

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

PROBLEMATIKA SPOJOVÁNÍ PLASTŮ

AUTOR: Martin Michalík

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

STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojího inženýrství

PRAHA 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Michalík** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **457591**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Problematika spojování plastů

Název bakalářské práce anglicky:

Jointing of plastic materials

Pokyny pro vypracování:

- 1) seznámení se s problematikou tepelného spojování plastů
- 2) Navrhnout experiment pro kvantifikované stanovení pevnosti spoje
- 3) provedení experimentu a jeho vyhodnocení
- 4) analýza dat a závěr

Seznam doporučené literatury:

Zuzana Weberová: Evaluation of adhesion in metal-plastic welded joints. Diploma Thesis, FS ČVUT Praha 2018
LOYDA, Miloslav; ŠPONER, Vlastimil; ONDRÁČEK, Ladislav. Svařování termoplastů. 2. vyd. Praha: UNO Praha, 2011
Časopisecká literatura - její vyhledání je součástí práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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

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


Datum zadání bakalářské práce: **16.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

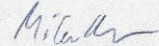

prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

25.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze literaturu a zdroje uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 zákona č.121/2000Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

podpis autora

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou spojování plastů. Teoretická část se zabývá nejvíce používanými metodami spojování plastů s důrazem na tepelné spojování. Cílem experimentální části bylo prokázat vliv doby plazmové modifikace polymerního prášku na pevnost ve spojení s neupraveným polymerním práškem.

Klíčové slova

Plazmová modifikace, práškové plasty, spojování plastů

Abstract

The scope of this bachelor thesis is joining of plastics. The theoretical part describes the most commonly used methods of plastics joining with emphasis on thermal joining. The aim of the experimental part was to investigate the effect of plasma treatment duration on the adhesion between the sheets made from treated and untreated polymer powders.

Keywords

Plasma modification, plastic powders, plastic joining

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce prof. RNDr. Petru Špatenkovi, CSc., za cenné rady, přátelský přístup a za umožnění práce na zajímavém tématu. Také bych rád poděkoval Ing. Zdeňce Jeníkové, Ph.D. za konzultace a dohled v laboratořích. Děkuji také Bc. Jakubu Antoňovi za asistenci při přípravě experimentu a Ing. Zuzaně Weberové, která umožnila vzniku tohoto projektu.

Tato práce byla vypracována v rámci výzkumného projektu TJ01000310 programu ZETA Technické Agentury ČR.

Seznam zkratek

A	průřez vzorku	[mm ²]
DSC	diferenciální skenovací kalorimetrie	
F	síla	[N]
F_m	maximální nominální síla	[N]
PE	polyethylen	
PL-PE	plazmově modifikovaný polyethylen	
PLA	polylaktid	
PP	polypropylen	
T_f	teplota tečení	[°C]
T_g	teplota zeskelnění	[°C]
T_m	teplota tání	[°C]
v	rychlost posuvu	[mm/min]
WF	ruční svařování horkým plynem	
WZ	svařování horkým plynem s rychlotryskou	
ZS-PE	polyethylen v základním stavu	
σ_m	mez pevnosti	[MPa]

Obsah

Úvod.....	10
Teoretická část	11
1 Polymery	11
1.1 Struktura polymerů	11
1.1.1 Amorfnní	11
1.1.2 Krystalická.....	11
1.2 Termoplasty	12
1.2.1 Polyethylen.....	13
1.2.2 Polypropylen	13
1.3 Reaktoplasty	14
2 Spojování plastů.....	14
2.1 Mechanické spojování	15
2.1.1 Tvarové západky	15
2.1.2 Nalisování.....	17
2.2 Lepení a adheze	17
2.2.1 Teorie mechanického zaklínění.....	17
2.2.2 Fyzikální teorie	17
2.2.3 Difúzní teorie.....	18
2.2.4 Poruchy spojení.....	18
2.3 Svařování plastů	18
2.3.1 Základní parametry svařování.....	19
2.3.2 Proces svařování.....	19
2.3.3 Svařovací metody	21
3 Sintrování.....	25

3.1	Parametry pro sintrování	25
3.2	Sintrování termoplastů	25
3.2.1	Produkce polymerních prášků.....	26
3.2.2	Zpracování polymerů	26
	Praktická část.....	28
4	Použité materiály	28
4.1	Materiály vzorků	28
4.2	Materiály pro tvorbu formy	29
5	Použité experimentální metody.....	31
5.1	DSC.....	31
5.2	Tahová zkouška.....	31
6	Příprava vzorků	32
7	Výsledky a diskuze.....	36
7.1	DSC.....	36
7.2	Výsledky tahové zkoušky.....	36
7.2.1	Vyhodnocení referenčních vzorků DOWLEX, ICORENE, Resinex	37
7.2.2	Vyhodnocení vzorků s prášky DOWLEX	38
7.2.3	Vyhodnocení vzorků Resinex-ICORENE	38
7.2.4	Vyhodnocení vzorků s filmem slinutého Ico5'	40
8	Závěr.....	41
9	Bibliografie	42
10	Seznam použitých obrázků.....	43
11	Seznam tabulek.....	45
12	Seznam příloh	46
	47

Úvod

Plasty jsou v moderním světě jedním z nepostradatelných materiálů našeho života. Během 50. a 60. let minulého století se velmi rozmohl vývoj nových plastových materiálů, které s novými technologiemi jejich zpracování postupně začaly nahrazovat tradiční materiály jako např. kovy, dřevo a sklo. S novými aplikacemi plastů se objevují materiálové, technologické a konstrukční otázky, které je potřeba překonávat a nové postupy vylepšovat. [1]

V první části této práce je vypracována literární rešerše zabývající se různými metodami spojování plastů. Princip těchto metod je popsán, je přiblížena jejich problematika a jsou zde uvedeny příklady jejich výskytu.

Motivací pro praktickou část této práce byl problém při používání vzorků navržených v diplomové práci [2] pro projekt TJ01000310 Technické Agentury ČR, který řeší výzkum adheze při spojování plazmově modifikovaných práškových plastů s kovy. Tam bylo prokázáno, že doba plazmování polymerního prášku zlepšuje adhezi ke kovu, ale také dochází ke zhoršení adheze k plazmově nemodifikovanému plasty. Některé vzorky s prášky, které byly podrobeny delší době plazmové úpravy se neporušovaly na rozhraní plast-kov, ale plast-plast (viz Obr.1). Nebylo jasné, zda je příčina v plazmové modifikaci, nebo v jiné části procesu přípravy vzorků. Cílem této práce je navrhnout metodu, která by rychle a levně umožnila zjistit, jestli je problém v materiálu nebo použité metodě a prokázat vliv plazmově modifikovaného prášku na pevnost spoje s nemodifikovaným plastem, respektive kompatibilitu dvou plastových prášků, které by mohly být použity i v průmyslové aplikaci.



Obr. 1 Vzorek, kde je adheze ke kovu vyšší než k plasty

Teoretická část

1 Polymery

Polymery jsou tvořeny makromolekulami, kde základní konstituční jednotkou je „mer“. *Poly* (více nebo mnoho) vyjadřuje výskyt více na sebe vázaných jednotek. Z pohledu chemie se jedná hlavně o látky přírodního původu nebo synteticky přeměněné organické látky. [3]

Polymery dělíme na:

- Termoplasty
- Reaktoplasty
- Elastomery
- Termoplastické elastomery

Se všemi se nejčastěji setkáme v pevném stavu, ačkoliv pro jejich zpracování často přecházejí do plastického stavu. [4]

1.1 Struktura polymerů

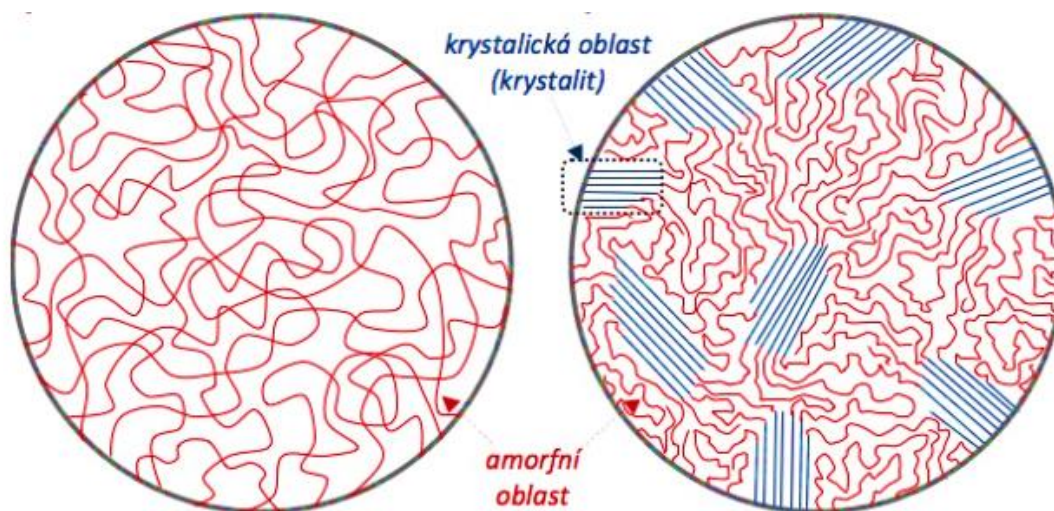
1.1.1 Amorfní

Polymery s amorfní strukturou mají neuspořádaná klubka makromolekul. Toto uspořádání si můžeme představit jako špagety na talíři nebo chomáček vaty. Amorfní části se vyznačují vyšší ohebností, rázovou houževnatostí a schopností prodloužení. Na příklad se jedná o polykarbonát (PC), polystyren (PS) a polyvinylchlorid (PVC). [3]

1.1.2 Krystalická

Krystalické polymery mají uspořádané oblasti makromolekul. Tyto oblasti vykazují díky těsnějšímu uspořádání vyšší hustotu, pevnost, tvrdost a modul pružnosti. Zároveň zde dochází ke snížení tažnosti, rázové houževnatosti a průhlednosti. Samotná krystalizace je dosažena během chlazení taveniny. Pokaždé zůstanou v součásti makromolekuly v neuspořádaném amorfním stavu, které budou krystalické oblasti obklopot. Často poté hovoříme o

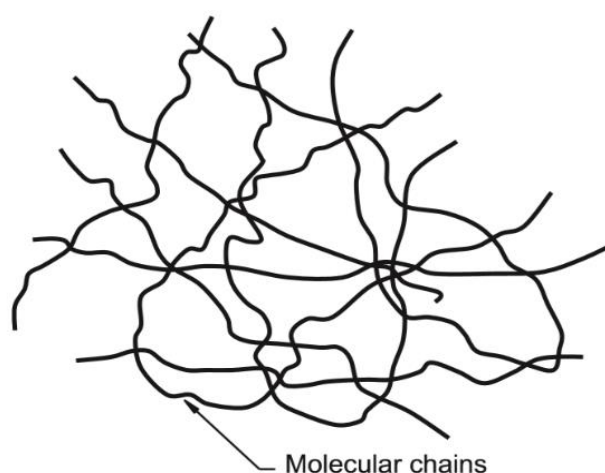
semikrystalických polymerech. Polyethylen (PE), polypropylen (PP), polyamid (PA) a polyester (PET) jsou typickými příklady semikrystalických polymerů. [1; 3]



Obr. 2 Struktura amorfního plastu vlevo, semikrystalického vpravo [3]

1.2 Termoplasty

Hlavní charakteristika termoplastů je, že mohou opakovaně měknout při zahřátí nad teplotu tání a zpět tuhnout při přechodu pod tuto teplotu bez změny vlastností. Molekuly u sebe drží pomocí chemických vazeb a mezimolekulárních sil (např. Van der Waalsova síla). Při působení tlaku a teploty na termoplast se mezimolekulární vazby přeruší, molekuly se začnou volně pohybovat a měnit mezi sebou pozice. Po vychladnutí zůstávají molekuly v nových pozicích a mezimolekulární vazby se obnoví. Tyto změny jsou pouze fyzikálního charakteru, proto je možné materiál opakovaně tepelně tvarovat, svařovat a recyklovat. [1]



Obr. 3 Uspořádání řetězců v termoplastu [1]

1.2.1 Polyethylen

Je semikrystalický termoplast, který může mít v závislosti na způsobu výroby rozdílné vlastnosti. Mezi nejzákladnější typy patří vysokohustotní polyethylen (PE-HD) a nízkohustotní polyethylen (PE-LD). [3]

