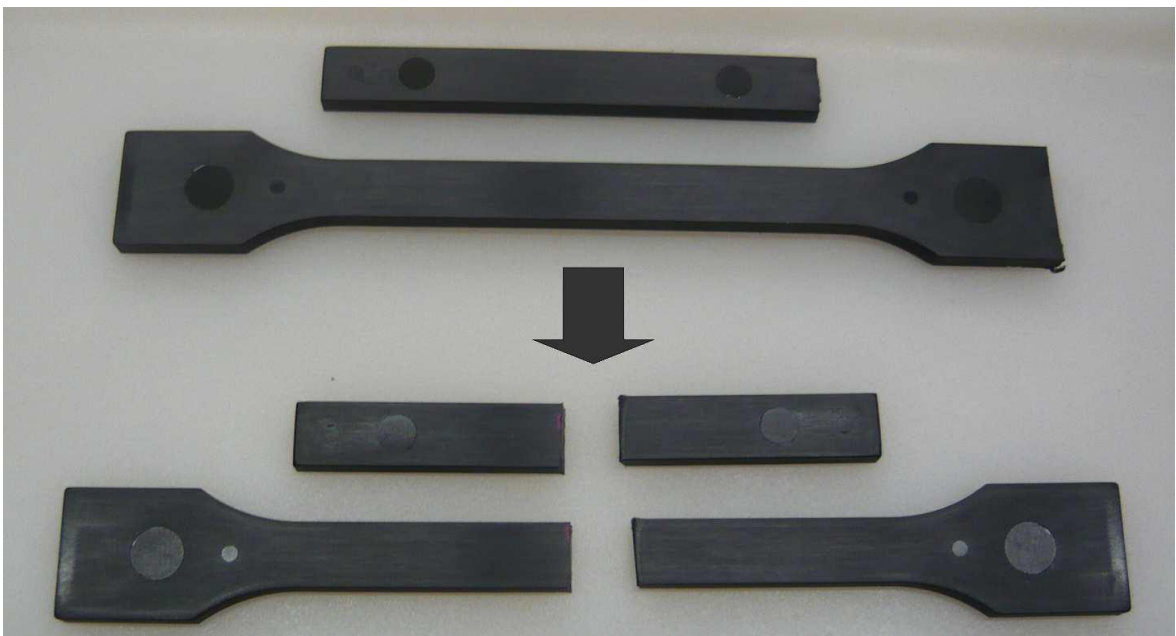
### **6.3 Příprava zkušebních vzorků**

Zkušební vzorky byly vystříknuty na vstříkovacím stroji Arburg 420C Advanced v dílnách Ústavu výrobního inženýrství. Vzorek je znázorněn na obrázku (Obr.17)



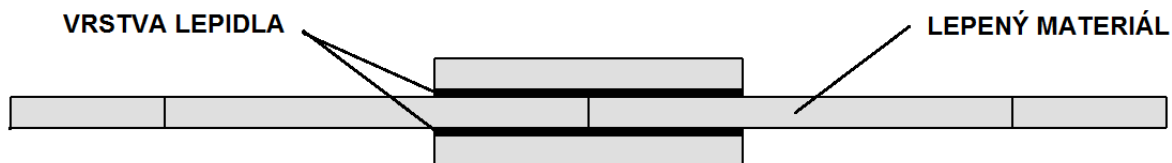
*Obr. 17 Zkušební vzorek a pásek pro překlátování. [3]*

Po vyrobení byly zkušební tělesa modifikovány plasmou o výkonu 300 W, 350 W a 400W. Před samotným lepením byly vzorky spolu s pásky rozstříhány v polovině své délky.



*Obr. 18 Příprava zkušebních vzorků. [3]*

Pro posouzení pevnosti lepených spojů byly vzorky spojeny dvojitě přeplátovaným spojem.



Obr. 19 Lepený spoj. [11]

### 6.3.1 Modifikace lepených povrchů plazmou

Pro modifikaci povrchu byla použita plasma The PlasmaJet G12P.

Tab. 9 Popis použité plasmy.

Plasma G12P	
Rozměry v mm (Š x V x H)	210 x 375 x 420
Hmotnost	15 kg
Barva	RAL 7030
Výstupní výkon (W)	1000 / 1200
Napájení ze sítě	230V 50/60 Hz
Maximální spotřeba proudu	9,5 A
Stupeň ochrany	IP 52

#### Charakteristika generátorů

- Komplexní autodiagnostika
- Regulace výkonu
- Maximální teplota okolí 40°C
- Měření výkonu ve Watech

Generátory jsou speciálně určeny pro plazmové aplikace, produkují energii, kterou před tím nebylo možné získat. Pro povrchové aplikace je 500 W dostatečná energie, 1000 W je potřeba pro čištění a svařování. [32]

#### Výhody technologie

- Pracuje při atmosférickém tlaku,
- extrémně čistý provoz ve srovnání s plamenem,
- tichý provoz,

- mikroprocesorové řízení zajišťuje konstantní a reprodukovatelné výsledky.

### **Funkce plazmy**

Plazma se skládá ze zdroje vysokého napětí a trysky. Plazma se tvoří uvnitř sestavy trysky prostřednictvím výboje vysokého napětí mezi dvěma elektrodami.

Aplikuje-li se například aktivovaný plyn na povrch plastu, zvýší se smáčivost plastu. Při použití vhodné trysky lze modifikovat materiály i na špatně přístupných místech. Tato metoda se výborně hodí na svařování plastových žeber. [32]

### **Aplikace**

- Aktivace povrchů za zvýšením smáčivosti u široké škály materiálů (pro automobilový průmysl, elektronické desky, skla a polykarbonátové desky, okenní profily atd.).
- Zlepšení spolehlivosti a dlouhodobé stability lepených spojů.
- Aktivace silikonu, PTFE a EPDM.
- Čištění a odstranění prachu.
- Podélné a tvarové svařování fólií. [32]

## **6.4 Provedené zkoušky**

Pro posouzení vlivu modifikace plazmou na povrchové vlastnosti lepených materiálů a pro zjištění pevnosti lepených spojů se provedly následující zkoušky:

- Měření kontaktního úhlu smáčení metodou přisedlé kapky
- Stanovení volné povrchové energie metodou OWRK
- Stanovení pevnosti lepených spojů tahovou zkouškou

## 7 VÝSLEDKY PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo zjistit vliv modifikace plasmou na povrchové a adhezní vlastnosti a na pevnost lepených spojů a u vybraných materiálů (HDPE, LDPE, PP, PC).

### 7.1 Kontaktní úhel smáčení

Měření kontaktních úhlů smáčení bylo provedeno metodou přisedlé kapky na zařízení See System od firmy Advex Instruments. Samotné měření probíhalo dle normy ČSN EN 15802 za použití tří kapalin (destilovaná voda, glycerin, etylenglykol) s rozdílnou hodnotou povrchového napětí ( $\gamma$ ). Měření bylo uskutečněno při pokojové teplotě (23 °C) s opakovatelností minimálně 10.



Obr. 20 See System od firmy Advex Instruments. [www.advex-instruments.cz]

Tab. 10 Hustota a povrchové napětí použitých kapalin. [31]

Použité kapaliny	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Povrchové napětí ( $\gamma$ ) [mJ/m <sup>2</sup> ]
Destilovaná voda	0,997	72,7
Glycerin	1,258	65,2
Etylenglykol	1,113	47,7

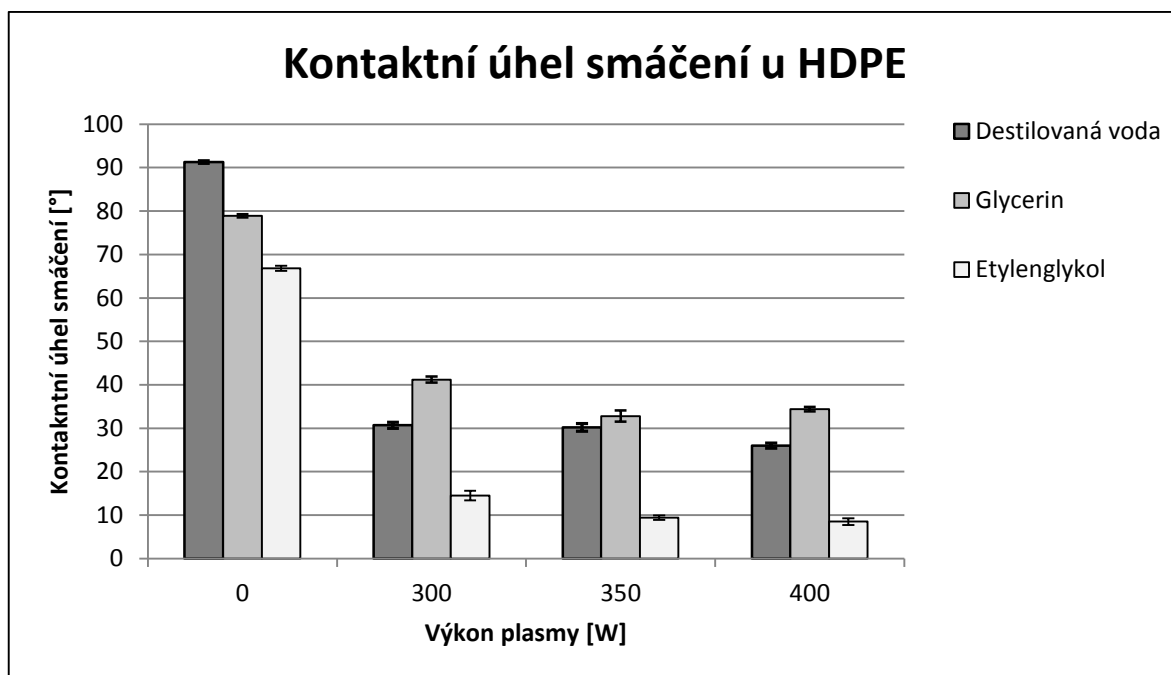
Výsledky kontaktních úhlů smáčení jsou velmi důležité pro lepení polymerů, protože na dostatečné smáčivosti lepeného materiálu závisí kvalita lepeného spoje.

### 7.1.1 Výsledky u HDPE

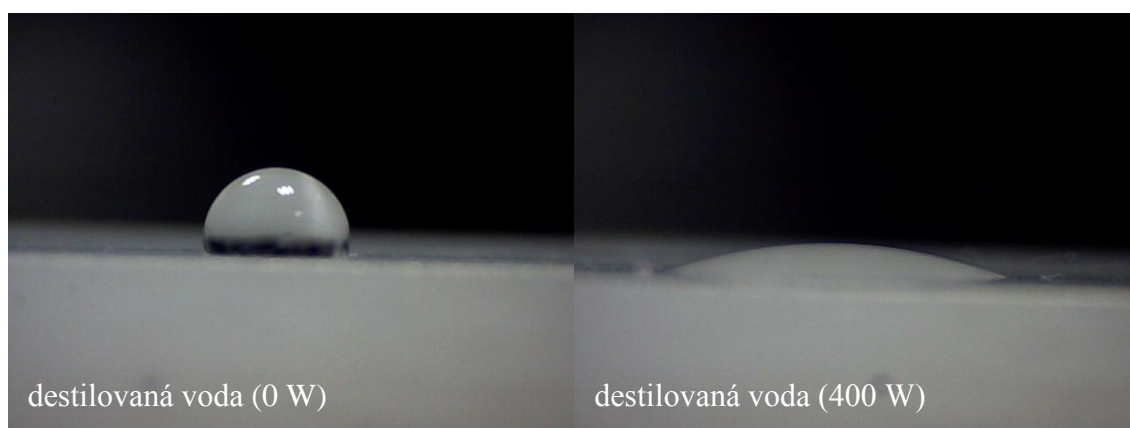
Z tabulky (Tab. 11) můžeme zjistit, že modifikace plazmou zlepšuje smáčivost, což je vidět na poklesu kontaktních úhlů. Zlepšení bylo zaznamenáno u všech použitých kapalin. Nejvyšší kontaktní úhly (nejhorší smáčivost) byly zaznamenány u nemodifikovaného materiálu (výkon plasmy 0W). Se zvyšujícím se výkonem plasmy dochází k poklesu kontaktních úhlů smáčení na hodnoty 26° (destilovaná voda) 34,4° (glycerin) a 8,5° (etylenglykol), což je pokles minimálně o 55 % v závislosti na použité kapalině.

Tab. 11 Výsledky kontaktních úhlů smáčení u materiálu HDPE.

HDPE				
Kapalina	Výkon plasmy [W]			
	0	300	350	400
Destilovaná voda	(91,3 ± 0,3)°	(30,7 ± 0,7)°	(30,2 ± 0,9)°	(26 ± 0,6)°
Glycerin	(78,9 ± 0,4)°	(41,2 ± 0,7)°	(32,8 ± 1,3)°	(34,4 ± 0,5)°
Etylenglykol	(66,8 ± 0,6)°	(14,5 ± 1,1)°	(9,4 ± 0,5)°	(8,5 ± 0,8)°



*Obr. 21 Kontaktní úhel smáčení u HDPE v závislosti na výkonu plasmy.*



*Obr. 22 Kapka destilované vody na povrchu HDPE.*

Na obrázku (Obr. 22) můžeme vidět kapku referenční kapaliny na povrchu nemodifikovaného HDPE (0W) a kapku na povrchu materiálu modifikovaného plasmou o výkonu 400W. Z naměřených výsledků (Obr. 21 a Obr. 22) můžeme tedy vyhodnotit, že modifikace HDPE plasmou vede ke zlepšení smáčivosti a v důsledku toho také ke zlepšení lepitelnosti.

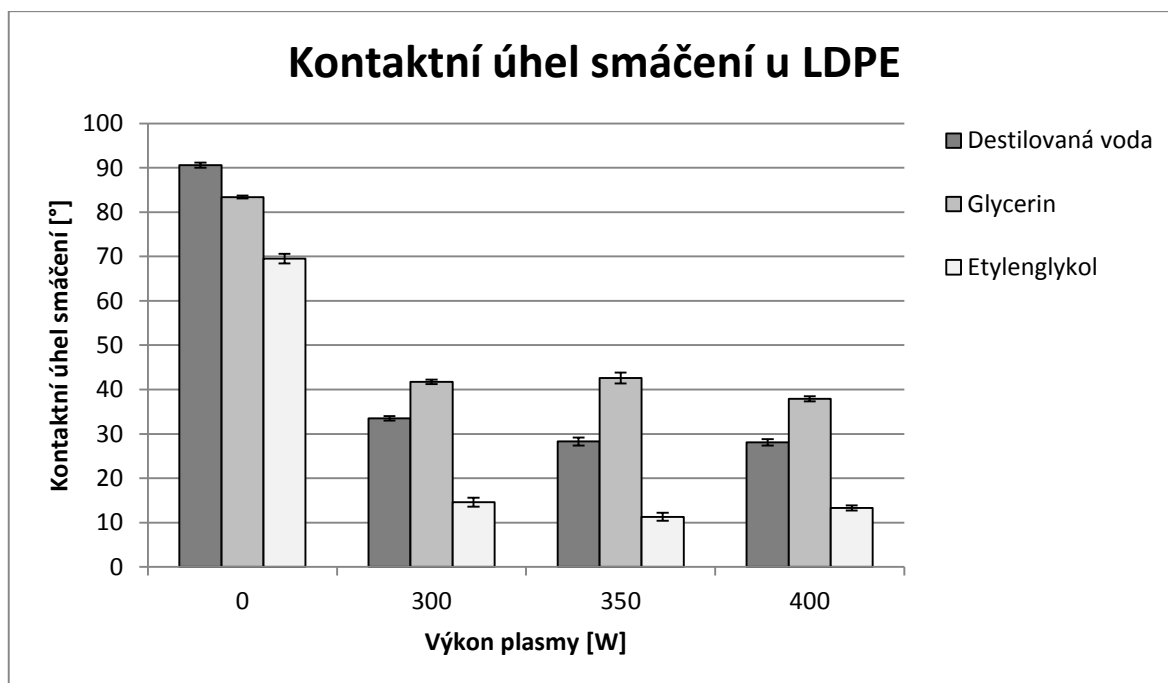


### 7.1.2 Výsledky u LDPE

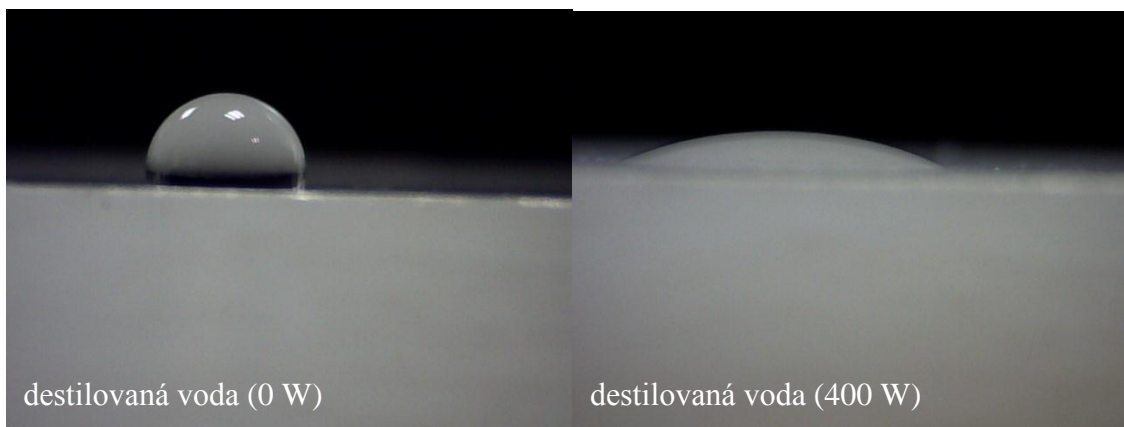
Při porovnání výsledků v tabulce (Tab. 12) je patrné, že modifikace LDPE plasmou zlepšuje smáčivost a tím i lepitelnost daného materiálu, což je charakterizováno zmenšením kontaktních úhlů smáčení. Pokles kontaktních úhlů smáčení byl zaznamenán u všech kapalin. Nejvyšší hodnoty kontaktního úhlu byly zaznamenány u nemodifikovaného materiálu (výkon plasmy 0W). Se zvyšujícím se výkonem plazmy klesá kontaktní úhel smáčení 28,1°(pro destilovanou vodu), 37,9 (glycerin) a 13,3 (etylenglykol). Jedná o více jak trojnásobný pokles.

Tab. 12 Výsledky kontaktních úhlů smáčení u materiálu LDPE.

LDPE				
Kapalina	Výkon plazmy [W]			
	0	300	350	400
Destilovaná voda	$(90,6 \pm 0,6)^\circ$	$(33,5 \pm 0,5)^\circ$	$(28,3 \pm 0,9)^\circ$	$(28,1 \pm 0,7)^\circ$
Glycerin	$(83,4 \pm 0,3)^\circ$	$(41,7 \pm 0,5)^\circ$	$(42,6 \pm 1,2)^\circ$	$(37,9 \pm 0,6)^\circ$
Etylenglykol	$(69,5 \pm 1,1)^\circ$	$(14,6 \pm 1,0)^\circ$	$(11,3 \pm 0,9)^\circ$	$(13,3 \pm 0,6)^\circ$



Obr. 23 Kontaktní úhel smáčení u LDPE v závislosti na výkonu plazmy.



