



Využití technologického odpadu PA12 z technologie Multi Jet Fusion v procesu vstřikování

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Václav Musil

Vedoucí práce:

Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Jiří Šafka, Ph.D.

Katedra výrobních systémů a automatizace





Zadání bakalářské práce

Využití technologického odpadu PA12 z technologie Multi Jet Fusion v procesu vstřikování

Jméno a příjmení: **Václav Musil**
Osobní číslo: S17000088
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše na dané téma (3D tisk, technologie Multi Jet Fusion).
2. Mísení technologického odpadu PA12 z technologie Multi Jet Fusion s originálním (novým) materiálem ve zvoleném poměru.
3. Vstřikování zkušebních těles z práškového materiálu PA12, technologického odpadu a ze směsi nového a odpadového materiálu.
4. Simulace stárnutí vstřikovaných dílů pomocí tepelného zatížení pro posouzení jejich životnosti.
5. Analýza užitečných vlastností výstřiků před a po tepelném stárnutí.
6. Zhodnocení dosažených výsledků, závěr.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

obrázky, tabulky, grafy
cca 30 stran textu
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] RIEDELBAUCH, Julius, Dominik RIETZEL a Gerd WITT. Analysis of material aging and the influence on the mechanical properties of polyamide 12 in the multi jet fusion process. *Additive Manufacturing*. 2019, Vol. 27, May 2019, 16-49. ISSN 2214-8604.
- [2] O'CONNOR, Heather J., Andrew N. DICKSON a Denis P. DOWLING. Evaluation of the mechanical performance of polymer parts fabricated using a production scale multi jet fusion printing process. *Additive Manufacturing*. 2018, Vol. 22, August 2018, 381-387. ISSN 2214-8604.
- [3] ALMEIDA, Henrique A. a Joel C. VASCO, eds. *Progress in Digital and physical manufacturing: proceedings of ProDPM' 19*. Cham: Springer, 2020. ISBN 978-3-030-29040-5.
- [4] LEWANDOWSKI, G., E. RYTWIŃSKA a E. MILCHERT. Physical properties and application of polyamide 12. *Polimery*. 2006, Vol. 51, No. 11-12, 829-835. ISSN 0032-2725.
- [5] GOODSHIP, Vanessa, ed. *ARBURG Practical guide to injection moulding*. Shawbury: Smithers Rapra, 2017. ISBN 978-1-91024-294-0.
- [6] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [7] Technické podklady firmy Hewlett Packard.
- [8] Mezinárodní standardy ISO.

Vedoucí práce:

Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Jiří Šafka, Ph.D.
Katedra výrobních systémů a automatizace

Datum zadání práce:

15. listopadu 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

15. května 2022

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

6. června 2021

Václav Musil

Využití technologického odpadu PA12 z technologie Multi Jet Fusion v procesu vstřikování

Use of technological waste PA12 from Multi Jet Fusion technology in the injection moulding process

Anotace

Bakalářská práce se zabývá experimentální studií využití technologického odpadu práškového polymeru PA12 z aditivní výroby Multi Jet Fusion v procesu vstřikování plastů. Hodnoceny jsou základní mechanické, tepelné a strukturní vlastnosti výstřiků v závislosti na typu a množství technologického odpadu. Výsledky jsou porovnávány s vlastnostmi výstřiků, které byly zhotoveny z originálního polymeru. Využití technologického odpadu je provedeno také z hlediska hodnocení životnosti výstřiků, které bylo simulováno jejich tepelným zatížením při teplotě 140 °C po dobu až 1000 hodin.

Klíčová slova: polyamid 12, technologický odpad, Multi Jet Fusion, vstřikování, tepelné stárnutí, tahové vlastnosti, ohybové vlastnosti, vrubová houževnatost

Annotation

The bachelor's thesis deals with an experimental study of the use of technological waste of polymer powder PA12 from the additive production Multi Jet Fusion in the process of injection moulding of plastics. The basic mechanical, thermal and structural properties of injected samples depending on the type and amount of technological waste are evaluated. The results are compared with the properties of the injected samples, which were made of the original polymer. The use of technological waste is also made in terms of evaluating the life of injected samples, which was simulated by their thermal load at a temperature of 140 °C for up to 1000 hours.

Key words: polyamide 12, technological waste, Multi jet fusion, injection moulding, thermal aging, tensile properties, bending properties, notched toughness

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a čas, který mi během zpracovávání bakalářské práce věnoval.

Obsah

Přehled použitých zkratk a symbolů.....	8
1 Úvod	10
2 Teoretická část.....	12
2.1 <i>Aditivní technologie Multi Jet Fusion.....</i>	<i>12</i>
2.1.1 Materiály používané pro technologii MJF	15
2.1.2 Popis zařízení pro technologii MJF	16
2.1.3 Parametry 3D tisku.....	17
2.2 <i>Technologie vstřikování</i>	<i>18</i>
2.2.1 Fáze plastifikace.....	21
2.2.2 Fáze vstřikování	21
2.2.3 Fáze chlazení, tuhnutí a dotlaku	22
2.2.4 Základní procesní parametry ovlivňující kvalitu dílu	23
3 Experimentální část.....	25
3.1 <i>Příprava zkušebních vzorků pro experimentální výzkum.....</i>	<i>25</i>
3.2 <i>Stanovení mechanických vlastností.....</i>	<i>27</i>
3.2.1 Stanovení ohybových vlastností	28
3.2.2 Stanovení vrubové houževnatosti metodou Charpy	30
3.2.3 Stanovení tahových vlastností	31
3.3 <i>Stanovení tvarové stálosti za zvýšené teploty.....</i>	<i>34</i>
4 Vyhodnocení a diskuze výsledků.....	36
4.1 <i>Vyhodnocení změny zabarvení</i>	<i>36</i>
4.2 <i>Vyhodnocení a diskuze mechanických vlastností</i>	<i>37</i>
4.2.1 Vyhodnocení mechanických vlastností před tepelným stárnutím	37
4.2.2 Vyhodnocení mechanických vlastností po tepelném stárnutí.....	41
4.3 <i>Vyhodnocení tvarové stálosti za zvýšené teploty.....</i>	<i>45</i>
5 Závěr	46
Seznam použité literatury	48
Seznam příloh.....	50

Přehled použitých zkratk a symbolů

A	počáteční průřez zkušebního tělesa	[mm ²]
a_{cA}	vrubová houževnatost Charpy	[kJ/m ²]
b_A	šířka zkušebního tělesa pod vrubem	[mm]
E_c	korigovaná energie spotřebovaná při přeražení zkušebního tělesa	[MPa]
E_f	modul pružnosti v ohybu	[MPa]
E_t	modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	síla	[N]
h	tloušťka zkušebního tělesa	[mm]
p_i	vnitřní tlak	[MPa]
p_z	zbytkový tlak	[MPa]
s_K	dráha šneku	[mm]
s_N	dráha nástroje	[mm]
t	čas	[s]
t_d	doba dotlaku	[s]
t_{ch}	doba chlazení	[s]
t_m	manipulační čas	[s]
t_{pl}	doba plastifikace	[s]
t_{s1}	doba uzavírání formy	[s]
t_{s2}	doba přisuvu vstřikovací jednotky k formě	[s]
t_{s3}	doba otevírání formy	[s]
t_v	doba vstřikování	[s]
ε_1	poměrné prodloužení tahem 0,0005	[-]
ε_2	poměrné prodloužení tahem 0,0025	[-]
ε_{f1}	deformace ohybem 0,0005	[-]
ε_{f2}	deformace ohybem 0,0025	[-]
ε_{tb}	jmenovité poměrné prodloužení při přetržení	[%]
σ	napětí v tahu	[MPa]
σ_1	napětí v tahu, při poměrném prodloužení ε_1	[MPa]
σ_2	napětí v tahu, při poměrném prodloužení ε_2	[MPa]
σ_{f1}	napětí v ohybu při deformaci ε_{f1}	[MPa]
σ_{f2}	napětí v ohybu při deformaci ε_{f2}	[MPa]
σ_{fM}	mez pevnosti v ohybu	[MPa]
σ_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]

PA	polyamid
PP	polypropylen
TPU	termoplastický polyuretan
3MF	3D výrobní formát (3D Manufacturing Format)
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DSC	diferenční snímací kalorimetrie
FDM	Fused Deposition Modeling
MJF	Multi Jet Fusion
SLA	Stereolitografie
SLS	Selective Laser Sintering
VST	Vicatův stupeň
XML	rozšiřitelný značkovací jazyk (Extensible Markup Language)

1 Úvod

Aditivní technologie nabízí možnost rychlé prototypové výroby dílů. Jsou perspektivní nejen z technického hlediska, ale také proto, že velmi dobře odpovídají trendu chytré výroby, která má zajistit vysokou variabilitu pro výrobu menších sérií při zachování stejné kvality a přesnosti. Na celkové průmyslové výrobě se podílejí ca 0,7 %, ale existují i odvětví, kde je tento podíl již 10 – 20 %. Jedná se zejména o medicínské výrobky (implantáty, sluchadla nebo protézy), elektroniku, strojírenský, letecký a automobilový průmysl [1]. Aditivních procesů existuje celá řada a jeden z nejmodernějších způsobů je technologie Multi Jet Fusion (MJF), který lze použít i pro sériovou výrobu mechanicky namáhaných nepohledových dílů z polymerních prášků. Výrobní proces je do značné míry zatížen produkcí velkého množství technologického odpadu (nevyužitého prášku), který lze ca z 80 % znovu použít. Kromě jiného vzniká také technologický odpad práškového polymeru z očištěných dílů, který již není pro další tisk používán. Z environmentálního hlediska, ale také z hlediska ekonomické náročnosti výrobního procesu, je pro opětovné zpracování snahou využít všechen odpad, který vzniká ve výrobních procesech. Obdobně je tomu i v tomto případě a proto vznikla myšlenka využít technologický odpad práškového polymeru z 3D tisku (MJF) pro výrobu dílů zhotovených technologií vstřikování, která patří v plastikářském průmyslu k nejrozšířenějšímu výrobnímu procesu zpracování plastů.

Cílem bakalářské práce je zhodnotit využití technologického odpadu práškového polymeru PA12 z 3D tisku (technologie Multi Jet Fusion) pro výrobu vstřikovaných dílů. Pro tyto účely se předpokládá využití technologického odpadu ze sudu výrobní jednotky a prášku z očištěných dílů. Vstřikováním budou vyrobeny vzorky, které budou zhotoveny ze sta procent odpadu z dílu a z odpadu výrobní jednotky (práškového polymeru, který současně slouží jako podpěra při 3D tisku). Dále budou vstřikovány vzorky ze směsi materiálu tvořené odpadem z výrobní jednotky a novým polymerním práškem v poměru 80/20, který je pro opětovný 3D tisk doporučován výrobcem jako maximálně vhodný. Kromě těchto materiálů bude pro vstřikování použit i čistý polymerní prášek, který umožní porovnání vlastností výstřiků zhotovených z původního materiálu a technologického odpadu. V rámci experimentálního měření budou v souladu s mezinárodními standardy studovány základní mechanické vlastnosti výstřiků při tahovém, ohybovém a rázovém namáhání.

Hodnocena bude také jejich tvarová stálost za působení teploty. Tyto vlastnosti budou sledovány před i po tepelném (termooxidačním) stárnutí. Záměrem tepelného stárnutí je zhodnotit vliv typu a množství technologického odpadu na vlastnosti výstřiků v průběhu jejich životnosti, resp. zhodnotit, zda použití technologického odpadu nebude mít oproti čistému polymeru vliv na životnost vstříkované součásti.

2 Teoretická část

S ohledem na řešenou problematiku praktické části bakalářské práce se teoretická část zabývá základními principy a procesními parametry poměrně nové technologie 3D tisku „Multi Jet Fusion“, materiály využívanými pro tuto technologii a jejím srovnáváním s ostatními procesy (metodami) 3D tisku. Následující část je zaměřena na technologii vstřikování, její principy a procesní parametry z hlediska konečných vlastností vstřikovaných dílů.

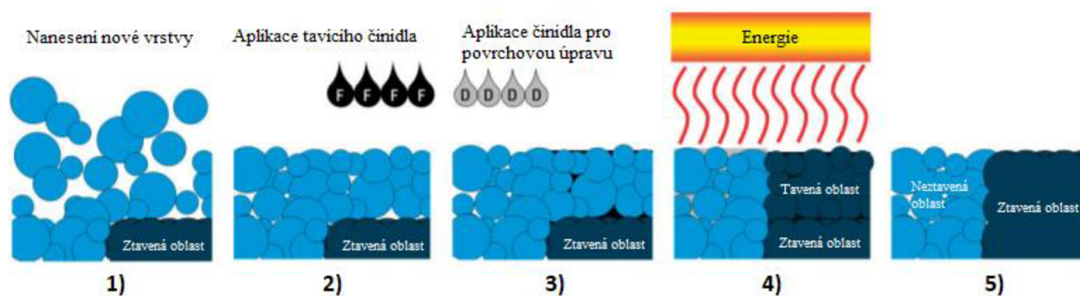
2.1 Aditivní technologie Multi Jet Fusion

Multi Jet Fusion (zkráceně MJF) je druh aditivní technologie (3D tisku) pro výrobu prototypových dílů postupným nanášením tenkých vrstev materiálu na sebe. Tím se liší od konvenčních metod, jako je například frézování či soustružení, kde je naopak materiál ubírán. Technologie 3D tisku umožňuje výrobu jednoduchých, ale i velmi složitých dílů s komplexní vnější i vnitřní geometrií, kterou by nebylo možné (nebo jen obtížně) vyrobit jiným způsobem. Aditivní technologie mají své uplatnění především v prototypové a kusové výrobě. Technologie Multi Jet Fusion má navíc potenciál proniknout i do výroby sériové. Mezi nejrozšířenější aditivní technologie patří metody založené na spékání polymerních prášků (Selective laser sintering – SLS), fotopolymeraci (Stereolitografie – SLA) nebo tavení extrudovaných polymerů (Fused deposition modeling – FDM), tzv. filamentů [2].

Technologie 3D tisku MJF byla uvedena na trh společností Hewlett Packard (HP) v roce 2014 [3]. Jedná se o systém aditivní výroby na bázi práškových materiálů, který je podobný technologii selektivního spékání laserem (SLS). U obou technologií dochází ke spojení polymeru ve formě prášku po vrstvách. Liší se především zdrojem tepla, který způsobuje potřebné spečení prášku. U technologie SLS je zdrojem tepla plynový CO₂ laser a u technologie MJF se používá infračervené světlo (tepelná energie). Stejně jako u jiných práškových aditivních technologií slouží nespečený okolní prášek jako podpora dílu a není zde potřeba jiného podpůrného materiálu, jako například u technologie FDM, která patří mezi nejběžnější technologie 3D tisku, kdy materiál (filament) je tlačěn na základovou desku přes rozehrátou trysku.

Při technologii MJF je výrobek (na základě digitálního modelu/3D CAD dat) vrstven na základovou desku (stavební platformu), která během procesu klesá ze své nejvyšší polohy. Přenos 3D CAD dat (ve formátu STL – Stereo Lithography) na stroj probíhá pomocí speciálního softwaru dodávaného výrobcem. Nativní formát STL ale neumožňuje využít plný potenciál této technologie a z dnešního pohledu je zastaralý, neboť obsahuje pouze geometrické informace o modelu a neobsahuje voxelový popis (voxel je objemový element, je to jako pixel pro 2D), který MJF využívá. Společnost HP se proto aktivně podílí na vývoji formátu 3MF (3D Manufacturing Format), což je platforma založená na XML kódování. Vyvinutí tohoto formátu by mělo technologii MJF umožnit tisknout díly s voxely jiných barev, různých mechanických a dokonce i elektrických vlastností [4].