Tab. 1 Vlastnosti polyethylenu [3]

Polyethylen	Zkratka	Stupeň krystalinity [%]	Hustota [g/cm ³]	Teplota tání [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
Vysokohustotní polyethylen	PE-HD	65 ÷ 90	0,940÷0,960	130÷135	700÷1400	18 ÷ 35
Nízkohustotní polyethylen	PE-LD	50 ÷ 70	0,914÷0,928	105÷115	200÷500	8 ÷ 23

Polyethylen je skvělý elektrický izolant, je nenavlhavý a nepolární plast. Využívá se v široké řadě aplikací. Od obalových materiálů jako jsou tašky a fólie, přes kanystry a potrubí na vodu a plyn, až po různé nádržky nebo kryty v automobilovém průmyslu. [3]

1.2.2 Polypropylen

Stejně jako polyethylen je polypropylen semikrystalický, nepolární termoplast Jeho vlastnosti se odvíjí od indexu izotakticity (uspořádání substituentů v makromolekule). [3]

Tab. 2 Vlastnosti polypropylenu [3]

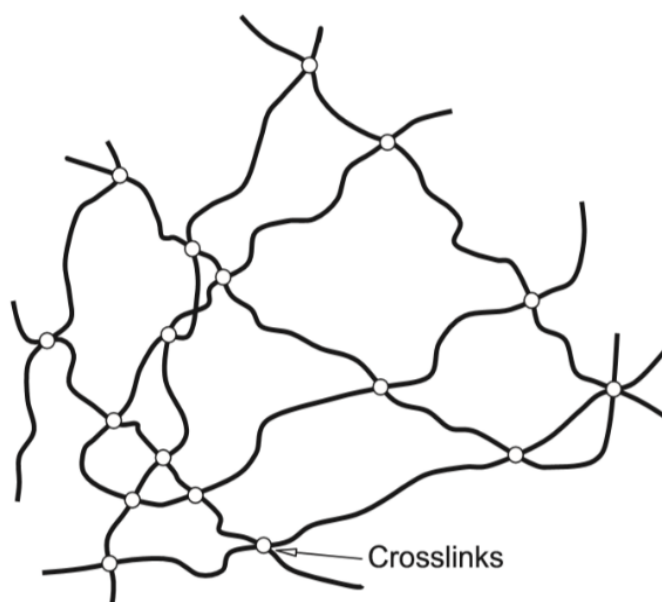
Polypropylen	Stupeň krystalinity [%]	Hustota [g/cm ³]	Teplota tání [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
Izotaktický (čistý)	60 ÷ 70	0,905÷0,920	160 ÷176	1100 ÷ 1500	34 ÷ 38

Na rozdíl od polyethylenu, kvůli nízké teplotě zesklenní (-15 °C) křehne pod bodem mrazu, má nižší hustotu, ale vyšší tvrdost, odolnost proti oděru, pevnost a díky vyšší teplotě tání je schopen si udržet tvar za zvýšené teploty. Najdeme ho v podobných aplikacích jako polyethylen. Ve strojírenství se používá na součásti

strojů a přístrojů, u automobilů například na nárazníky a reflektory, a využití najde i ve zdravotnické technice. [3]

1.3 Reaktoplasty

U reaktoplastů dochází při tepelném zpracování k zesíťování molekulárních řetězců. Tuto chemickou reakci můžeme nazvat jako *vytvrzování*. Místa zauzlování brání pohybu jednotlivých řetězců (molekuly nemohou po sobě dobře klouzat a pohybovat). Reaktoplasty nemůžeme poté dále tvarovat nebo svařovat. Zvyšováním teploty po vytvrzení dochází pouze k degradaci materiálu. Výhodou reaktoplastů je vysoká tuhost, tvrdost, chemická a tepelná odolnost. Zástupcem reaktoplastů je například epoxidová pryskyřice. [1]



Obr. 4 Schéma zesíťování v reaktoplastu [1]

2 Spojování plastů

Spojování plastů je důležitým výrobním krokem, při kterém jsou plastové součásti spojeny k sobě nebo k jiným materiálům tak, aby vytvořili součást, výrobek nebo byly použity na opravu. S nárůstem využívání plastů, polymerních kompozitů a větší komplexností součástí se požadavky na spoje zvyšují. Návrh spoje a spojovací metody záleží na použitých materiálech a požadované činnosti spoje. [5]

Při návrhu spojovací metody bychom měli zohlednit tyto faktory:

- velikost a typ zatížení přenášené spojem
- geometrie součástí a spoje
- provozní prostředí
- potřeba rozebíratelnosti pro údržbu nebo opravu
- náklady
- spolehlivost a životnost

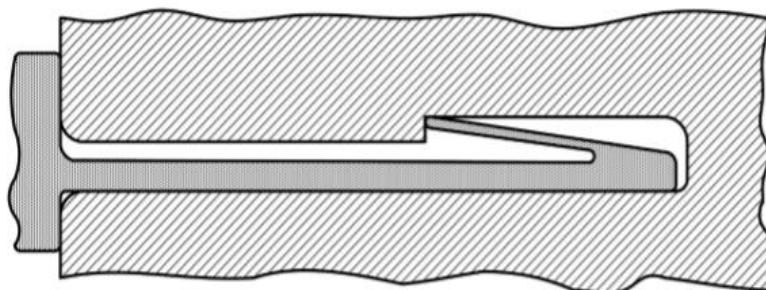
Mechanické spojování a lepení můžeme použít ke spojení podobných nebo různých materiálů, například ke spojení plastů s nepolymerními materiály jako je dřevo nebo ocel. Svařování je omezeno na použití součástek ze stejného plastu nebo odlišného, ale kompatibilního plastu. V každé z těchto kategorií je mnoho spojovacích metod, které mohou být použity v široké řadě aplikací. [5]

2.1 Mechanické spojování

Mechanické spoje mohou být trvalé nebo rozebíratelné. Používání šroubů a jiných spojovacích prostředků obvykle zařazujeme do rozebíratelných spojů. Západky svými tvarovanými prvky tvoří trvalé nebo dočasné spoje. Nalisování na základě tření a tlaku mezi součástkami řadíme do dočasných spojů. [5]

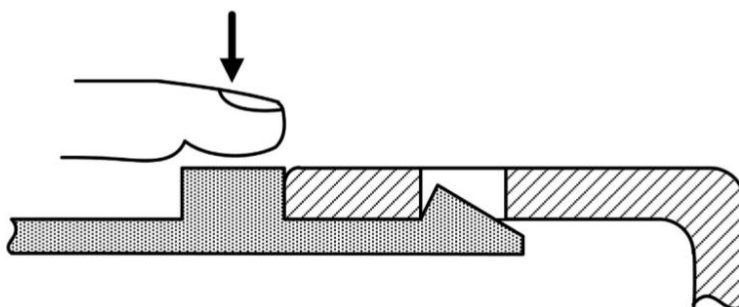
2.1.1 Tvarové západky

Tyto prvky mohou být použity pro spojování dílů z odlišných polymerů nebo zcela jiných materiálů, jako jsou kovy a dřevo. Používají se v různých průmyslových odvětvích. Pro montáž elektrického nářadí, počítačových skříní, elektronických součástek, obalů výrobků, hraček, automobilových dílů, zdravotnických prostředků a dalších produktů. [1]



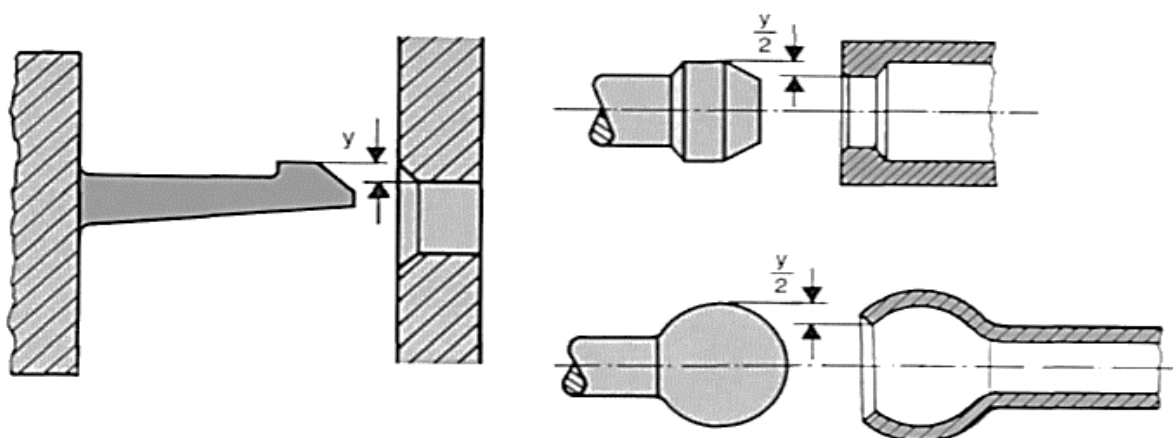
Obr. 5 Příklad jednorázové západky [5]

Existují dvě hlavní skupiny západek. První jsou trvalé západky (viz Obr. 6), které se většinou pro jednorázové spotřební výrobky, montují se při výrobním procesu a nikdy se nerozebírají. Druhou skupinou jsou západky pro opakované použití, které najdeme v aplikacích jako jsou uzávěry psacích per nebo lahví, které se mohou dokola otevírat a zavírat nebo je můžeme najít v automobilovém průmyslu, kde se díly musí demontovat za účelem servisu. [1]



Obr. 6 Příklad západky s prvkem pro jednoduché uvolnění [5]

Obě kategorie zahrnují několik designových rodin. Konzolová západka je základní spoj s nosíkem, drážkou a háčkem, který zapadá do štěrbin v odpovídající části. Prstencová západka má kulatý nebo oválný tvar. Najdeme ji v produktech jako jsou uzávěry per a lahví. Sférická západka má kopulovitý výčnělek, který zapadne do prohloubení v odpovídající části. [5; 6]



Obr. 7 Vlevo příklad konzolové západky, vpravo nahoře prstencová západka, vpravo dole sférická západka [6]

Západky mohou velmi prospět výrobnímu procesu. Snížením počtu dílů mohou ušetřit na skladovacích nákladech, snížit náklady na pracovní sílu, snížit počet potřebných dodavatelů, snížit náklady na dopravu, manipulaci a veškeré další náklady spojené s dodatečnými díly. Velmi také šetří čas při montáži. [1; 5]

2.1.2 Nalisování

Je velmi jednoduchá montážní metoda, která nepotřebuje žádné další díly nebo mechanické součástky. Spoléhá na třecí sílu při natlačení jedné části do druhé. Tuto metodu můžeme použít pro stejné nebo rozdílné materiály, ale i přesto musíme zohlednit materiálové vlastnosti při tvorbě spojení. Jedna z důležitých vlastností je, aby hřídel měla větší rozměr, než je nejvyšší tolerance natlačované díry. Pokud tohle nezajistíme, může dojít k proklouznutí a spoj nebude bezpečný. [1]

2.2 Lepení a adheze

Lepení je montážní proces, při kterém dvě součásti drží u sebe pomocí mechanického zaklínění a povrchových přitažlivých sil. Lepidlo (adhezivum) je schopné samo o sobě přilnout k druhé součásti, po nanesení vyvinout spojovací sílu a udržet spoj dlouhodobě stabilní. [1] Jedná se dnes o velmi rozšířenou technologii. Umožňuje nám spojovat díly stejných i rozdílných materiálů, aniž bychom narušovali jejich mechanické vlastnosti (např. vrtáním děr). Lepením zároveň dochází k lepšímu rozložení napětí než u mechanického spojování. Lepení nejčastěji najdeme v obuvnictví, u obalů potravin nebo v automobilovém a leteckém průmyslu. Nejvíce tu závisí na adhezi, která se dá vysvětlit jako přilnavost lepidla k lepenému dílu (adherentu). Mnoho autorů se pokoušelo jednoduše charakterizovat adhezi, ale nikdy nepokryli celou problematiku. Existují různé teorie pro popis jejího principu. [2; 7]

2.2.1 Teorie mechanického zaklínění

Tato teorie adhezi uvažuje jako výsledek mechanického zaklesnutí adheziva v pórech a dalších malých nerovnostech povrchu spojované součásti. Velmi tu záleží na drsnosti a smáčivosti povrchu, aby lepidlo zateklo i do mikroskopických dutinek a mezi výčnělky v adherentu a tím zvětšilo stykovou plochu. [2; 8]