*Obr. 24 Kapka destilované vody na povrchu LDPE.*

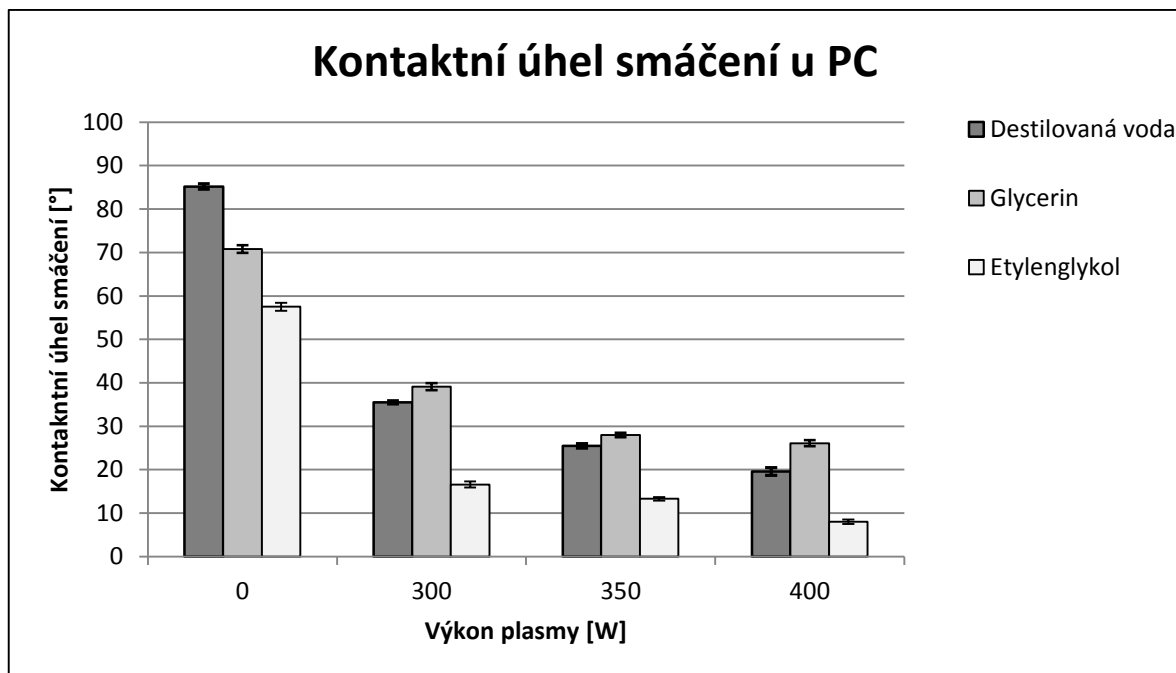
Na obrázku (Obr. 24) můžeme vidět kapku referenční kapaliny u nemodifikovaného materiálu (0W) a kapku na povrchu modifikovaného LDPE plasmou o výkonu 400 W, kde je patrné, že modifikace povrchu výrazně zlepšuje smáčivost povrchu materiálu LDPE, které je charakterizováno poklesem kontaktních úhlů smáčení.

### 7.1.3 Výsledky u PC

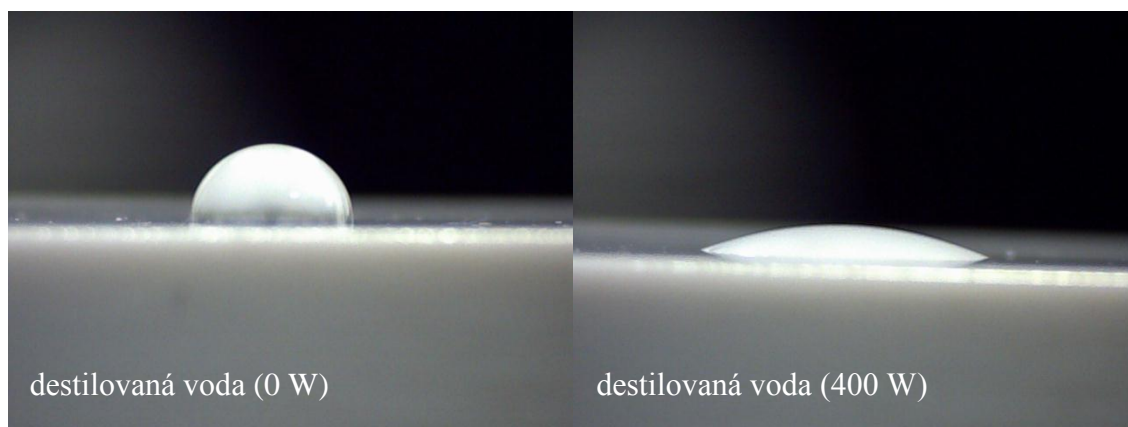
Stejně jako u předchozích dvou materiálů, tak i u PC je z naměřených výsledků jasně patrné, že i zde modifikace plasmou výrazně zlepšuje smáčivost povrchu. Nejmenší kontaktní úhel smáčení opět vykazoval materiál modifikován plasmou o výkonu 400 W (pro etylenglykol,  $26,1^\circ$  (glycerin) a  $19,6^\circ$  (pro destilovanou vodu). Nejvyšších kontaktní úhly (nejhorší smáčivost) byla zaznamenána e nemodifikovaného materiálu (výkon plasmy 0W).

*Tab. 13 Výsledky kontaktních úhlů smáčení u materiálu PC.*

PC				
Kapalina	Výkon plasmy [W]			
	0	300	350	400
Destilovaná voda	$(85,2 \pm 0,6)^\circ$	$(35,5 \pm 0,4)^\circ$	$(25,5 \pm 0,5)^\circ$	$(19,6 \pm 0,9)^\circ$
Glycerin	$(70,8 \pm 0,9)^\circ$	$(39,1 \pm 0,8)^\circ$	$(28,0 \pm 0,5)^\circ$	$(26,1 \pm 0,7)^\circ$
Etylenglykol	$(57,5 \pm 0,9)^\circ$	$(16,6 \pm 0,7)^\circ$	$(13,3 \pm 0,4)^\circ$	$(8,0 \pm 0,5)^\circ$



Obr. 25 Kontaktní úhel smáčení u PC v závislosti na výkonu plasmu.



Obr. 26 Kapka destilované vody na povrchu PC.

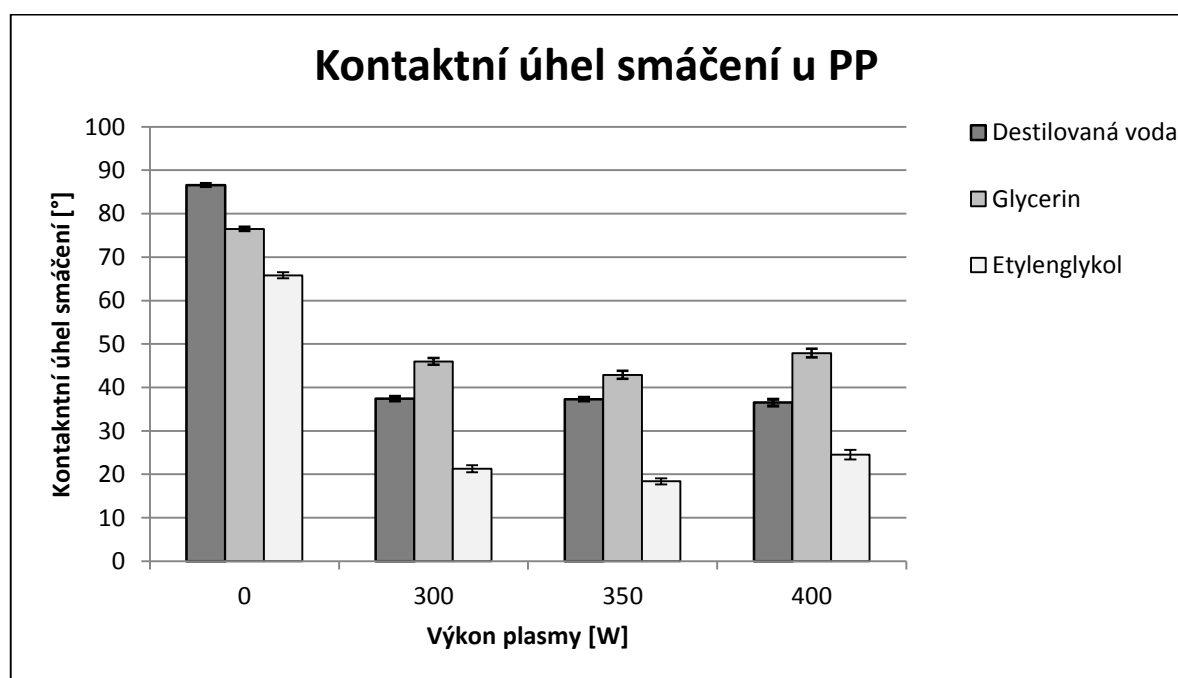
Na obrázku (Obr. 26) můžeme vidět kapku referenční kapaliny na povrchu nemodifikovaného PC (0W) a kapku na povrchu materiálu modifikovaného plasmou o výkonu 400W. Z naměřených výsledků můžeme tedy vyhodnotit, že modifikace PC plasmou vede ke zlepšení smáčivosti a v důsledku toho také ke zlepšení lepitelnosti.

### 7.1.4 Výsledky u PP

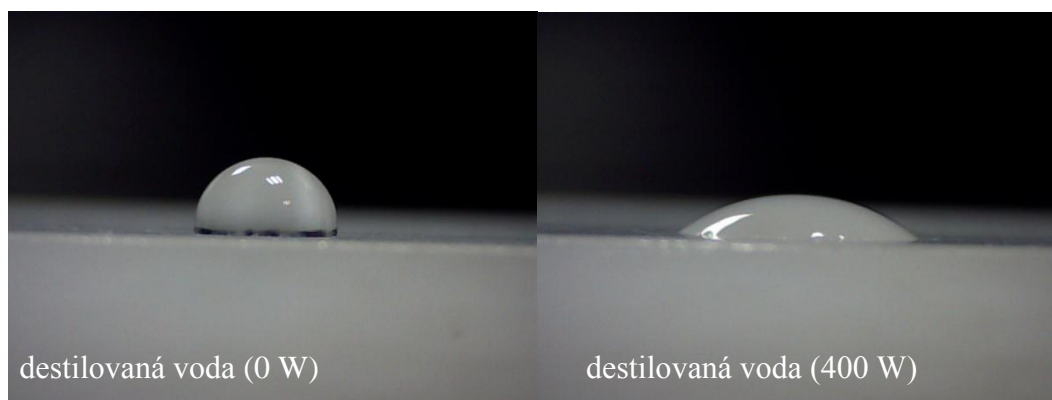
Tak jako u všech předchozích materiálů, tak i zde modifikace materiálu plasmou vedla k výraznému zlepšení smáčivosti povrchu. Nejhorší smáčivost byla zaznamenána u nemoifikovaného materiálu (výkon plasmy 0 W). Se zvyšující se výkonem plasmy dochází k poklesu kontaktních úhlů smáčení na hodnoty 36,5° (pro destilovanou vodu), 47,9° (glycerin) a 24,5° (etylenglykol), což je pokles o 57 %.

Tab. 14 Výsledky kontaktních úhlů smáčení u materiálu PP.

PP				
Kapalina	Výkon plasmy [W]			
	0	300	350	400
Destilovaná voda	(86,6 ± 0,3)°	(37,4 ± 0,5)°	(37,3 ± 0,4)°	(36,5 ± 0,8)°
Glycerin	(76,5 ± 0,5)°	(46,0 ± 0,8)°	(42,9 ± 0,9)°	(47,9 ± 1,0)°
Etylenglykol	(65,8 ± 0,7)°	(21,3 ± 0,8)°	(18,4 ± 0,7)°	(24,5 ± 1,1)°



Obr. 27 Kontaktní úhel smáčení u PC v závislosti na výkonu plasmy.



*Obr. 28 Kapka destilované vody na povrchu PP.*

Na obrázku (Obr. 28) můžeme vidět kapku referenční kapaliny u neošetřeného povrchu PP a na povrchu modifikovaného plazmou u výkonu 400 W.

## **7.2 Volná povrchová energie**

Z teorie smáčení je dáno, že pro pevný lepený spoj by měl lepený materiál mít vyšší povrchovou energii než vybrané lepidlo. Proto se musí povrchy některých materiálů před samotným lepením vhodným způsobem upravovat.

Pro stanovení povrchové energie byla použita metoda OWRK (Owens-Wendt-Raeble-Kaeble) a bylo vycházeno z naměřených kontaktních úhlů smáčení. Pro vyhodnocení naměřených výsledků bylo využito softwaru See System. Metoda OWRK se používá pro určení povrchového napětí u polymerů.

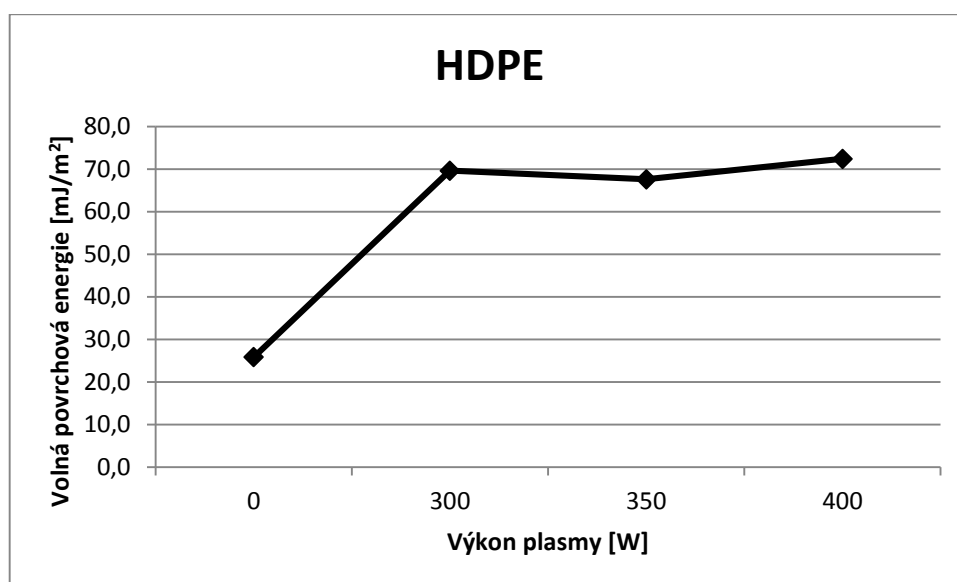
Byla určena volná povrchová energie ( $\gamma_s$ ) a také její disperzní ( $\gamma_s^d$ ) a polární složka ( $\gamma_s^p$ ), která má významný vliv na adhezní vlastnosti. Hodnoty volné povrchové energie určené z kombinace kapalin destilovaná voda + glycerin, destilovaná voda + etylenglykol a také z regresního modelu byly vyneseny do tabulek a z hodnot získaných z regresního modelu byly následně sestrojeny grafy ve formě trendových křivek.

### **7.2.1 Materiál HDPE**

Srovnáme-li výsledky z tabulky (Tab. 15) zjistíme, že při modifikaci povrchu plazmou výrazně stoupla i povrchová energie, na rozdíl od nemoifikovaného materiálu. Stejně tak stouply i hodnoty polární složky, která je velmi důležitá pro výslednou lepitelnost.

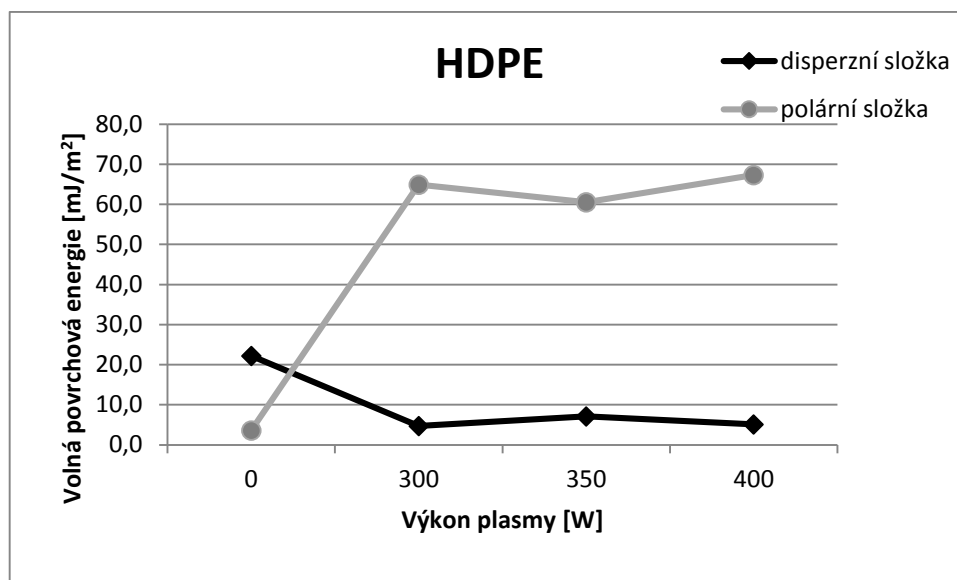
Tab. 15 Volná povrchová energie HDPE.

HDPE										
Kapaliny		OWRK model destilovaná voda + glycerin			OWRK model destilovaná voda + etylen-glykol			OWRK model – regresní		
Povrchová energie a její složky [mJ/m <sup>2</sup> ]		$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$	$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$	$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$
Výkon plasmy [W]	0	<b>26,8</b>	23,5	3,3	<b>25,3</b>	21,5	3,8	<b>25,8</b>	22,2	3,6
	300	<b>71,9</b>	3,4	68,5	<b>68,8</b>	5,4	63,4	<b>69,6</b>	4,7	64,9
	350	<b>65,7</b>	9,3	56,4	<b>68,4</b>	6,1	62,3	<b>67,6</b>	7,1	60,5
	400	<b>71,5</b>	5,8	65,7	<b>72,8</b>	4,8	68,0	<b>72,4</b>	5,1	67,3



Obr. 29 Trendová křivka volné povrchové energie u HDPE.

Z grafu (Obr. 29) můžeme vyčíst, že nejnižší povrchovou energii (pro regresní model) má neošetřený materiál (25,8 mJ/m<sup>2</sup>) a nejvyšší hodnoty dosáhl materiál modifikován plasmou o výkonu 400W (72,4 mJ/m<sup>2</sup>). U materiálů modifikovaných plasmou o výkonu 350 W došlo k mírnému poklesu povrchové energie oproti ostatním modifikovaným materiálům.



Obr. 30 Trendové křivky disperzní a polární složky materiálu HDPE.

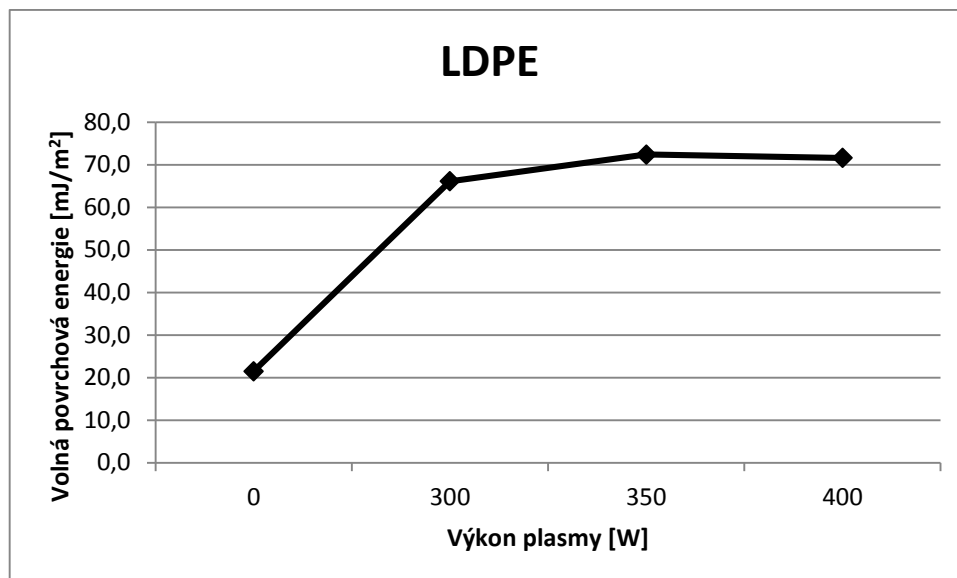
Stejně jako u celkové volné povrchové energie, můžeme i u polární složky říct, že modifikace plazmou je efektivní a zlepšuje vlastnosti lepeného materiálu.