Při 3D tisku technologií MJF je prášek dopravován ze zásobníku na základovou desku umístěnou ve vyhřátém prostoru, pomocí válce je rovnoměrně rozložen (stejně jako u metody SLS) a tento prášek je zahřát těsně pod teplotu tání tisknutého materiálu. V další fázi procesu jsou aplikovány dvě odlišné kapaliny (činnidla/roztoky), které jsou aplikovány za pomoci tiskové hlavy s tryskami pokrývající celou šíři pracovní plochy. Tyto trysky jsou podobné tryskám, které používají 2D tiskárny. Jedno z činnidel (tzv. pojivo, resp. tavící činnidlo) slouží ke spojení materiálu a je aplikováno na místa, ve kterých je nutné roztavit částice polymeru. Druhé činnidlo (činnidlo pro povrchovou úpravu) je nanášeno po obvodu kontur dílu a zajišťuje vysoké rozlišení povrchových detailů. Po aplikaci činnidel dochází pomocí tepelné energie k roztavení materiálu v oblasti činnidla, které slouží k jeho spojení. Proces nanášení polymerů a činnidel je opakován až do konečného tvaru výrobku. Schéma výrobního procesu je zřejmé z obr. 2.1. Pro lepší absorpci záření, respektive jeho přeměnu na tepelnou energii má tavící činnidlo černou barvu. To způsobuje, že výrobky vyrobené tímto způsobem mají po vyjmutí z tiskárny světle šedou barvu. Typické pro tyto výrobky je hladký zrnitý povrch bez viditelných vrstev. Drsnost i barva povrchu dílu může být upravena dalším zpracováním, jako je například barvení, impregnování, otryskávání, pokovování atd. [2].



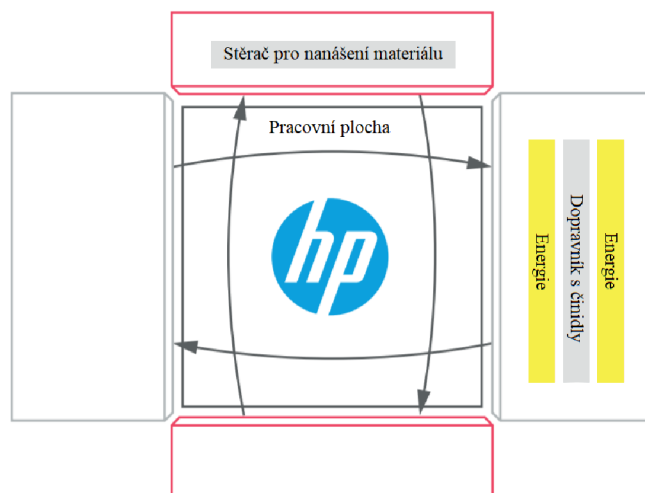
Obr. 2.1 Schéma výrobního procesu [4]

Český partner společnosti HP 3Dees Industries s.r.o. uvádí, že „jde o jedinou technologii 3D tisku, která je schopna nákladově konkurovat tradiční sériové výrobě plastových dílů. HP Multi Jet Fusion představuje nový způsob, jak prototypovat a vyrábět funkční a kvalitní díly, avšak desetkrát rychleji a při polovičních nákladech v porovnání s doposud známými technologiemi [5].“ Takto vysoká produktivita je dosahována rozdělením tisku do dvou zmiňovaných kroků (nanesení materiálu a nanesení činidel, tavení a spojení polymeru), které jsou prováděny dvěma na sebe kolmými vozíky pracujícími současně, což je znázorněno na obr. 2.2. Pro maximální produktivitu výroby a optimální funkčnost a vlastnosti výrobku může být každý z těchto kroků optimalizován z hlediska rychlosti nanášení materiálu, množství dodané tepelné energie apod. Ve srovnání s technologií SLS, která při výrobě dílu využívá rovněž práškového polymeru je u této technologie rychlost chlazení a odstranění přebytečného materiálu výrazně rychlejší [4].

Technologie MJF má oproti jiným aditivním technologiím kromě poměrně vysoké produktivity i jiné výhody [1]:

- Až 80 % nespečeného prášku může být recyklováno a znovu použito (u SLS je to pouze 50 %).
- Využíváním činidla pro povrchovou úpravu se zlepšuje kvalita komponentů, napomáhá se k tisku ostrých hran a zvyšuje se jakost povrchu a rozměrová přesnost dílů.
- Výrobky z MJF jsou oproti SLS pevnější (především ve vertikálním směru tisku), mají vyšší pružnost a jejich mechanické vlastnosti jsou více homogenní.
- Díky vyšší produktivitě a opětovnému využití přebytečného materiálu jsou náklady na tisk nižší než například u technologie SLS.

I přes všechny vyjmenované přednosti nemusí být tato technologie vždy vhodnou volbou. Výrobky jsou náchylné ke křivení (z důvodu nepoužívání podpěr), proto by měly být konstruovány bez velkých rovných ploch. Nevýhodou MJF (ve srovnání s klasickými FDM tiskárnami) je poměrně vysoká cena zařízení a oproti jiným aditivním technologiím je pro MJF používáno jen omezené množství materiálů.



Obr. 2.2 Schéma procesu tisku MJF [4]

2.1.1 Materiály používané pro technologii MJF

Z důvodu krátkého působení technologie MJF na trhu a specifických požadavků na materiál je jedním z největších nedostatků této technologie velmi malé množství použitelných materiálů, kterých je v současné době pouze několik. Nejčastěji jsou používány:

- Polyamid 11 (PA 11), jedná se o biokompatibilní a ekologicky udržitelný termoplast, který je získáván polykondenzací kyseliny 11-aminoundekanové, jež se získává z ricinového oleje. Polymer je tvárný, odolný vůči rázu a méně navlhavý než ostatní alifatické typy polyamidů (PA6, PA 66) [6].
- Polyamid 12 (PA12), který je vyráběn polymerací laurolaktamu. Polymer se vyznačuje dobrou chemickou odolností a výbornými mechanickými vlastnostmi, zejména rázovou odolností. Díly z tohoto materiálu vytisknuté technologií MJF mají ve srovnání s SLS nižší pórovitost [6].

- Polyamid 12 vyztužený skleněnými kuličkami, který je vhodný pro výrobu dílů, kde je potřeba velmi vysoká tuhost a rozměrová stabilita [6].
- Termoplastický polyuretan (TPU), který je vysoce houževnatý a odolný vůči rázu a abrazi [6].
- Polypropylen (PP), který se vyznačuje velmi dobrou chemickou odolností, odolností vůči navlhavosti a dlouhou životností. Jedná se o materiál, který lze opětovně zpracovávat až ze 100 % [7].

Materiály využívané technologií MJF lze dělit také podle jejich stavu na:

- nový materiál,
- opětovně použitelný materiál,
- směs nového a opětovně použitelného materiálu,
- odpadní materiál [8].

2.1.2 Popis zařízení pro technologii MJF

Společnost HP dodává tiskárny ve třech různých řadách. Základní řada, vhodná pro výrobu prototypů a schopná tisknout i barvené díly, je řada HP 300/500. Modely v této řadě se cenově pohybují od 57.000 do 110.000 \$ (1,2 – 2,3) mil. Kč. Původní, nejběžnější a nejrozšířenější řada, které bude věnována tato kapitola je řada HP4200 (použita také v rámci experimentálního měření), jejíž pořizovací cena je od 270.000 do 430.000 \$ (5,8 – 9,3 mil. Kč). Řada pro nejnáročnější uživatele určena do průmyslové výroby je řada HP 5200 v cenové relaci od 350.000 do 500.000 \$ (7,5 – 10,7) mil. Kč [9].

Tiskárna HP Jet Fusion 4200 se skládá z tiskárny samotné, procesní stanice a výrobní jednotky (tiskárna je na obr 2.3 vlevo a procesní stanice vpravo). Informace o nastavení procesních parametrů a o stavu tisku jsou sledovány v uživatelském rozhraní na předním panelu. Tiskárna obsahuje zahřívací a tavící lampy, tepelnou kameru, základovou desku, která je součástí výrobní jednotky, válec pro rovnoměrné nanášení materiálu, tiskovou hlavu pro nanášení činidel a čisticí zařízení. Tak jako u jiných aditivních technologií lze i zde vytisknuté díly po ochlazení dále povrchově upravovat. Následné zpracování i chlazení zajišťuje procesní stanice. Procesní stanice obsahuje vysavač pro odstranění přebytečného práškového materiálu, který slouží

současně jako podpora při stavbě dílu. Pro dokonalé odstranění přebytečného prášku následuje otryskávání dílu stlačeným vzduchem nebo abrazivem. Procesní stanice dále obsahuje mísící jednotku, skladovací a externí nádrž pro již použitý materiál, kazety s čerstvým materiálem o objemu 30 nebo 300 litrů a další příslušenství. Procesní stanice zajišťuje automatické mísení přebytečného materiálu s materiálem novým a plnění tohoto materiálu do výrobní jednotky, čímž se dosahuje již zmíněná osmdesáti procentní recyklovatelnost. Výrobní jednotka slouží jako zásobník pro přenos materiálu nebo vytištěného dílu mezi procesní stanicí a tiskárnou. Tiskárna i procesní stanice obsahují také ethernetovou zásuvku, což umožňuje snadnou aktualizaci softwaru [8].



Obr. 2.3 Tiskárna HP Jet Fusion 4200 (vlevo) s procesní stanicí (vpravo) [10]

2.1.3 Parametry 3D tisku

Technologie MJF nabízí možnost výroby dílů, které by bylo obtížné vyrobit jinými technologiemi, ale tak jako každý jiný výrobní proces má i MJF svá omezení.

Velmi důležitým parametrem každé technologie je rychlost/produktivita. Tiskárna HP Jet Fusion 4200 je schopná tisknout 4115 cm^3 za hodinu, přičemž tisk plně naplněné komory (rozměry komory jsou $380 \times 284 \times 380 \text{ mm}$) ve výchozím/silném tisku trvá přibližně 16 hodin a 20 minut (doba tisku se může lišit podle velikosti a počtu dílů). V režimu rychlého tisku trvá vytisknutí pouze 10 hodin. Následující přirozené chlazení při plně naplněné komoře lze očekávat od 31 do 46 hodin, ale s využitím funkce rychlého chlazení lze tento čas snížit na 10 hodin. To znamená, že při využití rychlého tisku, rychlého chlazení a užití dvou výrobních jednotek, lze tisknout nepřetržitě [8]. Největší vliv na dobu tisku má počet vrstev, což je nutné zohlednit při konstruování dílu. Jedna vrstva má tloušťku $0,08 \text{ mm}$ [6]. Kvalita tisku se u MJF (z důvodu využívání voxelů) udává v jednotkách dpi (dots per inch), stejně jako u běžných 2D tiskáren.

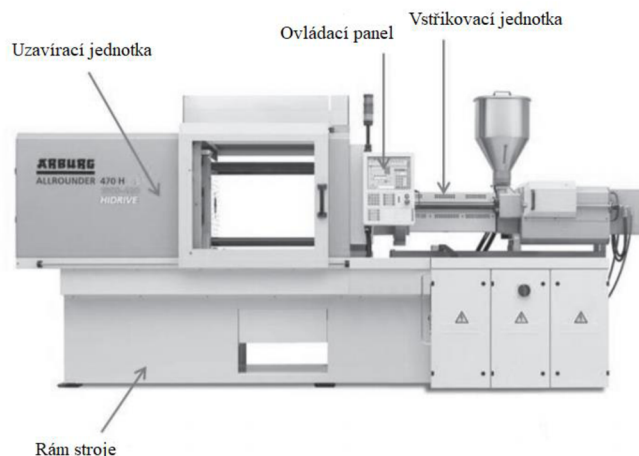
Rozlišení MJF tiskárny je 1200 dpi (1 tečka na 0,022 mm). MJF je tedy velmi přesná technologie. Pro srovnání paprsek laseru u SLS technologie má průměr 0,3 – 0,4 mm. Přesnost 1200 dpi vede k rozměrové přesnosti $\pm 0,3 \%$ s maximální odchylkou 0,2 mm. Minimální tloušťka stěny je 0,6 mm, nicméně s ohledem na stabilitu dílu je doporučováno používat tloušťku stěny alespoň 1 mm [2].

2.2 Technologie vstřikování

V současnosti je vstřikování jedna z nejrozšířenějších technologií pro zpracování a výrobu plastových dílů, zejména na bázi termoplastů. První vstřikovací stroj byl vyroben a patentován v roce 1870 bratry Hyattovými. Jednalo se o stroj pracující na bázi přímočarého vratného pohybu a sloužil pro výrobu držáků na štětky na holení [11].

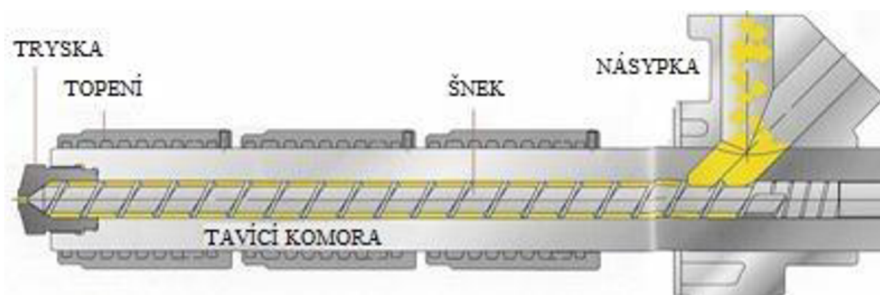
Plastové výrobky zhotovené touto technologií jsou nenahraditelnou součástí našich každodenních životů. Mohou to být výrobky jak finálního charakteru, tak polotovary. Technologie vstřikování se vyznačuje především dobrou rozměrovou a tvarovou přesností. Jedná se o diskontinuální cyklický proces skládající se z tavení a plastifikace materiálu, rychlého plnění formy taveninou plastu, následného chlazení a vyjmutí dílu. Při použití vertikální dělicí roviny lze tento proces plně automatizovat, proto je vstřikování jednou z nejproduktivnějších a nejpoužívanějších technologií zpracování plastů. Z důvodu vysokých počátečních nákladů na stroj i vstřikovací formu se využívá výhradně ve velkosériové a hromadné výrobě [13].

Vstřikovací stroj (viz obr. 2.4) se skládá ze čtyř hlavních částí: vstřikovací jednotky, uzavírací jednotky, ovládacího panelu a rámu stroje s elektrickým nebo hydraulickým pohonem [12].



Obr. 2.4 Vstřikovací stroj [12]

Existují dva typy vstřikovacích jednotek u vstřikovacích strojů. Jsou to jednotky pístové a jednotky šnekové. Pístové jednotky jsou dnes používány jen v omezené míře. V těchto jednotkách jsou umístěny písty, před které je dávkován granulát vstřikovaného materiálu, v tavicí komoře je zahřát na odpovídající teplotu a následně vstřikován do dutiny formy, kde je postupně chlazen pomocí temperačního systému [12]. Pístové jednotky byly postupně nahrazovány jednotkami šnekovými, které mají mnoho výhod. Například výrazně lépe homogenizují roztavený plast, zajišťují přesnější dávkování hmoty, mají vyšší produktivitu atd. [13]. Šnekové jednotky mohou být použity pro vstřikování termoplastů, elastomerů i reaktoplastů. Šnek v těchto jednotkách dopravuje granulát do tavicí komory a hromadí roztavený materiál před čelem šneku, přičemž ustupuje dozadu až do doby než naplastifikuje dostatečné množství taveniny. Následně se šnek zastaví a jako píst vtláčí taveninu do dutiny formy. Parametry šnekové vstřikovací jednotky jsou: poměr délky šneku ku průměru šneku, plastikační kapacita, vstřikovací kapacita, objemová vstřikovací rychlost a vstřikovací tlak [13]. Schéma šnekové vstřikovací jednotky je uvedeno na obr. 2.5.