2.2.2 Fyzikální teorie

Fyzikální adheze působí na vzdálenosti 0,3 až 0,5 nm může dosahovat pevnosti 0,7 až 7 GPa. Je uskutečněna díky Van der Waalsově vazbě mezi částicemi na

rozhraní. Stejně jako u teorie mechanického zaklínění zde závisí na smáčivosti povrchu. [8]

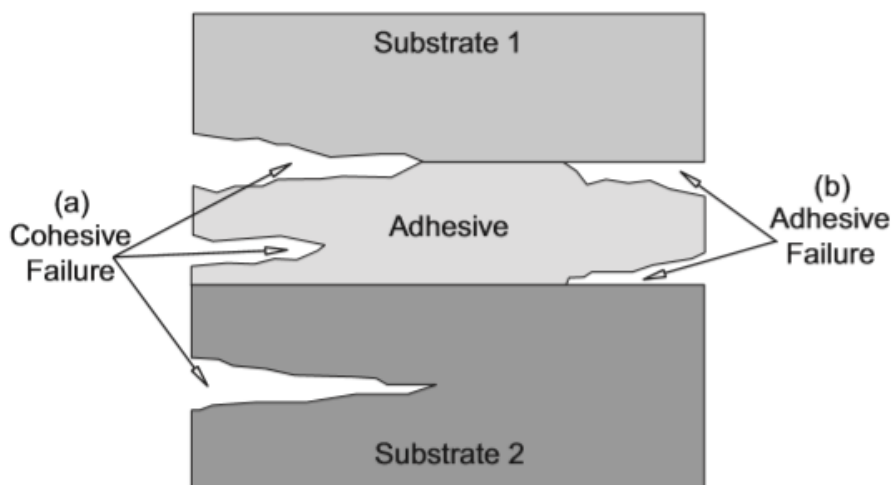
2.2.3 Difúzní teorie

Zde je teorie založena na difúzi makromolekul mezi povrchy lepených dílů. Pevnost spojení je právě určena schopností difundovat, která závisí na použitém typu adherentu a lepidla. Často se využívá u lepení pomocí rozpouštědel, kde spojení vznikne stlačením změkčených (naleptaných) povrchových vrstev. Zpevnění nastane po vytěkání lepidla. [1; 7]

2.2.4 Poruchy spojení

První porucha je **selhání adheze**. Vznikne tak, že se lepidlo, které drží dva povrchy u sebe odloupne od jedné nebo obou spojovaných ploch. Ve většině aplikací není selhání adheze přijatelné.

Selhání koheze je druhý typ poruchy, při kterém se poruší lepidlo použité ve spoji. Na obou spojovaných plochách by měli zůstat po porušení viditelné zbytky spojovacího prvku. Na rozdíl od selhání adheze je tato porucha preferovanější. [1]



Obr. 8 Selhání koheze (a), selhaní adheze (b) [1]

2.3 Svařování plastů

Svařování plastů je proces, kdy vlivem tepla dochází k natavení termoplastu. Nahřáté plochy se přitlačí k sobě, přičemž dochází k promísení makromolekul. Při pomalém ochlazování dochází k návratu pevnosti a vzniká

nerozebíratelný spoj. Svařovat můžeme pouze termoplasty. Oproti svařování kovů u nich nedochází k chemickým změnám materiálu (přeměnám v řetězci). [7]

2.3.1 Základní parametry svařování

Mezi základní parametry, které mají největší vliv na kvalitu spoje patří **teplota, tlak a čas**. Každý z těchto parametrů se liší pro různé metody svařování a svařované plasty. Vybráním správných hodnot svařovacích parametrů a jejich sladěním podle svařovaného materiálu můžeme docílit kvalitního svaru, nejlépe bez vnitřního pnutí. [7]

2.3.2 Proces svařování

Proces svařování můžeme rozdělit do pěti kroků. [5]

- Příprava povrchu
- Zahřátí materiálu
- Stlačování
- Proces difúze makromolekul
- Chladnutí

Přípravou povrchu nejčastěji myslíme očištění nebo odmaštění, ale patří sem i obrábění. Jedná se o velmi důležitý krok hlavně u ručního nebo polo automatizovaného svařování, jelikož ne vždy se nám daří součásti uchovávat v čistém, nekontaminovaném prostředí. Očištění většinou spočívá v nanesení čistícího prostředku a následného setření utěrkou. Díly můžeme také obrábět, abychom zajistili rovné spojovací plochy pro svařování. U automatizovaných procesů se příprava povrchu téměř nevyskytuje, protože svaření nastává krátce po zformování dílů. [5]

Při ohřevu materiálu využíváme tepelného zdroje, popřípadě můžeme využít mechanickou nebo elektromagnetickou energii, která se převádí v materiálu na teplo. Abychom ušetřili čas a energii, tak nejčastěji nahříváme díly pouze v oblasti spoje. Při zahřívání celé součástky nastává problém v tepelné deformaci na celé délce, kdy musíme zajistit, aby si těleso zachovalo stejný tvar jako mělo před svářením. [5]

Stlačením natavených nebo změkčených povrchů k sobě se uvolní z rozhraní uzavřený vzduch a dochází k dokonalému spojení mezi oběma díly. Tento děj může být popsán a modelován jako stlačování toku viskoelastické kapaliny. Nicméně je velmi obtížné přesně popsat chování taveniny kvůli její komplexnosti, nerovnoměrnému tepelnému poli, nerovnostem na spojovaných plochách a zachycenému vzduchu. [5]

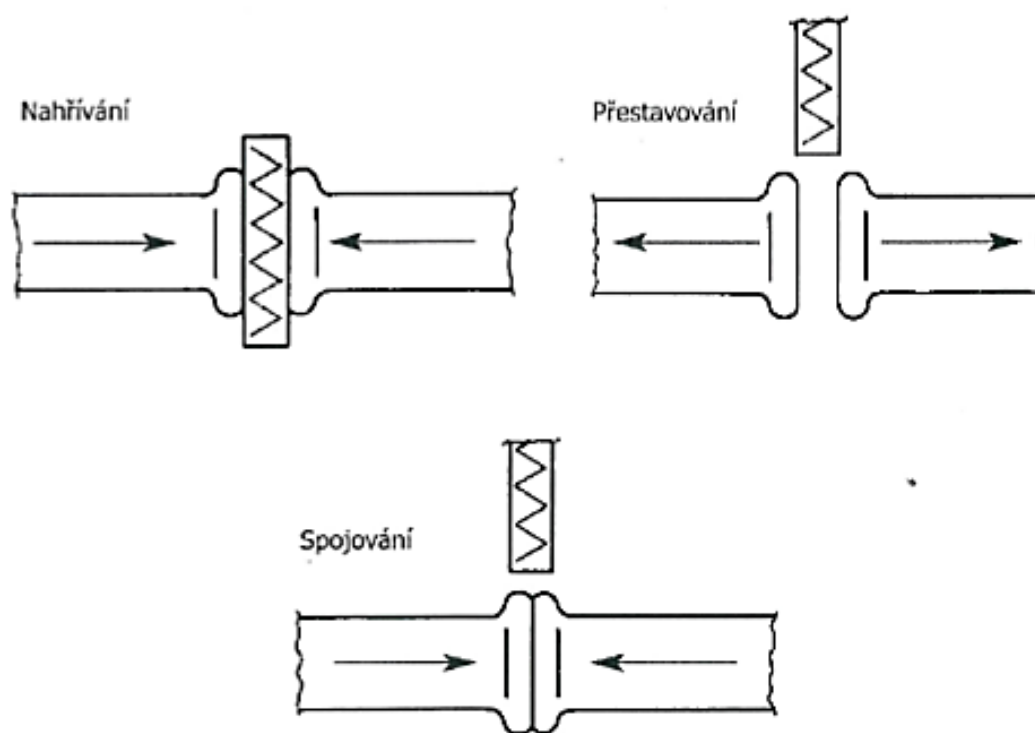
Při působení síly v určitém směru se makromolekulární klubko rozmotává a řetězce se orientují do směru působící síly. Difúze polymerního řetězce se dá popsat pomocí tzv. plazivého modelu (reptation model), kde se molekuly pohybují stejným způsobem jako plazi. Jediný polymerní řetězec si představíme v imaginární trubici tvořené sousedními řetězci, která omezuje pohyb do stran. Řetězec se může snadno pohybovat uvnitř imaginární trubice, ale pouze koncové části se mohou pohybovat mimo trubici. Jakmile koncová část opustí trubici, tak je přilehlé části umožněn pohyb mimo trubici. Tento proces pokračuje, dokud se těžiště molekuly nenachází vně trubice a řetězec je v nové imaginární trubici. Pro dosažení úplného zacelení v oblasti spoje chceme pouze velké části řetězců bez těžiště, aby difundovaly napříč a propletly se s řetězci z druhé části. [5]

Posledním krokem u svařovacího procesu je chladnutí. Při přechodu z taveniny na pevnou strukturu se ustálí přechod makromolekul a dochází k obnovení mezimolekulárních vazeb. Zároveň dochází ke zmenšování objemu, což je jev, který můžeme pozorovat téměř u všech látek. U svařování tohle není velmi důležité, jelikož pracujeme s tenkými vrstvami roztaveného materiálu, řádově v milimetrech. Dále se při chladnutí můžeme setkat se vznikem vnitřního pnutí, které nastává při rychlém ochlazení. Z časových a ekonomických důvodů si nemůžeme dovolit ochlazovat díl za přijatelné rychlosti bez vzniku pnutí (např. 3 °C/hod). I přestože vnitřní pnutí nepříznivě ovlivňuje pevnost svaru, tak nebývá pro soudržnost svaru kritické. [7]

2.3.3 Svařovací metody

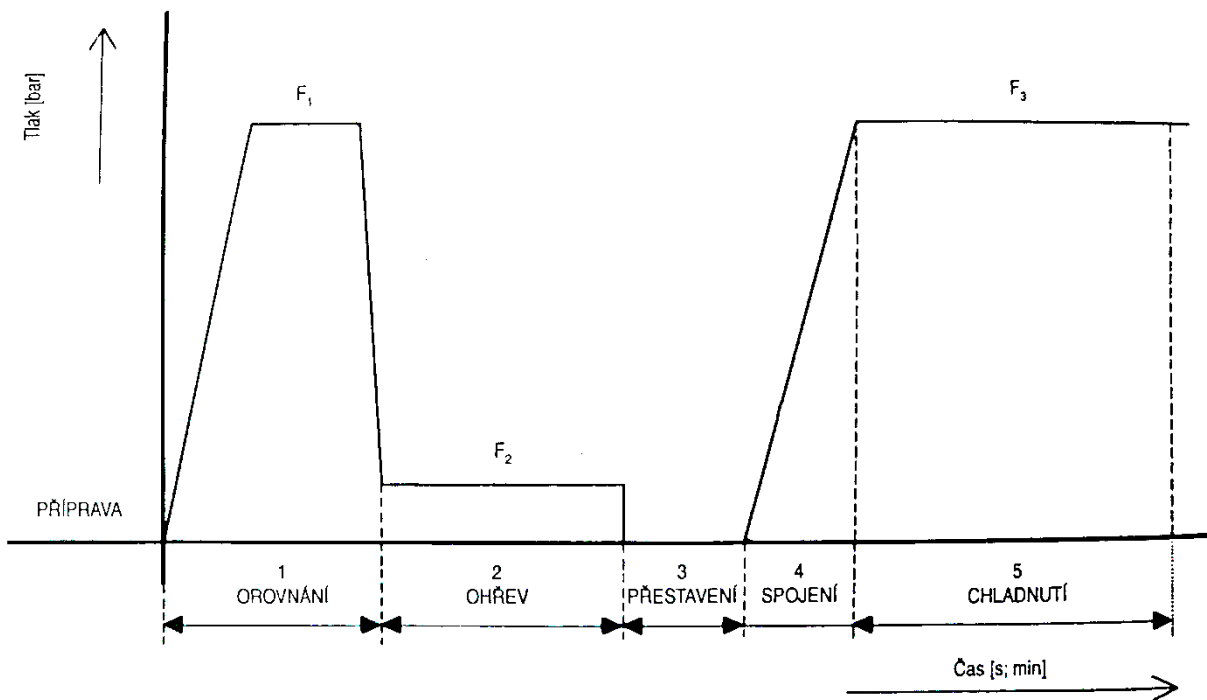
2.3.3.1 Svařování horkým tělesem

Provede se umístěním horkého tělesa mezi svařované plochy. Po natavení spojovaných ploch se těleso odebere a díly se přitlačí k sobě. Tato metoda se využívá pro spojování desek a trubek.