### 7.2.2 Materiál LDPE

Z naměřených výsledků je zřejmé, že modifikace plasmou výrazně zvyšuje volnou povrchovou energii materiálu LDPE. Nejnižších hodnot dosahoval neupravený materiál (0W). Nejvyšších hodnot bylo naopak dosaženo modifikací povrchu plazmou u výkonů 350 a 400 W, kde byl nárůst až o 260 %.

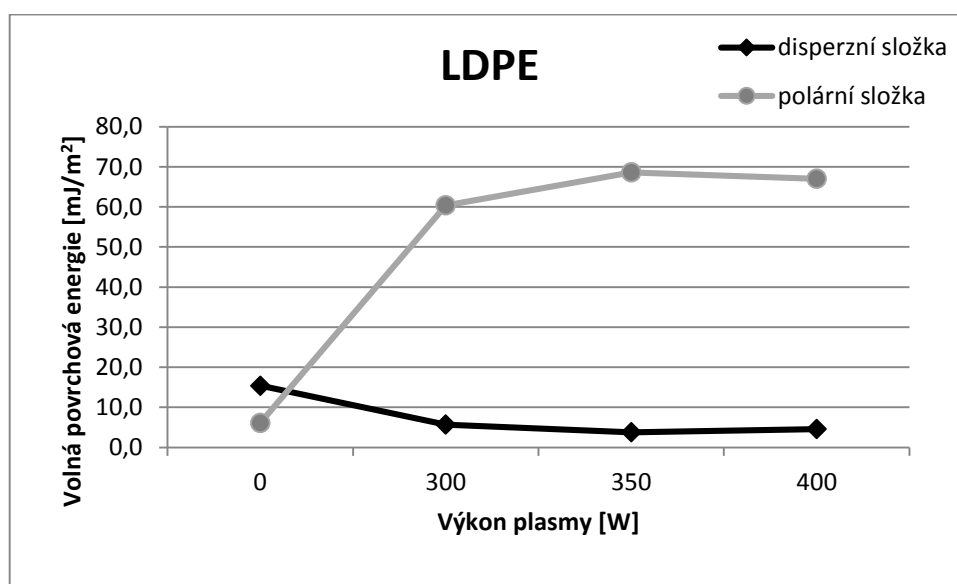
Tab. 16 Volná povrchová energie LDPE.

LDPE										
Kapaliny		OWRK model destilovaná voda + glycerin			OWRK model destilovaná voda + etylen-glykol			OWRK model – regresní		
Povrchová energie a její složky [mJ/m²]		$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$	$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$	$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$
Výkon plazmy [W]	0	<b>20,1</b>	12,8	7,3	<b>22,4</b>	16,9	5,5	<b>21,5</b>	15,4	6,1
	300	<b>68,4</b>	4,3	63,8	<b>65,5</b>	6,5	59,0	<b>66,1</b>	5,7	60,4
	350	<b>77,4</b>	1,8	75,6	<b>70,7</b>	5,2	65,5	<b>72,4</b>	3,8	68,6
	400	<b>72,1</b>	4,3	67,8	<b>71,4</b>	4,8	66,6	<b>71,6</b>	4,6	67,0



Obr. 31 Trendová křivka volné povrchové energie u LDPE.

U OWRK regresního modelu vykazoval nejhorší hodnoty opět nemodifikovaný materiál  $\gamma_s$  (21,5 mJ/m<sup>2</sup>) a nejlepší hodnoty materiál oplazmován výkonem 350W (72,4 mJ/m<sup>2</sup>). Z toho vyplývá, že použitím plasmu se zvýší povrchová energie více jak trojnásobně.



Obr. 32 Trendové křivky disperzní a polární složky materiálu LDPE.

Při porovnání výsledků polárních a disperzních složek jsme došli k závěru, že polární složka se zvyšujícím se výkonem oplazmování taktéž stoupá.

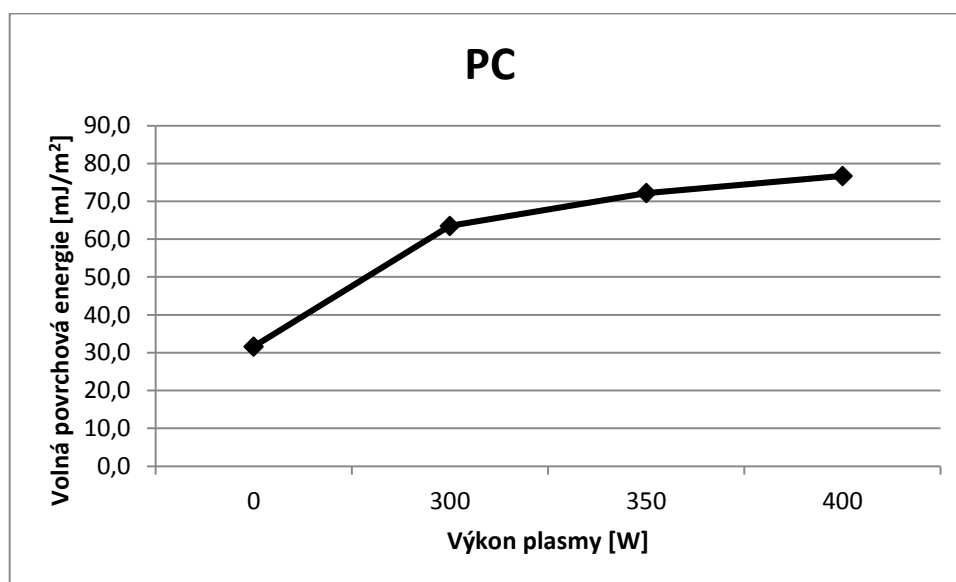


### 7.2.3 Materiál PC

Obdobně jako u předchozích dvou materiálů, úprava povrchu plazmou výrazně zlepšuje povrchovou energii a taky její polární složku, čímž dochází ke zlepšení adhezních vlastností.

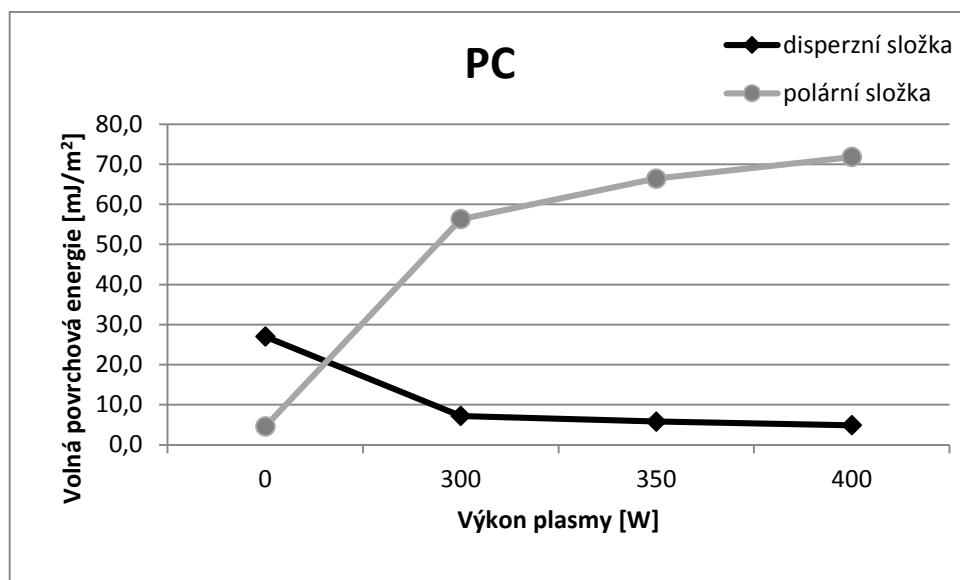
Tab. 17 Volná povrchová energie PC.

PC										
Kapaliny		OWRK model destilovaná voda + glycerin			OWRK model destilovaná voda + etylen-glykol			OWRK model – regresní		
Povrchová energie a její složky [mJ/m <sup>2</sup> ]		$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$	$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$	$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$
Výkon plasmy [W]	0	<b>33,6</b>	29,8	3,8	<b>30,5</b>	25,6	4,9	<b>31,6</b>	27,0	4,6
	300	<b>63,1</b>	7,5	55,6	<b>63,6</b>	7,0	56,6	<b>63,5</b>	7,2	56,3
	350	<b>68,2</b>	10,1	58,1	<b>74,3</b>	4,0	70,3	<b>72,2</b>	5,8	66,4
	400	<b>72,3</b>	8,5	63,8	<b>78,9</b>	3,3	75,6	<b>76,7</b>	4,9	71,8



Obr. 33 Trendová křivka volné povrchové energie u PC.

Výše uvedená tabulka (Tab. 17) ukazuje, že nejnižší hodnoty volné povrchové energie u materiálu PC bylo naměřeno u neošetřeného povrchu a to 31,6 mJ/m<sup>2</sup> (regresní model). Nejvyšších hodnot bylo dosaženo u materiálu, upraveného plazmou o výkonu 400 W. Hodnoty vzrostly na 76,7 mJ/m<sup>2</sup>, což je více jak dvojnásobný nárůst.



Obr. 34 Trendové křivky disperzní a polární složky materiálu PC.

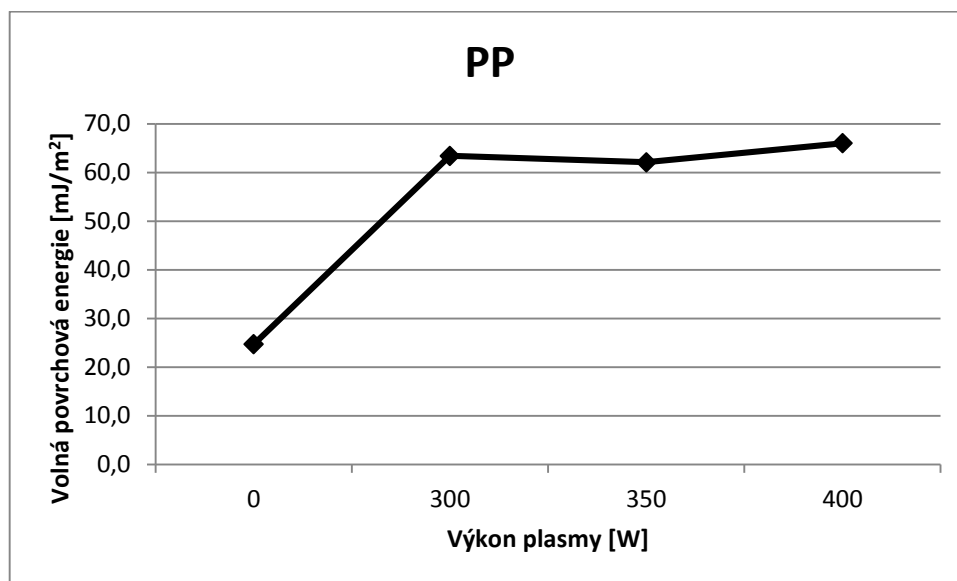
Na křivce polární složky (Obr. 34) můžeme vidět, podobně jako u volné povrchové energie, že hodnoty modifikací vzrostly. U regresního modelu OWRK z 4,6 mJ/m<sup>2</sup> (u nemodifikovaného materiálu) na 71,8 mJ/m<sup>2</sup> (u materiálu modifikovaného výkonem 400 W), což je o více jak 15-ti násobek.

#### 7.2.4 Materiál PP

Tak jako u všech předchozích materiálů, stejně tak i u PP se modifikací povrchu plazmou výrazně zvýšila volná povrchová energie. Z výsledných hodnot byly sestrojeny grafy (Obr. 35 a Obr. 36).

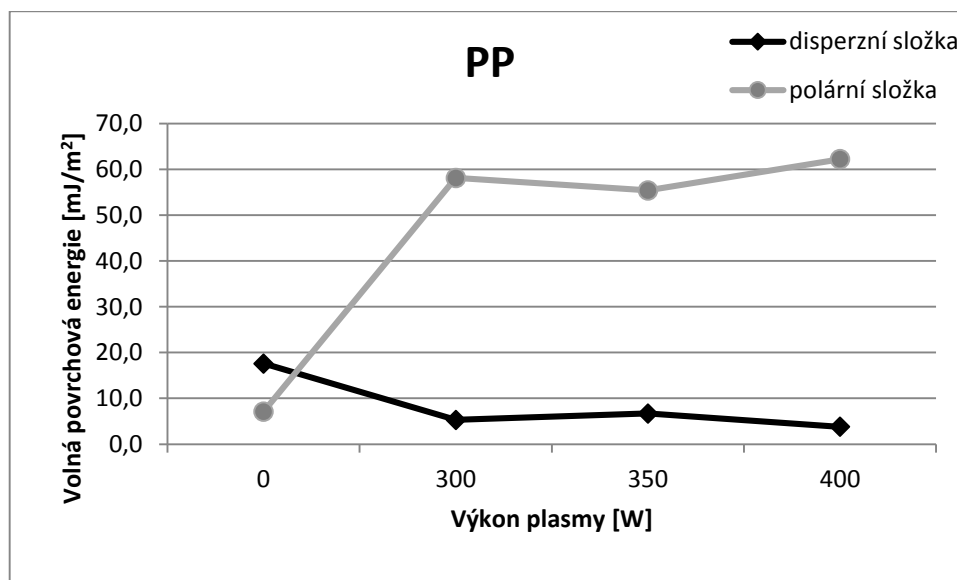
Tab. 18 Volná povrchová energie PP.

PP										
Kapaliny		OWRK model destilovaná voda + glycerin			OWRK model destilovaná voda + etylen-glykol			OWRK model - regresní		
Povrchová energie a její složky [mJ/m <sup>2</sup> ]		$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$	$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$	$\gamma_s$	$\gamma_s^d$	$\gamma_s^p$
Výkon plazmy [W]	0	<b>25,7</b>	19,4	6,3	<b>24,1</b>	16,6	7,5	<b>24,7</b>	17,6	7,1
	300	<b>66,6</b>	3,4	63,2	<b>62,4</b>	6,5	55,9	<b>63,4</b>	5,3	58,1
	350	<b>63,4</b>	5,7	57,7	<b>61,7</b>	7,4	54,3	<b>62,1</b>	6,7	55,4
	400	<b>70,6</b>	1,9	68,7	<b>64,6</b>	5,2	59,4	<b>66,0</b>	3,8	62,2



Obr. 35 Trendová křivka volné povrchové energie u PP.

Nejnižších hodnot bylo opět naměřeno u nemodifikovaného PP a to 24,7 mJ/m<sup>2</sup>. Naopak nejvyšších hodnot bylo dosaženo u PP oplazmovaného výkonem 400 W (66,0 mJ/m<sup>2</sup>), čímž hodnoty vzrostly téměř o 170 %.



Obr. 36 Trendové křivky disperzní a polární složky materiálu PC.

Z grafu (Obr. 36) můžeme vyhodnotit hodnoty polární složky. Nejnižší hodnota byla naměřena pro nemodifikovaný PP a to 7,1 mJ/m<sup>2</sup> a nejvyšší u upraveného plazmou o výkonu 400 W a to 62,2 mJ/m<sup>2</sup>.

### 7.3 Pevnost lepených spojů

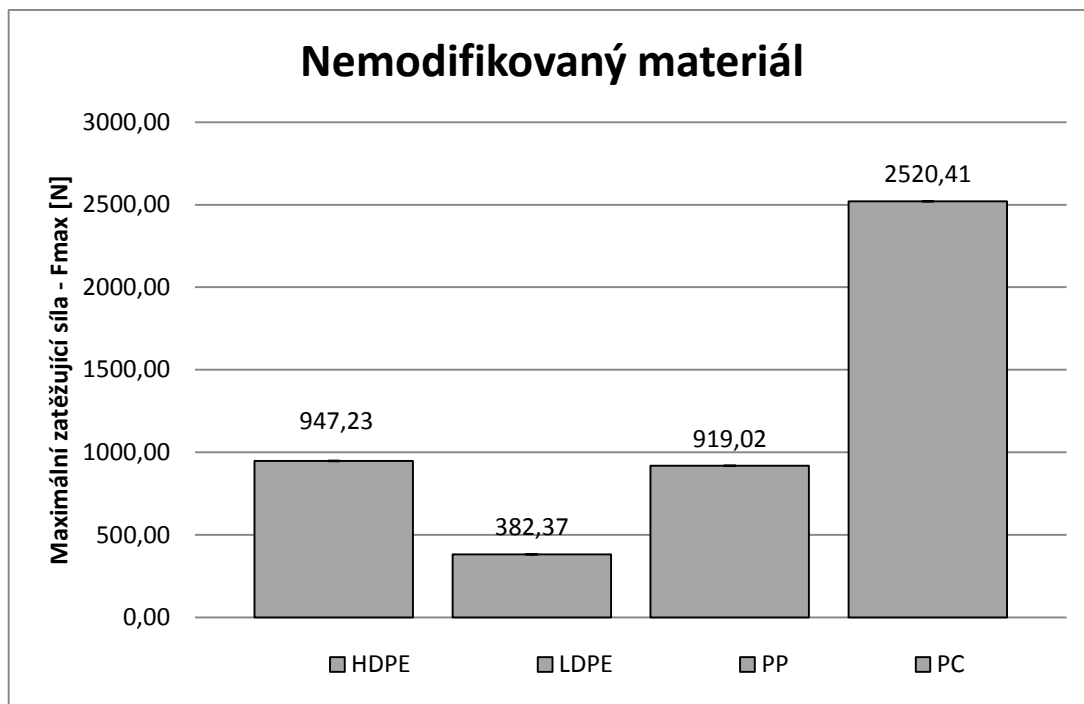
Jednou z nejdůležitějších zkoumaných vlastností lepeného spoje je jeho pevnost. K posouzení únosnosti lepených spojů byla měřena maximální zatěžující síla, kterou definovaný lepený spoj přenáší. Pro její zjištění bylo využito tahové zkoušky, která byla realizována na trhačím stroji Zwick 1456 při rychlosti příčnicku 50 mm/min. Měření bylo uskutečněno při pokojové teplotě (23 °C) s opakovatelností minimálně 10 (pro každý materiál a každé lepidlo) a následně byla získaná data vyhodnocena pomocí softwaru Test Expert. Výsledky jsou zpracovány do tabulek a grafů.

#### 7.3.1 Pevnost základního, nerozstříhaného a nelepeného materiálu

Jak plyne z výsledků (Tab. 19 a Obr.37), nejvyšší pevnosti dosahoval nemodifikovaný, nerozstřížený materiál PC ( $F_{\max}=2520,41$  N), dále HDPE ( $F_{\max}=947,23$  N), PP ( $F_{\max}=919,02$  N) a nejnižší pevnost vykazoval materiál LDPE ( $F_{\max}=382,37$  N).

Tab. 19 Max. únosnost nemodifikovaného, nerozstříhaného a nelepeného materiálu.

Nemodifikovaný materiál				
Maximální zatěžující síla - $F_{\max}$ [N]				
č. m.	HDPE	LDPE	PP	PC
1	948,7	383,5	907,6	2519,0
2	948,1	378,9	921,2	2518,4
3	945,6	382,8	925,7	2523,4
4	953,0	383,0	921,4	2517,2
5	942,5	380,4	914,4	2514,3
6	945,4	382,3	921,9	2523,4
7	935,0	381,1	915,7	2521,3
8	956,6	382,9	918,0	2529,9
9	945,4	384,3	919,4	2515,5
10	951,8	384,4	924,7	2521,9
Průměr	947,23	382,37	919,02	2520,41
SMCH	1,90	0,55	1,70	1,45



Obr. 37 Porovnání  $F_{max}$  základního materiálu.