Obr 2.5 Šneková vstřikovací jednotka [13]

Uzavírací jednotka zajišťuje pohyby vstřikovací formy. Forma je upnuta na pevnou a pohyblivou upínací desku stroje pomocí upínek (mechanicky), hydraulického nebo magnetického systému. Pro plynulý pohyb a zajištění rovnoběžnosti upínacích desek stroje obsahuje uzavírací jednotka zpravidla vodící tyče. U malých vstřikovacích strojů se používají dvě vodící tyče a u větších čtyři. Světlost mezi těmito tyčemi určuje maximální rozměry formy. Pro vytvoření dostatečné uzamykací síly, která udržuje formu uzavřenou během vstřiku a dotlaku jsou používány hydraulické nebo mechanické uzamykací systémy (nejčastěji se jedná o kloubový mechanismus), ale možná je i kombinace obou způsobů. Dostatečná síla je taková, aby nedocházelo k přetokům taveniny v dělicí rovině [14]. Podle pohonu, který zajišťuje posuvy pohyblivé desky, se uzavírací jednotky dělí na elektrické (zdrojem pohybu je elektromotor) nebo

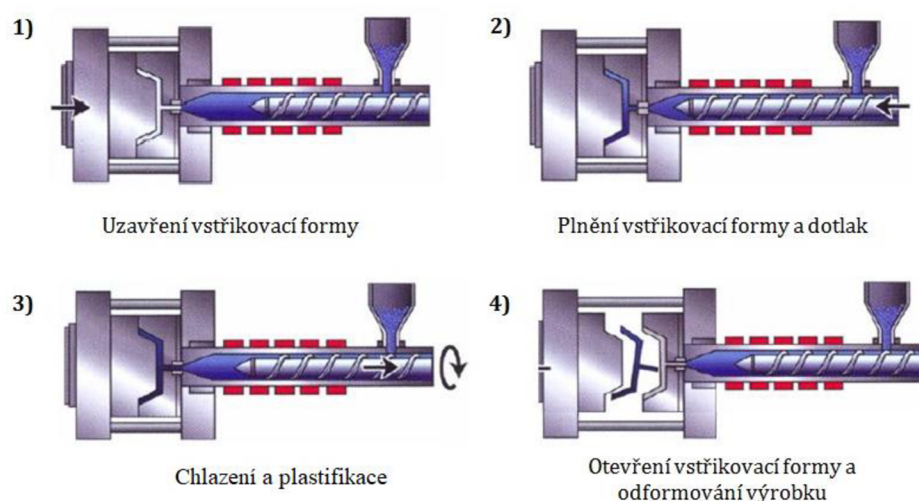
hydraulické (zdrojem pohybu je hydraulický píst). Co se týče formy samotné, ta zajišťuje dopravu taveniny do dutiny formy pomocí vtokového systému, odvádí teplo z výrobku, a plní i mnoho další funkcí, zejména odformování dílu z dutiny formy. Mohou být konstruovány pro jeden výstřik (jednonásobné formy) nebo pro více výstřiků (vícenásobné formy). U vícenásobných forem mohou být dutiny umístěny symetricky do tvaru hvězdy nebo v řadě, přičemž výhodnější je uspořádání do hvězdy, kde jsou předpoklady k rovnoměrnému plnění taveniny plastu při stejných teplotách a stejném tlaku. Pro plnou automatizaci procesu obsahuje forma také vyhazovací systém. Nejčastěji se jedná o systémy mechanické, jako jsou vyhazovací kolíky nebo stírací desky. Další možností je například pneumatický systém [13].

Ovládací panel (kontrolní a řídicí jednotka) slouží k obsluze stroje. Hlavním prvkem této jednotky je regulátor, ten kontroluje celý proces vstřikování a dorovnává případné odchylky na požadovanou úroveň. Ovládací panel rovněž slouží pro změnu parametrů vstřikovacího cyklu, zobrazování chybových hlášení apod. [14].

Vlastní proces vstřikování lze rozdělit do čtyř fází:

- fáze plastifikace,
- fáze vstřikování,
- fáze chlazení, tuhnutí a dotlaku,
- fáze odformování [12].

Schéma procesu vstřikování je zobrazeno na obr. 2.6.



Obr 2.6 Schéma vstřikovacího procesu [14]

2.2.1 Fáze plastifikace

Zpracovávaný granulát, který může mít tvar válečků, kuliček, čoček nebo krychliček, je sypán do násypky stroje, z níž je šnekem následně přesouván do plastifikační jednotky (tavící komory), kde je pomocí vnějších topných těles a třením zahříván a taven na požadovanou teplotu. Tavenina se během plastifikace hromadí před čelem šneku a šnek koná současně rotační a zpětný pohyb [12]. Rychlost plastifikace je určena tzv. zpětným tlakem, který může být nastaven dle potřeby. Zpětný tlak zajišťuje konzistentní vlastnosti taveniny v každém cyklu, napomáhá dosažení její tepelné homogenity a zamezuje přítomnosti plynových bublin. Zvyšování zpětného tlaku prodlužuje dobu plastifikace a zvyšuje vnitřní ohřev a homogenitu taveniny. Na druhou stranu příliš velký zpětný tlak může způsobit tepelnou degradaci polymeru [15].

Cílem této výrobní fáze je připravit teplotně a viskózně homogenní taveninu a nahromadit ji před čelo šneku. Neúplná homogenita taveniny se může projevit na kvalitě povrchu i v nerovnoměrné tvorbě nadmakromolekulární struktury polymeru [16].

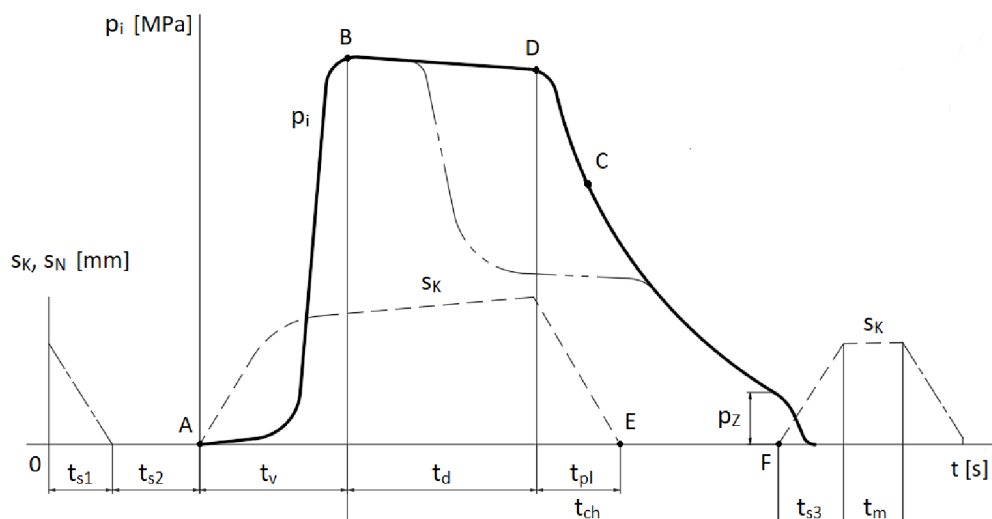
2.2.2 Fáze vstřikování

V této fázi již šnek nekoná rotační pohyb, ale pohybuje se axiálně vpřed a plní tím funkci pístu. Nahromaděná tavenina je vstřikována vysokou rychlostí a pod vysokým tlakem do dutiny formy. Právě rychlost plnění formy hraje významnou roli pro koncové vlastnosti dílu. Vysoká rychlost má pozitivní vliv na reorientaci makromolekul a snižuje anizotropní vlastnosti výstřiku. Na druhou stranu příliš vysoká rychlost může zapříčinit degradaci materiálu vlivem vysokého smykového napětí mezi ztuhlou povrchovou vrstvou a plastickým jádrem [13]. S klesající rychlostí se zvyšují nároky na tlak, který musí šnek překonat, klesá kvalita povrchu a zvyšuje se vnitřní napjatost dílu, která má negativní vliv na jeho konečné užité vlastnosti, jako je např. pevnost a rázová houževnatost [16]. Doba plnění formy se u malých výstřiků pohybuje obvykle ve zlomkách sekund, u velkých výstřiků až několik sekund [13]. Mezi technologické parametry ovlivňující vstřikovací fázi patří především teplota taveniny, teplota formy a vstřikovací tlak. Je však ovlivněna také konstrukčními parametry stroje a formy (vtokovou a temperační soustavou).

2.2.3 Fáze chlazení, tuhnutí a dotlaku

V okamžiku, kdy tavenina vstoupí do formy, začne okamžitě chladnout a tuhnout a děje se tak až do vyhození výrobku z formy. Během tuhnutí dochází ke smršťování plastu z důvodu snižující se hustoty, což by mohlo způsobit tvoření propadlin, staženin a tvorbu dalších vad ve výstřiku [12]. Pro zamezení tohoto jevu se nechává před šnekem určitý objem taveniny, který je dotlačován do formy během chladnutí [13]. V momentě, kdy již není potřeba dotlaku a výstřik ve formě chladne, začíná šnek plastifikovat novou dávku materiálu [12]. Nejdůležitějším parametrem chlazení je teplota formy, čím vyšší teplota je, tím delší je doba chlazení. Vyšší teplota formy má ale pozitivní vliv na krystalizaci materiálu, kvalitu výrobku a eliminaci vnitřního napětí [16]. Po vychladnutí se forma otevře, výrobek je vyhozen z formy ven (odformován) a celý proces se opakuje.

Pro plné porozumění vstřikovacího cyklu je vhodný i popis závislosti vnitřního tlaku (p_i) v dutině formy na čase (t). Tato závislost je znázorněna na obr. 2.7, kde bod A značí začátek cyklu uzavřením formy a přisunutím vstřikovací jednotky k formě, mezi body A a B probíhá fáze vstřikování, mezi body B a D působí dotlak a následuje chlazení. Bod C značí okamžik zatuhnutí vtoku, bod E konec plastifikace nové dávky materiálu a bod F okamžik otevření formy a vyhození výstřiku. Na obr. 2.7 je rovněž zobrazen pohyb šneku (s_K) a pohyb nástroje (s_N) [13].



Obr. 2.7: Závislost vnitřního tlaku v dutině formy na čase při vstřikování [13]
 t_{s1} – doba uzavírání formy, t_{s2} – doba přisuvu vstřikovací jednotky k formě, t_v – doba vstřikování, t_d – doba dotlaku, t_{pl} – doba plastifikace, t_{ch} – doba chlazení, t_{s3} – doba otevírání formy, t_m – manipulační čas, p_z – zbytkový tlak

2.2.4 Základní procesní parametry ovlivňující kvalitu dílu

Kvalita vstřikovaných dílů je, kromě materiálu a konstrukčních parametrů výrobku, stroje a formy, ovlivněna technologickými podmínkami zpracování. Nevhodně zvolené procesní parametry ovlivňují nejen konečnou kvalitu dílu, ale také jejich životnost v důsledku stárnutí materiálu.

Prvním technologickým parametrem ovlivňující konečné vlastnosti dílu je vlhkost vstřikovaného plastu, proto musí být každý vstřikovaný polymerní materiál vysušen na minimální zbytkovou vlhkost, předepsanou výrobcem materiálu. V případě, že není materiál dostatečně vysušen, mohou vzniknout komplikace ve formě zvýšené tekutosti taveniny a kolísání doby dávkování. To se negativně projeví na kvalitě dílu přetoky, vlhkostními šmouhami na povrchu materiálu či případným křehnutím materiálu v důsledku jeho hydrolytického rozkladu [17].

Kvalita dílu je rovněž ovlivněna tlakovými a teplotními cykly v dutině formy. V ideálním případě by tlak i teplota měla být stejná v každém bodě dutiny formy, čímž by se zamezilo vzniku deformací a vnitřního napětí ve výstřiku. Takto rovnoměrné rozložení tlaku a teploty však není možné, jelikož při plnění dutiny formy dochází vždy k poklesu tlaku směrem k čelu taveniny kvůli odporu proti tečení taveniny a vlivem ochlazování taveniny během vstřikování. Pokles tlaku i teploty lze snížit zvýšením rychlosti plnění formy, proto je snaha, aby byla tato rychlost co nejvyšší, aniž by docházelo k degradaci materiálu [17].

Dalším parametrem ovlivňující kvalitu dílu je velikost dotlaku, který zajišťuje kompenzaci rozměrových změn dílu vyvolaných během smrštění materiálu ve fázi chlazení a tuhnutí dílu. Dotlak by měl být volen co nejnižší. Vysoký dotlak zvyšuje hodnotu zbytkového tlaku v dutině formy těsně před jejím otevřením a negativně tak ovlivňuje velikost vnitřního napětí a následných deformací dílu. Doba dotlaku musí být dostatečně dlouhá, aby neunikala tavenina z ústí vtoku, což by způsobilo tvorbu propadlin a docházelo by k rozměrovým odchýlkám výstřiku [17].

Důležitým parametrem je i teplota formy, která má výrazný vliv na kvalitu dílu. Vyšší teplota formy zvyšuje kvalitu povrchu dílu (lesk), snižuje tlakové ztráty při plnění dutiny formy, zvyšuje stupeň krystalinity (uspořádání makromolekul na nadmolekulární úrovni), snižuje vnitřní napětí i anizotropii ve výstřiku a eliminuje jeho dodatečné smrštění. Nevýhodou zvyšování teploty formy je delší doba chlazení a tím i zvyšující se

výrobní náklady. Teplota formy se nastavuje pomocí temperačního systému a je předepisována jako teplotní interval výrobcem materiálu [17]. Mezi nejběžnější temperační systémy patří systém teplotnosného média, které cirkuluje v temperačních kanálech vstříkovací formy, které mohou být zhotovovány vrtáním nebo frézováním, případně aditivní technologií spékáním kovových prášků (Direct Metal Laser Sintering – DMLS), v praxi označované jako konformní chlazení [18].

3 Experimentální část

Experimentální část této bakalářské práce se zabývá přípravou zkušebních vzorků z odpadního práškového polymeru PA12, který je používán pro aditivní výrobu technologií MJF a hodnocením jejich tvarové stálosti za působení teploty, ohybových, rázových a tahových vlastností v závislosti na typu odpadního materiálu. Užité vlastnosti polyamidových dílů jsou hodnoceny před i po tepelném (termooxidačním) stárnutí pro posouzení vlivu odpadního materiálu na životnost dílu.

3.1 Příprava zkušebních vzorků pro experimentální výzkum

Zkušební vzorky pro experimentální výzkum byly zhotoveny vstříkovaní na hydraulickém vstříkovacím stroji ARBURG Allrounder 270S 400-100 (Arburg, Německo) za technologických podmínek uvedených v tab. 3.1. Před vstříkovaním byl práškový polymer sušen ve vakuové sušárně Binder V53 (Binder, Německo) při teplotě 80 °C po dobu ca 12 hodin. Pro vstříkování byla použita vstříkovací forma, která odpovídá vstříkování zkušebních těles dle mezinárodních předpisů ČSN EN ISO 294-1 a ČSN EN ISO 3167. Chlazení tvarových částí formy bylo zajištěno cirkulací temperačního média (vody) v chladicích kanálech formy. Odformování výstříků bylo zajištěno pomocí vyhazovacích kolíků.

Tab. 3.1 Technologické podmínky pro vstříkování zkušebních těles z PA12

Parametr	Hodnota	Jednotka
Uzavírací síla formy	400	kN
Přítlačná síla trysky	30	kN
Rychlost vstříkování	25	cm ³ /s
Dávkování	25	m/min
Zpětný tlak	0,15	MPa
Bod přepnutí na dotlak	11	cm ³
Velikost dotlaku	70	MPa
Doba dotlaku	40	s
Doba chlazení po dotlaku	15	s
Teplota temperačního média	60	°C
Doba cyklu	60	s
Teplotní profil (směrem od násypky)	190/200/205/210/210	°C

Vyrobené vzorky měly tvar oboustranných lopatek, jejichž geometrie je dána předpisem ČSN EN ISO 3167. Jedná se o víceúčelová zkušební tělesa typu A, resp. tělesa 1A

(dle ČSN EN ISO 527) určená pro hodnocení tahových vlastností termoplastů. Pro stanovení ohybových a rázových vlastností bylo nutné obrobit ze střední části víceúčelových zkušebních těles vzorky o délce $(80,0 \pm 0,2)$ mm, šířce $(10,0 \pm 0,2)$ mm a tloušťce $(4,0 \pm 0,2)$ mm v souladu s ČSN EN ISO 20753. Pro stanovení vrubové houževnatosti metodou Charpy byly tyto vzorky dále opatřeny vrubem typu A dle ČSN EN ISO 179-1 pomocí mechanické vrubovačky (Ceast, Itálie) Pro stanovení tvarové stálosti výstřiků za působení zvýšených teplot (metodou Vicat, viz kap. 3.3) byly připraveny zkušební tělesa s tloušťkou $(4,0 \pm 0,2)$ mm, jejichž průřez měl tvar čtverce o straně 10 mm (tloušťka zkušebních těles odpovídá tloušťce víceúčelových zkušebních těles).

Tímto způsobem byly vyrobeny celkem čtyři sady vzorků z PA12 pro 3D tisk technologií MJF o četnosti stanovené jednotlivými mezinárodními předpisy pro stanovení mechanických a tepelných vlastností. První sada vzorků byla vyrobena z čistého, dosud nepoužitého prášku, pro výrobu druhé sady byl použit neexponovaný (neroztavený) prášek z výrobní jednotky zařízení MJF (v následujícím textu označován jako odpad ze sudu). Třetí sada byla vyrobena ze směsi čistého a neexponovaného prášku v poměru 80/20 a pro výrobu čtvrté sady byl použit odpadní materiál z technologie MJF (prášek po očištění dílu, dále označován jako odpad z dílu).