Obr. 9 Svařování na tupo horkým tělesem [7]

Nejdříve musíme zajistit dobrý kontakt mezi tělesem a svařovanou plochou. Při fázi orovnění tlačíme svařované plochy na planoparalelní desku, dokud se obě svařované plochy nevyrovnají, což se projeví výškou výronku na hranách desek nebo trubek. Svařované plochy poté natlačujeme na horké těleso, které bývá často pokryto nepřílnavou vrstvou. Jakmile dojde k natavení dostatečné tloušťky, snížíme tlak na nulu a dochází k odsunutí svařovaných ploch od horkého tělesa. Horké těleso se následně vysune z oblasti svařování a plastifikovaná čela svařovaných ploch se zvyšujícím se přitlakem posouvají k sobě. Po celou dobu chladnutí musíme udržovat svařovací tlak konstantní a nechat chladnutí probíhat samovolně. [5; 7]



Obr. 10 Diagram tlak-čas u svařování na tupo horkým tělesem [7]

Pro PE-HD jsou dle DVS 2207 takto dané směrné hodnoty: [7]

- Teplota horkého tělesa 200-220 °C
- Svařovací tlaky pro orovnávaní a spojování 0,15 N/mm²,
- Svařovací tlak pro nahřívání ≤ 0,02 N/mm²
- Svařovací čas podle fází pro první 4 rozsahy tloušťky stěn (Tab. 3)

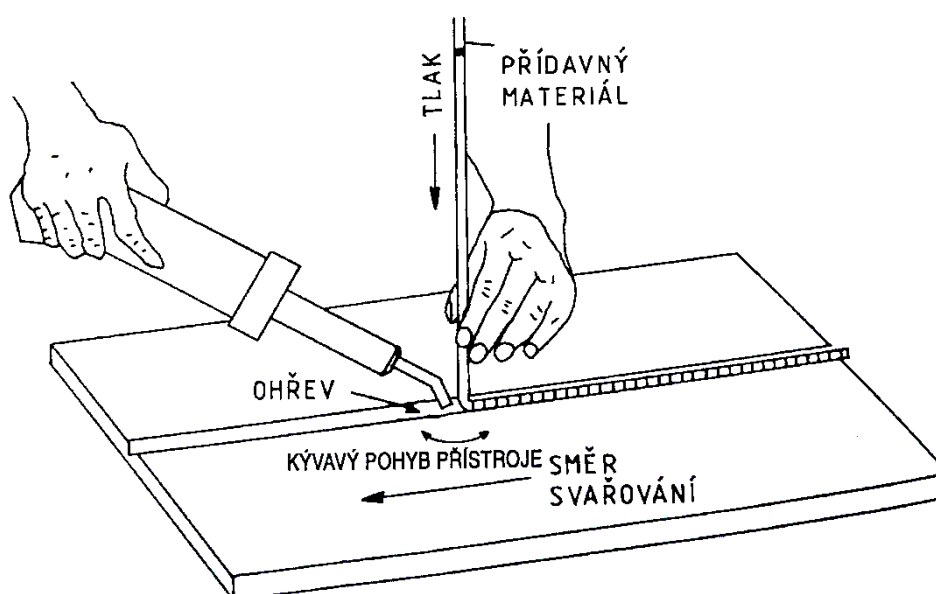
Tab. 3 Svařovací časy PE-HD podle fází [7]

Jmenovitá tloušťka stěny [mm]	Orovnávání -		Přestavování max. doba [s]	Spojování [s]	Chladnutí [min]
	výška výronku [mm]	Ohřev [s]			
do 4,5	0,5	45	5	5	6
4,5-7	1	45-70	5-6	5-6	6-10
7-12	1,5	70-120	6-8	6-8	10-16
12-19	2	120-190	8-10	8-11	16-24

2.3.3.2 Svařování horkým plynem

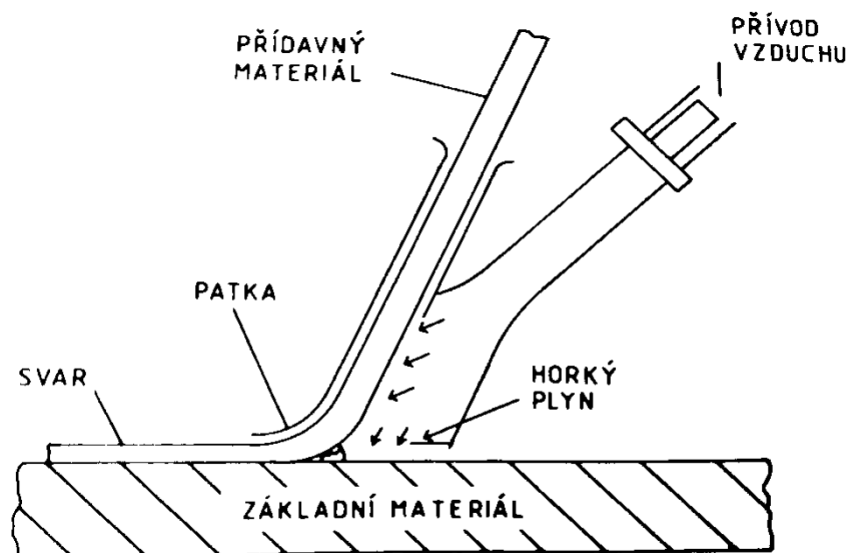
U této metody se používá plyn o vysoké teplotě, který ohřívá přídavný materiál spolu se spojovanou oblastí. Plastické hmoty se následně spojují stlačováním materiálu. Přídavná tyčinka se obvykle používá k vyplnění V-drážek nebo u T-spojů. Plyn je nejčastěji vzduch, s výjimkou případů, kdy materiál může snadno oxidovat. Poté se jako plyn používá dusík nebo inertní plyny. [5]

Ruční svařování (označení WF) probíhá ručně, kdy obsluha kývavým pohybem střídavě ohřívá přídavný materiál a povrch dílu, zatímco přes tyčinku tlačí taveninu do spoje. [5]



Obr. 11 Ruční svařování horkým plynem [7]

Pro urychlení procesu může být použita **rychlotryska (označení WZ)**, která svým tvarem rozděljuje proud horkého plynu do kanálek pro ohřev povrchu dílu a přídavného svarového drátu. Svařovací síla se zavádí přes kluznou patku na špičce rychlosvařovací trysky. [5; 7]



Obr. 12 Svařování horkým plynem s rychlotryskou [7]

Klíčové parametry svařování zahrnují typ plynu, jeho průtok a teplotu, rychlost svařování, průměr svařovací tyče a přítlak svařovací tyče. Svařovat můžeme širokou řadu termoplastů, nejčastěji PE, PP, PVC, PVDF, PMMA. [7]

Tab. 4 Svařovací parametry [7]

Materiál	Způsob svařování	Svařovací síla N pro průměr drátu Ø 3 mm	Teplota horkého vzduchu [°C]	Množství vzduchu [l/min]
PE-HD	WF	6-10	300-350	40-60
	WZ	10-16		
PP	WF	6-10	280-330	
	WZ	10-16		
PVC-C	WF	10-15	350-400	
	WZ	15-20		

Svařování horkým plynem je vhodné pro malou výrobu nebo výrobu prototypů, protože se obvykle provádí ručně nebo poloautomaticky a je pomalá, s typickými rychlostmi svařování 5 až 30 cm/min. Ve většině případů je zapotřebí proces svařování vícekrát opakovat a čistit svar mezi průchody. Výhodou ručního provozu je flexibilita a možnost svařovat nebo opravovat v terénu. Tuto metodu je možné použít na desky, trubky i fólie. [5] [7]

3 Sintrování

Sintrování neboli spékání, je procesní technologie využívaná k produkci materiálů nebo součástek z kovových, keramických nebo polymerních prášků dodáváním tepelné energie. Jedná se o jednu z nejstarších technologií začínající v pravěku výrobou keramický a porcelánových nádob. Sintrováním se nicméně začalo vědecky zabývat až od 40. let minulého století. Od té doby došlo velkému rozvoji v jeho využití na díly z kovových prášků a objemových keramických komponent. Cílem sintrování je opakovaně produkovat stejně spečené součástky pomocí řízených parametrů při procesu tak, aby výsledná součástka měla plně celistvé tělo s jemnou strukturou. [9]

3.1 Parametry pro sintrování

Parametry můžeme rozdělit do 2 skupin:

- Materiálové parametry
- Procesní parametry

Parametry materiálu zahrnují chemické složení prášku, velikost zrna, tvar zrna, shlukování prášku atd. Tyto parametry ovlivňují stlačitelnost a spékavost prášku. Při použití 2 a více prášků je velmi důležité zachovat homogenitu směsi. Ke zlepšení homogenity se dají využít jak mechanické, tak i chemické procesy. Ostatní parametry sintrování se odvíjí od termodynamických proměnných jako je teplota, tlak, prostředí, čas, rychlost ohřevu a chladnutí. Ačkoliv se mnohé studie zabývaly teplotou a časem při spékání práškových směsí, tak se zdá, že větší vliv na spékavost má prostředí a tlak. V tomto ohledu se začaly zkoumat a vyvíjet nové nekonvenční procesy, které mohou tyto parametry měnit. [9]

3.2 Sintrování termoplastů

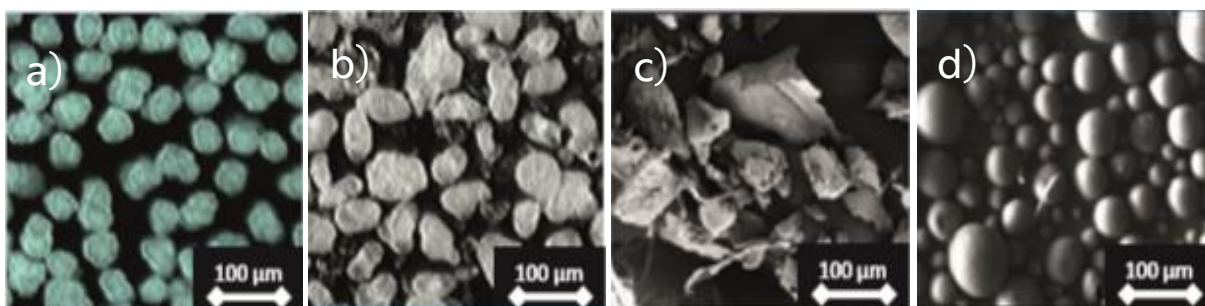
Sintrování se využívá při výrobě dílů z těžce tavitelných termoplastů. Prášek bývá volně nasypán do formy a v ochranné atmosféře zahříván až do slnutí. Často zde vyskytuje určité procento pórů. Mimo to se polymerní prášky využívají i v jiných oblastech plastového průmyslu. Například v aplikacích jako je průmyslové povlakování, elektronika, stavebnictví nebo automobilový průmysl. [7] [10]

3.2.1 Produkce polymerních prášků

Produkce se rozlišuje podle toho, jestli se částice polymeru tvoří při polymeračním procesu nebo se částice tvoří následným krokem až po zhotovení polymeru. Mezi nejpoužívanější procesy patří:

- Emulzní/Suspenzní polymerace
- Vysrážení z roztoků
- Mechanické mletí/drcení
- Vytlačování (koextruze)

Každý z těchto procesů má své výhody a nevýhody. Proces s využitím koextruze poskytuje vynikající výsledky, pokud jde o kulovitost částic a tím i sypké chování prášků. Nevýhodou je komplexnost a časová náročnost vedlejších kroků. Naproti tomu mlecí proces je nenáročný z procesního hlediska, ale produkuje geometricky nejednotné částice se značně sníženou sypkostí a hustotou prášku. Jak vysrážení z roztoků, tak i přímo polymerované částice vykazují dobré až velmi dobré vlastnosti, pokud jde o tvar, povrch, hustotu prášku a sypkost. Jsou však technicky náročnější na vyladění procesních parametrů a vyžadují specifické know-how. [10]