### 7.3.2 Pevnost lepeného spoje při použití kyanoakrylátového lepidla SUREFIX 4401

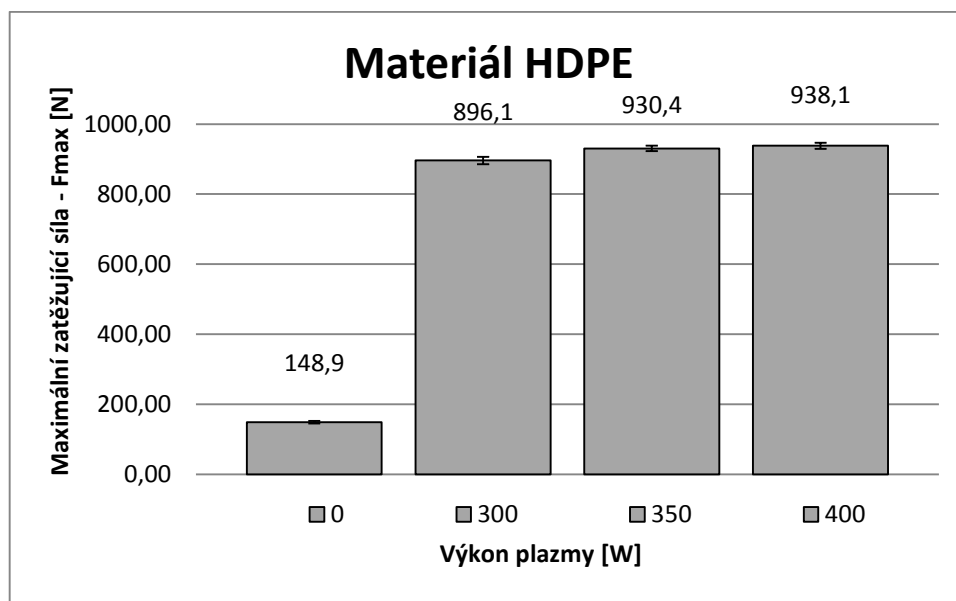
Z výsledků uvedených v tabulce (Tab. 20) je zřejmé, že modifikací materiálů (HDPE, LDPE, PP a PC) plazmou dochází k výraznému zlepšení pevnosti lepeného spoje. Pro spojení zkoumaných materiálů bylo použito kyanoakrylátové lepidlo SUREFIX 4401.

Tab. 20 Maximální zatěžující síla materiálu, modifikovaného plazmou o různém výkonu, lepeného kyanoakrylátovým lepidlem SUREFIX 4401.

Kyanoakrylátové lepidlo SUREFIX 4401					
Materiál		Materiál modifikovaný plazmou [W]			
		0	300	350	400
HDPE	průměr [N]	148,9	896,1	930,4	938,1
	SMCH [N]	3,7	10,3	7,6	8,3
LDPE	průměr [N]	69,7	373,0	369,9	379,7
	SMCH [N]	2,0	7,8	9,3	3,6
PP	průměr [N]	479,9	900,1	880,4	845,9
	SMCH [N]	8,0	6,2	11,5	18,3
PC	průměr [N]	1116,8	1776,2	2434,8	2227,0
	SMCH [N]	22,8	24,3	30,8	25,5

## Materiál HDPE

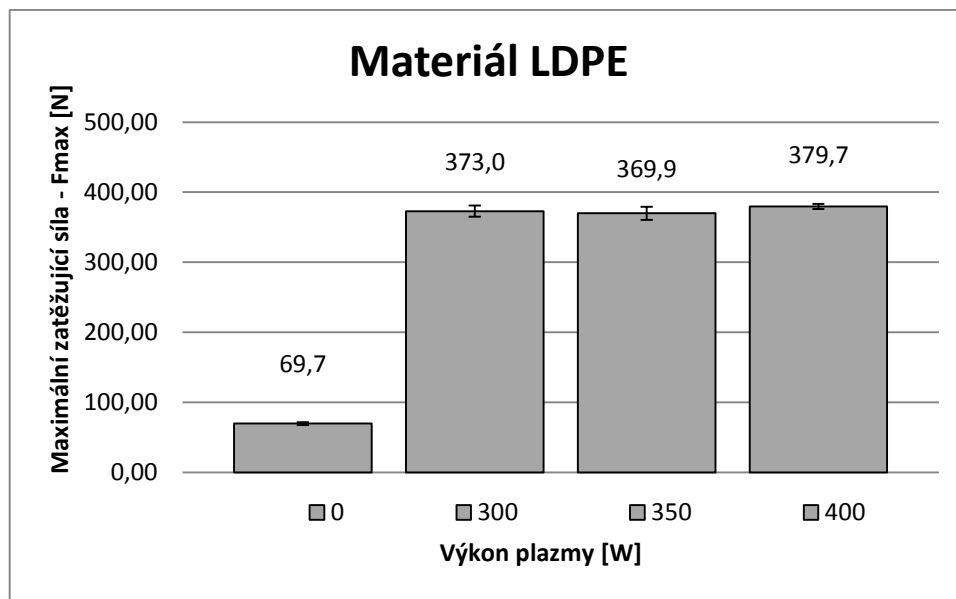
Porovnáme-li naměřené výsledky lepených spojů u nemodifikovaného a modifikovaného HDPE zjistíme, že pevnost roste s výkonem plazmy. Avšak výrazného nárůstu pevnosti bylo dosaženo již po modifikaci plazmou o výkonu 300 W, kde pevnost lepeného spoje stoupla přibližně o 502 %. Jako nejvhodnější výkon plazmy se jeví 400 W, u kterého maximální únosnost spoje vzrostla o 530 % vůči nemodifikovanému materiálu.



Obr. 38 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u HDPE, lepeného lepidlem Cyberbond 2008.

## Materiál LDPE

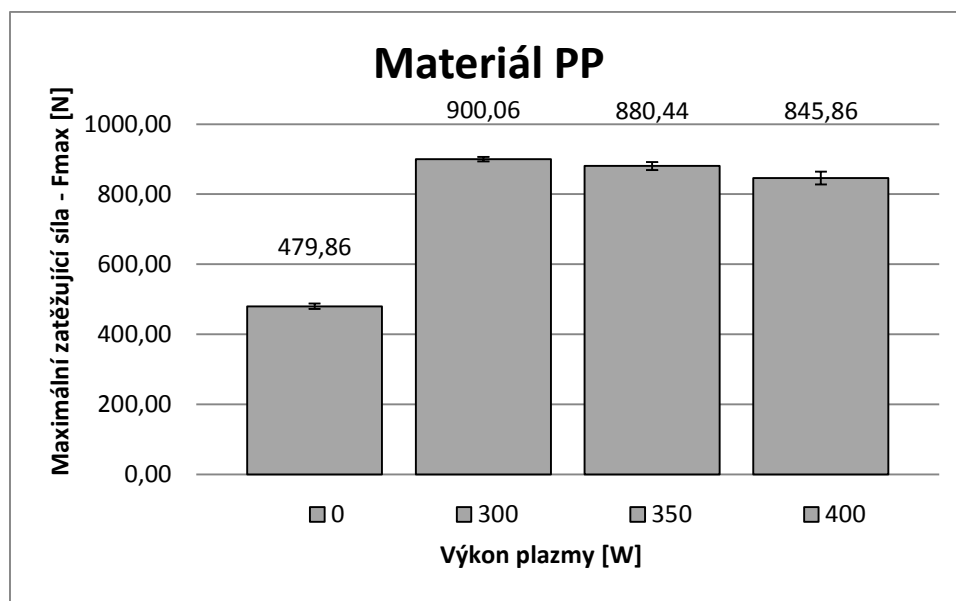
Výrazného nárůstu pevnosti lepeného spoje materiálu LDPE bylo zaznamenáno již při výkonu plazmy 300W, kdy pevnost vzrostla téměř o 435 %. Mezi jednotlivými výkony (300 W, 350W a 400W) je jen nepatrná změna v pevnosti, avšak u výkonu 350W dochází k nepatrnému poklesu pevnosti ( $F_{\max} = 369,9 \%$ ), přibližně o 2 % oproti modifikaci výkonem 400W. Právě modifikace výkonem 400W se jeví pro materiál LDPE jako nejvhodnější, kdy se u takto modifikovaného materiálu maximální zatěžující síla zvýšila vůči neošetřenému LDPE o 440 %.



Obr. 39 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u LDPE, lepeného lepidlem Cyberbond 2008.

### Materiál PP

Z obrázku (Obr. 40) vyplývá, že u materiálu PP došlo opět modifikací ke zlepšení pevnosti lepeného spoje, avšak už ne tak výrazně jako u předchozích materiálů (HDPE a LDPE). Nejvyšší pevnosti bylo dosaženo u modifikace výkonem 300W ( $F_{\max} = 900,1$  N), což je nárůst o 87 % vůči nemodifikovanému PP. Se zvyšující se výkonem plazmy pozvolna klesá únosnost lepeného spoje. Z upravených povrchů nejhorších výsledků dosáhl výkon 400W ( $F_{\max} = 845,7$  N), kde únosnost klesla o 6 % vůči PP oplazmovaného výkonem 300W.



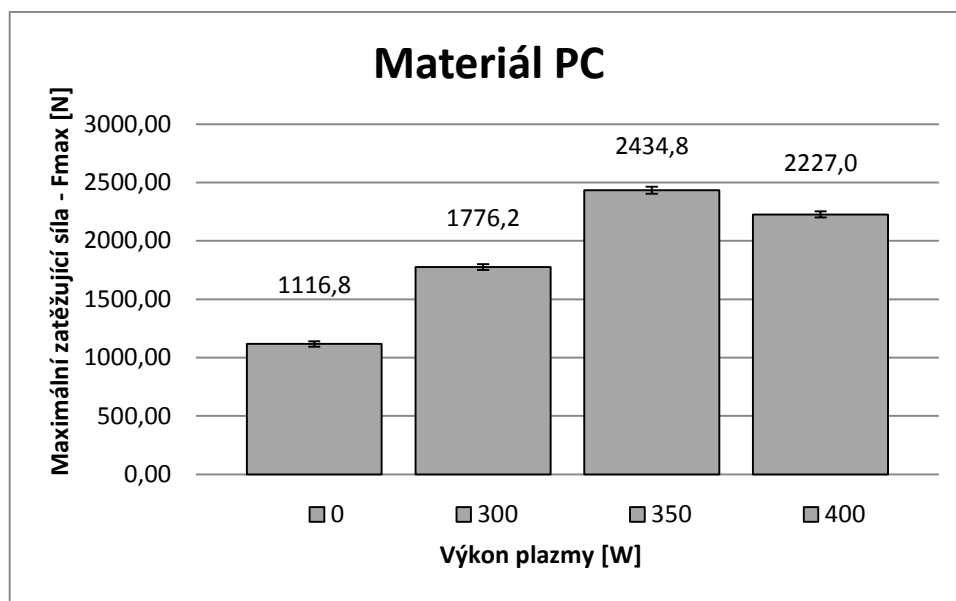
*Obr. 40 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PP, lepeného lepidlem Cyberbond 2008.*

Z obrázku (Obr. 40) vyplívá, že u materiálu PP došlo opět modifikací ke zlepšení pevnosti lepeného spoje, avšak už ne tak výrazně jako u předchozích materiálů (HDPE a LDPE). Nejvyšší pevnosti bylo dosaženo u modifikace výkonem 300W ( $F_{\max} = 900,1 \text{ N}$ ), což je nárůst o 87 % vůči nemodifikovanému PP. Se zvyšující se výkonem plazmy pozvolna klesá únosnost lepeného spoje. Z upravených povrchů nejhorších výsledků dosáhl výkon 400W ( $F_{\max} = 845,9 \text{ N}$ ), kde únosnost klesla o 6 % vůči PP oplazmovaného výkonem 300W.

### **Materiál PC**

U materiálu PC nebyl zaznamenán až tak dramatický nárůst únosnosti lepeného spoje při modifikaci plazmou o výkonu 300 W. Maximální zatěžující síla stoupla o 59 % vůči neupravenému PC. Nejpozitivnější vliv na výslednou pevnost lepeného spoje má plazma o výkonu 350 W ( $F_{\max} = 2434,8 \text{ N}$ ), kde dochází ke zvýšení o 118 %, vůči neoplazmovanému materiálu. U výkonu 400W dochází k poklesu vůči modifikaci plazmou o výkonu 350 W, nicméně se jeví stále výhodněji, nežli oplazmování výkonem 300 W nebo nemodifikovaným PC. V porovnání výkonu plazmy 400 W a 300 W, je únosnost výkonu 300 W nižší o 20 % vůči výkonu 400 W.





Obr. 41 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PC, lepeného lepidlem Cyberbond 2008.

### 7.3.3 Pevnost lepeného spoje při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla CYBERBOND A806

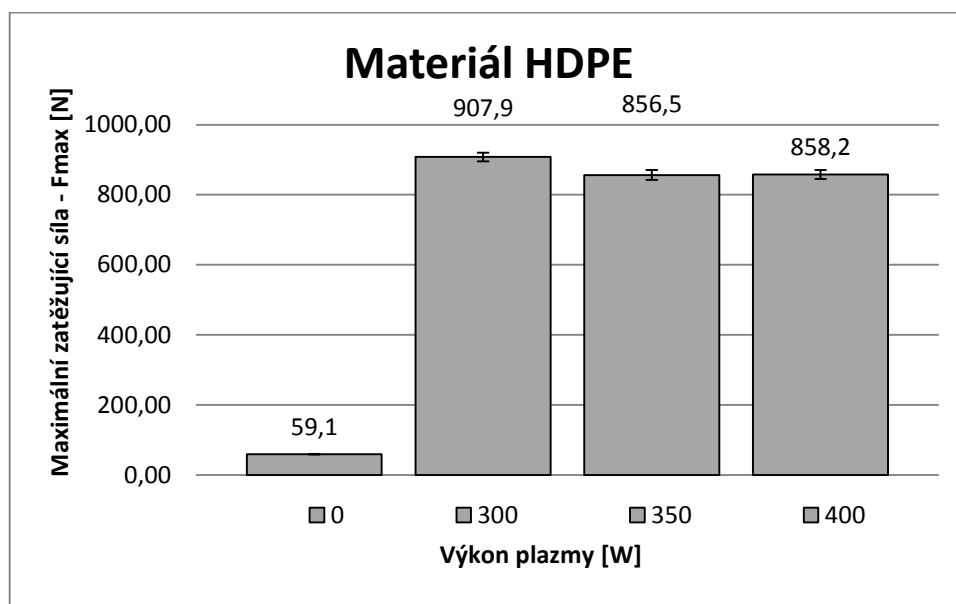
Z naměřených výsledků (Tab.21) vyplývá, že modifikací zkoumaných vzorků (HDPE, LDPE, PP a PC) plazmou o různých výkonech dochází ke zvýšení pevnosti lepených spojů lepených 2-komponentním metakrylátovým lepidlem CYBERBOND A806.

Tab. 21 Maximální zatěžující síla materiálu, modifikovaného plazmou o různém výkonu, lepeného 2-komponentním metakrylátovým lepidlem CYBERBOND A806.

2-komponentní metakrylátové lepidlo CYBERBOND A806					
Materiál		Materiál modifikovaný plazmou [W]			
		0	300	350	400
HDPE	průměr [N]	59,1	907,9	856,5	858,2
	SMCH [N]	0,9	12,4	14,0	12,9
LDPE	průměr [N]	59,1	346,5	380,5	349,8
	SMCH [N]	1,0	3,6	4,0	5,2
PP	průměr [N]	130,1	335,3	399,2	383,9
	SMCH [N]	2,4	7,4	9,5	4,1
PC	průměr [N]	545,4	1106,5	1073,5	1295,9
	SMCH [N]	13,9	28,2	25,4	37,8

## Materiál HDPE

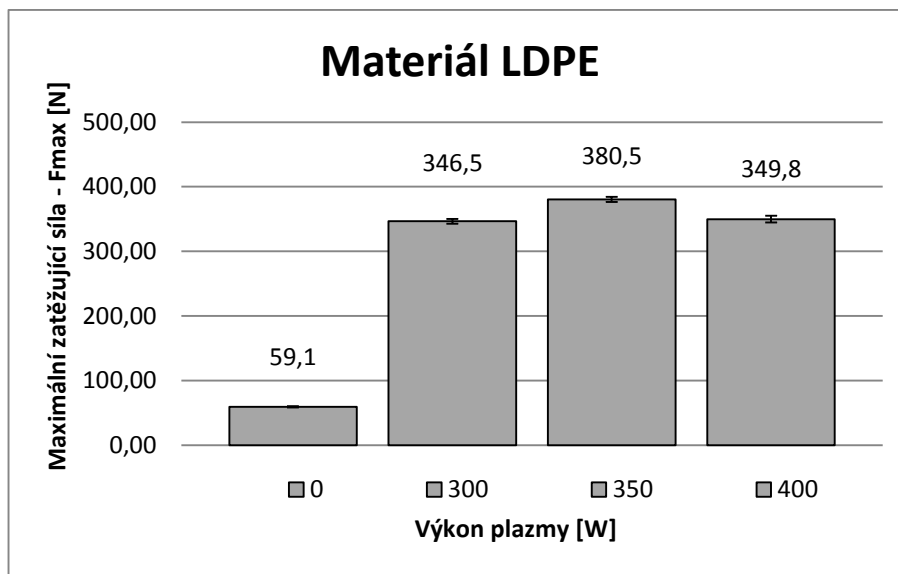
Z naměřených výsledků (Obr. 42) vyplývá, že s modifikací materiálu plazmou dochází k rapidnímu zlepšení pevnosti lepeného spoje. Nejvyšších hodnot dosahoval HDPE oplazmován výkonem 300 W, se stoupajícím výkonem únosnost spoje lehce klesala. U výkonu 300 W došlo k nárůstu o 1437 %, vůči nemodifikovanému materiálu. Pokles pevnosti lepeného spoje u výkonů 350W a 400 W je vůči modifikaci plazmou o výkonu 300W nepatrný cca o 5 %.



Obr. 42 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u HDPE, lepeného lepidlem Cyberbond A806.

## Materiál LDPE

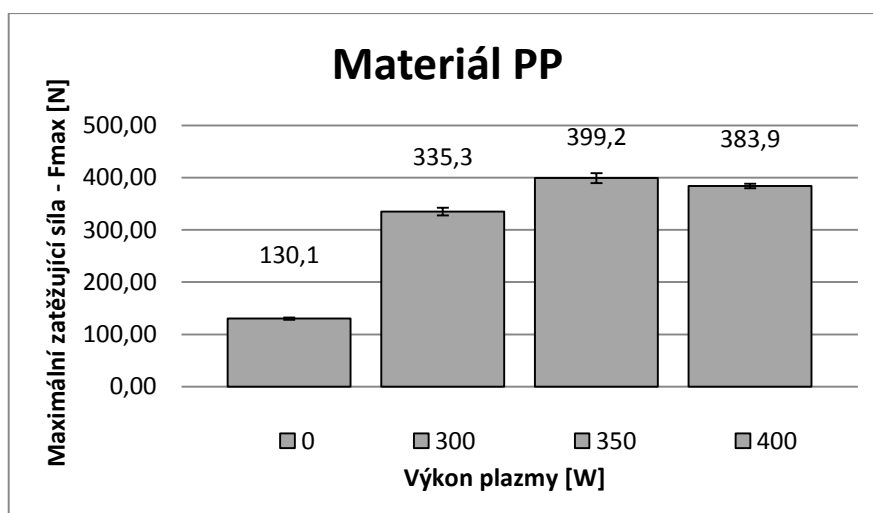
Při porovnání pevnosti lepeného spoje modifikovaného materiálu a nemodifikovaného materiálu je zřejmé, že pevnost spoje se zlepšuje spolu s výkonem plazmy. Výrazného nárůstu pevnosti bylo dosaženo již při výkonu 300W, kdy pevnost vzrostla o 486 %. Nejvýhodnějším výkonem plazmy se jeví 350 W, u kterého pevnost lepeného spoje vzrostla o 544 % vůči neošetřenému materiálu. Oplazmování výkonem 400 W nemá tak pozitivním vliv na výslednou únosnost lepeného spoje jako u výkonu 350 W, naopak dochází k mírnému poklesu (přibližně o 8 % v porovnání s výkonem 350 W).



Obr. 43 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u LDPE, lepeného lepidlem Cyberbond A806.