Část vzorků z každé sady byla současně vystavena tepelnému (termooxidačnímu) stárnutí, které mělo za cíl simulovat urychlení životnosti dílu, během které ale nemusí nutně docházet ke zhoršování vlastností. Tepelné stárnutí probíhalo za teploty $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ po dobu 200 hodin, 500 hodin a 1000 hodin v horkovzdušné sušárně Venticell 222 (BMT Medical Technology, Česká republika). Volba teploty vychází z výsledků stanovení tvarové stálosti výstřiků PA12 metodou Vicat B/120 při zatížení vzorků 50 N (viz kap. 3.3). Nezatížené polyamidové vzorky by tak měly jednoznačně odolávat teplotě 140°C . Během tepelného (termooxidačního) stárnutí byly vzorky v sušárně rovnoměrně rozloženy a nepřekrývaly se, což zajišťovalo rovnoměrné stárnutí vzorků po celém jejich povrchu. V následujícím textu bude stárnutý materiál označován jako „S“ s číslovkou odpovídající době vystavení tepelnému stárnutí v hodinách, tj. S0, S200, S500 a S1000.

3.2 Stanovení mechanických vlastností

Mechanické vlastnosti výstřiků před tepelným stárnutím byly stanoveny na zkušebních vzorcích v suchém a navlhším (kondicionovaném) stavu dle ČSN EN ISO 16396-2. Zkušební vzorky v suchém stavu jsou ty, které se bezprostředně po vstříkování umístily do exikátoru se silikagelem, který je chránil proti vlhkosti a ponechaly se v něm při teplotě $(23 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ minimálně 24 hodin. Obsah vlhkosti u těchto zkušebních vzorků nesmí překročit 0,2 % [19]. Zkušební vzorky ve vlhkém stavu jsou ty, jejichž vlhkost odpovídá rovnovážnému stavu při teplotě $(23 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $(50 \pm 5) \%$ dle ČSN EN ISO 291. Tohoto stavu bylo dosaženo v souladu s ČSN EN ISO 16396-2 urychlenou kondicionací zkušebních vzorků v klimatické skříni (Teseco, Česká republika) při teplotě $(70 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ a relativní vlhkosti $(62 \pm 1) \%$ po dobu 10 dnů dle ČSN EN ISO 1110. Vlhkost suchých a kondicionovaných (navlhších) vzorků byla stanovena pomocí halogenového analyzátoru vlhkosti HX204 Mettler Toledo (Mettler Toledo, Švýcarsko), který zaznamenával hmotnost vzorku během sušení, které bylo realizováno topným tělesem ze skleněné trubice naplněné halogenovým plynem. Analyzátor vlhkosti pracuje na principu termogravimetrické metody. Měření bylo provedeno na vzorcích o hmotnosti ca 5 g ve dvou krocích, které na sebe bezprostředně navazovaly. V prvním kroku byly vzorky sušeny při teplotě $145 \text{ }^\circ\text{C}$ po dobu 5 minut, v druhém kroku byly při dané teplotě sušeny do okamžiku, kdy bylo dosaženo úbytku hmotnosti vzorku $\leq 1 \text{ mg}/140 \text{ s}$. Toto vypínací kritérium je doporučované pro měření vlhkosti u plastů a vykazuje nejvyšší úroveň opakovatelnosti měření (0,01 % u vzorku 10 g). Teplota sušení ($145 \text{ }^\circ\text{C}$) odpovídá doporučenému postupu měření vlhkosti u materiálu PA12 na použitém halogenovém analyzátoru, jehož výsledky byly ověřeny referenční metodou pomocí Karl Fischerovi titrace [20]. Mechanické vlastnosti výstřiků po tepelném stárnutí byly stanoveny v čase 24 - 48 hodin po vyjmutí z horkovzdušné sušárny a jejich kondicionaci ve standardním prostředí 23/50 dle ČSN EN ISO 291. Ověřená vlhkost zkušebních vzorků po tepelném (termooxidačním) stárnutí odpovídá suchému stavu dle ČSN EN ISO 16396-2. Výsledky mechanických vlastností po stárnutí jsou tak porovnávány s výsledky mechanických vlastností polyamidových výstřiků stanovených na zkušebních tělesech v suchém stavu. Měření vlastností v navlhším (kondicionovaném) stavu bylo provedeno z důsledku charakterizace materiálu a je dokladováno v příloze 1 - 4, 21 - 24 a 41 - 44.

3.2.1 Stanovení ohybových vlastností

Ohybová zkouška patří mezi statické destruktivní zkoušky, která se používá ke zjišťování chování zkušebních těles při namáhání ohybem a pro stanovení pevnosti v ohybu (σ_{FM}), modulu pružnosti v ohybu (E_f), případně dalších závislostí mezi napětím a deformací za definovaných podmínek. Podstatou zkoušky je zatěžování zkušebního tělesa volně umístěného na dvou podporách přitlačným trnem uprostřed jejich rozpětí. Měření ohybových vlastností probíhalo v souladu s mezinárodním předpisem ČSN EN ISO 178.

Měření ohybových vlastností probíhalo na zařízení Hounsfield H10KT (Tinius Olsen, USA). Zkušební tělesa umístěna mezi dvě podpěry (viz obr. 3.1) byla postupně zatěžována trnem působícím uprostřed těchto podpěr konstantní rychlostí 2 mm/min, která odpovídá rychlosti deformace 1 % za minutu v souladu s ČSN EN ISO 178 a ČSN EN ISO 16396-2.



Obr. 3.1 Měření ohybových vlastností

Pro zamezení vzniku zakřivené oblasti na počátku křivky napětí/deformace bylo použito předpětí 2 N. Zkušební tělesa byla zatěžována vždy ze strany, která byla ve styku s tvárníkem ve vstřikovací formě, aby se eliminovaly metodické faktory ovlivňující výsledky měření. Od každé sady materiálu bylo testováno 5 zkušebních těles. Měřena byla závislost napětí na deformaci. Modul pružnosti byl stanoven z rovnice (3.1) pro hodnoty napětí (σ_{f1} , σ_{f2}), které odpovídají deformacím 0,0005 (ϵ_1) a 0,0025 (ϵ_2):

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \quad (3.1)$$

kde je:

E_f - modul pružnosti v ohybu [MPa]

ε_{f1} - deformace ohybem 0,0005 [-]

ε_{f2} - deformace ohybem 0,0025 [-]

σ_{f1} - napětí v ohybu při deformaci ε_{f1} [MPa]

σ_{f2} - napětí v ohybu při deformaci ε_{f2} [MPa].

Průměrné hodnoty naměřených/vypočtených hodnot modulů pružnosti v ohybu a pevnosti ohybu jsou pro jednotlivé materiálové systémy uvedeny v tab. 3.2 tab. 3.3. Dílčí výsledky měření jsou uvedeny v příloze 5 - 20.

Tab. 3.2 Modul pružnosti v ohybu zkušebních těles z PA12 v závislosti na době tepelného (termooxidačního) stárnutí

Modul pružnosti v ohybu (E_f) [MPa]				
Materiál	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
S0	1334 ± 28	1305 ± 71	1303 ± 29	1339 ± 24
S200	1576 ± 38	1540 ± 39	1532 ± 48	1577 ± 30
S500	1574 ± 36	1684 ± 58	1709 ± 34	1722 ± 52
S1000	1867 ± 66	1839 ± 17	1918 ± 53	1883 ± 55

Tab. 3.3 Mez pevnosti v ohybu zkušebních těles z PA12 v závislosti na době tepelného (termooxidačního) stárnutí

Mez pevnosti v ohybu (σ_{fM}) [MPa]				
Materiál	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
S0	60,0 ± 0,1	60,8 ± 0,7	58,7 ± 0,1	57,9 ± 0,6
S200	68,2 ± 0,4	66,7 ± 0,8	67,2 ± 0,6	67,7 ± 0,6
S500	68,0 ± 0,4	70,6 ± 0,7	72,6 ± 1,7	70,6 ± 0,4
S1000	81,0 ± 1,8	79,3 ± 0,4	79,5 ± 0,3	79,1 ± 1,2

3.2.2 Stanovení vrubové houževnatosti metodou Charpy

Zkouška vrubové houževnatosti metodou Charpy (viz obr. 3.2) je dynamická destruktivní zkouška, při níž je zkušební těleso, opatřené vrubem, umístěno vodorovně na dvě podpory a přeraženo jediným rázem kyvadlového kladiva. Měření rázových vlastností bylo provedeno dle mezinárodního předpisu ČSN EN ISO 179-1 metodou ISO 179-1/1eA na zařízení Resil Ceast 5.5 (Ceast, Itálie). Stanovena byla vrubová houževnatost Charpy (a_{cA}) zkušebních těles opatřených vrubem pomocí mechanické vrubovačky. Vrub byl zvolen standardního typu A s poloměrem kořene vrubu ($0,25 \pm 0,05$) mm a šířkou pod vrubem ($8,0 \pm 0,2$) mm.



Obr. 3.3 Měření vrubové houževnatosti metodou Charpy

Během zkoušky byla zaznamenávána rázová energie potřebná pro přeražení zkušebního tělesa, pro jejíž přesné stanovení bylo nutné provést nezbytné korekce na ztráty třením stanovené volným kyvem rázového kladiva z výchozí polohy. Samotná zkouška probíhala volným spuštěním kladiva z výchozí pozice. Kladivo následně narazilo do zkušebního vzorku a zaznamenala se korigovaná energie spotřebovaná k jeho přeražení, z níž byla stanovena vrubová houževnatost (a_{cA}) dle rovnice (3.2). Ve všech případech sledovaných vzorků nastal lom zkušebního tělesa typu C (úplné přeražení zkušebního tělesa).

$$a_{cA} = \frac{E_c}{h \cdot b_A} \cdot 10^3 \quad (3.2)$$

kde je:

a_{cA} – vrubová houževnatost Charpy [kJ/m^2]

E_c – korigovaná energie spotřebovaná při přeražení zkušební tělesa [J]

h – tloušťka zkušební tělesa [mm]

b_A – šířka zkušební tělesa pod vrubem [mm].

Vrubová houževnatost byla stanovena pro každou sadu materiálu na 10 zkušebních tělesech v souladu s ČSN EN ISO 179-1. Průměrné hodnoty naměřených/vypočtených hodnot v závislosti na době tepelného (termooxidačního) stárnutí jsou uvedeny v tab. 3.4. Dílčí výsledky jsou dokladovány v příloze 25 - 40.

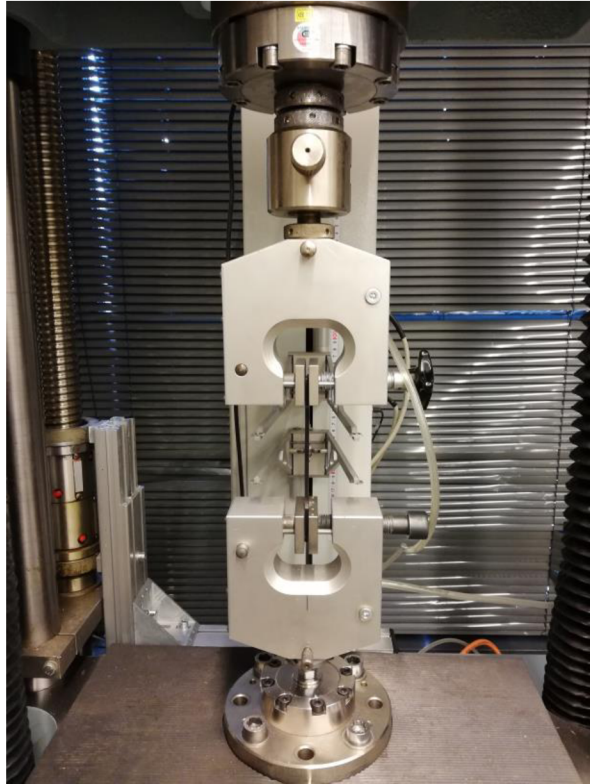
Tab. 3.4 Vrubová houževnatost zkušebních těles z PA12 v závislosti na době tepelného (termooxidačního) stárnutí

Vrubová houževnatost (a_{ca}) [kJ/m^2]				
Materiál	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
S0	$5,1 \pm 0,5$	$4,9 \pm 0,4$	$4,9 \pm 0,5$	$5,3 \pm 0,6$
S200	$3,8 \pm 0,1$	$4,2 \pm 0,4$	$3,9 \pm 0,4$	$3,6 \pm 0,3$
S500	$3,1 \pm 0,5$	$3,2 \pm 0,2$	$2,8 \pm 0,3$	$2,9 \pm 0,5$
S1000	$2,4 \pm 0,3$	$2,4 \pm 0,1$	$2,4 \pm 0,1$	$2,6 \pm 0,2$

3.2.3 Stanovení tahových vlastností

Tahová zkouška je jedna z nejpoužívanějších zkoušek pro stanovení mechanických vlastností materiálů. Jedná se o destruktivní zkoušku, při níž je vzorek obdélníkového průřezu jednoose zatěžován v podélném směru zvyšující se silou předepsanou rychlostí až do jeho přetržení. Cílem této zkoušky je zjištění meze pevnosti v tahu (σ_m), modulu pružnosti v tahu (E_t) a dalších tahových vlastností materiálu, zejména celkové tažnosti, resp. jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení (ϵ_{tb}).

Tahové vlastnosti (pro každou sadu materiálového systému vždy po deseti zkušebních tělesech) byly měřeny na trhacím zařízení TiraTest 2300 (Labormachine, Česká republika) v souladu s mezinárodními předpisy ČSN EN ISO 527-1 a ČSN EN ISO 527-2. Při této zkoušce bylo zkušební těleso umístěno do čelistí trhacího zařízení tak, aby nedošlo během zkoušky k jeho uvolnění (viz obr. 3.3).



Obr. 3.3 Měření tahových vlastností

Následně bylo zkušební těleso protahováno konstantní rychlostí ve směru své hlavní podélné osy, přičemž byly použity dvě zkušební rychlosti. Rychlost 1 mm/min byla použita v oblasti pro stanovení modulu pružnosti (do poměrného prodloužení 0,3 %). Pro zjištění meze pevnosti a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení byla následně použita rychlost zkoušení 50 mm/min. Pro stanovení modulu pružnosti byl použit průtahoměr MFX 500-B (Mess-& Feinwerktechnik, Německo) s počáteční měřenou délkou 50 mm. Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení bylo stanoveno z upínací vzdálenosti mezi čelistmi 115 mm. Primárním výstupem tahové zkoušky je závislost síly na prodloužení a napětí je vypočteno z rovnice (3.3)

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

kde je

σ – napětí v tahu [MPa]

F – příslušná naměřená síla [N]

A – počáteční průřez zkušební tělesa [mm²].

Modul pružnosti v tahu (E_t) byl vypočten z hodnot napětí naměřených při poměrných prodlouženích 0,0005 a 0,0025 ze vztahu (3.4):

$$E_t = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (3.4)$$

kde je

E_t – modul pružnosti v tahu [MPa]

ε_1 - poměrné prodloužení 0,0005 [-]

ε_2 – poměrné prodloužení 0,0025 [-]

σ_1 - napětí v tahu, při poměrném prodloužení ε_1 [MPa]

σ_2 - napětí v tahu, při poměrném prodloužení ε_2 [MPa].

Průměrné hodnoty naměřených hodnot modulů pružnosti v tahu jsou uvedeny v tab. 3.5, meze pevnosti v tab. 3.6 a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení v tab. 3.7. Dílčí výsledky měření jsou zaznamenány v příloze 45 - 60.