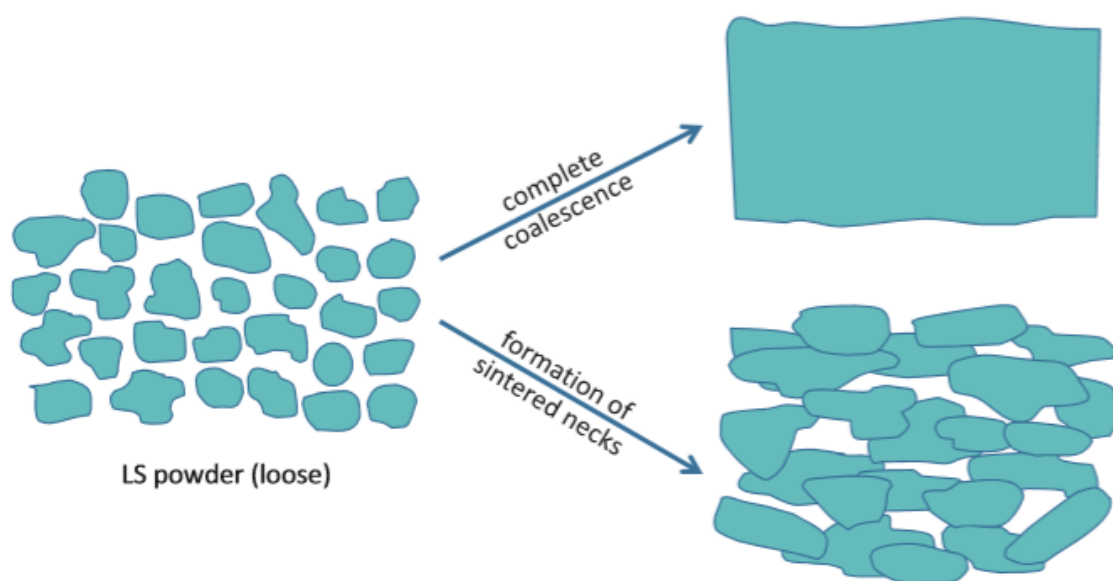
Obr. 13 Tvar a velikost částic: a) suspenzní polymerace, b) vysrážení, c) kryogenní mletí, d) vytlačování [10]

3.2.2 Zpracování polymerů

Manipulace s termoplasty je rozdělena na primární a sekundární zpracování. Při primárním zpracování se tvarování provádí nad teplotou tečení polymerů (T_f). Pro semikrystalické plasty se jedná o teplotu tání ($T_m = T_f$) a pro amorfní materiály nad T_f . Při těchto teplotách mají materiály obvykle dobrou tekutost (nízkou viskozitu) a mohou být relativně snadno tvarovány do požadované formy běžnými způsoby zpracování (vstřikování, vytlačování). Naproti tomu sekundární zpracování plastů

se nachází pod teplotou tečení, tedy v tuhé oblasti plastů, mezi T_g (teplota zeselnění) a T_f . Příklady zpracování polymerů v sekundární oblasti zahrnují vyfukování, tvarování za tepla a výrobu fólií. K tomu, aby polymery dosáhly požadovaného tvaru ve stavu s vyšší viskozitou, je zapotřebí značné přídavné síly.

Z toho plyne, že pro sintrování, jako primární zpracování, je výhodnější využívat semikrystalických polymerů. Amorfní materiály jsou často velmi viskózní i vysoko nad teplotou skelného přechodu a vykazují nedostatečné sjednocení práškových částic v procesu, což má za následek vznik slinutých krčků mezi zrny prášku. To se poté projevuje nižší hustotou a horšími mechanickými vlastnostmi. [10]



Obr. 14 Spékání prášku – plné sjednocení nebo tvorba slinutých krčků [10]

Praktická část

Experimentální část se zaměřuje na návrh jednodušší a rychlejší metody, než metody používané na testování adheze kov-plast, při které by bylo možné testovat adhezi mezi nemodifikovaným polyethylenem (ZS-PE) a plazmově modifikovaným polyethylenem (PL-PE).

Tato část práce je věnována tvorbě formy pro zkušební vzorky, přípravě vzorků, podrobení těchto vzorků tahové zkoušce, pozorování negativních jevů při této metodě a je zde také provedena metoda DSC pro teplotní charakteristiku použitých materiálů. Z výsledků je vypracovaná diskuze a zpracován závěr.

4 Použité materiály

4.1 Materiály vzorků

Vzorky pro provedení experimentální metody byly připravené z PE prášků uvedených v Tab. 5. Prášky s dobou plazmování 0 s označují základní stav, kde prášky neprošly plazmovou úpravou. Pro plazmování byl použitý mikrovlnný zdroj laboratorního zařízení společnosti SurfaceTreat a.s.

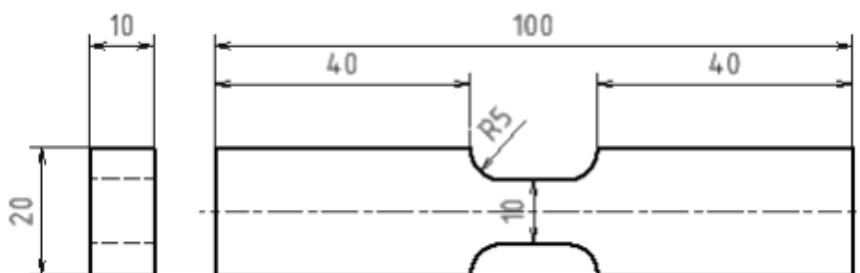
Tab. 5 Použité práškové materiály

Dodavatel/model	Barva	Velikost částic [μm]	Doba plazmování [s]	Plyn při plazmování	Vlastní označení	Datasheet
DOWLEX 2629.10UE	natural	300	0	-	DowZS	[14]
			120	vzduch	Dow2'	
Resinex RX 101 BLACK 9003	černá	300	0	-	RxZS	[15]
ICORENE 1613	natural	630	0	-	IcoZS	[13]
			60	vzduch	Ico1'	
			120	vzduch	Ico2'	
			180	vzduch	Ico3'	
			240	vzduch	Ico4'	
			300	vzduch	Ico5'	

4.2 Materiály pro tvorbu formy

Vytisknutý model vany je z PLA. Jedná se o biodegradovatelný materiál, který je rozšířený v různých průmyslových odvětvích. Je jeden z nejpoužívanějších materiálů pro 3D tisk metodou extruze termoplastu. Je pružný, tvrdý a odolný jako jiné plasty.

V programu Solid Edge byl nejprve vytvořen model tvořený vanou s pozitivem vzorku. Tvar zkušební vzorku byl navržen podle vzorků používaných na tahovou zkoušku plastových materiálů podle normy ISO 527 (viz. Obr.15).



Obr. 15 Navrhnuté rozměry vzorku

Při modelování bylo nutné zohlednit tloušťky stěn a dna kvůli zatékavosti formovacího silikonu při lití do vany a špatné teplotní vodivosti silikonu při pečení s prášky. Model vany (Obr.16 vlevo) byl vytisknutý na stolní 3D tiskárně ORIGINAL PRUSA i3 Mk3 zobrazené na Obr.16 vpravo.



Obr. 16 Vlevo model vany , vpravo fotografie použité 3D tiskárny ORIGINAL PRUSA i3 Mk3

Jako materiál formy byl použit dvousložkový kondenzační odlévací silikon ChN-KS Typ 25, který se vytvrzuje při pokojové teplotě pomocí kondenzační reakce. Hlavní výhody formovacího silikonu jsou:

- dobrá pružnost pro jednoduché vyjmutí vypečených vzorků z formy
- vysokoteplotní odolnost
- možnost vícenásobného použití



Obr. 17 Formovací silikon ve vaně před vytvrzením

Po vytvrzení byla silikonová forma opatrně vyndána z vany a zkontrolována, jestli je kavita plně vytvarovaná a jestli se v ní nenacházejí nechtěné artefakty jako bubliny nebo prázdná místa, kde silikon při formování nezatekl.



Obr. 18 Silikonová forma po vytvrzení

5 Použité experimentální metody

5.1 DSC

Diferenciální skenovací kalorimetrie (Differential scanning calorimetry – DSC) je termoanalytická metoda. Využívá se pro zjišťování tepelných vlastností materiálů. U polymerních materiálů nejčastěji k určení teplot tání, krystalizací a skelných přechodů. Do přístroje se umístí nádoba (kalíšek) se zkoušeným vzorkem a referenční nádoba (obvykle prázdná). Nádoby a vzorek nesmíme zapomenout přesně zvážit. Poté se začnou oba vzorky konstantní rychlostí ohřívat (chladit). Na počítači sledujeme průběhy tepelných toků do nádob v závislosti na teplotě, které se liší díky rozdílnému složení vzorků a fázových změn, které ve vzorku probíhají. [10]

DSC metoda byla provedena pro měření teplot tání a zjištění, zda ji doba plazmové úpravy ovlivňuje. Měření bylo provedeno přístrojem NETZSCH STA 409 PG LUXX (viz Obr.19). Rychlost ohřevu byla stanovena na 10 °C/min a rychlost chladnutí 3 °C/min.



Obr. 19 Fotografie tanice pro provedení metody DSC s přístrojem NETZSCH STA 409 PG LUXX

5.2 Tahová zkouška

Jedná se o zkoušku, kdy dochází k trvalé deformaci testovaného tělesa. Používá se ke stanovení mechanických vlastností materiálu jako je modul pružnosti v tahu, mez pevnosti v tahu a dalších tahových charakteristik ze závislosti napětí

a poměrného prodloužení. Princip spočívá v natahování zkušebního tělesa silou F ve směru hlavní podélné osy. Při konstantní rychlosti posuvu v čelistí sledujeme, dokud těleso neporušíme nebo nedosáhneme námi zvoleného prodloužení. [11] Hodnoty zatěžovací síly a prodloužení můžeme během zkoušky odečítat z počítače jako číselné údaje nebo jako vykreslený graf závislosti těchto hodnot. Pro tahovou zkoušku byl použit trhací stroj ZD 10 Walter (viz. Obr.20).

Rychlost posuvu byla nastavena na 10 mm/min a vzdálenost mezi čelistmi byla 40 mm. Zkouška byla prováděna, dokud nedošlo k porušení vzorku nebo dokud prodloužení nedosáhlo 15 mm.



Obr. 20 Fotografie použitého trhacího stroje ZD 10 Walter

6 Příprava vzorků

Tab.6 ukazuje všechny kombinace prášků, které se použily pro testování pevnosti mezi ZS-PE a PL-PE. Důležité zmínit, že hmotnost použitého prášku v naplněné formě se mírně lišila podle dodavatele. Hmotnost prášku pro ICORENE byla 8,3 g a pro DOWLEX 8,5 g, kde hrubší prášek nevyplní tak dobře objem, mezi zrny zůstane více vzduchu a proto bude mít menší hmotnost.

Tab. 6 Výpis kombinací mezi ZS-PE a PL-PE prášky

Označení	ZS-PE prášek	PL-PE prášek	Počet připravených vzorků
DowZS	DowZS	-	3
RxZS	RxZS	-	4
IcoZS	IcoZS	-	5
D2	DowZS	Dow2'	5
RI1	RxZS	Ico1'	1
RI2	RxZS	Ico2'	1
RI3	RxZS	Ico3'	1
RI4	RxZS	Ico4'	5
RI5	RxZS	Ico5'	10

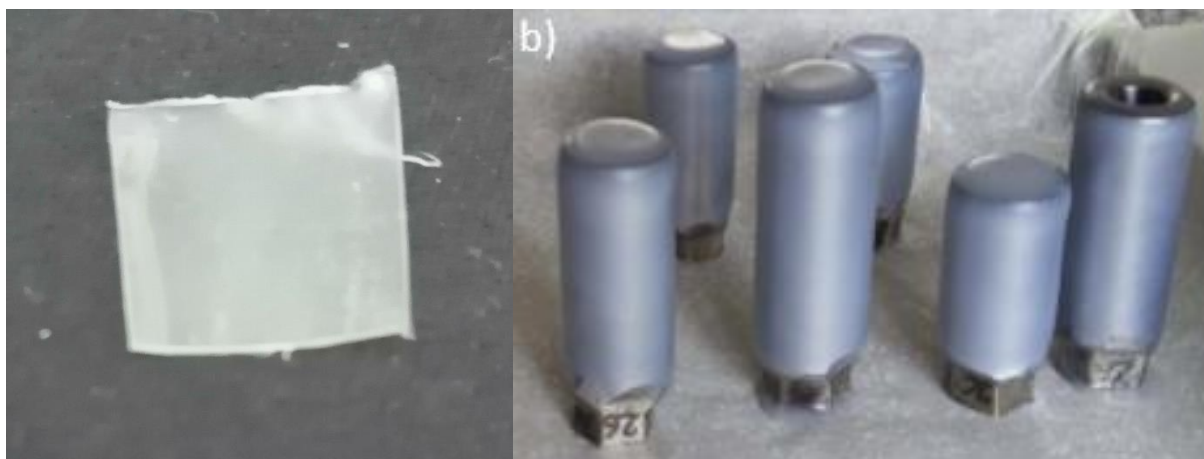
Při přípravě vzorků tvořeného pouze práškem ZS-PE byla celá dutina formy až po okraj naplněna práškem a důkladně utlačena za účelem eliminace vzduchu a rovnoměrného rozložení prášku v dutině.