### Materiál PP

Tak jako u materiálu LDPE, stejně tak i u PP se dosáhlo nejlepších výsledků u plazmy o výkonu 350 W, u které vzrostla výsledná pevnost lepeného spoje o 207 % vůči nemodifikovanému materiálu. Druhých nejlepších hodnot dosahovala plazma o výkonu 400 W (nárůst o 195 % vůči neupravenému PP) a nejnižších hodnot vykazovala modifikace plazmou o výkonu 300 W (nárůst o 158 % vůči neupravenému PP). Nicméně můžeme říct, že modifikace PP plazmou zvyšuje výslednou únosnost lepeného spoje.

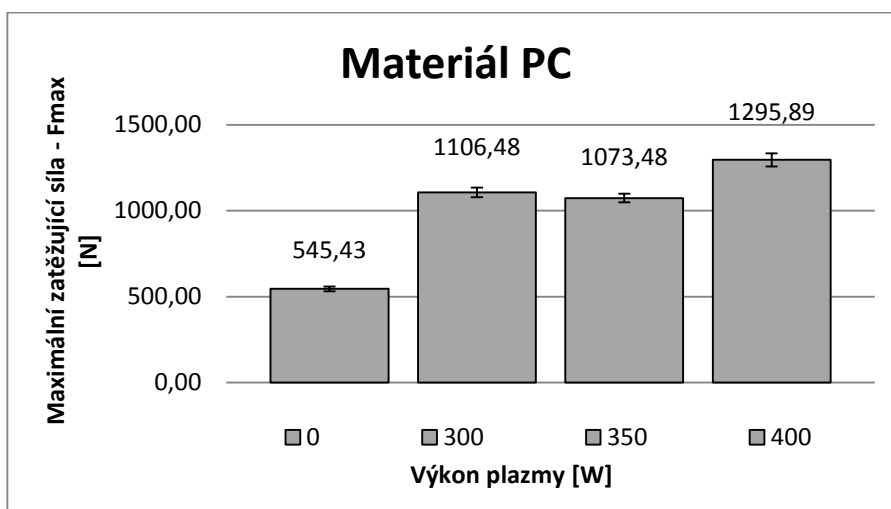


Obr. 44 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PP, lepeného lepidlem Cyberbond A806.

## Materiál PC

Z naměřených výsledků u materiálu PC lze konstatovat, že pevnost lepeného spoje je závislá na výkonu plazmy (Obr. 45). Již při výkonu 300 W dochází k nárůstu o 103 %, avšak nejvyšší pevnosti bylo dosaženo u výkonu 400 W, u kterého byl nárůst zaznamenán o 138 % ve srovnání s nemodifikovaným materiálem.

U výkonu plazmy 350 W nebylo dosaženo již tak pozitivních výsledků pevnosti spoje, došlo zde k poklesu o 17 % v porovnání s výkonem 400W.



Obr. 45 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PC, lepeného lepidlem Cyberbond A806.

### 7.3.4 Pevnost lepeného spoje při použití 2-komponentního metakrylátového lepidla ZYROBOND 2K-MMA 7306

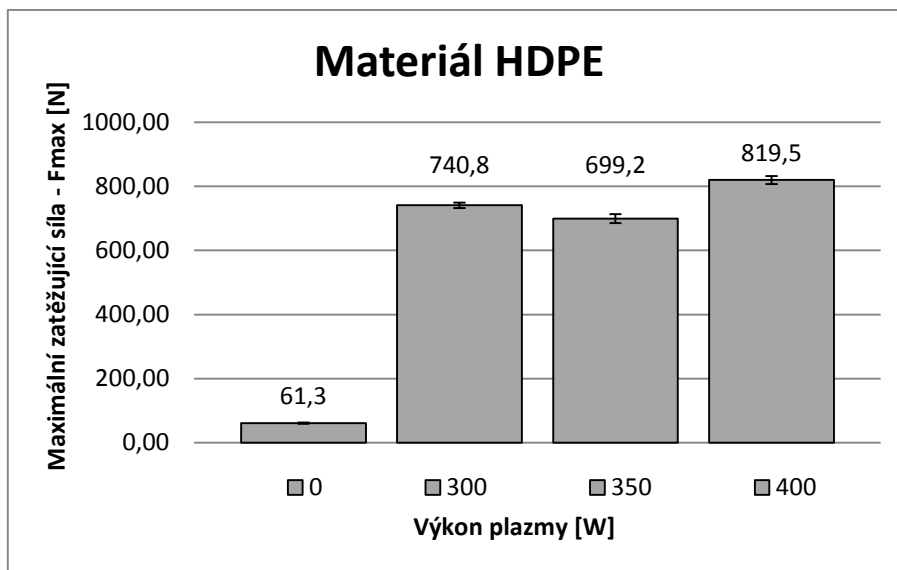
Z naměřených výsledků vyplývá, že modifikace materiálu plazmou přispívá ke zlepšení únosnosti lepeného spoje lepidlem ZYROBOND 2K-MMA 7306.

Tab. 22 Maximální zatěžující síla materiálu, modifikovaného plazmou o různém výkonu, lepeného 2-komponentním metakrylátovým lepidlem ZYROBOND 2K-MMA 7306.

<b>2-komponentní metakrylátové lepidlo ZYROBOND 2K-MMA 7306</b>					
<b>Materiál</b>		<i>Materiál modifikovaný plazmou [W]</i>			
		<b>0</b>	<b>300</b>	<b>350</b>	<b>400</b>
<b>HDPE</b>	průměr [N]	61,3	740,8	699,2	819,5
	SMCH [N]	2,9	10,4	11,0	14,6
<b>LDPE</b>	průměr [N]	38,5	374,5	359,1	353,1
	SMCH [N]	1,6	2,5	5,1	4,9
<b>PP</b>	průměr [N]	79,3	298,9	247,1	253,3
	SMCH [N]	0,9	4,9	6,0	6,9
<b>PC</b>	průměr [N]	374,6	873,6	789,5	801,6
	SMCH [N]	12,5	15,8	18,6	11,5

### **Materiál HDPE**

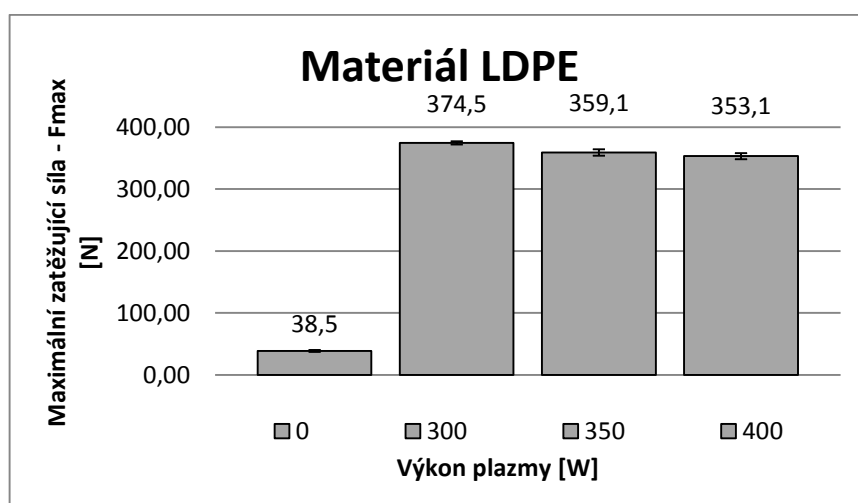
Jak můžeme vidět na obrázku (Obr. 46) má modifikace plazmou výrazný vliv na zlepšení výsledné pevnosti lepeného spoje u materiálu HDPE. Nejvyšší hodnot bylo zjištěno u plazmy o výkonu 400 W, kde hodnota  $F_{\max}$  vzrostla z 61,30 N na 819,45 N, což je nárůst o 1237 %. Výkony 300W a 350W nemají tak pozitivní vliv jako výkon 400W. Nejnižší hodnota byla zjištěna u výkonu 350W, kde výsledná únosnost lepeného spoje klesla o 15 % oproti materiálu modifikovanému výkonem 400W.



Obr. 46 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u HDPE, lepeného lepidlem ZYROBOND 2K-MMA 7306.

### Materiál LDPE

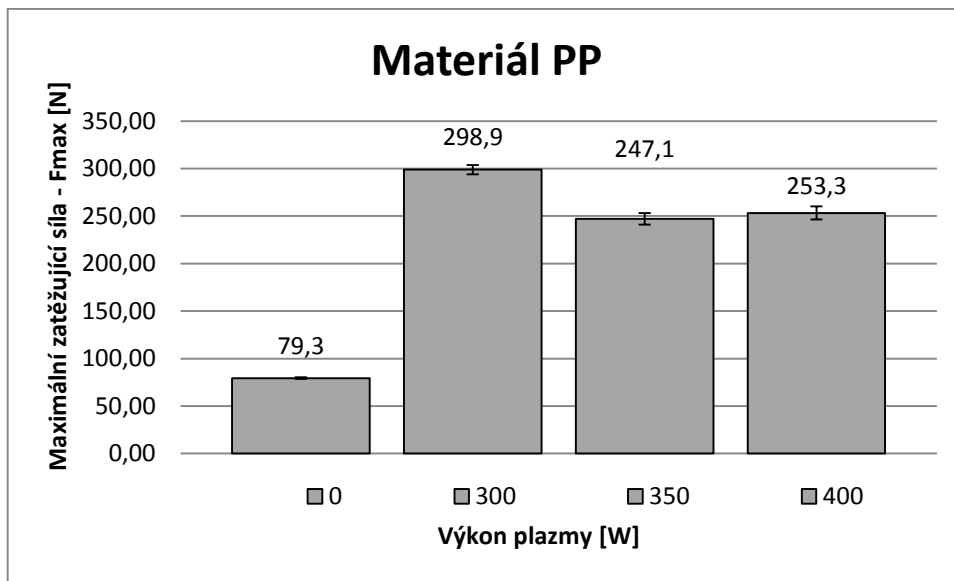
Stejně jako u HDPE, tak i u LDPE dochází modifikací k výraznému zlepšení pevnosti spoje. Nejvyšší pevnost byla zaznamenána u výkonu 300 W (zvýšení o 873 % oproti nemodifikovanému LDPE). Avšak se zvyšující se výkonem plazmy únosnost spoje lehce klesá (oproti modifikaci plazmou o výkonu 300 W). U výkonu 400 W došlo k poklesu o 6 % oproti výkonu plazmy 300 W.



Obr. 47 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u LDPE, lepeného lepidlem ZYROBOND 2K-MMA 7306.

## Materiál PP

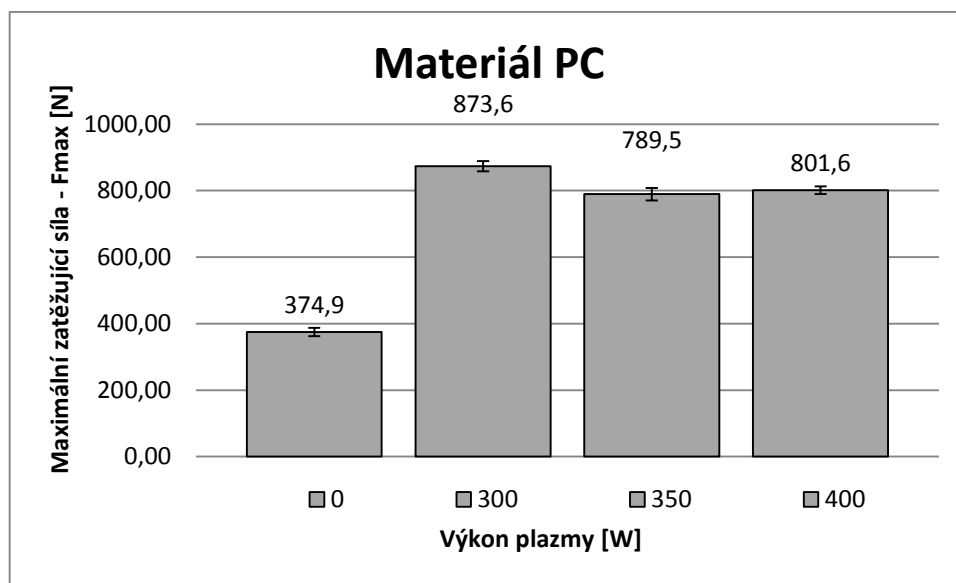
Z výsledků měření u materiálu PP lze zjistit, že pevnost lepeného spoje je závislá na modifikaci materiálu plazmou. Již při výkonu 300 W došlo k výraznému a zároveň největšímu nárůstu o 277 %, což se jeví jako nejvýhodnější výkon plazmy. Modifikace plazmou o výkonu 300 W poskytuje nejvyšší pevnost lepeného spoje. U výkonu 350 W a 400 W došlo oproti výkonu 300 W k poklesu přibližně o 15 %.



Obr. 48 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PP, lepeného lepidlem ZYROBOND 2K-MMA 7306.

## Materiál PC

Stejně jako u přechozích materiálů (s výjimkou HDPE) dosahoval nejlepších výsledků výkon plazmy o 300 W, u kterého došlo ke zvýšení o 133 % oproti nemodifikovanému materiálu. A stejně jako u předchozích vzorků (s výjimkou HDPE) dochází se zvyšující se výkonem ke snížení únosnosti lepeného spoje (pokles o 8 % oproti výkonu 300W).



Obr. 49 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PC, lepeného lepidlem ZYROBOND 2K-MMA 7306.

### 7.3.5 Pevnost lepeného spoje při použití 2-komponentního epoxidového lepidla SUREFIX EPOXY

Stejně tak jako u všech předchozích lepidel, tak i u spojů lepených lepidlem SUREFIX EPOXY, dochází ke zvýšení pevnosti lepených spojů.

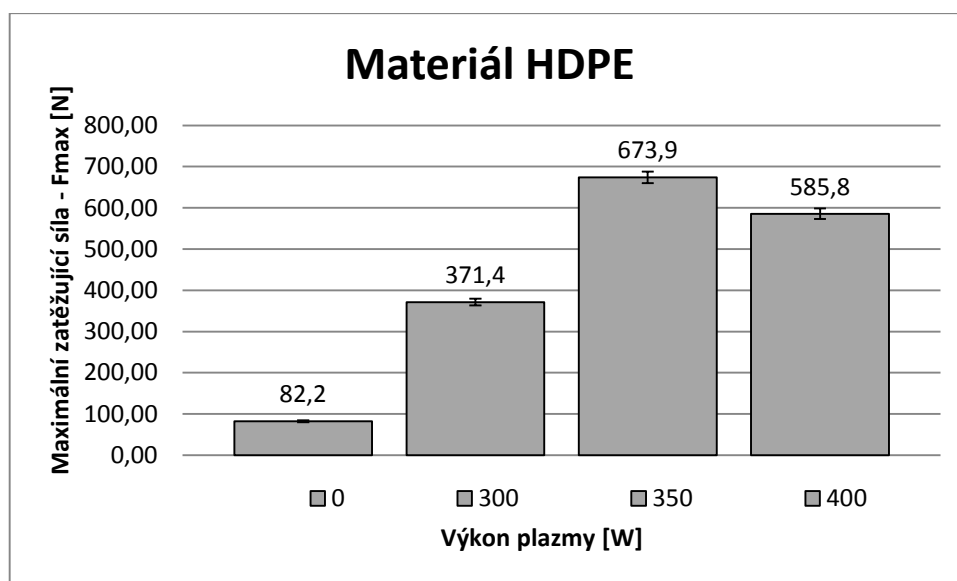
Tab. 23 Maximální zatěžující síla materiálu, modifikovaného plazmou o různém výkonu, lepeného 2-komponentním epoxidovým lepidlem SUREFIX EPOXY.

2-komponentní epoxidové lepidlo SUREFIX EPOXY					
Materiál		Materiál modifikovaný plazmou [W]			
		0	300	350	400
HDPE	průměr [N]	82,2	371,4	673,9	585,8
	SMCH [N]	2,1	8,3	13,9	12,6
LDPE	průměr [N]	58,8	300,1	300,8	292,9
	SMCH [N]	2,1	5,2	1,9	2,1
PP	průměr [N]	78,3	568,8	558,9	436,1
	SMCH [N]	2,2	12,2	10,8	9,0
PC	průměr [N]	342,6	729,3	701,5	609,9
	SMCH [N]	11,6	25,5	14,4	13,2



## Materiál HDPE

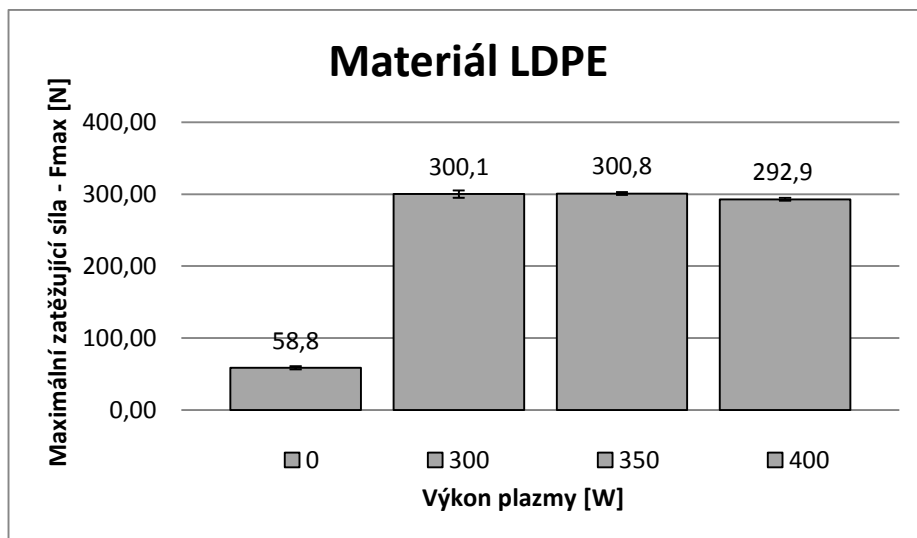
Porovnáme-li pevnosti lepených spojů u modifikovaného a nemodifikovaného HDPE je zřejmé, že únosnost lepeného spoje roste se zvyšujícím se výkonem plazmy. Nejvýraznějšího nárůstu bylo dosaženo u výkonu 350 W, kdy pevnost vzrostla přibližně o 720 %, což se jeví jako nejvhodnější dávka, charakterizována maximální zatěžovací silou, vůči neošetřenému HDPE. S výjimkou nemodifikovaného HDPE bylo dosaženo nejnižší pevnosti u výkonu 300 W, kdy oproti výkonu 350 W došlo k poklesu o 45 %.



*Obr. 50 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u HDPE, lepeného lepidlem SUREFIX EPOXY.*

## Materiál LDPE

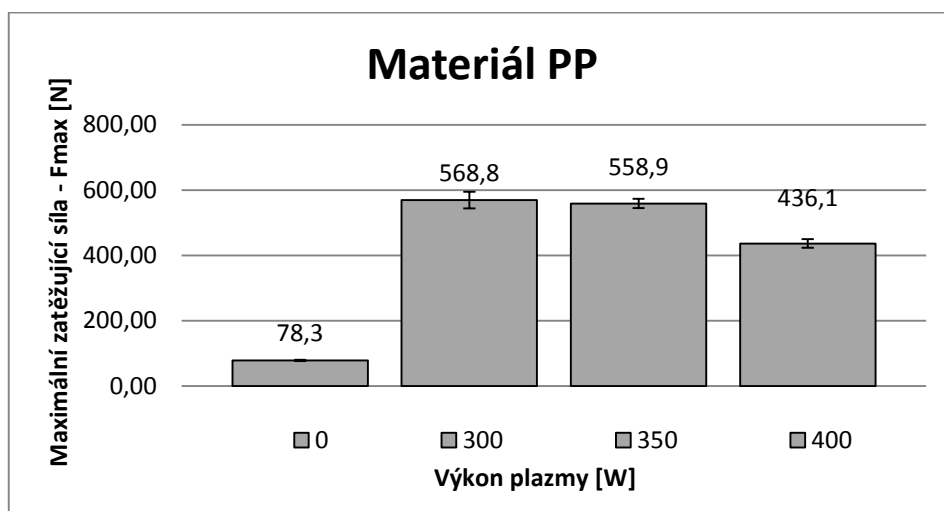
U materiálu LDPE došlo modifikací plazmou k výraznému zlepšení výsledné pevnosti lepeného spoje. Naměřené výsledky výkonů 300 W, 350 W a 400 W jsou téměř totožné. Oproti nemodifikovanému LDPE vzrostla pevnost lepeného spoje u všech výkonů plazmy o 412 %.