Tab. 3.5 Modul pružnosti v tahu zkušebních těles z PA12 v závislosti na době tepelného (termooxidačního) stárnutí

Modul pružnosti v tahu (E_t) [MPa]				
Materiál	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
S0	1459 ± 24	1368 ± 44	1402 ± 30	1472 ± 19
S200	1662 ± 76	1579 ± 24	1537 ± 29	1628 ± 21
S500	1910 ± 83	1950 ± 58	1927 ± 74	1895 ± 50
S1000	1886 ± 32	1911 ± 50	1864 ± 81	1854 ± 177

Tab. 3.6 Mez pevnosti v tahu zkušebních těles z PA12 v závislosti na době tepelného (termooxidačního) stárnutí

Mez pevnosti v tahu (σ_m) [MPa]				
Materiál	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
S0	45,5 ± 0,9	42,8 ± 1,3	43,1 ± 0,8	44,8 ± 0,5
S200	52,2 ± 1,0	50,6 ± 0,5	49,7 ± 0,6	51,9 ± 0,4
S500	48,0 ± 11,0	49,6 ± 7,2	52,5 ± 6,9	54,5 ± 0,9
S1000	52,9 ± 6,9	46,2 ± 9,2	51,3 ± 5,5	57,9 ± 0,4

Tab. 3.7 Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení zkušebních těles z PA12 v závislosti na době tepelného (termooxidačního) stárnutí

Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení (ϵ_{tb}) [%]				
Materiál	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
S0	320,0 ± 45,9	334,0 ± 29,4	272,1 ± 31,5	320,3 ± 19,5
S200	54,3 ± 23,9	138,8 ± 76,0	196,5 ± 53,2	107,1 ± 38,7
S500	16,5 ± 15,6	7,5 ± 6,2	18,0 ± 17,2	30,1 ± 23,2
S1000	7,3 ± 4,4	5,8 ± 5,4	5,8 ± 3,8	23,9 ± 10,5

3.3 Stanovení tvarové stálosti za zvýšené teploty

Vliv využití technologického odpadu na vlastnosti výstřiků byl posuzován také z hlediska jejich tvarové stálosti za působení teploty. V rámci experimentálního výzkumu byla aplikována metoda stanovení teploty měknutí dle Vicata, která je předepsána mezinárodním standardem ČSN EN ISO 306.

Teplota měknutí podle Vicata (tzv. Vicatův stupeň VST) je teplota, při níž jehla s plochým hrotem o ploše 1 mm² a zatížená předepsanou silou pronikne do materiálu do hloubky 1 mm pod povrch zkušebního tělesa, které je současně zahříváno předepsanou stálou rychlostí.

Testování probíhalo v souladu s mezinárodní metodou B120 dle ČSN EN ISO 306 na zařízení HDT/Vicat A (Zwick/Roell, Německo). Definované zatížení je při této metodě 50 N a rychlost ohřevu je 120 K/h. Pro měření byly z každé sady použity 3 vzorky o rozměrech 10 x 10 x 4 mm. Tyto vzorky byly umístěny na základnu rámu zkušebního zařízení kolmo pod jehly (viz obr. 3.4) a ponořeny do temperační lázně se silikonovým olejem s počáteční teplotou 25 °C. Po dvou minutách byly vzorky zatíženy zatížením 50 N, po pěti minutách (s ohledem na krípkové chování plastu) se vynulovalo zařízení pro měření hloubky vtlačení jehel do vzorků a vzorky byly zahřívány stálou rychlostí až do okamžiku, kdy jehla byla vtlačena do hloubky 1 mm pod jejich povrch. V tento okamžik byla zaznamenána teplota měknutí dle Vicata (VST). Aktuální teplota lázně byla měřena a zaznamenávána teplotními čidly v blízkosti každého ze vzorků.



Obr. 3.4 Umístění vzorků pro měření teploty měknutí

Průměrné hodnoty naměřených hodnot teploty měknutí dle Vicata jsou uvedeny v tab. 3.8. Dílčí výsledky měření jsou dokladovány v příloze 62 - 65.

Tab. 3.8 Teplota měknutí dle Vicata zkušebních těles z PA12 v závislosti na době tepelného (termooxidačního) stárnutí

Teplota měknutí podle Vicata (VST) [°C]				
Materiál	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
S0	135	135	137	136
S200	158	155	159	158
S500	162	162	162	162
S1000	167	166	165	164

4 Vyhodnocení a diskuze výsledků

Tato kapitola bakalářské práce se zabývá diskuzí a vyhodnocením ohybových, rázových a tahových vlastností a teploty měknutí dle Vicata u vstříkovaných vzorků z PA12 v závislosti na typu odpadního materiálu a podmínkách tepelného (termooxidačního) stárnutí. Vyhodnocení a diskuze vychází především z naměřených dat v kap. 3.

4.1 Vyhodnocení změny zbarvení

Na první pohled viditelný vliv použití odpadu a stárnutí materiálu je zřejmý ze změny jeho barvy. Původně bílá/mléčná barva nestárnutých vzorků z čistého prášku PA12 s přibývajícím podílem odpadního materiálu tmavla a zabarvovala se do žluta. Se zvyšující se dobou stárnutí vzorky všech sad tmavly, přičemž po 1000 hod. stárnutí byly všechny zbarveny zcela černě a nebylo možné je na základě zbarvení odlišit.

Změna zbarvení byla zapříčiněna oxidací polymeru během technologické procesu MJF vlivem působení infračerveného světla a okolní atmosféry, přičemž oxidaci nejvíce podléhal materiálový systém odpadu z dílu, protože byl nejvíce vystaven infračervenému záření. K oxidaci docházelo i během tepelného (termooxidačního) stárnutí vzorku v horkovzdušné sušárně.



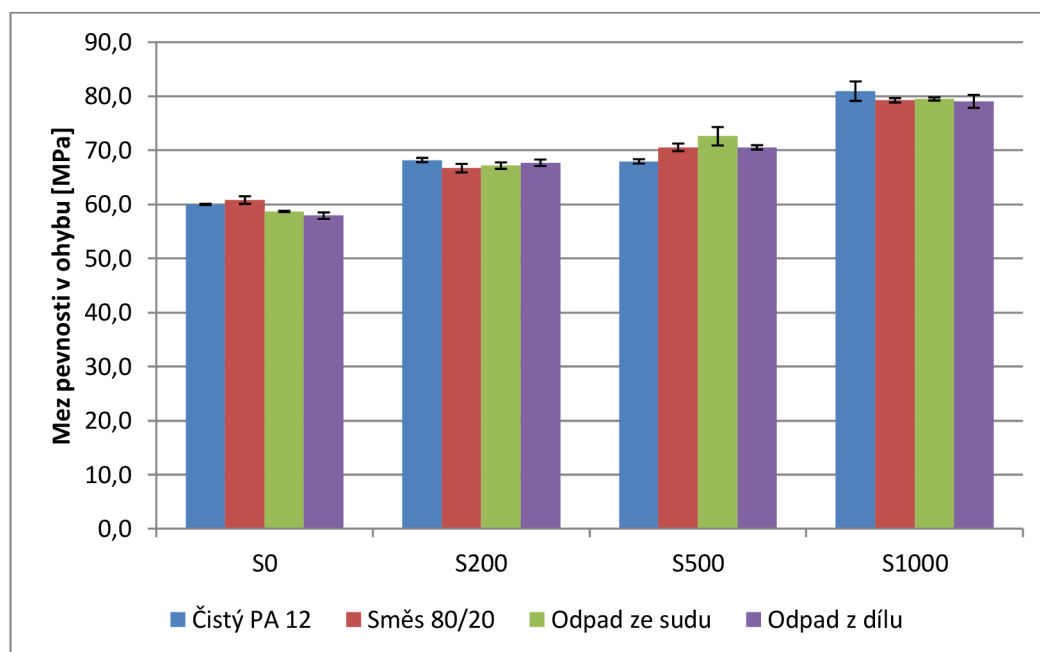
Obr 4.1 Změna zbarvení PA12 vlivem odpadu a umělého stárnutí

4.2 Vyhodnocení a diskuze mechanických vlastností

Tato kapitola slouží pro vyhodnocení vlivu typu a podílu odpadního materiálu na základní mechanické vlastnosti testovaných vzorků před a po tepelném stárnutí, které má zhodnotit vliv použitého prášku na případnou životnost dílu.

4.2.1 Vyhodnocení mechanických vlastností před tepelným stárnutím

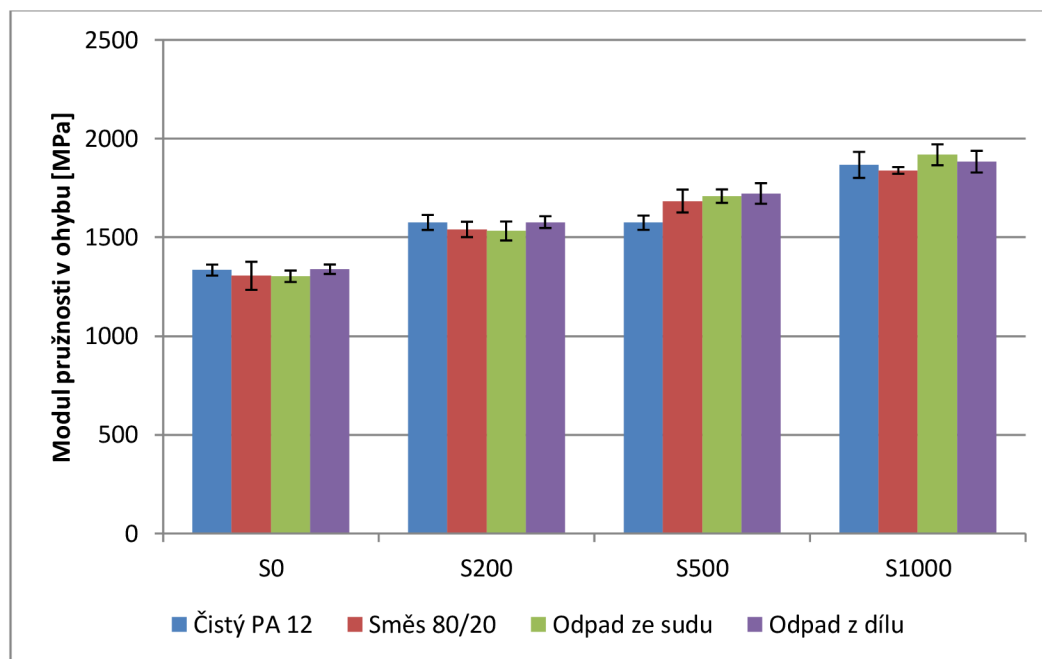
Experimentální měření ohybových vlastností a následné vyhodnocení bylo stanoveno v souladu s normou ČSN EN ISO 178. Grafické závislosti meze pevnosti v ohybu (viz obr. 4.2) a modulu pružnosti v ohybu (viz obr. 4.3) na době tepelného stárnutí jednotlivých materiálových systémů byly sestrojeny na základě naměřených a vypočtených hodnot uvedených v tab. 3.2 a tab. 3.3.



Obr. 4.2 Porovnání meze pevnosti v ohybu polyamidových výstřiků před a po tepelném (termooxidačním) stárnutí při 140 °C

Z obr. 4.2 je zřejmé, že průměrná mez pevnosti nestárnutých vzorků z čistého polyamidového prášku byla $(60 \pm 0,1)$ MPa. Průměrná mez nestárnutých vzorků ze směsi odpadu a nového (čistého) prášku v poměru 80/20 byla $(60,8 \pm 0,7)$ MPa, u vzorků z odpadu ze sudu procesní jednotky $(58,7 \pm 0,1)$ MPa a z technologického odpadu po očištění dílu $(57,9 \pm 0,6)$ MPa. Z těchto hodnot je patrné, že nejnižší pevnost vykazují vzorky, které byly vyrobeny z technologického odpadu po očištění dílu, tedy z materiálu, který byl při technologii MJF nejvíce tepelně zatěžován a podléhal tepelné oxidaci (viz obr. 4.2). Vzhledem k směrodatným odchýlkám, které vyjadřují rozptyl

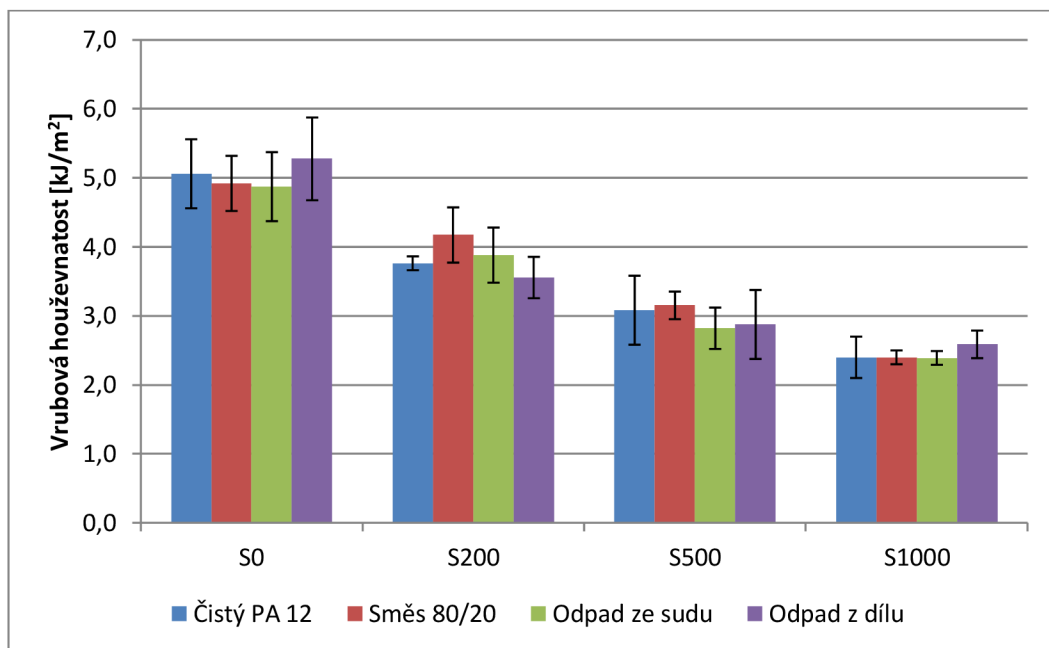
měřených hodnot, jsou tyto změny pevnosti v ohybu statisticky nevýznamné. Při hodnocení modulu pružnosti v ohybu nebyl mezi vzorky sledán žádný vliv, nestárnuté vzorky dosahovaly v suchém stavu modul pružnosti v ohybu ca 1300 MPa. Lze tedy říci, že použití odpadního materiálu nemá z „krátkodobého“ hlediska negativní vliv na ohybové vlastnosti vstříkovaného dílu.



Obr. 4.3 Porovnání modulu pružnosti v ohybu polyamidových výstřiků před a po tepelném (termooxidačním) stárnutí při 140 °C

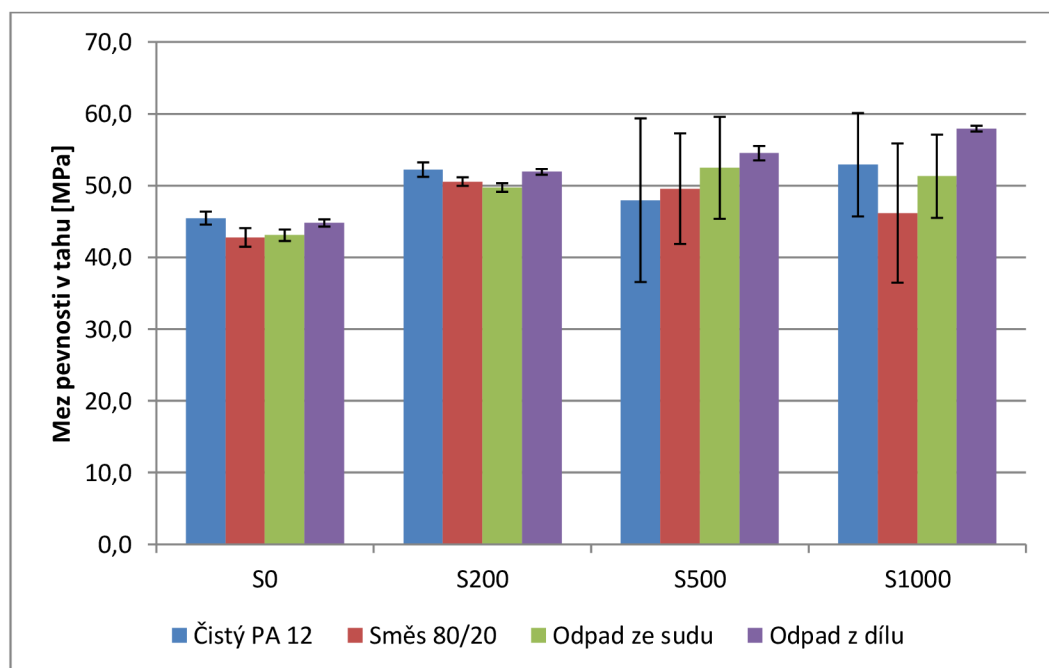
Vyhodnocování rázových vlastností probíhalo v souladu s metodou ISO 179-1/1eA. Z naměřených a vypočtených průměrných hodnot uvedených v tab. 3.4 byla sestrojena grafická závislost vrubové houževnatosti výstřiků v závislosti na jednotlivých materiálových systémech PA12 a tepelném stárnutí. Tato grafická závislost včetně směrodatných odchylek je zobrazena na obr. 4.4.