Při použití dvou prášků byla do středu zúžené části umístěna přepážka (viz Obr. 21), která brání před promícháním prášků během plnění formy. Poté byla každá půlka zaplněna po okraj příslušným práškem. Přepážka byla následně odstraněna a prášky byly utlačeny.



Obr. 21 Silikonová forma s dělicí přepážkou

Pro simulaci slinuté vrstvy ve spojení plast-plast pro tuto metodu byl použitý stejný postup jako v diplomové práci [2]. Kovový váleček se nejprve zahřál na teplotu 180 °C, poté byl vyndán z pece a obalen v $\text{Ico5}'$. Obalený váleček byl zpátky vložen do pece, kde se prášek slinoval po dobu 40 minut. Po vyjmutí z pece a ztuhnutí (Obr.22b) slinutá vrstva plastu byla sloupnula z válečku a tenký film byl nařezán na čtverečky 10 x 10 mm (Obr.22a). Tloušťka slinuté vrstvy byla 0,3 mm. Poté se čtvereček vložil do středu formy a z každé strany byl zasypán RxZS. Takto bylo připraveno 15 vzorků.



Obr. 22 Vlevo čtvereček slinutého filmu $\text{Ico5}'$, vpravo vychladnutá vrstva slinutého prášku na válečcích [2]

Naplněné formy byly následně umístěny do pece vyhřáté přibližně na 180 °C. Po 35 až 40 minutách byly formy se vzorky vytáhnuty z pece a při pokojové teplotě chladnuly alespoň 24 hodin (maximálně 120 hodin).



Obr. 23 Naplněné formy (vlevo), slinuté vzorky po vyndání z formy (vpravo)

Po vypečení vzorků bylo možné na spodním povrchu pozorovat pórovitou strukturu s výskytem bublin. Někdy dokonce docházelo k výskytu bublinovitého povrchu i na vrchní straně vzorku. Tento jev negativně ovlivňoval průběh tahové zkoušky, jelikož bubliny v některých případech způsobovaly trhání zkušebního vzorku mimo spojovanou oblast. Problém je pravděpodobně špatná tepelná vodivost silikonového materiálu, kdy horký vzduch v peci nejprve ohřívá povrchovou vrstvu prášku, která se začíná jako první tavit a vzniklá tavenina velmi vysokou viskozitou poté znemožní úniku vzduchu z formy. Výskyt bublin a pórovité struktury se později podařilo téměř eliminovat při sériovém pečení vzorků. Pokud byly formy použité k přípravě dalších vzorků, aniž by stihly vychladnout z předchozího cyklu, tak při dalším pečení netrvalo dlouho, aby se i spodní vrstva prášku začala tavit. Výsledné vzorky měli jednotnější vrchní i spodní povrch a více homogenní strukturu po celé délce. Obr.24 porovnává vzhled zhotovených vzorků při sériovém pečení po první a třetí sérii.

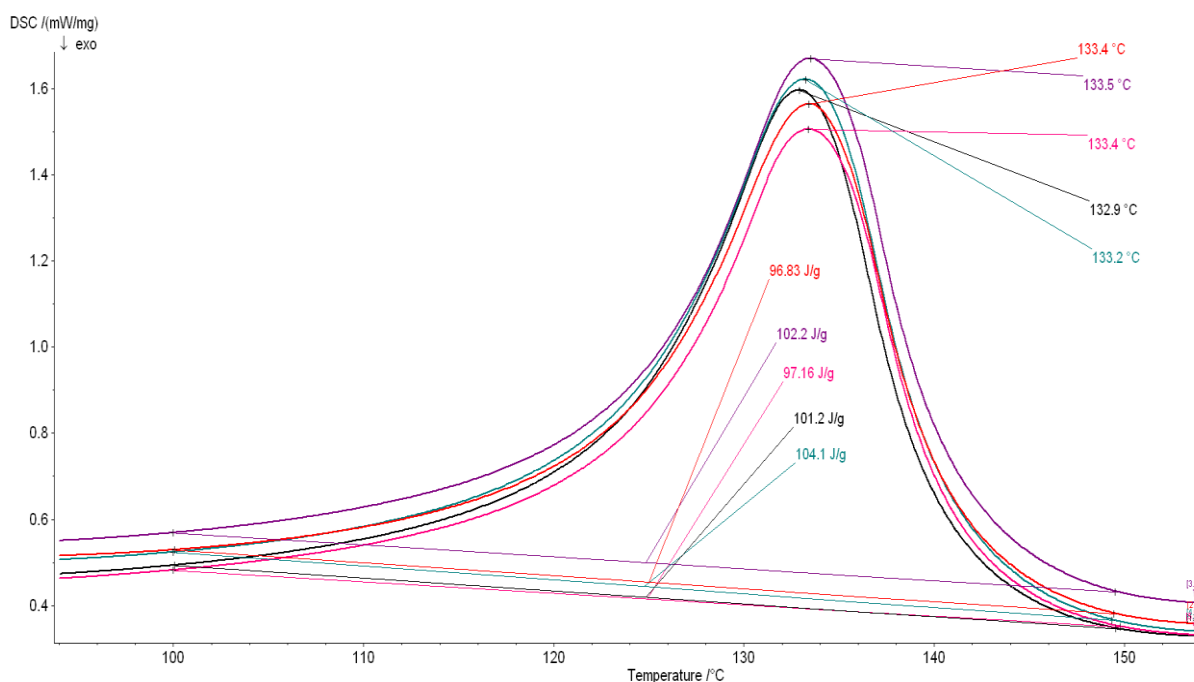


Obr. 24 Porovnání povrchů vzorků 1.(nahore) a 3. (dole) série pečení

7 Výsledky a diskuze

7.1 DSC

Metodou DSC byly změřeny teploty tání prášků časové řady plazmově modifikovaných prášků ICORENE. Vyhodnocení ukázalo, že doba úpravy prášku výrazně neovlivňuje teplotu tání. Rozdíly mezi teplotami jsou v rozmezí chyby měření, a není kvůli tomu potřeba přizpůsobovat proces tvorby vzorků.



Obr. 25 Část grafu DSC z oblasti teploty tání pro měřené prášky

7.2 Výsledky tahové zkoušky

Z počítačem vykresleného digramu zatěžovací síly na prodloužení vzorku byla odečtena maximální síla. Po vykonání zkoušky se v místě porušení posuvným měřítkem změřila šířka a výška pro určení plochy průřezu vzorku. Díky těmto parametrům je možné vypočítat mez pevnost σ_m ze vzorce, kde F_m je maximální nominální síla a A průřez vzorku: [11]

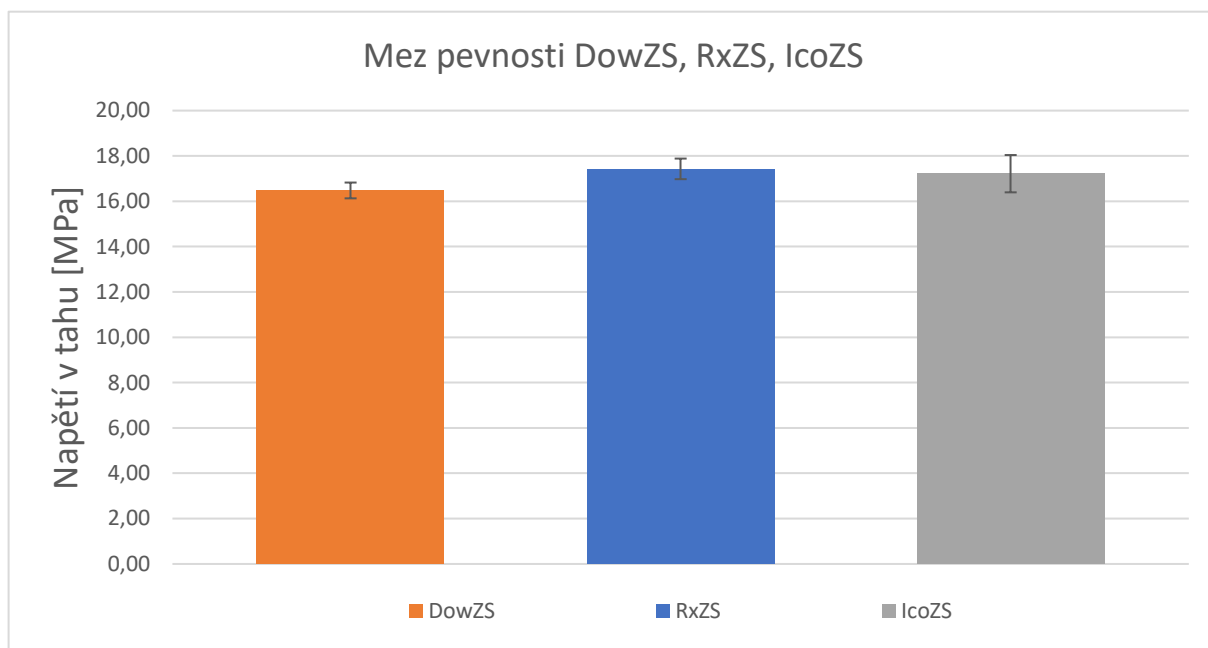
$$\sigma_m = \frac{F_m}{A} [MPa]$$

Výpočty a grafy byly prováděny v softwaru Microsoft Excel. U každého vzorku bylo vypočteno maximální napětí. Poté byl z funkce v programu vypočítán

aritmetický průměr napětí a odchylka každé řady. Vzorky, při kterých došlo k porušení v místě mimo spoj z důvodu přítomnosti bubliny, nebyly zahrnuty ve vyhodnocení. Takto bylo z celkově 50 vzorků vyřazeno 7. Diagramy z tahových zkoušek jsou v přílohách.

7.2.1 Vyhodnocení referenčních vzorků DOWLEX, ICORENE, Resinex

Pro ověření správnosti navržené metody byly připraveny vzorky plazmově nemodifikovaného PE, které byly podrobeny tahové zkoušce a jejich meze pevnosti byly porovnány s údaji od dodavatele.



Obr. 26 Mez pevnosti DowZS, RxZS, IcoZS

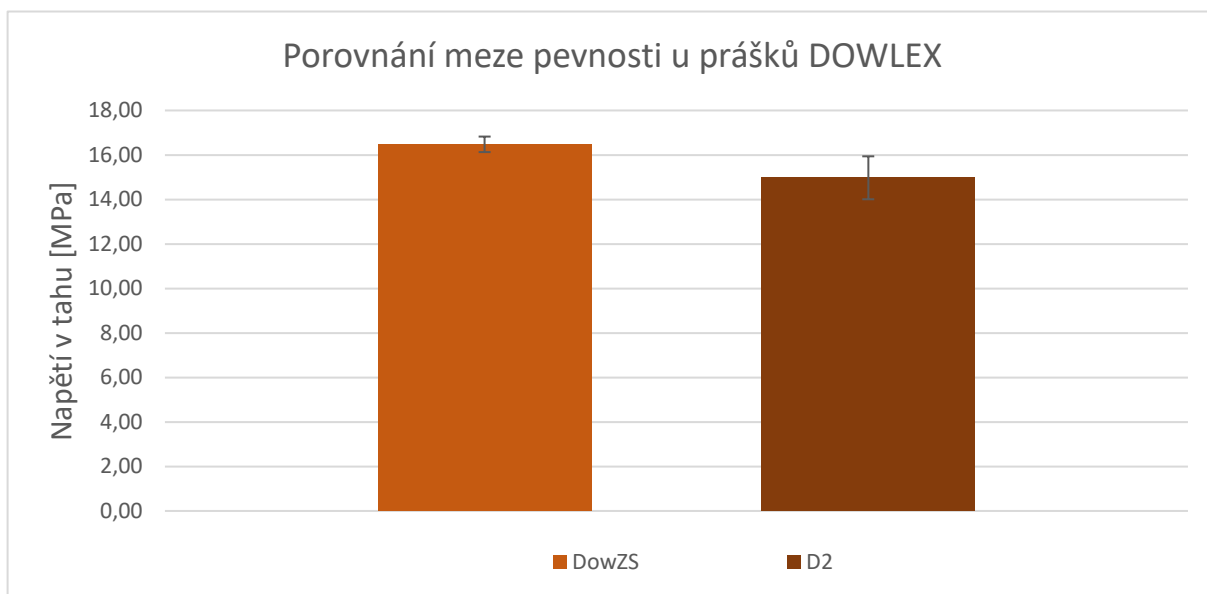
Z porovnání v Tab. 7 plyne, že příprava vzorků touto metodou nedegraduje vlastnosti použitých materiálů, které jsou zkoumány v dalších experimentech. Rozdíl od dodavatele v tomto případě nedosáhl ani 10 %.