Obr. 51 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u LDPE, lepeného lepidlem SUREFIX EPOXY.

### Materiál PP

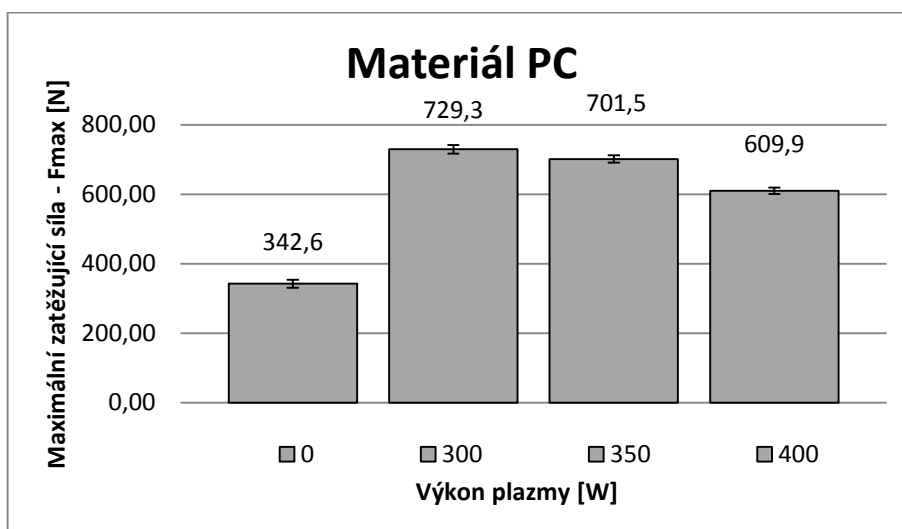
Z následujícího obrázku (Obr. 52) vyplývá, že pevnost lepeného spoje u materiálu PP závisí na výkonu plazmy. Nejvyšší zjištěná pevnost byla u výkonu 300 W. V tomto případě vzrostla maximální zatěžující síla ze 78,3 N na 568,5 N, což je nárůst o 626 %. Výsledky výkonu plazmy o výkonu 350 W jsou téměř totožné s výkonem 300 W. Pouze u výkonu 400 W došlo k výraznějšímu snížení pevnosti spoje oproti oplazmování výkonem 300 W (pokles o 23 %).



Obr. 52 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PP, lepeného lepidlem SUREFIX EPOXY.

## Materiál PC

Stejně jako u PP, tak i u PC vykazuje plazma o výkonu 300 W nejlepší výsledky únosnosti. Oproti nemodifikovanému PC vzrostla pevnost u výkonu 300W o 113 %. Výsledky výkonů 300 W a 350 W jsou téměř srovnatelné (pouze s minimálním rozdílem), avšak u výkonu plazmy 400 W došlo k poklesu pevnosti lepeného spoje (pokles o 16 % oproti výkonu 300 W).



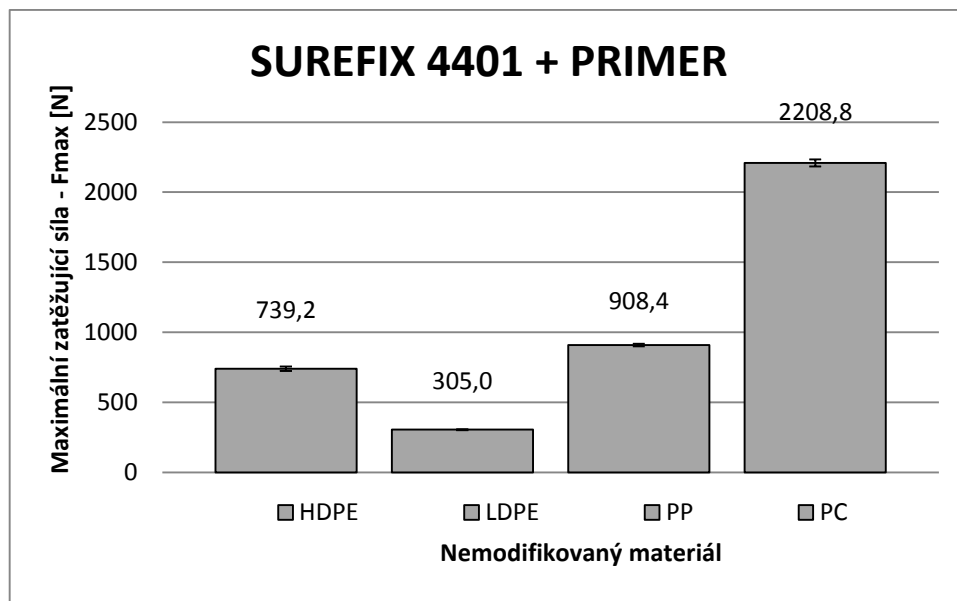
Obr. 53 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PC, lepeného lepidlem SUREFIX EPOXY.

### 7.3.6 Pevnost lepeného spoje při použití lepidla SUREFIX 4401 a Primeru LOCTITE 7239

Z výše uvedených výsledků (Tab. 24 a Obr. 54) vyplývá, že nejkvalitnější spoj vznikne při lepení materiálu PC, kde maximální zatěžující síla dosahuje hodnot 2208,8 N. Na rozdíl od materiálu LDPE, kde bylo dosaženo nejmenší pevnosti lepeného spoje.

Tab. 24 Maximální zatěžující síla nemodifikovaných materiálů, lepených lepidlem SUREFIX 4401 + PRIMER LOCTITE 7239.

SUREFIX 4401 + PRIMER				
Nemodifikovaný materiál	Maximální zatěžující síla - Fmax [N]			
	HDPE	LDPE	PP	PC
Průměr	739,2	305,0	908,4	2208,8
SMCH	15,9	3,2	8,8	25,9



*Obr. 54 Pevnost lepeného spoje u nemodifikovaného materiálu, lepeného lepidlem SUREFIX 4401 + Primerem Loctite 7239.*

## 8 DISKUZE VÝSLEDKŮ

### 8.1 Vliv modifikace plazmou na povrchové vlastnosti

V níže uvedené tabulce (Tab. 25), popisujeme vliv modifikace plazmou na změnu kontaktních úhlů smáčení.

Dospěli jsme k závěru, že modifikace lepených povrchů plazmou snižuje u všech zkoumaných materiálů hodnoty kontaktních úhlů smáčení. Pokles hodnot přináší výrazné zlepšení smáčivosti. U všech materiálů se jako nejvhodnější výkony plasmy jeví 350 W a 400 W (pokles vůči nemodifikovanému materiálu byl v rozmezí od 44 % do 87 %).

Tab. 25 Změna kontaktních úhlů smáčení v závislosti na výkonu plasmy.

Materiál	Použitá kapalina	Výkon plasmy (W)			
		0	300	350	400
HDPE	destilovaná voda (°) (změna kontaktního úhlu)	91,3 (0 %)	30,7 (- 66 %)	30,2 (- 67 %)	26,0 (- 72 %)
	glycerin (°) (změna kontaktního úhlu)	78,9 (0 %)	41,2 (- 48 %)	38,2 (- 52 %)	34,4 (- 56 %)
	etylenglykol (°) (změna kontaktního úhlu)	66,8 (0 %)	14,5 (- 78 %)	9,4 (- 86 %)	8,5 (- 87 %)
LDPE	destilovaná voda (°) (změna kontaktního úhlu)	90,6 (0 %)	33,5 (- 63 %)	28,3 (- 69 %)	28,1 (- 69 %)
	glycerin (°) (změna kontaktního úhlu)	83,4 (0 %)	41,7 (- 50 %)	42,6 (- 49 %)	37,9 (- 55 %)
	etylenglykol (°) (změna kontaktního úhlu)	69,5 (0 %)	14,6 (- 79 %)	11,3 (- 84 %)	13,3 (- 81 %)
PP	destilovaná voda (°) (změna kontaktního úhlu)	86,6 (0 %)	37,4 (- 57 %)	37,3 (- 57 %)	36,5 (- 58 %)
	glycerin (°) (změna kontaktního úhlu)	76,5 (0 %)	46,0 (- 40 %)	42,9 (- 44 %)	47,9 (- 37 %)
	etylenglykol (°) (změna kontaktního úhlu)	65,8 (0 %)	21,3 (- 68 %)	18,4 (- 72 %)	24,5 (- 63 %)
PC	destilovaná voda (°) (změna kontaktního úhlu)	85,2 (0 %)	35,5 (- 58 %)	25,5 (- 70 %)	19,6 (- 77 %)
	glycerin (°) (změna kontaktního úhlu)	70,8 (0 %)	39,1 (- 45 %)	28,0 (- 60 %)	26,1 (- 63 %)
	etylenglykol (°) (změna kontaktního úhlu)	57,5 (0 %)	16,6 (- 71 %)	13,3 (- 77 %)	8,0 (- 86 %)

Porovnáme-li naměřené výsledky u volné povrchové energie, můžeme konstatovat, že modifikace materiálu (HDPE, LDPE, PP a PC) plazmou vede k výraznému zlepšení lepitelnosti. Pro materiály HDPE, PP a PC se jeví jako nejvhodnější výkon plazmy 400 W

Tab. 26 Změna volné povrchové energie v závislosti na výkonu plazmy.

Materiál	Použitá kapalina	Výkon plazmy (W)			
		0	300	350	400
HDPE	volná povrchová energie (mJ/m <sup>2</sup> ) (změna volné povrchové energie)	25,8 (0 %)	69,6 (+ 170 %)	67,6 (+ 162 %)	72,4 (+ 181 %)
LDPE	volná povrchová energie (mJ/m <sup>2</sup> ) (změna volné povrchové energie)	21,5 (0 %)	66,1 (+ 207 %)	72,4 (+ 237 %)	71,6 (+ 233 %)
PP	volná povrchová energie (mJ/m <sup>2</sup> ) (změna volné povrchové energie)	24,7 (0 %)	63,4 (+ 157 %)	62,1 (+ 151 %)	66,0 (+ 167 %)
PC	volná povrchová energie (mJ/m <sup>2</sup> ) (změna volné povrchové energie)	31,6 (0 %)	63,5 (+ 101 %)	72,2 (+ 128 %)	76,7 (+ 143 %)

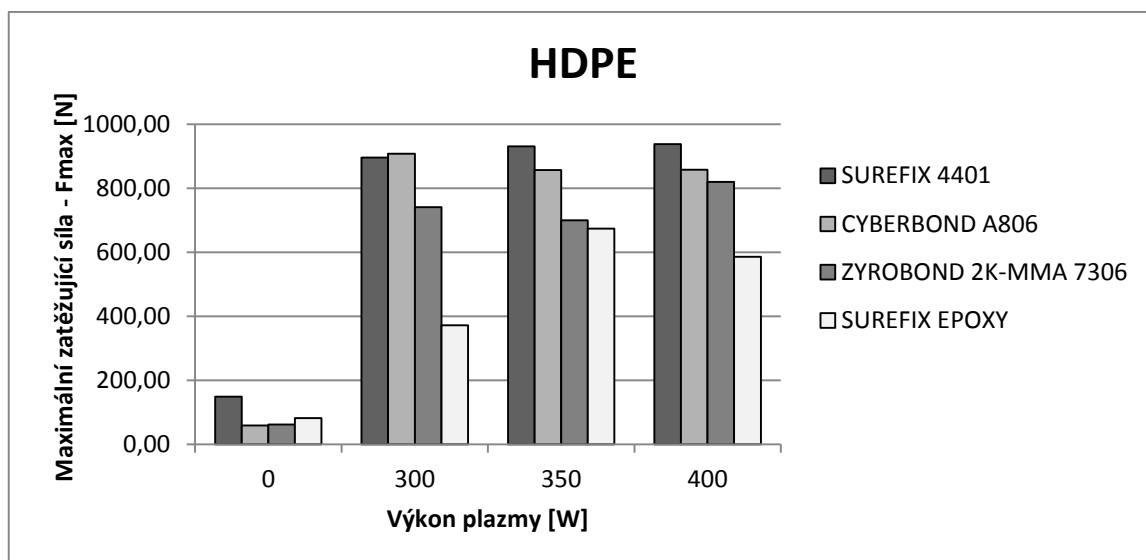
## 8.2 Vliv modifikace plazmou na únosnost lepeného spoje

### 8.2.1 Materiál HDPE

Z výjimkou HDPE modifikovaného plazmou o výkonu 300 W, vykazovalo nejlepších výsledků pevnosti lepeného spoje lepidlo SUREFIX 4401. Již u zmíněného výkonu plazmy 300 W bylo dosaženo nejlepší únosnosti spoje lepidlem CYBERBOND A806. Naopak nejniž kvalitního spoje bylo dosaženo lepidlem SUREFIX EPOXY a to téměř u všech výkonů plazmy (s výjimkou nemodifikovaného HDPE).

Tab. 27 Maximální pevnost lepeného spoje u materiálu HDPE u jednotlivých lepidel.

HDPE					
Výkon plazmy [W]		Lepidlo			
		SUREFIX 4401	CYBERBOND A806	ZYROBOND 2K-MMA 7306	SUREFIX EPOXY
0	průměr [N]	148,9	59,1	61,3	82,2
300	průměr [N]	896,1	907,9	740,8	371,4
350	průměr [N]	930,4	856,5	699,2	673,9
400	průměr [N]	938,1	858,2	819,5	585,8



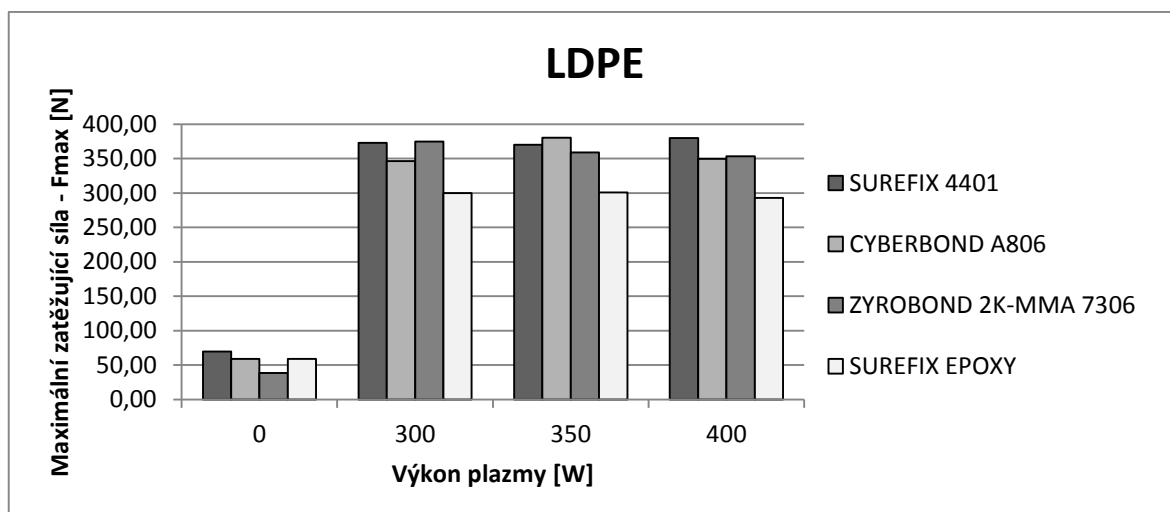
Obr. 55 Porovnání pevnosti lepeného spoje u HDPE vůči použitému lepidlu.

### 8.2.2 Materiál LDPE

U materiálu LDPE nelze jasně říct, které z použitých lepidel je nejvýhodnější. Pevnost lepeného spoje se měnila spolu s výkonem plazmy. S určitostí lze vyhodnotit, že nejnižší pevnosti lepeného spoje bylo dosaženo u lepidla SUREFIX EPOXY. U LDPE modifikovaného plazmou o výkonu 400 W dosáhlo nejlepší pevnosti lepidlo SUREFIX 4401, u výkonu 350 W lepidlo CYBERBOND A806 a u výkonu 300 W dosáhly srovnatelných výsledků lepidla SUREFIX 4401 a ZYROBOND 2K-MMA 7306.

Tab. 28 Maximální pevnost lepeného spoje u materiálu LDPE u jednotlivých lepidel

LDPE					
Výkon plazmy [W]		Lepidlo			
		SUREFIX 4401	CYBERBOND A806	ZYROBOND 2K-MMA 7306	SUREFIX EPOXY
0	průměr [N]	69,7	59,1	38,5	58,8
300	průměr [N]	373,0	346,5	374,5	300,1
350	průměr [N]	369,9	380,5	359,1	300,8
400	průměr [N]	379,7	349,8	353,1	292,9



Obr. 56 Porovnání pevnosti lepeného spoje u LDPE vůči použitému lepidlu.

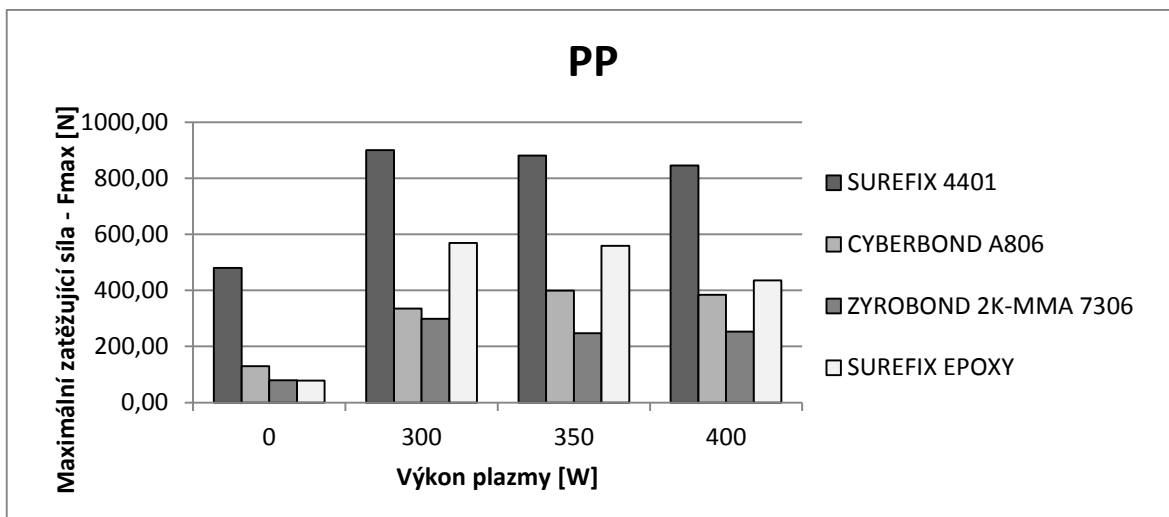
### 8.2.3 Materiál PP

Z výše uvedených výsledků (Tab. 29 a Obr. 57) jasně vyplývá, že nejvhodnějším lepidlem, pro lepení modifikovaného i nemodifikovaného materiálu PP, je lepidlo SUREFIX 4401, které dosahovalo nejlepších pevnostních výsledků u všech výkonů plazmy. Dalším vhodným lepidlem je lepidlo SUREFIX EPOXY. Nicméně nejméně vhodným lepidlem pro PP je lepidlo ZYROBOND 2K-MMA 7306.

Tab. 29 Maximální pevnost lepeného spoje u materiálu PP u jednotlivých lepidel.