Z obr. 4.4 je patrné, že průměrná vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z čistého polyamidového prášku byla $(5,1 \pm 0,5)$ kJ/m² a vzhledem ke statistickému zhodnocení pomocí směrodatných odchylek lze konstatovat, že vzorky vyrobené z technologického odpadu výrobní jednotky a z dílu po jeho očištění, včetně směsi čistého a odpadního materiálu vykazují vrubovou houževnatost shodnou se vzorky, které byly vyrobeny z neexponovaného (čistého) prášku. Použití polyamidového prášku z technologického odpadu nemá negativní vliv na vrubovou houževnatost vstříkovaných dílů.



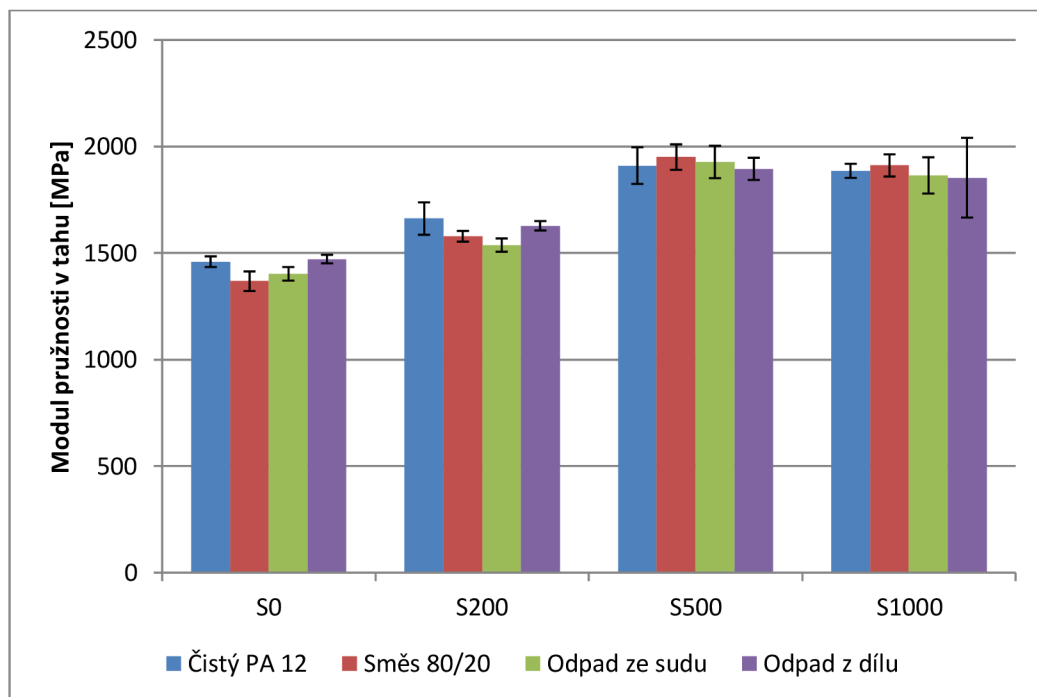
Obr. 4.4 Porovnání vrubové houževnatosti Charpy polyamidových výstřiků před a po tepelném (termooxidačním) stárnutí při 140 °C

Vyhodnocování tahových vlastností z naměřených dat probíhalo v souladu s mezinárodním předpisem ČSN EN ISO 527. Z naměřených a vypočtených průměrných hodnot uvedených v tab. 3.5 až tab. 3.7 byly sestrojeny grafické závislosti meze pevnosti v tahu (viz obr. 4.5), modulu pružnosti v tahu (viz obr. 4.6) a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení, resp. celkové tažnosti (viz obr. 4.7).

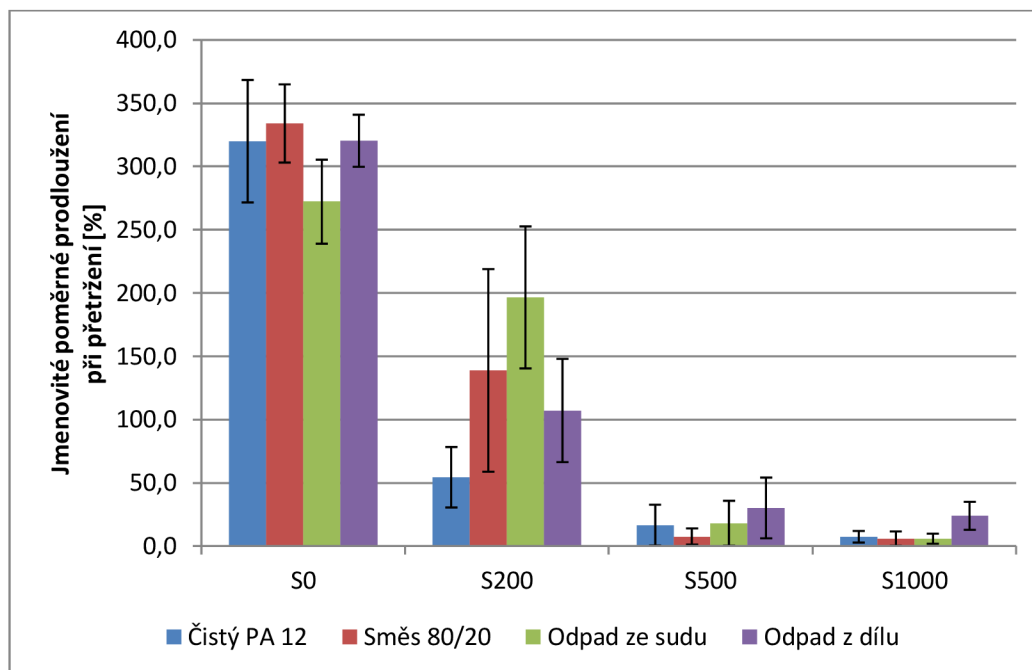


Obr. 4.5 Porovnání meze pevnosti v tahu polyamidových výstřiků před a po tepelném (termooxidačním) stárnutí při 140 °C

Použití technologického odpadu k výrobě výstřiků nemělo výrazný vliv ani na jejich tahové vlastnosti. Nejvyšší mez pevnosti se vyskytovala u vzorků vstříkovaných z čistého polyamidového prášku ($45,5 \pm 0,9$) MPa a nejnižší u směsi 80/20 ($42,8 \pm 1,3$) MPa, což je ale s ohledem na rozptyl měřených hodnot zanedbatelný rozdíl. Zanedbatelný rozdíl byl naměřen i u modulu pružnosti v tahu. Nejvyšší průměrná hodnota modulu pružnosti byla naměřena u vzorků vyrobených z technologického odpadu po očištění dílu (1472 ± 19) MPa, nejnižší u směsi 80/20 (1368 ± 44) MPa a vzorky z čistého prášku měly průměrný modul pružnosti v tahu (1459 ± 24) MPa. Použitý technologický odpad příliš neovlivnil ani celkovou tažnost výstřiků hodnocenou jmenovitým poměrným prodloužením při přetržení. Vzorky z čistého polyamidového prášku měly tažnost (320 ± 45) % a vzorky z technologického odpadu ze sudu procesní jednotky (272 ± 32) %. Rozdíl tažnosti 48 % se může jevit jako výrazný pokles, ale s ohledem na vysokou směrodatnou odchylku je i tento rozdíl statisticky nevýznamný. Vyhodnocení tahových vlastností potvrdilo, že užití technologického odpadu PA12 neovlivní z „krátkodobého“ hlediska tahové charakteristiky výstřiků.



Obr. 4.6 Porovnání modulu pružnosti v tahu polyamidových výstřiků před a po tepelném (termooxidačním) stárnutí při 140 °C



Obr. 4.7 Porovnání jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení polyamidových výstřiků před a po tepelném (termooxidačním) stárnutí při 140 °C

4.2.2 Vyhodnocení mechanických vlastností po tepelném stárnutí

Vyhodnocení mechanických vlastností po tepelném, resp. termooxidačním stárnutí slouží k posouzení vlivu použití odpadního materiálu z hlediska životnosti dílu.

Z obr. 4.2 lze pozorovat nárůst meze pevnosti v ohybu se zvyšováním doby tepelného stárnutí, přičemž rozdíl mezi jednotlivými materiálovými systémy zůstal zanedbatelný. Mez pevnosti v ohybu vzorků z čistého polyamidového prášku ($60 \pm 0,1$) MPa se po 1000 hodinách tepelného stárnutí (140 °C) zvýšila na ($81,0 \pm 1,8$) MPa, jedná se o nárůst 35 %. Kromě pevnosti v ohybu došlo v průběhu tepelného stárnutí také ke zvýšení hodnot modulu pružnosti v ohybu (viz obr. 4.3), tj. z (1334 ± 28) MPa na (1867 ± 66) MPa, jedná se o nárůst 40 %.

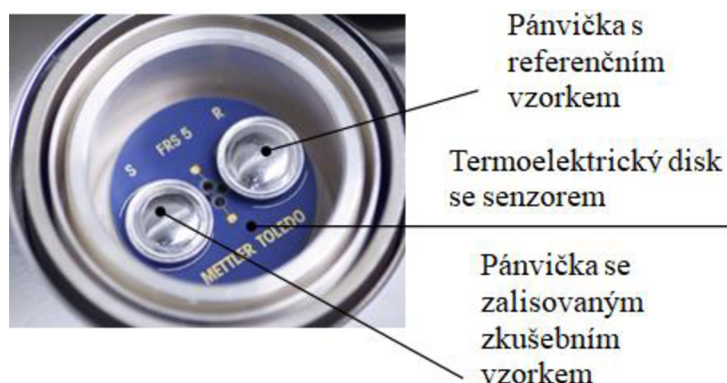
Z grafické závislosti vrubové houževnatosti Charpy (viz obr. 4.4) je patrný opačný trend. S narůstající dobou tepelného stárnutí vrubová houževnatost postupně klesala. Po 1000 hodinách expozice vzorků teplotě 140 °C klesla průměrná hodnota vrubové houževnatosti u všech studovaných materiálových systémů na 2,4 kJ/m², což představuje pokles ca o 53 %. Z výsledků je dále jednoznačné, že použití technologického odpadu (namísto čistého polyamidového prášku) neovlivnilo vrubovou houževnatost výstřiků, které byly vystaveny tepelnému stárnutí.

Změny tahových vlastností výstřiků po tepelném stárnutí byly zajímavější. Z grafické závislosti meze pevnosti v tahu (viz obr. 4.5) a modulu pružnosti v tahu (viz obr. 4.6) je vidět, že pevnost v tahu se ve sledovaném časovém intervalu 1000 hodin zvyšuje, zatímco modul pružnosti v tahu se zvyšuje pouze v čase expozice do 500 hodin (při stárnutí 1000 hodin lze modul pružnosti v tahu s ohledem na rozptyl měřených hodnot považovat za shodný). Pevnost v tahu u výstřiku z čistého polyamidového prášku se po 1000 hodinách stárnutí zvýšila o 16 % a modul pružnosti v tahu o 29 %, přičemž rozdíly hodnot různých materiálových systémů zůstaly zanedbatelné (s ohledem na rozptyl měřených hodnot). Změny tahových charakteristik materiálů v důsledku tepelného stárnutí jsou nižší než změny ohybových vlastností. U stejného výstřiku z čistého PA12 došlo při stejné době tepelného stárnutí k zvýšení meze pevnosti v ohybu o 35 % a modulu pružnosti v ohybu o 40 %. Ohybové vlastnosti, zejména modul pružnosti v ohybu je odrazem struktury materiálu v jeho povrchové vrstvě. Rozdíly mezi tahovými a ohybovými charakteristikami jsou tedy způsobeny nejen odlišným charakterem zkoušky, ale v tomto případě i změnou struktury materiálu, ke které při tepelném stárnutí dochází a jež se mění od povrchu ke středu průřezu výstřiku. Různý průběh stárnutí po průřezu výstřiku by mohl objasnit rozdíly v rozptylech měřených hodnot, které se po 500 hodinách stárnutí začaly výrazně zvyšovat při měření pevnosti v tahu.

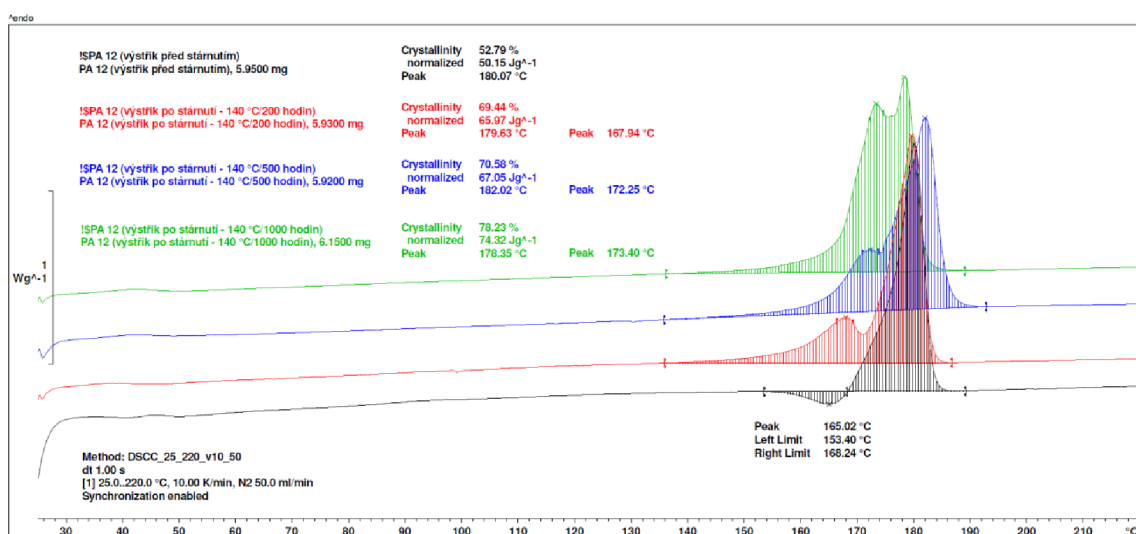
Z obr. 4.7 je zřejmé, že tepelné stárnutí výstřiků se negativně projevilo poklesem jejich celkové tažnosti. Výrazný rozdíl se projevilo při 200hodinách expozice, kde měly vzorky z čistého polyamidového prášku tažnost ca 54 % a po 1000 hodinách expozice ca 7 %, což představuje pokles oproti nestárnutým vzorkům o 83 %, resp. o 98 %. Vzhledem k rozptylům měřených hodnot nelze říci, že by na tažnost výstřiků měl větší negativní vliv technologický odpad než čistý polyamidový prášek.

Nárůst pevnosti a modulu pružnosti v tahu i ohybu a současný pokles rázové houževnatosti v průběhu tepelného stárnutí lze zdůvodnit změnou struktury polyamidových systémů. Z tohoto důvodu byla pro potřeby diskuse výsledků bakalářské práce provedena termická analýza výstřiků metodou diferenční snímací kalorimetrie (DSC), která umožňuje sledovat tepelné a strukturní vlastnosti materiálů. Pro ověření strukturních změn byly použity vzorky vyrobené z čistého polyamidového prášku před stárnutím a v průběhu tepelného stárnutí. Diferenční snímací kalorimetrie je metoda, při které je sledován elektrický příkon, který je potřebný pro zachování nulového teplotního

rozdílu mezi studovaným a referenčním vzorkem v rámci teplotního cyklu (ohřevu nebo chlazení, dle potřeby). Výsledkem je pak teplotní závislost tepelného toku mezi těmito vzorky (tzv. DSC křivka). Pro potřeby bakalářské práce byla sledována endotermní přeměna polyamidů ve fázi tání krystalických útvarů. Její velikost je přímo úměrná stupni krystalinity. Experimentální měření bylo provedeno na kalorimetru DSC 1 (Mettler Toledo, Švýcarsko), kde měření probíhalo v inertní atmosféře (dusíku) metodou DSC s tepelným tokem. Zkušební vzorky o hmotnosti ca 6 mg byly zalisovány do hliníkové pánvičky a spolu s referenčním vzorkem (vzduchem, resp. prázdnou zalisovanou hliníkovou pánvičkou) umístěny na termoelektrický disk v měřící cele kalorimetru (viz obr. 4.8), kde byly zahřívány od teploty 25 °C do 220 °C rychlostí ohřevu 10 °C/min. Během měření byly zaznamenávány DSC křivky, z nichž byly stanoveny změny entalpie tání, resp. hodnoty stupně krystalinity (viz obr. 4.9). Pro stanovení stupně krystalinity byla použita entalpie tání ideálně krystalické oblasti polymeru PA12 (95 J/g) [21].