Tab. 7 Porovnání pevností materiálů podle technických listů od výrobců a pevností vzorků

Prášek	Naměřená mez pevnosti [MPa]	Mez pevnosti podle dodavatele [MPa]	Rozdíl [%]
DowZS	16,48	16,5	0,12
RxZS	17,43	18	3,17
IcoZS	17,22	19	9,37

7.2.2 Vyhodnocení vzorků s prášky DOWLEX

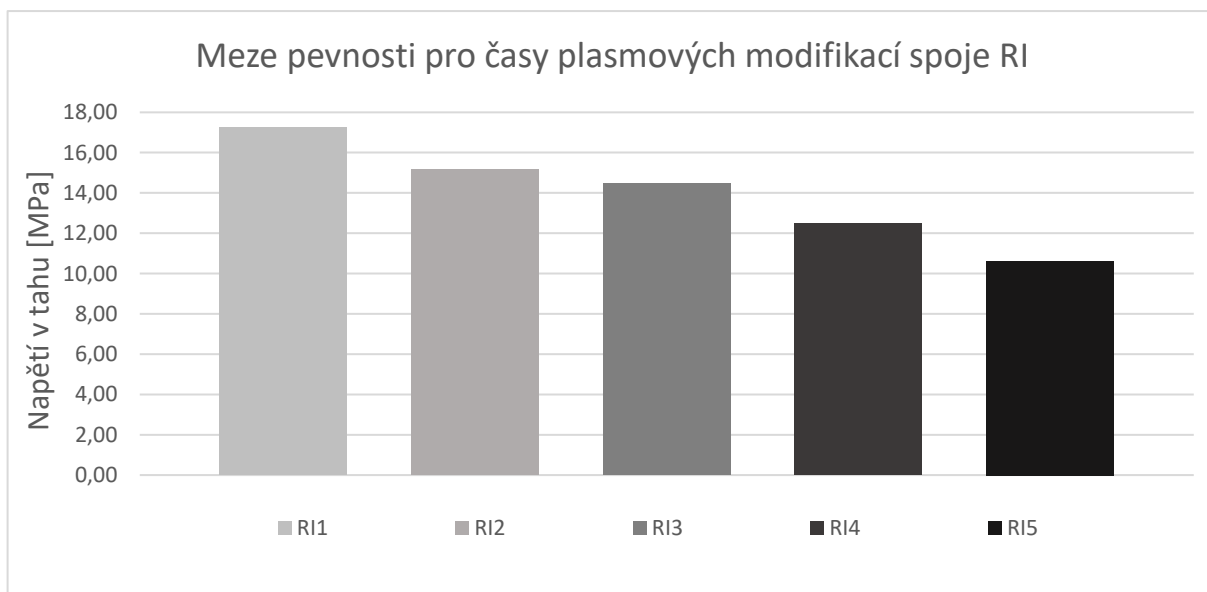
Vzorky DowZS dosáhly hodnoty napětí 16,48 MPa. Z grafu na Obr. 27 jde vidět, že vzorky D2 mají nižší pevnost v tahu o 9,1 % (14,97 MPa). Příprava vzorků s prášky DOWLEX sloužila pouze k vyladění metody a postupu přípravy. Zaměření se poté přesunulo na prášky Resinex a ICORENE.



Obr. 27 Porovnání meze pevnosti u prášků DOWLEX

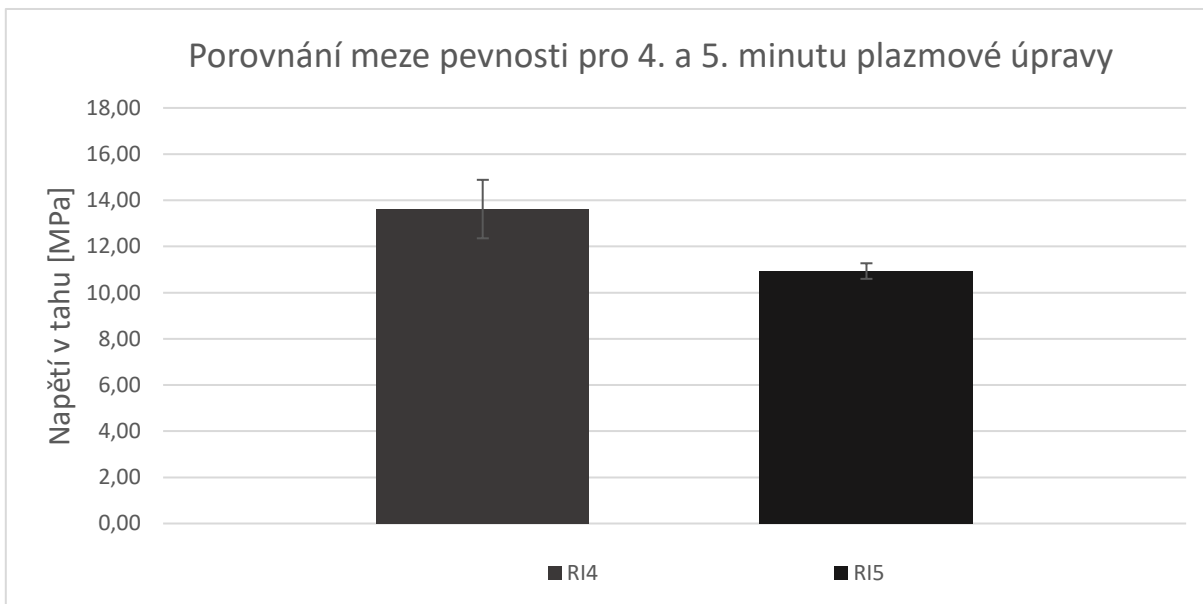
7.2.3 Vyhodnocení vzorků Resinex-ICORENE

Pro ověření, že pevnost spoje klesá s narůstající dobou plazmování byl vytvořen jeden vzorek z každé časové řady od 1. do 5. minuty.



Obr. 28 Meze pevnosti pro časy plazmových modifikací spoje RI

Z grafu na Obr.28 je vidět, že s narůstající dobou plasmování mez pevnosti klesá. To dokazuje, že problém je v plasmové úpravě, a ne v použité metodě. Ve výzkumu projektu začalo u prášku ICORENE docházet k problému oddělování od třetí minuty plasmové modifikace a výš. Proto byly pro statistické ověření vytvořeny série více vzorků 4. a 5. minuty, kde je možné pozorovat zajímavé chování.



Obr. 29 Porovnání meze pevnosti pro 4. a 5. minutu plazmové úpravy

Vyhodnocení spojů RI4 a RI5 je v grafu na Obr. 29. Mez pevnosti u spoje RI4 vychází 13,62 MPa, což je oproti referenčnímu RxZS s 17,43 MPa (21,86 % pokles). Průměrná hodnota meze pevnosti RI5 byla 10,93 MPa (pokles 37,27 % vůči RxZS).

Tab. 8 Vliv doby plasmování na meze pevnosti pro spoje Resinex-ICORENE

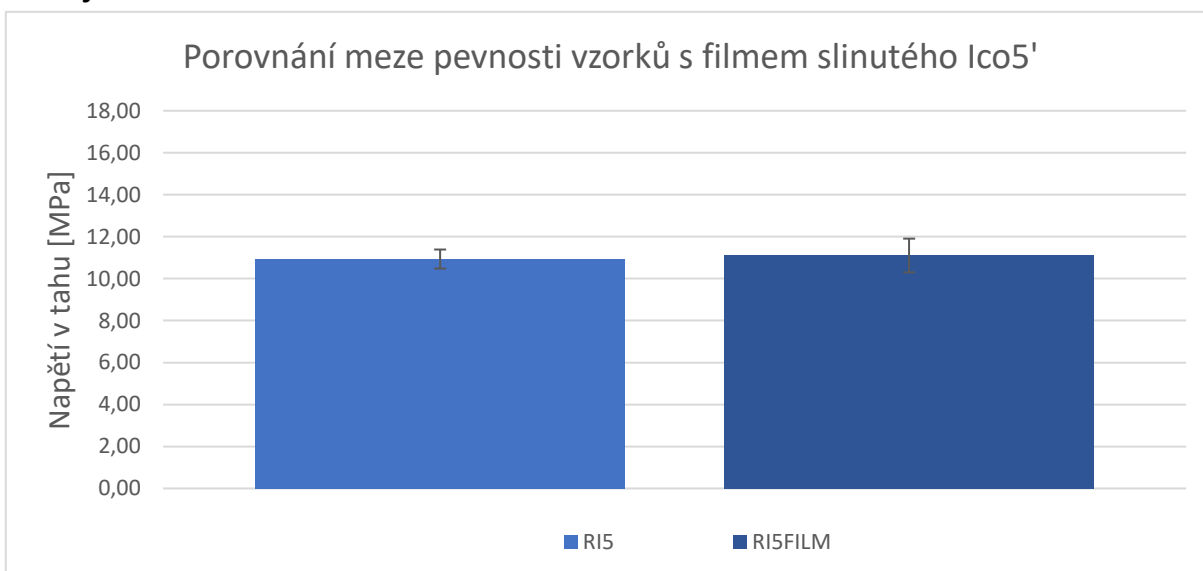
Spoj	Snížení meze pevnosti oproti RxZS [%]	Snížení meze pevnosti oproti IcoZS [%]
RI1	1,08	-0,14
RI2	12,95	11,87
RI3	17,13	16,11
RI4	21,86	20,89
RI5	37,27	36,49

Tab. 8 ukazuje vliv doby plasmování prášku na pevnosti spoje s plasmově neupraveným práškem. Jedna z možných důvodů proč pevnost klesá je vysvětlena tak, že s nárůstem doby plasmování prášku dochází k vyššímu

zesíťování materiálu a tento materiál dále nemá možnost provázat molekulární řetězce s druhým materiálem. Tuto teorii by potvrdzovalo i to, že u vzorků 4. a 5. minuty modifikace docházelo na rozhraní materiálů ke křehkému lomu.

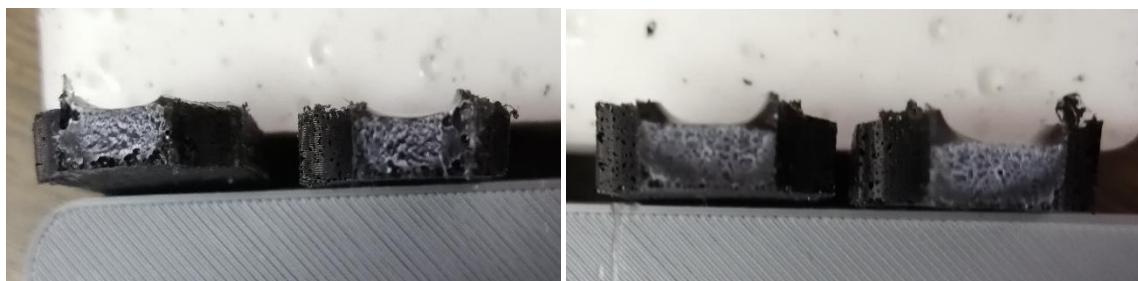
7.2.4 Vyhodnocení vzorků s filmem slinutého Ico5'

Vzorky s filmem slinutého Ico5' (označené jako RI5FILM), které sloužily jako simulace mezivrstvy mezi kovem a plastem jako v diplomové práci [2], dosáhly meze pevnosti 11,10 MPa. Oproti spojení RI5 (mez pevnosti 10,93 MPa) je zde vidět malé zlepšení (viz. Obr. 30), které je v rozmezí chyby měření a které je nejspíše způsobené spečením RxZS malými mezerami mezi filmem a stěnami formy.



Obr. 30 Porovnání meze pevnosti vzorků s filmem slinutého Ico5'

Provedení a vyhodnocení této metody ukázalo, že můžeme použít časově výhodnější metodu bez předem slinovaného plazmově upraveného prášku.



Obr. 31 Lom u vzorků s filmem slinutého Ico5'

Z Obr. 31 je možné usoudit, že na rozhraní materiálu došlo částečně k poruše adheze i koheze. V některých částech je dosaženo promísení černého a bílého materiálu, v jiných zase ne.