<b>PP</b>					
Výkon plazmy [W]		<i>Lepidlo</i>			
		SUREFIX 4401	CYBERBOND A806	ZYROBOND 2K-MMA 7306	SUREFIX EPOXY
<b>0</b>	průměr [N]	479,9	130,1	79,3	78,3
<b>300</b>	průměr [N]	900,1	335,3	298,9	568,8
<b>350</b>	průměr [N]	880,4	399,2	247,1	558,9
<b>400</b>	průměr [N]	845,9	383,9	253,3	436,1





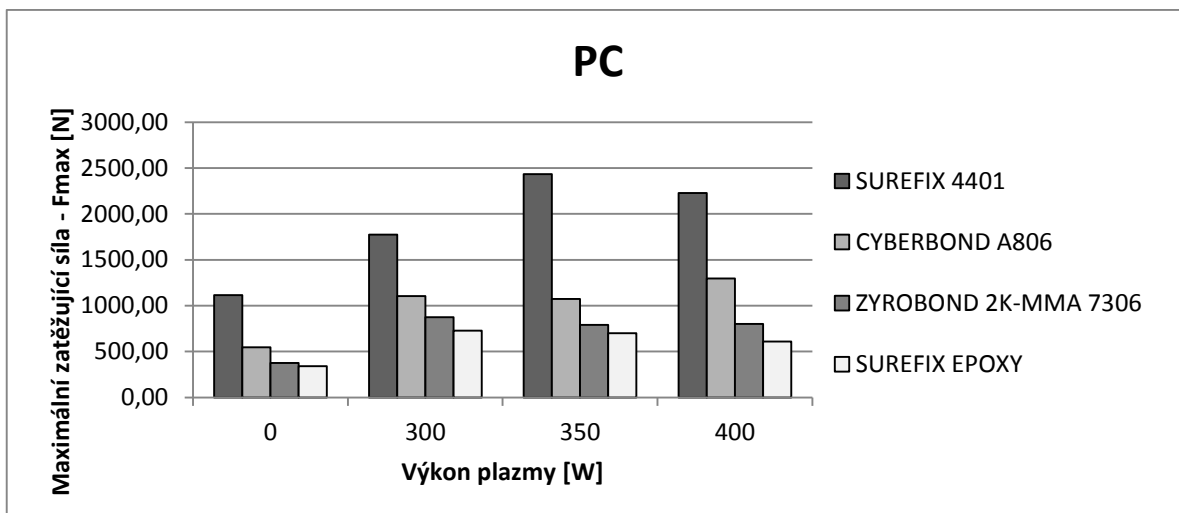
Obr. 57 Porovnání pevnosti lepeného spoje u PP vůči použitému lepidlu.

#### 8.2.4 Materiál PC

S výjimkou LDPE i u materiálu PC vykazuje lepidlo SUREFIX 4401 výrazně nejlepší výsledky u lepených spojů. Nejméně výhodným lepidlem pro lepení PC je lepidlo SUREFIX EPOXY.

Tab. 30 Maximální pevnost lepeného spoje u materiálu PC u jednotlivých lepidel.

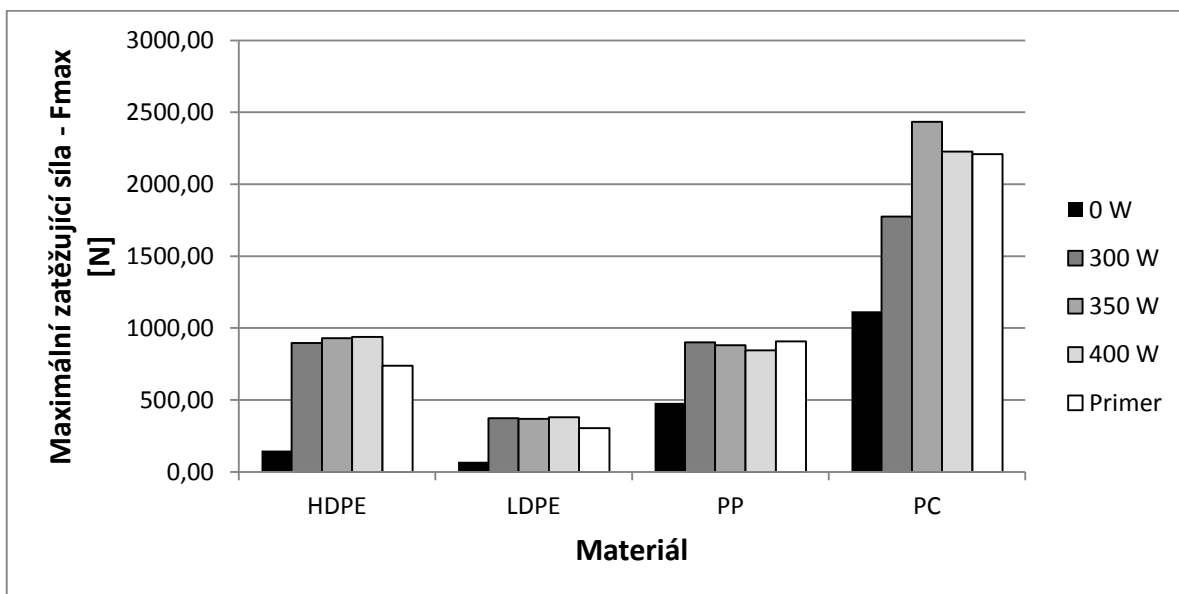
PC					
Výkon plazmy [W]		Lepidlo			
		SUREFIX 4401	CYBERBOND A806	ZYROBOND 2K-MMA 7306	SUREFIX EPOXY
<b>0</b>	průměr [N]	1116,8	545,4	374,9	342,6
<b>300</b>	průměr [N]	1776,2	1106,5	873,6	729,3
<b>350</b>	průměr [N]	2434,8	1073,5	789,5	701,5
<b>400</b>	průměr [N]	2227,0	1295,9	801,6	609,9



Obr. 58 Porovnání pevnosti lepeného spoje u PP vůči použitému lepidlu.

### 8.3 Porovnání únosnosti spojů u materiálů modifikovaných plazmou a u materiálů aktivovaných primerem

Na obrázku (Obr. 59) srovnáváme naměřené hodnoty pevnosti spojů u jednotlivých materiálech, kde ke konstrukci spoje bylo použito lepidlo SUREFIX 4401. Porovnáváme závislost výkonu plazmy a aktivaci lepené plochy primerem. Z naměřených hodnot vyplývá, použitím primeru značně stoupne i únosnost lepeného spoje.



Obr. 59 Maximální únosnost lepených spojů v závislosti na výkonu plazmy a aktivaci primerem.

## ZÁVĚR

Diplomová práce je zaměřena na zlepšení lepitelnosti a hlavně pevnosti lepeného spoje modifikací plazmou u vybraných typů polymerů. Pro vzorky byly vybrány dva typy polyetyleny (nízko-hustotní a vysoko-hustotní), polypropylen a polykarbonát. Vzhledem k tomu, že první tři výše zmíněné materiály (HDPE, LDPE a PP) patří do skupiny polyolefinů a vyznačují se špatnými adhezními vlastnostmi a nízkou povrchovou energií, jsou v podstatě bez předchozí modifikace nelepitelné.

Z naměřených hodnot můžeme vyhodnotit, že modifikace povrchu lepených polymerů plazmou o různých výkonech vede ke zlepšení smáčivosti, charakterizované snížením kontaktních úhlů smáčení. Pokles hodnot byl zaznamenán u všech kapalin a zkoumaných vzorků.

U volné povrchové energie bylo zjištěno, že k výraznému zlepšení hodnot dojde již po modifikaci plazmou o výkonu 300W. Avšak se zvyšujícím se výkonem se hodnoty zlepšovaly. U materiálu HDPE bylo dosaženo nejlepších výsledků u výkonu plazmy 400 W, kde hodnoty vzrostly (oproti nemodifikovanému materiálu) o 180 %. Jen u materiálu LDPE se jevil nejvýhodnější výkon 350 W, kde hodnoty vzrostly o 237 % vůči hodnotám nemodifikovaného materiálu. U materiálů PP a PC byly naměřeny nejlepší hodnoty pro výkon plazmy 400 W. U všech materiálů došlo ke zlepšení polární složky.

Pro zjištění pevnosti lepených spojů u jednotlivých materiálů a za použití různých druhů lepidel, byla provedena tahová zkouška. Modifikací se výrazně zlepšila únosnost lepených spojů u všech materiálů i lepidel v porovnání s lepenými spoji neošetřených materiálů. S výjimkou materiálu LDPE, bylo zaznamenáno nejvyšších nárůstů u lepených spojů kyanokrylátovým lepidlem SUREFIX 4401. U materiálu LDPE pak vykazovalo nejvyšší pevnost 2-komponentní metakrylátové lepidlo CYBYRBOND A806 u výkonu 350 W. U materiálu PP bylo nejlepší únosnosti spoje dosaženo již po oplazmování výkonem 300 W. Jednoznačně nejnižší pevnosti bylo dosaženo použitím 2-komponentního epoxidového lepidla SUREFIX EPOXY. Pro dosažení kvalitního spoje u jednotlivých lepidel a materiálů je nutno vhodně zvolit výkon plazmy.

Z naměřených výsledků tedy vyplývá, že modifikace materiálů plazmou vede k efektivnímu zlepšení adhezních vlastností, smáčivosti a zvýšení pevnosti lepených spojů u materiálů HDPE, LDPE, PP a PC.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KOVÁŘOVÁ, Petra. *Pevnost lepeného spoje vybraných druhů materiálů*. Zlín, 2013, 82 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc.Ing. David Mañas, Ph.D.
- [2] BEDNAŘÍK, Martin. *Vlastnosti lepených spojů - polymery*. Zlín, 2009, 74 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc.Ing. David Mañas, Ph.D.
- [3] BEDNAŘÍK, Martin. *Lepení polymerů*. Zlín, 2011, 120 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc.Ing. David Mañas, Ph.D.
- [4] BROCKMANN, W. *Adhesive bonding: materials, applications and technology*. Weinheim: Wiley-VCH, c2009, 414 s. ISBN 35-273-1898-4.
- [5] EBNESAJJAD, Sina. a Cyrus F. EBNESAJJAD. *Surface treatment of materials for adhesion bonding*. Norwich, NY, U.S.A.: William Andrew Pub., c2006, 260 s. ISBN 978-081-5515-234.
- [6] TRHOŇ, Vojtěch. *Vliv povrchu na pevnost lepeného spoje*. Brno, 2011, 100 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jaroslav Kubíček.
- [7] HRÁDEK, Zbyněk. *Metodika modelování lepených spojů v automobilovém průmyslu*. Brno, 2010, 96 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Ramík.
- [8] Základy teorie lepení. LEAR [online]. Brno: LEAR a.s., 2010 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: [www.lear.cz](http://www.lear.cz)
- [9] ŽÁČEK, Štěpán. *Lepení polymerů*. Zlín, 2010, 70 s. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc.Ing. David Mañas, Ph.D.
- [10] ŠVESTKOVÁ, Dana. *Vliv adhezni mezivrstvy na lomově-mechanické chování kompozitu PP + anorganické plnivo*. Brno, 2011, 58 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc.Ing. Eva Nezbedová, CSc.
- [11] BEDNAŘÍK, Martin. *Možnosti ovlivnění pevnosti lepených spojů u vybraných typů polymerů*. Zlín, 2015, 135 s. Disertační práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc.Ing. David Mañas, Ph.D.
- [12] PEKAŘ, Josef. *Vliv technologických parametrů na pevnost lepených spojů*. Brno, 2007, 83 s. Diplomová práce. Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně.
- [13] *Lepení materiálů* [online]. 2015 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory\\_soubory/hsv\\_\\_specialni\\_metody\\_svarovani\\_\\_lepeni\\_materialu\\_\\_mrna.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__lepeni_materialu__mrna.pdf)
- [14] MAJZLÍK, Radek. *Vlastnosti lepených spojů*. Zlín, 2007, 87 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Doc.Ing. David Mañas, Ph.D.
- [15] VESELÝ, Jakub. *Vliv stavu povrchu na únavovou a statickou pevnost lepeného spoje*. Plzeň, 2013, 66 s. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Petr Beneš, Ph.D.

- [16] KRÁSNÝ, Ivo. *Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů*. Zlín, 2010, 126 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D.
- [17] KUPSKÁ, Ivana. *Vliv mikrovlnného plazmatu vzduchu na smáčivost povrchů syntetických polymerů*. Zlín, 2010, 98 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Prof. Ing. Lubomír Lapčík, Ph.D.
- [18] CHMELA, Ondřej. *Pokovování polyetylentereftalátu mědí a realizace vodivých struktur*. Brno, 2013, 90 s. Diplomová práce. Vysoké učení v Brně. Vedoucí práce Ing. Jiří Starý, Ph.D.
- [19] FOLTA, Jiří. *Hodnocení pevnosti lepených spojů v konstrukci autobusů*. Pardubice, 2008, 54 s. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Vedoucí práce Ing. Pavel Švanda, Ph.D.
- [20] *DOW HDPE 25055E: Materiálový list*. 2000. Dostupné také z: [www.dowplastics.com](http://www.dowplastics.com)
- [21] *DOW LDPE 780E: Materiálový list*. 2005. Dostupné také z: [www.dowplastics.com](http://www.dowplastics.com)
- [22] *PC Makrolon 2405: Materiálový list*. 2005. Dostupné také z: [www.bayermaterialscience.com](http://www.bayermaterialscience.com)
- [23] *PP TATREN IM 55 80: Materiálový list*. 2015.
- [24] *Nízkohustotní polyetylen* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.petroleum.cz/vyroby/ldpe.aspx>
- [25] *Polykarbonát* [online]. 2016 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polykarbon%C3%A1t>
- [26] *Polypropylen* [online]. 2015 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>
- [27] *SUREFIX 4401* [online]. 2009 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.centrum-lepidel.cz/product/sekundova-lepidla/surefix/surefix-4401-stredni-56g/11>
- [28] *Cyberbond A 806: Technický list*. Libochovice, 2009. Dostupné také z: <http://cybershopcz.com/zbozi/cyberbond-a806-50gr-62>
- [29] *ZYROBOND 2K-MMA 7306: Technický list* [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: [http://adhesive.cz/partite7300\\_dvouslozkove\\_metylakrylatove\\_lepidlo\\_na\\_lepeni\\_kovu\\_oceli\\_PVC\\_Laminatu\\_dreva\\_nylonu\\_polyesteru\\_plastu.htm](http://adhesive.cz/partite7300_dvouslozkove_metylakrylatove_lepidlo_na_lepeni_kovu_oceli_PVC_Laminatu_dreva_nylonu_polyesteru_plastu.htm)
- [30] *SUREFIX Epoxy: Technický list* [online]. 2008 [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <http://www.surefix.cz/products/surefix-epoxy-5min-clear-28g/>
- [31] [KWOK, D. Y., T. GIETZELT, K. GRUNDKE, H.-J. JACOBASCH a A. W. NEUMANN. Contact Angle Measurements and Contact Angle Interpretation. 1. Contact Angle Measurements by Axisymmetric Drop Shape Analysis and a Goniometer Sessile Drop Technique. *Langmuir*. 1997, vol. 13, issue 10, s. 2880-2894. ISSN 0743-7463.]
- [32] *The PlasmaJet: Technický list*. Germany. Dostupné také z: [www.afs.biz](http://www.afs.biz)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

F	Síla potřebná k rozlepení adhezního spoje [N]
$F_{\max}$	Maximální zatěžující síla [N]
g	Gram
GPa	Gigapascal
HDPE	Polyetylen s vysokou hustotou
hod	Hodina
kg	Kilogram
kJ	Kilojoule
l/g	Rozhraní kapalina/plyn
l/l	Rozhraní kapalina/kapalina
s/g	Rozhraní pevná látka/plyn
s/l	Rozhraní pevná látka/kapalina
s/s	Rozhraní pevná látka/pevná látka
LDPE	Polyetylen s nízkou hustotou
min	Minuta
MPa	Megapascal
N	Newton
OWRK	Metoda Owens-Wendt-Reable-Kaeble
PC	Polykarbonát
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluoretylen
%	Procento
°	Stupeň
°C	Stupeň Celsiův
W	Watt

$\gamma$	Povrchová energie [mJ.m <sup>2</sup> ]
$\gamma^d$	Disperzní složka povrchové energie [mJ.m <sup>2</sup> ]
$\gamma^p$	Polární složka povrchové energie [mJ.m <sup>2</sup> ]
$\theta$	Kontaktní úhel smáčení [°]
$\mu\text{m}$	Mikrometr

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Adheze a koheze ve spoji. [10]</i> .....	14
<i>Obr. 2 Nejčastější druhy zatížení a rozložení napětí v lepeném spoji. [13]</i> .....	16
<i>Obr. 3 Namáhání spoje loupáním a návrh na konstrukční úpravu. [13]</i> .....	17
<i>Obr. 4 Příznivá a nepříznivá zatížení lepených sestav. [13]</i> .....	17
<i>Obr. 5 Typy namáhání lepených spojů. [12]</i> .....	26
<i>Obr. 6 Základní typy nerovností lepených ploch.</i> .....	27
<i>Obr. 7 Vady vyskytující se v lepené vrstvě. [14]</i> .....	28
<i>Obr. 8 Rozhraní kapalina/kapalina a rovnováha sil na molekulách kapalin. [11]</i> .....	32
<i>Obr. 9 Dokonalé smáčení. [16]</i> .....	35
<i>Obr. 10 Dobré smáčení. [16]</i> .....	35
<i>Obr. 11 Nesmáčení – špatné</i> .....	35
<i>Obr. 12 Dokonalé nesmáčení. [16]</i> .....	36
<i>Obr. 13 a) přisedlá kapka; b) přilnavající bublina. [16]</i> .....	37
<i>Obr. 14 Měření kontaktního úhlu smáčení na nakláněné destičce. [16]</i> .....	38
<i>Obr. 15 Závislost skupenství na množství dodané energie. [17]</i> .....	41
<i>Obr. 16 2-komponentní metakrylátové lepidlo – CYBERBOND A806. [28]</i> .....	49
<i>Obr. 17 Zkušební vzorek a pásek pro přeplátování. [3]</i> .....	50
<i>Obr. 18 Příprava zkušebních vzorků. [3]</i> .....	50
<i>Obr. 19 Lepený spoj. [11]</i> .....	51
<i>Obr. 20 See System od firmy Advex Instruments. [www.advex-instruments.cz]</i> .....	53
<i>Obr. 21 Kontaktní úhel smáčení u HDPE v závislosti na výkonu plasmu.</i> .....	55
<i>Obr. 22 Kapka destilované vody na povrchu HDPE.</i> .....	55
<i>Obr. 23 Kontaktní úhel smáčení u LDPE v závislosti na výkonu plasmu.</i> .....	56
<i>Obr. 24 Kapka destilované vody na povrchu LDPE.</i> .....	57
<i>Obr. 25 Kontaktní úhel smáčení u PC v závislosti na výkonu plasmu.</i> .....	58
<i>Obr. 26 Kapka destilované vody na povrchu PC.</i> .....	58
<i>Obr. 27 Kontaktní úhel smáčení u PC v závislosti na výkonu plasmu.</i> .....	59
<i>Obr. 28 Kapka destilované vody na povrchu PP.</i> .....	60
<i>Obr. 29 Trendová křivka volné povrchové energie u HDPE.</i> .....	61
<i>Obr. 30 Trendové křivky disperzní a polární složky materiálu HDPE.</i> .....	62
<i>Obr. 31 Trendová křivka volné povrchové energie u LDPE.</i> .....	63