Obr. 4.8 Zkušební a referenční vzorek v měřící cele DSC kalorimetru



Obr. 4.9 DSC křivky pro výstřiky z čistého polyamidového prášku (PA12) před a po tepelném (termooxidačním) stárnutí při 140 °C

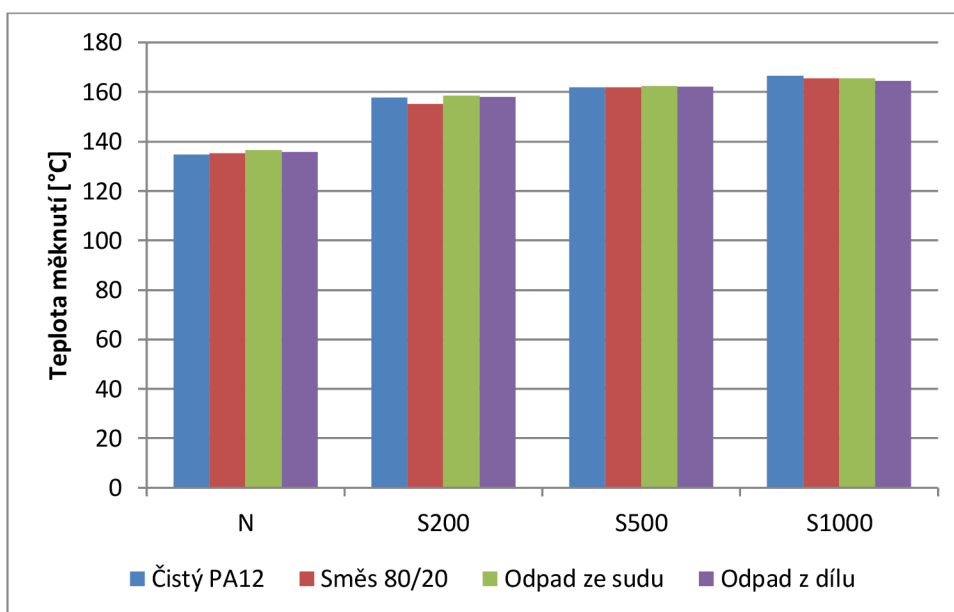
Z DSC křivek jednoznačně vyplývá, že v průběhu tepelného stárnutí, po celou sledovanou dobu (1000 hodin), dochází k fyzikálním pochodům, které souvisí s dodatečnou krystalizací polyamidu. Výstřik PA12 před tepelným stárnutím vykazuje uspořádanost makromolekul na nadmolekulární úrovni 52,8 %, po tepelném stárnutí při teplotě 140 °C a době 200 hodin je stupeň krystalinity 69,4 %, po 500 hodinách 70,6 % a po 1000 hodinách 78,2 %. Je obecně známo, že se zvyšujícím se stupněm krystalinity se zvyšuje pevnost a tuhost polymeru, snižuje se jeho tažnost a rázová houževnatost. Z výsledků DSC měření je tedy zřejmé, že v průběhu sledované doby stárnutí kromě chemických reakcí (zejména oxidace, viz kap. 4.1) dochází především k fyzikálním pochodům a lze se domnívat, že chemické reakce, jako je štěpení makromolekul polyamidových řetězců, bude především nastávat až při delším působení tepelného zatížení. Z obr. 4.5 a obr. 4.6 jsou ostatně patrné náznaky poklesu pevnosti a modulu pružnosti v tahu, které by mohly být projevem počátku štěpení řetězce makromolekul. Tuto tezi by bylo vhodné prověřit v navazující studii, při které by vzorky byly vystaveny tepelnému stárnutí po dobu delší, než je 1000 hodin. Nelze vyloučit, že účinek technologického odpadu použitého k vstřikování polyamidových vzorků na jejich životnost se projeví ve výrazně delším čase, než je 1000 hodin při teplotě 140 °C.

Rozdíly v nadmolekulární struktuře jednotlivých materiálových systémů jsou zřejmé nejen z hlediska stupně krystalinity, ale také z průběhu exotermní a endotermní přeměny ve fázi tavení, resp. před roztavením materiálu, viz obr. 4.9. Výstřik z PA12, který nebyl vystaven tepelnému stárnutí, vykazuje při jeho ohřevu v teplotní oblasti (153 – 168) °C exotermní oblast, která odpovídá jeho rekrystalizaci, tato oblast je následována táním krystalitů se střední hodnotou teploty tání 180 °C. Výstřiky, které byly vystaveny tepelnému stárnutí při teplotě 140 °C po dobu (200 – 1000) hodin, vykazují při následném ohřevu (studiu nadmolekulární struktury metodou DSC) pouze endotermní přeměnu s dvěma teplotními vrcholy tání krystalických struktur. Například u tepelně stárnutého výstřiku po 200 hodinách se jedná o tání při středních teplotách 167,9 °C a 179,6 °C. První oblast odpovídá tání nestabilních krystalitů s nižší teplotní stabilitou, které byly vytvořeny během tepelného stárnutí. Je zřejmé, že v průběhu tepelného stárnutí se krystalické oblasti zdokonalovaly, neboť vrchol teploty prvního tání se postupně posouvá k vyšším hodnotám a zvyšuje se celková hodnota entalpie tání krystalitů.

4.3 Vyhodnocení tvarové stálosti za zvýšené teploty

Experimentální měření tvarové stálosti za zvýšené teploty a následné vyhodnocení bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN ISO 306. Stanovena byla teplota měknutí podle Vicata. Grafická závislost teploty měknutí dle Vicata je zobrazena na obr. 4.10 a vychází z naměřených hodnot uvedených v tab. 3.8.

Z grafické závislosti teploty měknutí je patrné, že použití technologického odpadu k výrobě vstřikovaných dílů nemělo vliv na jejich teplotní odolnost. Teplota měknutí nestárnutých vzorků (pro všechny materiálové systémy) byla v rozmezí (135 - 137) °C. Po 200 hodinovém stárnutí teplota měknutí vzrostla přibližně o 16 %, po 500 hodinovém stárnutí následoval další nárůst teploty měknutí o (3 - 7) °C. Po 1000 hodinovém stárnutí teplota měknutí opět vzrostla ca o (2 - 5) °C. Změna teplotní odolnosti výstřiků po tepelném stárnutí koresponduje se závěry, které byly zjištěny diferenční snímací kalorimetrií, neboť s rostoucím stupněm krystalinity se zvyšuje teplotní odolnost polymeru.



Obr. 4.10 Porovnání teploty měknutí dle Vicata polyamidových výstřiků před a po tepelném (termooxidačním) stárnutí při 140 °C

5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo v rámci teoretické části zpracování aktuální rešerše v oblasti vstřikování a velmi moderní aditivní technologie Multi Jet Fusion (MJF). V rámci praktické části byl hodnocen vliv technologického odpadu práškového polymeru PA12 vzniklého během výrobního procesu MJF na vlastnosti a životnost vstřikovaných dílů. Vstřikovány a analyzovány byly zkušební tělesa z čistého práškového materiálu, technologického odpadu a ze směsi nového a odpadového materiálu PA12. Měřeny byly ohybové, rázové a tahové vlastnosti a tvarová stálost za zvýšené teploty. Pro simulování životnosti byly vzorky tepelně stárnuty v horkovzdušné sušárně při teplotě 140 °C po dobu 200 až 1000 hodin.

Na základě naměřených dat lze konstatovat, že použití technologického odpadu z výrobního procesu MJF, který byl získán ze sudu výrobní jednotky a po očištění dílů, nemá z „krátkodobého“ hlediska (před urychleným stárnutím) negativní vliv na mechanické vlastnosti ani na tvarovou stálost výstřiků, ovlivňuje však jejich optické vlastnosti, neboť technologický odpad podléhal během aditivní výroby dílů oxidačním reakcím. Z toho vyplývá, že užití odpadního materiálu z technologie MJF pro zpracování procesem vstřikování je možné, ale převážně pro nepohledové díly nebo pro díly s přidaným barvivem. Po tepelném (termooxidačním) stárnutí se v důsledku fyzikálních změn ve struktuře materiálu, způsobených jeho dodatečnou krystalizací, zvyšovala pevnost a tuhost výstřiků, naopak jejich rázová odolnost a celková tažnost se snižovala. V důsledku stárnutí a dodatečných změn struktury polyamidových výstřiků se zvyšuje také jejich tvarová stálost za působení teploty. Výsledky neprokázaly rozdíly mezi studovanými vlastnostmi výstřiků zhotovených z čistého (neexponovaného) prášku PA12 a jeho technologického odpadu. Lze tedy konstatovat, že odpadní materiál z technologie MJF nemá negativní vliv na životnost vstřikovaných dílů (za podmínek daného experimentu) a lze jej využít pro opětovné zpracování v rámci technologického procesu vstřikování.

Předložená bakalářská práce je úvodní studií na dané téma a nelze vyloučit, že při tepelném stárnutí delším jak 1000 hodin, případně při stárnutí za vyšších teplot, nebude docházet ke štěpení makromolekul a degradaci polymeru a rovněž nelze vyloučit, že se vliv použití technologického odpadu projeví po výrazně delší době stárnutí. Proto bych doporučil v rámci navazující studie podrobit zkušební vzorky tepelnému stárnutí po

dobu delší než 1000 hodin, případně tepelnému stárnutí za vyšších teplot nebo stárnutí za působení jiných klimatických podmínek (např. UV záření apod.).

Seznam použité literatury

- [1] SEDLÁČEK, Karel. *Aditivní technologie na vlně zájmu* [online]. Technický týdeník, 2018 [cit. 29.5.2021]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/aditivni-technologie-na-vlne-vseobecneho-zajmu_43045.html
- [2] VAROTSIS, Alkaios Bournias. *HP MJF vs. SLS: A 3D printing technology comparison* [online]. [cit. 7.2.2021] Dostupné z: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison/#what>
- [3] COTU. *MJF (Multi Jet Fusion)* [online]. [cit. 7.2.2021] Dostupné z: <https://www.cotu.cz/blog/138/mjf-multi-jet-fusion>
- [4] HP. *HP Multi Jet Fusion technology Technical white paper* [online]. [cit. 7.2.2021] Dostupné z: <https://pages.hawkridgesys.com/rs/499-VQL-975/images/hp-multi-jet-fusion-technology-whitepaper.pdf>
- [5] 3DEES. *3D tisk vstupuje do sériové výroby s HP Multi Jet Fusion* [online]. 2017 [cit. 7.2.2021] Dostupné z: <https://www.3dees.cz/3d-tisk-vstupuje-do-seriove-vyroby-s-hp-multi-jet-fusion>
- [6] HP. *HP Jet Fusion 4200* [online] 2021 [cit. 7.2.2021] Dostupné z: <https://www8.hp.com/h20195/v2/GetDocument.aspx?docname=4AA6-4892ENA>
- [7] BITFAB. *All about HP Multi Jet Fusion, industrial 3D printing* [online]. [cit. 7.2.2021] Dostupné z: <https://bitfab.io/blog/hp-multi-jet-fusion/>
- [8] HP. *Tiskové řešení HP Jet Fusion 4200 3D Uživatelská příručka* [online]. 2020 [cit. 7.2.2021] Dostupné z: <http://h10032.www1.hp.com/ctg/Manual/c05671706>
- [9] MASTER GRAPHICS. *How much does the HP 3d printer cost* [online]. 2019 [cit. 7.2.2021] Dostupné z: http://blog.mastergraphics.com/expert_advice/how-much-does-the-hp-3d-printer-cost
- [10] DKSH. *HP - 3D Printer - Jet Fusion 3D 4200 Printing Solution* [online]. [cit. 29.5.2021] Dostupné z: <https://www.dksh.com/vn-en/products/mac/hp-3dprinter-jetfusion-3d-4200>
- [11] NEUHÄUSL, Emil. *Historie a rozvoj vstříkovaní plastů v ČR* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2010 [cit. 7.2.2021] Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/historie-a-rozvoj-vstrikovani-plastu-v-cr.html>
- [12] GOODSHIP, Vanessa. *Practical guide to injection moulding* 2nd edition. Shrewsbury: Arburg, 2017. ISBN 978-1-91024-295-7
- [13] LENFELD, Petr. *Technologie II. Část 2., Zpracování plastů*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-467-2.

- [14] SEIDL, Martin. *Stroje pro zpracování polymerních materiálů* [online]. © Code Creator, s.r.o. distribuce publi.cz, 2016 [cit. 7.2.2021] ISBN 978-80-88058-71-7 Dostupné z: <https://publi.cz/books/181/Cover.html>
- [15] GEOSPACE TECHNOLOGIES CONTRACT & MANUFACTURING DIVISION. *How to set back pressure in injection moulding* [online]. 2019 [cit. 6.6.2021] Dostupné z: <https://geospacemfg.com/blog/back-pressure-injection-molding/>
- [16] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [17] BĚHÁLEK, Luboš a Jiří HABR. *Moderní plasty a vláknové kompozity*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. ISBN 978-80-7494-458-1
- [18] INNOMIA. *Konformní chlazení* [online]. [cit. 23.2.2021] Dostupné z: <https://www.innomia.cz/konformni-chlazení>
- [19] ČSN EN ISO 16396-2. *Plasty – Polyamidy (PA) pro tváření – Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2017.
- [20] METTLER TOLEDO. *Stanovení obsahu vlhkosti pomocí halogenového analyzátoru vlhkosti* [online]. [cit. 29.5.2021] Dostupné z: https://www.mt.com/dam/P5/labtec/05_Moisture_Analyzer/01_Professional_Line/03_Documents/01_Brochures/Guide_To_Moisture_Analysis_CS.pdf
- [21] PERKINELMER. *Polymer Characterization* [online]. [cit. 6.5.2021] Dostupné z: https://labsense.fi/uploads/7/1/9/5/71957143/polymer_characterization_technical_poster.pdf

Seznam příloh

- Příloha 1: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků z čistého prášku ve vlhkém stavu
- Příloha 2: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 ve vlhkém stavu
- Příloha 3: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu ze sudu ve vlhkém stavu
- Příloha 4: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu z dílu ve vlhkém stavu
- Příloha 5: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků z čistého prášku v suchém stavu
- Příloha 6: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 v suchém stavu
- Příloha 7: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 v suchém stavu
- Příloha 8: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu z dílu v suchém stavu
- Příloha 9: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) z čistého prášku
- Příloha 10: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) ze směsi 80/20
- Příloha 11: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) z odpadu ze sudu
- Příloha 12: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) z odpadu z dílu
- Příloha 13: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z čistého prášku
- Příloha 14: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) ze směsi 80/20
- Příloha 15: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z odpadu ze sudu
- Příloha 16: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z odpadu z dílu
- Příloha 17: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z čistého prášku
- Příloha 18: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) ze směsi 80/20
- Příloha 19: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu ze sudu
- Příloha 20: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu z dílu
- Příloha 21: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z čistého prášku ve vlhkém stavu
- Příloha 22: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 ve vlhkém stavu
- Příloha 23: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z odpadu z dílu ve vlhkém stavu
- Příloha 24: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z odpadu z dílu ve vlhkém stavu
- Příloha 25: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z čistého prášku v suchém stavu
- Příloha 26: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 v suchém stavu
- Příloha 27: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z odpadu ze sudu v suchém stavu

Příloha 28: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z odpadu z dílu v suchém stavu

Příloha 29: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (200 h) z čistého prášku

Příloha 30: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (200 h) ze směsi 80/20

Příloha 31: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (200 h) z odpadu ze sudu

Příloha 32: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (200 h) z odpadu z dílu

Příloha 33: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (500 h) z čistého prášku

Příloha 34: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (500 h) ze směsi 80/20

Příloha 35: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (500 h) z odpadu ze sudu

Příloha 36: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (500 h) z odpadu z dílu

Příloha 37: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (1000 h) z čistého prášku

Příloha 38: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (1000 h) ze směsi 80/20