8 Závěr

Pro pochopení experimentu byla vypracována literární rešerše v teoretické části této práce. Rešerše pojednává o polymerních materiálech, jejich využití a různých metodách spojování plastů.

V praktické části byla navržena metoda pro rychlejší a levnější ověření adheze při spojování plazmově modifikovaných prášků s nemodifikovaným plastem. Byla navržena a vyrobena silikonová forma pro přípravu vzorků dle normy ISO 527 a vyzkoušena její funkce pro účely této práce. Výsledky DSC ukazují, že s rostoucí dobou plazmové úpravy se nemění teplota tání zkoumaných prášků a z tohoto důvodu není potřeba podle doby modifikace upravovat proces přípravy vzorků. Z výsledků tahové zkoušky (především materiálu ICORENE) je zřejmé, že s rostoucím časem plazmové úpravy klesá schopnost plastu vytvořit pevný spoj s jiným plastem. Toto poukazuje na to, že při přípravě vzorků pro testování adheze mezi kovem a plastovými prášky nedochází k závažným chybám při samotné přípravě vzorků, ale nežádoucí porušení na rozhraní plast-plast je způsobeno plazmovou úpravou jednoho z prášků. V návaznosti na toto zjištění by metoda použitá v této práci mohla být využitelná obecně pro zkoumání kompatibility dvou spojovaných práškových plastů v budoucích experimentech zmíněného projektu.

9 Bibliografie

- [1] **TRES, Paul A.** *Designing plastic parts for assembly*. 8th edition updated. Cincinnati : Hanser Publications, 2017. ISBN 978-1-56990-668-2.
- [2] **WEBEROVÁ, Zuzana.** *Evaluation of adhesion in metal-plastic welded joints*. Praha : ČVUT, 2018. Master Thesis. Vedoucí práce Ing. Taťána Vacková Ph.D..
- [3] **BĚHÁLEK, Luboš.** *Polymery*. *publi.cz*. [Online] 2016. [Citace: 30. 4 2019.] <https://publi.cz/books/180/Cover.html>. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [4] **MLEZIVA, Josef a ŠŇUPÁREK, Jaromír.** *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha : Sobotáles, 2000. ISBN 978-80-8592-72-7.
- [5] **KUTZ, Myer.** *Applied plastics engineering handbook: processing, materials, and applications*. Boston, MA : Elsevier, 2016. ISBN 978-032-3390-408.
- [6] **BAYER MATERIALSCIENCE LLC.** *Snap-Fit Joints for Plastics - A Design Guide*. Pittsburgh : autor neznámý, 2012.
- [7] **LOYDA, Miloslav.** *Svařování termoplastů*. Praha : Uno, 2001. ISBN 80-238-6603-6.
- [8] **DAŘOUREK, Karel.** *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-807-3722-791.
- [9] **KUNG, Suk-Joong L.** *Sintering: densification, grain growth, and microstructure*. Burlington : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 978-0-7506-6385-4.
- [10] **SCHMID, Manfred.** *Laser sintering with plastics: technology, processes and materials*. Munich : Hanser Publications, 2018. ISBN 978-156-9906-835.
- [11] **ČIŽMÁROVÁ, Elena a SOBOTOVÁ, Jana.** *Nauka o materiálu I. a II.: cvičení*. Praha : České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [12] **PROCHÁZKA, Martin.** *Analýza svarových spojů z termoplastů*. Brno : VUT, 2018. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Roman Gratza Ph.D..
- [13] **Prospector: ICORENE® 1613 BK85 Datasheet**. 2011. .
- [14] **The Dow Chemical Company: DOWLEX 2629.10UE Datasheet**. 2010.
- [15] **Resinex: RX 101 BLACK 9003, Black compound LLDPE resin datasheet**. 2008.. .

10 Seznam použitých obrázků

Obr. 1 Vzorek, kde je adheze ke kovu vyšší než k plastu	10
Obr. 2 Struktura amorfního plastu vlevo, semikrystalického vpravo [3]	12
Obr. 3 Uspořádání řetězců v termoplastu [1].....	12
Obr. 4 Schéma zesíťování v reaktoplastu [1].....	14
Obr. 5 Příklad jednorázové západky [5]	15
Obr. 6 Příklad západky s prvkem pro jednoduché uvolnění [5]	16
Obr. 7 Vlevo příklad konzolové západky, vpravo nahoře prstencová západka, vpravo dole sférická západka [6]	16
Obr. 8 Selhání koheze (a), selhání adheze (b) [1]	18
Obr. 9 Svařování na tupo horkým tělesem [7]	21
Obr. 10 Diagram tlak-čas u svařování na tupo horkým tělesem [7]	22
Obr. 11 Ruční svařování horkým plynem [7].....	23
Obr. 12 Svařování horkým plynem s rychlotryskou [7]	24
Obr. 13 Tvar a velikost částic: a) suspenzní polymerace, b) vysrážení, c) kryogenní mletí, d) vytlačování [10]	26
Obr. 14 Spékání prášku – plné sjednocení nebo tvorba slinutých krčků [10]	27
Obr. 15 Navrhnuté rozměry vzorku.....	29
Obr. 16 Vlevo model vany , vpravo fotografie použité 3D tiskárny ORIGINAL PRUSA i3 Mk3	29
Obr. 17 Formovací silikon ve vaně před vytvrzením	30
Obr. 18 Silikonová forma po vytvrzení.....	30
Obr. 19 Fotografie tanice pro provedení metody DSC s přístrojem NETZSCH STA 409 PG LUXX	31
Obr. 20 Fotografie použitého trhacího stroje ZD 10 Walter	32
Obr. 21 Silikonová forma s dělící přepážkou	33

Obr. 22 Vlevo čtvereček slinutého filmu Ico5', vpravo vychladnutá vrstva slinutého prášku na válečkách [2]	34
Obr. 23 Naplněné formy (vlevo), slinuté vzorky po vyndání z formy (vpravo)	34
Obr. 24 Porovnání povrchů vzorků 1.(nahore) a 3. (dole) série pečení	35
Obr. 25 Část grafu DSC z oblasti teploty tání pro měřené prášky	36
Obr. 26 Mez pevnosti DowZS, RxZS, IcoZS	37
Obr. 27 Porovnání meze pevnosti u prášků DOWLEX.....	38
Obr. 28 Meze pevnosti pro časy plazmových modifikací spoje RI	38
Obr. 29 Porovnání meze pevnosti pro 4. a 5. minutu plazmové úpravy	39
Obr. 30 Porovnání meze pevnosti vzorků s filmem slinutého Ico5'	40
Obr. 31 Lom u vzorků s filmem slinutého Ico5'	40

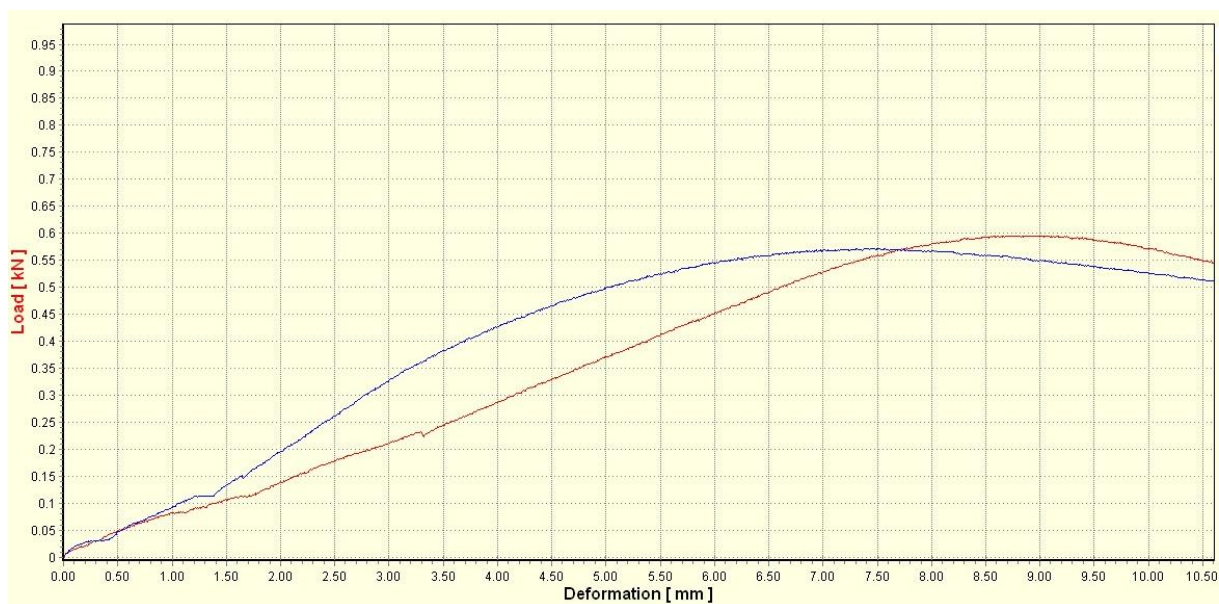
11 Seznam tabulek

Tab. 1 Vlastnosti polyethylenu [3]	13
Tab. 2 Vlastnosti polypropylenu [3]	13
Tab. 3 Svařovací časy PE-HD podle fází [7].....	22
Tab. 4 Svařovací parametry [7]	24
Tab. 5 Použité práškové materiály	28
Tab. 6 Výpis kombinací mezi ZS-PE a PL-PE prášky	33
Tab. 7 Porovnání pevností materiálů podle technických listů od výrobců a pevností vzorků.....	37
Tab. 8 Vliv doby plazmování na meze pevnosti pro spoje Resinex-ICORENE.....	39

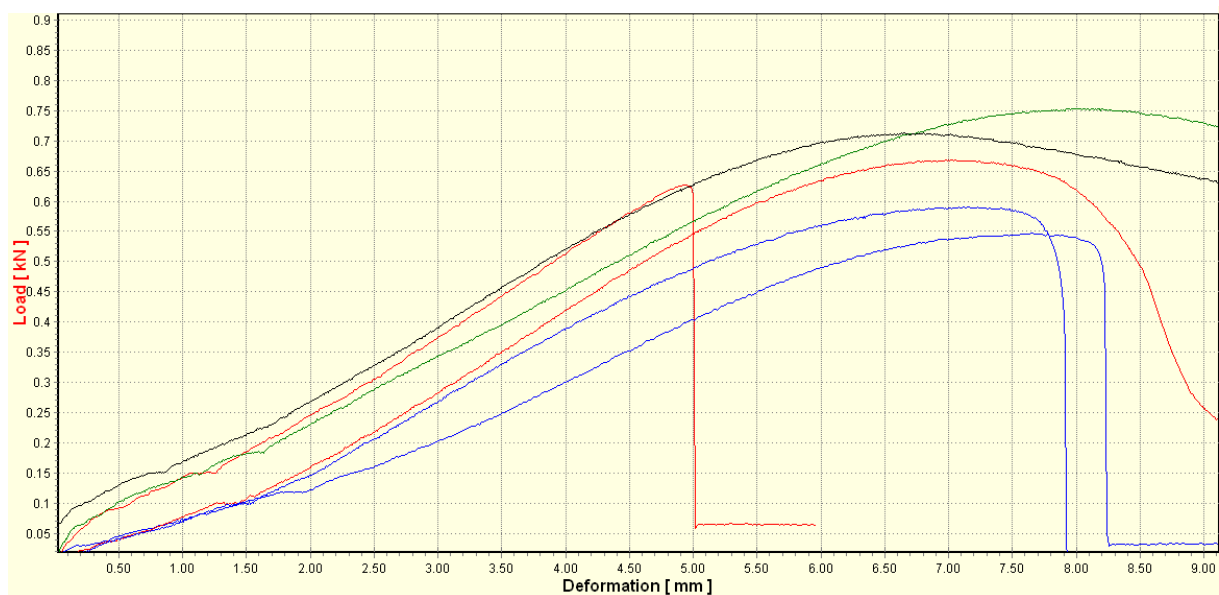
12 Seznam příloh

Příloha 1 Pracovní diagram tahové zkoušky vzorků DowZS (modrá) a D2 (červená)	47
Příloha 2 Pracovní digram z tahové zkoušky časové řady prášků ICORENE	47

Přílohy



Příloha 1 Pracovní diagram tahové zkoušky vzorků DowZS (modrá) a D2 (červená)



Příloha 2 Pracovní digram z tahové zkoušky časové řady prášků ICORENE