<i>Obr. 32 Trendové křivky disperzní a polární složky materiálu LDPE.</i>	63
<i>Obr. 33 Trendová křivka volné povrchové energie u PC.</i>	64
<i>Obr. 34 Trendové křivky disperzní a polární složky materiálu PC.</i>	65
<i>Obr. 35 Trendová křivka volné povrchové energie u PP.</i>	66
<i>Obr. 36 Trendové křivky disperzní a polární složky materiálu PC.</i>	66
<i>Obr. 37 Porovnání <math>F_{max}</math> základního materiálu.</i>	68
<i>Obr. 38 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u HDPE, lepeného lepidlem Cyberbond 2008.</i>	69
<i>Obr. 39 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u LDPE, lepeného lepidlem Cyberbond 2008.</i>	70
<i>Obr. 40 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PP, lepeného lepidlem Cyberbond 2008.</i>	71
<i>Obr. 41 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PC, lepeného lepidlem Cyberbond 2008.</i>	72
<i>Obr. 42 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u HDPE, lepeného lepidlem Cyberbond A806.</i>	73
<i>Obr. 43 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u LDPE, lepeného lepidlem Cyberbond A806.</i>	74
<i>Obr. 44 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PP, lepeného lepidlem Cyberbond A806.</i>	74
<i>Obr. 45 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PC, lepeného lepidlem Cyberbond A806.</i>	75
<i>Obr. 46 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u HDPE, lepeného lepidlem ZYROBOND 2K-MMA 7306.</i>	77
<i>Obr. 47 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u LDPE, lepeného lepidlem ZYROBOND 2K-MMA 7306.</i>	77
<i>Obr. 48 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PP, lepeného lepidlem ZYROBOND 2K-MMA 7306.</i>	78
<i>Obr. 49 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PC, lepeného lepidlem ZYROBOND 2K-MMA 7306.</i>	79
<i>Obr. 50 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u HDPE, lepeného lepidlem SUREFIX EPOXY.</i>	80

<i>Obr. 51 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u LDPE, lepeného lepidlem SUREFIX EPOXY.</i>	81
<i>Obr. 52 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PP, lepeného lepidlem SUREFIX EPOXY.</i>	81
<i>Obr. 53 Vliv modifikace plazmou na pevnost lepeného spoje u PC, lepeného lepidlem SUREFIX EPOXY.</i>	82
<i>Obr. 54 Pevnost lepeného spoje u nemodifikovaného materiálu, lepeného lepidlem SUREFIX 4401 + Primerem Loctite 7239.</i>	83
<i>Obr. 55 Porovnání pevnosti lepeného spoje u HDPE vůči použitému lepidlu.</i>	86
<i>Obr. 56 Porovnání pevnosti lepeného spoje u LDPE vůči použitému lepidlu.</i>	87
<i>Obr. 57 Porovnání pevnosti lepeného spoje u PP vůči použitému lepidlu.</i>	88
<i>Obr. 58 Porovnání pevnosti lepeného spoje u PP vůči použitému lepidlu.</i>	89
<i>Obr. 59 Maximální únosnost lepených spojů v závislosti na výkonu plasmy a aktivací primerem.</i>	89

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Vady a metody jejich kontroly. [12]</i> .....	28
<i>Tab. 2 Vybrané vlastnosti DOW HDPE 25055 E. [20]</i> .....	46
<i>Tab. 3 Vybrané vlastnosti DOW LDPE 780 E. [21]</i> .....	47
<i>Tab. 4 Vybrané vlastnosti PC Makrolon 2405. [22]</i> .....	47
<i>Tab. 5 Vybrané vlastnosti PP TATREN IM 50 80. [23]</i> .....	48
<i>Tab. 6 Vybrané vlastnosti (SUREFIX 4401). [27]</i> .....	48
<i>Tab. 7 Vybrané vlastnosti (CYBERBOND A806). [28]</i> .....	49
<i>Tab. 8 Vybrané vlastnosti (ZYROBOND 2K-MMA 7306). [29]</i> .....	49
<i>Tab. 9 Popis použité plasmy. ....</i>	51
<i>Tab. 10 Hustota a povrchové napětí použitých kapalin. [31]</i> .....	54
<i>Tab. 11 Výsledky kontaktních úhlů smáčení u materiálu HDPE. ....</i>	54
<i>Tab. 12 Výsledky kontaktních úhlů smáčení u materiálu LDPE. ....</i>	56
<i>Tab. 13 Výsledky kontaktních úhlů smáčení u materiálu PC. ....</i>	57
<i>Tab. 14 Výsledky kontaktních úhlů smáčení u materiálu PP. ....</i>	59
<i>Tab. 15 Volná povrchová energie HDPE. ....</i>	61
<i>Tab. 16 Volná povrchová energie LDPE. ....</i>	62
<i>Tab. 17 Volná povrchová energie PC. ....</i>	64
<i>Tab. 18 Volná povrchová energie PP. ....</i>	65
<i>Tab. 19 Max. únosnost nemodifikovaného, nerozstříhaného a nelepeného materiálu. ....</i>	67
<i>Tab. 20 Maximální zatěžující síla materiálu, modifikovaného plazmou o různém výkonu, lepeného kyanoakrylátovým lepidlem SUREFIX 4401. ....</i>	68
<i>Tab. 21 Maximální zatěžující síla materiálu, modifikovaného plazmou o různém výkonu, lepeného 2-komponentním metakrylátovým lepidlem CYBERBOND A806. ....</i>	72
<i>Tab. 22 Maximální zatěžující síla materiálu, modifikovaného plazmou o různém výkonu, lepeného 2-komponentním metakrylátovým lepidlem ZYROBOND 2K-MMA 7306. ....</i>	76
<i>Tab. 23 Maximální zatěžující síla materiálu, modifikovaného plazmou o různém výkonu, lepeného 2-komponentním epoxidovým lepidlem SUREFIX EPOXY. ....</i>	79
<i>Tab. 24 Maximální zatěžující síla nemodifikovaných materiálů, lepených lepidlem SUREFIX 4401 + PRIMER LOCTITE 7239. ....</i>	82
<i>Tab. 25 Změna kontaktních úhlů smáčení v závislosti na výkonu plasmy. ....</i>	84

<i>Tab. 26 Změna volné povrchové energie v závislosti na výkonu plasmu. ....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 27 Maximální pevnost lepeného spoje u materiálu HDPE u jednotlivých lepidel. ....</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 28 Maximální pevnost lepeného spoje u materiálu LDPE u jednotlivých lepidel. ....</i>	<i>86</i>
<i>Tab. 29 Maximální pevnost lepeného spoje u materiálu PP u jednotlivých lepidel. ....</i>	<i>87</i>
<i>Tab. 30 Maximální pevnost lepeného spoje u materiálu PC u jednotlivých lepidel. ....</i>	<i>88</i>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

- CD
- Materiálové listy

Technical Information



**DOW™ HDPE 25055E**  
High Density Polyethylene Resin

**Overview** POLYETHYLENE HIGH DENSITY 25055E High Density Polyethylene Resin is a very narrow molecular weight distribution resin, developed to impart excellent mechanical properties, high gloss and high surface finishing to injection moulded parts, while providing easy processing.

Applications:

- Housewares
- Food containers
- Toys

Complies with:

- EU, No 10/2011
- U.S. FDA 21 CFR 177.1520
- Canadian HPFB (No Objection)

Consult the regulations for complete details.

**Additive** • Antiblock: No • Slip: No • Processing Aid: No

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	0.955 g/cm <sup>3</sup>	0.955 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
Melt Index			ISO 1133
190°C/2.16 kg	25 g/10 min	25 g/10 min	
190°C/5.0 kg	62 g/10 min	62 g/10 min	
Spiral Flow <sup>1,2</sup>	42.9 in	109 cm	Dow Method
Molding Shrinkage - Flow	0.021 in/in	2.1 %	ASTM D955
Environmental Stress-Cracking Resistance			ASTM D1693
100% Antiarox CO-630, Compression Molded	0.700 hr	0.700 hr	
Mechanical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Strength			ASTM D638
Yield, Compression Molded	3630 psi	25.0 MPa	
Break, Compression Molded	3920 psi	27.0 MPa	
Tensile Elongation			ASTM D638
Break, Compression Molded	200 %	200 %	
Flexural Modulus - 2% Secant (Compression Molded)	126000 psi	870 MPa	ASTM D790
Impact	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Tensile Impact Strength (Compression Molded)	26.2 ft-lb/in <sup>2</sup>	55.0 kJ/m <sup>2</sup>	ASTM D1822
Hardness	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Shore Hardness (Shore D, Compression Molded)	65	65	ISO 868
Thermal	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Vicat Softening Temperature	255 °F	124 °C	ISO 306/A

**Notes**

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

<sup>1</sup> Melt Temperature: 482°F (250°C)

<sup>2</sup> 2 seconds injection

## Technical Information



### DOW™ LDPE 780E Low Density Polyethylene Resin

**Overview** LDPE 780E Low Density Polyethylene Resin can be readily processed using conventional injection moulding techniques utilising melt temperatures between 140 and 250°C, a mould temperature between 10 and 50°C, and injection pressure between 50 and 150 MPa.

When properly injection moulded, 780E Low Density Polyethylene Resin exhibit:

- Excellent flow
- Good rigidity
- Good surface gloss

Note: LDPE 780E Low Density Polyethylene Resin should comply with FDA regulation 177.1520 and with most European food contact regulations when used unmodified and processed according to good manufacturing practices for contact applications. Please, contact your nearest Dow office for food contact compliance statements. The purchaser remains responsible for determining whether the use complies with all relevant regulations.

Applications:

- Housewares.
- Toys & leisures.
- Containers.
- Compounding.

Physical	Nominal Value (English)	Nominal Value (SI)	Test Method
Density	0.923 g/cm <sup>3</sup>	0.923 g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792
Melt Index (190°C/2.16 kg)	20 g/10 min	20 g/10 min	ISO 1133
Spiral Flow			Dow Method
-- <sup>1</sup>	1.93 in	4.90 cm	
-- <sup>2</sup>	3.35 in	8.50 cm	
Molding Shrinkage			ASTM D955
Flow	0.023 in/in	2.3 %	
Across Flow	0.015 in/in	1.5 %	
Environmental Stress-Cracking Resistance			ASTM D1693
Compression Molded	1.40 hr	1.40 hr	
<b>Mechanical</b>	<b>Nominal Value (English)</b>	<b>Nominal Value (SI)</b>	<b>Test Method</b>
Tensile Modulus - 2% Secant (Compression Molded)	23800 psi	164 MPa	ISO 527-2
Tensile Stress			ISO 527-2
Yield, Compression Molded	1190 psi	8.20 MPa	
Break, Compression Molded	1520 psi	10.5 MPa	
Tensile Strain (Break, Compression Molded)	50 %	50 %	ISO 527-2
<b>Films</b>	<b>Nominal Value (English)</b>	<b>Nominal Value (SI)</b>	<b>Test Method</b>
Tensile Elongation			ASTM D882
MD : Break, 7.9 mil (200 µm)	700 %	700 %	
TD : Break, 7.9 mil (200 µm)	750 %	750 %	
<b>Impact</b>	<b>Nominal Value (English)</b>	<b>Nominal Value (SI)</b>	<b>Test Method</b>
Tensile Impact Strength	136 ft-lb/in <sup>2</sup>	286 kJ/m <sup>2</sup>	ISO 8256
<b>Hardness</b>	<b>Nominal Value (English)</b>	<b>Nominal Value (SI)</b>	<b>Test Method</b>
Shore Hardness (Shore D)	49	49	ISO 868
<b>Thermal</b>	<b>Nominal Value (English)</b>	<b>Nominal Value (SI)</b>	<b>Test Method</b>
Vicat Softening Temperature	199 °F	93.0 °C	ASTM D1525

**Notes**

These are typical properties only and are not to be construed as specifications. Users should confirm results by their own tests.

<sup>1</sup> Injection Pressure: 8.70E+3 psi (600 bar)

<sup>2</sup> Injection Pressure: 1.74E+4 psi (1.20E+3 bar)





## Makrolon 2405

**General purpose grades / Low viscosity / High productivity** Global grade; MFR 20 g/10 min; General purpose; Low viscosity; Easy release; Injection molding; Available in transparent, translucent and opaque colors

**ISO Shortname** ISO 7391-PC,MR,49-18-9

Property	Test Condition	Unit	Standard	Value
<b>Rheological properties</b>				
Melt flow rate	300 °C / 1.2 kg	g/(10 min)	ASTM D 1238	20
Mold shrinkage, flow/cross to flow		in/in	ASTM D 955	0.005 - 0.007
<b>Mechanical properties (23 °C/50 % r. h.)</b>				
Tensile modulus	1 mm/min	lb/in <sup>2</sup>	ASTM D 638	350000
Tensile stress at yield	-	lb/in <sup>2</sup>	ASTM D 638	9400
Tensile elongation at yield	-	%	ASTM D 638	6.0
Tensile elongation at break	-	%	ASTM D 638	115
Tensile stress at break	-	lb/in <sup>2</sup>	ASTM D 638	8700
Izod notched impact strength	73 °F, 0.125 in	ft.lb/in	ASTM D 256	14
Flexural modulus	-	lb/in <sup>2</sup>	ASTM D 790	340000
Flexural stress at 5 % strain	-	lb/in <sup>2</sup>	ASTM D 790	12000
Rockwell hardness	-	M Scale	ASTM D 785	75
Rockwell hardness	-	R Scale	ASTM D 785	120
<b>Thermal properties</b>				
Deflection temperature under load, Unannealed	264 psi; 0.250 in	°F	ASTM D 648	259
Deflection temperature under load, Unannealed	66 psi; 0.250 in	°F	ASTM D 648	273
Vicat softening temperature	50 N, 50 °C/h	°F	ASTM D 1525	291
Coefficient of linear thermal expansion, flow/cross-flow		in/in/°F	ASTM D 696	3.34 E-05
UL94 Flame Class	Thickness tested: 1.5 mm	Class	UL 94	V-2
UL94 Flame Class	Thickness tested: 3.0 mm	Class	UL 94	HB
UL94 Flame Class	Thickness tested: 6.0 mm	Class	UL 94	HB
Oxygen index		%	ASTM D 2863	28
Thermal conductivity		Btu*in/(h*ft <sup>2</sup> *°F)	ASTM C 177	1.39
Specific heat		Btu/(lb*°F)	ASTM D 2766	0.28
Relative temperature index, mechanical with impact	Thickness tested: 1.5 mm	°C	UL 746B	115
Relative temperature index, mechanical without impact	Thickness tested: 1.5 mm	°C	UL 746B	125
Relative temperature index, electrical	Thickness tested: 1.5 mm	°C	UL 746B	125
<b>Electrical properties (23 °C/50 % r. h.)</b>				
Dissipation factor, Tinfoil electrodes	60 Hz	-	ASTM D 150	0.0008
Dissipation factor, Tinfoil electrodes	1 MHz	-	ASTM D 150	0.01
Dielectric constant, Tinfoil electrodes	60 Hz	-	ASTM D 150	3.0
Dielectric constant, Tinfoil electrodes	1 MHz	-	ASTM D 150	2.9
Volume resistivity, Tinfoil electrodes		Ohm m	ASTM D 257	1.0 E+14
Surface resistivity		Ohm	ASTM D 257	1.0 E+16
Dielectric strength	Short time under oil at 73 °F; 0.162 in	V/mil	ASTM D 149	810
<b>Other properties (23 °C)</b>				
Water absorption	73 °F; immersion to saturation	%	ASTM D 570	0.30
Water absorption	73 °F; immersion 24 h	%	ASTM D 570	0.12
Density		lb/in <sup>3</sup>	ASTM D 792	0.043
Specific volume		in <sup>3</sup> /lb	ASTM D 792	23.1
Specific gravity		-	ASTM D 792	1.2
<b>Material specific properties</b>				
Refractive index		-	ASTM D 542	1.586
Luminous transmittance (clear transparent materials)	0.125 in	%	ASTM D 1003	88
Haze for transparent materials	0.125 in	%	ASTM D 1003	< 0.8

# TECHNICAL DATA SHEET

## POLYPROPYLENE TATREN IM 55 80

### IMPACT COPOLYMER FOR INJECTION MOULDING

TIPELIN / TIPOLEN / TIPPLEN / TATREN / BRALEN  
The joint product portfolio of TVK and SLOVNAFT provides infinite opportunities

#### DESCRIPTION

**TATREN IM 55 80** is a reactor impact copolymer of good processing stability and high fluidity. This grade contains very effective and modern nucleating agent which in combination with antistatic agent provides short cycles, good dimensional stability of final articles and good mould release in the injection moulding process.

**TATREN IM 55 80** is characterised by excellent organoleptic properties (low taste and odour), high stiffness/impact balance and good flow.

#### APPLICATIONS

**TATREN IM 55 80** is intended especially for high speed thin wall injection moulding of products where good impact resistance is required. Typical end products are different household and garden articles like bowls, pails, storage boxes, trays, caps, closures, boxes for food packaging, toys etc. This grade can be used in mixtures with TATREN homopolymer grades.

**TATREN IM 55 80** is well suited for LFT technology to produce sound insulation car parts by compression moulding. This grade can be used for compounding as well.

**TATREN IM 55 80** is suitable for food contact. The product complies with Food Contact Regulations.

#### PROPERTIES

	Test method	Unit	Typical value
MFR (230 °C/2.16 kg)	ISO 1133-1	g/10 min	55
Tensile stress at yield *	ISO 527-1,2	MPa	23
Tensile strain at yield *	ISO 527-1,2	%	4
Modulus of elasticity in tension *	ISO 527-1,2	MPa	1450
Flexural modulus *	ISO 178	MPa	1450
Izod impact strength (notched, 23 °C) *	ISO 180/A	kJ/m <sup>2</sup>	7
Izod impact strength (notched, -20 °C) *	ISO 180/A	kJ/m <sup>2</sup>	4
HDT (0.45 MPa) *	ISO 75-1,2	°C	88
Rockwell hardness *	ISO 2039/2	R scale	82

Typical properties, not to be used as specification.

\* Average mechanical property values of several measurements carried out on standard injection-moulded test specimens prepared in accordance with ISO 1873-2.

#### PROCESSING

**TATREN IM 55 80** can be processed on standard injection moulding machines.  
Recommended processing temperatures are 190 - 250 °C.

1

**TECHNICAL DATA SHEET  
POLYPROPYLENE TATREN IM 55 80  
IMPACT COPOLYMER FOR INJECTION MOULDING**

**TIPELIN / TIPOLEN / TIPPLEN / TATREN / BRALEN**  
The joint product portfolio of TVK and SLOVNAFT provides infinite opportunities

### STORAGE AND HANDLING

Pellets are packed in 25 kg PE-LD bags and transported on stretch or shrink-wrapped pallets at eligible load of polymer 1375 kg. Heat treated pallets are available as well. We use adhesive between the bags in order to avoid their slipping. Pay attention to this fact during the removing of the bags from the pallets. The preferred method is to lift the bag at first without rotation. Transportation in a road silo or rail silo is also available. For more detailed information please contact SLOVNAFT and TVK sales representative.

Since polypropylene is a combustible substance, the fire safety rules applicable for combustible materials in warehouses and store rooms should be observed.

If polymer is stored in conditions of high humidity and fluctuating temperatures, then atmospheric moisture can condense inside the packing. If it happened, it is recommended the pellets to be dried before use. During the storage polypropylene should not be exposed to UV radiation and temperatures above 40°C. Producer does not take responsibility for any damages caused by adverse storage.

### REACH STATEMENT

Polymers are exempt of REACH registration. However, their raw materials which mean monomers and relevant additives have been registered.

SLOVNAFT, a.s. is committed to fully respect legislation and will only use REACH compliant raw materials.

At this point in time PP TATREN does not contain any substances specifically identified as SVHC at levels greater than 0.1%.

### SAFETY

See MSDS.

### RECYCLING

Polypropylene resins are suitable for recycling using modern recycling methods.

In-house production waste should be kept clean to facilitate direct recycling.

### DISCLAIMER

The information provided in this publication has been compiled to the best of our present knowledge. However, in view of the various applications of polypropylene resins and the equipment used, the processing conditions may differ.

The recommendations and data herein are to be construed as informational only and do not relieve users from carrying out their own tests and experiments prior to processing in order to check suitability for a specific use. It is the responsibility of those to whom we supply our products to ensure that any proprietary rights and existing laws and legislation are observed. Our products are under continuous development, therefore we reserve the right to change the information presented in this brochure at our own discretion.

The REACH statement herein does not constitute legal advice. The REACH statement is provided for informational purpose only.