Příloha 39: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu ze sudu

Příloha 40: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu z dílu

Příloha 41: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z čistého prášku ve vlhkém stavu

Příloha 42: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 ve vlhkém stavu

Příloha 43: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu ze sudu ve vlhkém stavu

Příloha 44: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu z dílu ve vlhkém stavu

Příloha 45: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z čistého prášku v suchém stavu

Příloha 46: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 v suchém stavu

Příloha 47: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu ze sudu v suchém stavu

Příloha 48: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu z dílu v suchém stavu

Příloha 49: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) z čistého prášku

Příloha 50: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) ze směsi 80/20

Příloha 51: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) z odpadu ze sudu

Příloha 52: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) z odpadu z dílu

Příloha 53: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z čistého prášku

Příloha 54: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) ze směsi 80/20

Příloha 55: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z odpadu ze sudu

Příloha 56: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z odpadu z dílu

Příloha 57: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) z čistého prášku

Příloha 58: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) ze směsi 80/20

Příloha 59: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu ze sudu

Příloha 60: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu z dílu

Příloha 61: Teplota měknutí dle Vicata nestárnutých vzorků ve vlhkém stavu

Příloha 62: Teplota měknutí dle Vicata nestárnutých vzorků v suchém stavu

Příloha 63: Teplota měknutí dle Vicata stárnutých vzorků (200 h)

Příloha 64: Teplota měknutí dle Vicata stárnutých vzorků (500 h)

Příloha 65: Teplota měknutí dle Vicata stárnutých vzorků (1000 h)

Příloha 1: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků z čistého prášku ve vlhkém stavu

Čistý PA12 (vlhký stav) - S0				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	62,9	1,839	4,700	1431
2	63,2	1,907	4,700	1397
3	63,5	1,907	4,836	1465
4	63,9	1,839	4,768	1465
5	63,3	1,839	4,700	1431
Průměr	63,1			1437
Směrodatná odchylka	0,3			28

Příloha 2: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 ve vlhkém stavu

Směs 80/20 (vlhký stav) - S0				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	52,7	1,729	3,999	1135
2	53	1,675	3,836	1081
3	53,1	1,729	4,053	1162
4	53,2	1,783	4,107	1162
5	52,8	1,783	4,161	1189
Průměr	52,8			1146
Směrodatná odchylka	0,1			37

Příloha 3: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu ze sudu ve vlhkém stavu

Odpad ze sudu (vlhký stav) - S0				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	54,5	1,762	4,134	1186
2	54,4	1,762	4,134	1186
3	55,2	1,762	4,134	1186
4	54,1	1,789	4,121	1166
5	53,9	1,789	4,175	1193
Průměr	54,2			1183
Směrodatná odchylka	0,3			9

Příloha 4: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu z dílu ve vlhkém stavu

Odpad z dílu (vlhký stav) - S0				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	52,4	1,775	4,161	1193
2	52	1,775	4,105	1165
3	52	1,664	3,994	1165
4	51	1,775	4,050	1138
5	50,9	1,775	4,050	1138
Průměr	51,7			1160
Směrodatná odchylka	0,6			21

Příloha 5: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků z čistého prášku v suchém stavu

Čistý PA12 (suchý stav) - S0				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	60,1	1,875	4,488	1307
2	60,9	1,758	4,363	1303
3	60,4	1,732	4,426	1347
4	60,1	1,779	4,515	1368
5	59,9	1,604	4,298	1347
Průměr	60,0			1334
Směrodatná odchylka	0,1			25

Příloha 6: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 v suchém stavu

Směs 80/20 (suchý stav) - S0				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	61,3	1,523	4,135	1306
2	58,6	1,711	4,145	1217
3	61,9	1,523	4,352	1415
4	59,1	1,712	4,281	1285
5	60,3	1,718	4,326	1304
Průměr	60,8			1305
Směrodatná odchylka	0,5			63

Příloha 7: Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 v suchém stavu

Odpad ze sudu (suchý stav) - S0				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	58,8	1,727	4,251	1262
2	58,3	1,776	4,408	1316
3	59,1	1,867	4,467	1300
4	59,3	1,877	4,559	1341
5	58,6	1,793	4,384	1296
Průměr	58,7			1303
Směrodatná odchylka	0,4			26

Příloha 8 Ohybové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu z dílu v suchém stavu

Odpad z dílu (suchý stav) - S0				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	58,3	1,794	4,416	1311
2	58,1	1,763	4,409	1323
3	58,5	1,84	4,535	1348
4	58,2	1,787	4,536	1375
5	57,5	1,715	4,390	1338
Průměr	57,9			1339
Směrodatná odchylka	0,3			22

Příloha 9: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) z čistého prášku

Čistý PA12 - S200				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	68,5	1,962	4,986	1512
2	67,2	1,975	5,180	1603
3	67,6	1,975	5,180	1603
4	68,3	2,043	5,230	1594
5	67,9	1,975	5,110	1568
Průměr	68,2			1576
Směrodatná odchylka	0,3			34

Příloha 10: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) ze směsi 80/20

Směs 80/20 - S200				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	66,1	1,969	5,020	1526
2	66,1	1,969	5,020	1526
3	66,5	1,969	5,090	1561
4	65,8	1,969	5,160	1596
5	67,3	1,969	4,955	1493
Průměr	66,7			1540
Směrodatná odchylka	0,6			35

Příloha 11: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) z odpadu ze sudu

Odpad ze sudu - S200				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	67,6	2,043	5,240	1599
2	69	1,975	4,972	1499
3	63,2	1,975	4,972	1499
4	63,8	1,907	4,904	1499
5	66,7	1,975	5,110	1568
Průměr	67,2			1532
Směrodatná odchylka	0,4			43

Příloha 12: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) odpadu z dílu

Odpad z dílu - S200				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	68,1	1,98	5,120	1570
2	67,9	1,98	5,050	1535
3	67,5	1,98	5,120	1570
4	67,3	1,98	5,190	1605
5	67,3	2,048	5,260	1606
Průměr	67,7			1577
Směrodatná odchylka	0,4			26

Příloha 13: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z čistého prášku

Čistý PA12 - S500				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	68,2	2,043	5,230	1594
2	68,3	2,043	5,230	1594
3	68,2	2,043	5,070	1514
4	67,8	1,975	5,180	1603
5	67,7	1,975	5,110	1568
Průměr	68,0			1574
Směrodatná odchylka	0,3			32

Příloha 14: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) ze směsi 80/20

Směs 80/20 - S500				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	71,2	2,109	5,600	1746
2	73,2	2,109	5,600	1746
3	74,4	2,514	5,800	1643
4	71	2,27	5,515	1623
5	69,9	1,703	5,030	1664
Průměr	70,6			1684
Směrodatná odchylka	0,6			52

Příloha 15: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z odpadu ze sudu

Odpad ze sudu - S500				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	71,4	2,043	5,390	1674
2	74,1	2,125	5,640	1758
3	72,7	2,125	5,560	1718
4	73	2,125	5,480	1678
5	73,8	2,125	5,560	1718
Průměr	72,6			1709
Směrodatná odchylka	1,2			31

Příloha 16: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z odpadu z dílu

Odpad z dílu - S500				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	70,3	2,071	5,420	1675
2	72,4	2,071	5,580	1755
3	70	1,992	5,340	1674
4	73,9	2,071	5,660	1795
5	70,8	2,071	5,500	1715
Průměr	70,6			1722
Směrodatná odchylka	0,3			47

Příloha 17: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z čistého prášku

Čistý PA12 - S1000				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	79,7	2,041	5,880	1920
2	81,6	2,205	5,960	1878
3	76,8	2,123	5,630	1754
4	79,8	2,123	5,880	1879
5	82,2	2,177	5,990	1907
Průměr	81,0			1867
Směrodatná odchylka	1,3			59

Příloha 18: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) ze směsi 80/20

Směs 80/20 - S1000				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	79	2,217	5,910	1847
2	79,5	2,217	5,910	1847
3	80,6	2,217	5,910	1847
4	78,7	1,807	5,500	1847
5	79,5	2,053	5,670	1809
Průměr	79,3			1839
Směrodatná odchylka	0,3			15

Příloha 19: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu ze sudu

Odpad ze sudu - S1000				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	79,3	2,133	5,830	1849
2	80,7	2,051	5,990	1970
3	80	2,215	5,990	1888
4	80	2,051	5,990	1970
5	79,7	2,068	5,900	1916
Průměr	79,5			1918
Směrodatná odchylka	0,2			47

Příloha 20: Ohybové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu z dílu

Odpad z dílu - S1000				
Vzorek	σ_{fM} [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	E_f [MPa]
1	78,2	2,091	5,770	1840
2	80	2,174	5,940	1883
3	79,3	2,174	5,940	1883
4	77,6	2,174	5,850	1838
5	79,9	2,004	5,950	1973
Průměr	79,1			1883
Směrodatná odchylka	0,8			49

Příloha 21: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z čistého prášku ve vlhkém stavu

Čistý PA12 (vlhký stav) - S0			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,158	4,21	4,7
2	0,164	4,21	4,9
3	0,177	4,21	5,3
4	0,207	4,21	6,1
5	0,161	4,21	4,8
6	0,158	4,21	4,7
7	0,154	4,21	4,6
8	0,153	4,21	4,5
9	0,153	4,21	4,5
10	0,158	4,21	4,7
Průměr			4,9
Směrodatná odchylka			0,5

Příloha 22: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 ve vlhkém stavu

Směs 80/20 (vlhký stav) - S0			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,249	4,22	7,4
2	0,253	4,22	7,5
3	0,206	4,22	6,1
4	0,208	4,22	6,2
5	0,295	4,22	8,7
6	0,217	4,22	6,4
7	0,233	4,22	6,9
8	0,231	4,22	6,9
9	0,204	4,22	6,0
10	0,193	4,22	5,7
Průměr			6,8
Směrodatná odchylka			0,9

Příloha 23: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z odpadu z dílu ve vlhkém stavu

Odpad ze sudu (vlhký stav) - S0			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,228	4,21	6,8
2	0,229	4,21	6,8
3	0,206	4,21	6,1
4	0,228	4,21	6,8
5	0,206	4,21	6,1
6	0,21	4,21	6,2
7	0,212	4,21	6,3
8	0,201	4,21	6,0
9	0,21	4,21	6,2
10	0,222	4,21	6,6
Průměr			6,4
Směrodatná odchylka			0,3

Příloha 24: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z odpadu z dílu ve vlhkém stavu

Odpad z dílu (vlhký stav) - S0			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,197	4,16	5,9
2	0,214	4,16	6,4
3	0,239	4,16	7,2
4	0,204	4,16	6,1
5	0,254	4,16	7,6
6	0,214	4,16	6,4
7	0,235	4,16	7,1
8	0,252	4,16	7,6
9	0,27	4,16	8,1
10	0,238	4,16	7,2
Průměr			7,0
Směrodatná odchylka			0,7

Příloha 25: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z čistého prášku v suchém stavu

Čistý PA12 (suchý stav) - S0			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,195	4,23	5,8
2	0,192	4,32	5,6
3	0,2	4,23	5,9
4	0,172	4,20	5,1
5	0,153	4,22	4,5
6	0,158	4,23	4,7
7	0,153	4,24	4,5
8	0,169	4,25	5,0
9	0,154	4,20	4,6
10	0,169	4,24	5,0
Průměr			5,1
Směrodatná odchylka			0,5

Příloha 26: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 v suchém stavu

Směs 80/20 (suchý stav) - S0			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,169	4,26	5,0
2	0,166	4,26	4,9
3	0,146	4,26	4,3
4	0,192	4,22	5,7
5	0,166	4,25	4,9
6	0,172	4,22	5,1
7	0,154	4,23	4,6
8	0,161	4,25	4,7
9	0,189	4,23	5,6
10	0,154	4,23	4,6
Průměr			4,9
Směrodatná odchylka			0,4

Příloha 27: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z odpadu ze sudu v suchém

Odpad ze sudu (suchý stav) - S0			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,18	4,26	5,3
2	0,207	4,25	6,1
3	0,161	4,29	4,7
4	0,169	4,24	5,0
5	0,153	4,26	4,5
6	0,164	4,29	4,8
7	0,161	4,22	4,8
8	0,167	4,30	4,9
9	0,146	4,27	4,3
10	0,153	4,23	4,5
Průměr			4,9
Směrodatná odchylka			0,5

Příloha 28: Vrubová houževnatost Charpy nestárnutých vzorků z odpadu z dílu v suchém stavu

Odpad z dílu (suchý stav) - S0			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,172	4,15	5,2
2	0,215	4,16	6,5
3	0,166	4,22	4,9
4	0,198	4,14	6,0
5	0,158	4,16	4,7
6	0,172	4,16	5,2
7	0,158	4,15	4,8
8	0,158	4,27	4,6
9	0,166	4,16	5,0
10	0,198	4,17	5,9
Průměr			5,3
Směrodatná odchylka			0,6

Příloha 29: Vrubová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (200 h) z čistého prášku

Čistý PA12 - S200			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,127	4,21	3,8
2	0,125	4,21	3,7
3	0,124	4,21	3,7
4	0,128	4,21	3,8
5	0,122	4,21	3,6
6	0,136	4,21	4,0
7	0,126	4,21	3,7
8	0,128	4,21	3,8
9	0,129	4,21	3,8
10	0,125	4,21	3,7
Průměr			3,8
Směrodatná odchylka			0,1

Příloha 30: Vrbová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (200 h) ze směsi 80/20

Směs 80/20 - S200			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,167	4,22	5,0
2	0,132	4,22	3,9
3	0,166	4,22	4,9
4	0,134	4,22	4,0
5	0,125	4,22	3,7
6	0,144	4,22	4,3
7	0,127	4,22	3,8
8	0,129	4,22	3,8
9	0,146	4,22	4,3
10	0,137	4,22	4,1
Průměr			4,2
Směrodatná odchylka			0,4

Příloha 31: Vrbová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (200 h) z odpadu ze sudu

Odpad ze sudu - S200			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,096	4,21	2,9
2	0,131	4,21	3,9
3	0,138	4,21	4,1
4	0,142	4,21	4,2
5	0,13	4,21	3,9
6	0,134	4,21	4,0
7	0,128	4,21	3,8
8	0,13	4,21	3,9
9	0,138	4,21	4,1
10	0,14	4,21	4,2
Průměr			3,9
Směrodatná odchylka			0,4

Příloha 32: Vrbová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (200 h) z odpadu z dílu

Odpad z dílu - S200			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,122	4,21	3,6
2	0,12	4,21	3,6
3	0,132	4,21	3,9
4	0,099	4,21	2,9
5	0,119	4,21	3,5
6	0,113	4,21	3,4
7	0,131	4,21	3,9
8	0,132	4,21	3,9
9	0,127	4,21	3,8
10	0,101	4,21	3,0
Průměr			3,6
Směrodatná odchylka			0,3

Příloha 33: Vrbová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (500 h) z čistého prášku

Čistý PA12 - S500			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,14	4,21	4,2
2	0,094	4,21	2,8
3	0,094	4,21	2,8
4	0,1	4,21	3,0
5	0,111	4,21	3,3
6	0,089	4,21	2,6
7	0,083	4,21	2,5
8	0,115	4,21	3,4
9	0,101	4,21	3,0
10	0,111	4,21	3,3
Průměr			3,1
Směrodatná odchylka			0,5

Příloha 34: Vrbová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (500 h) ze směsi 80/20

Směs 80/20 - S500			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,112	4,22	3,3
2	0,115	4,22	3,4
3	0,115	4,22	3,4
4	0,105	4,22	3,1
5	0,091	4,22	2,7
6	0,097	4,22	2,9
7	0,105	4,22	3,1
8	0,118	4,22	3,5
9	0,101	4,22	3,0
10	0,105	4,22	3,1
Průměr			3,2
Směrodatná odchylka			0,2

Příloha 35: Vrbová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (500 h) z odpadu ze sudu

Odpad ze sudu - S500			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,094	4,21	2,8
2	0,089	4,21	2,6
3	0,101	4,21	3,0
4	0,108	4,21	3,2
5	0,083	4,21	2,5
6	0,108	4,21	3,2
7	0,101	4,21	3,0
8	0,086	4,21	2,6
9	0,089	4,21	2,6
10	0,091	4,21	2,7
Průměr			2,8
Směrodatná odchylka			0,3

Příloha 36: Vrbová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (500 h) z odpadu z dílu

Odpad z dílu - S500			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,091	4,26	2,7
2	0,123	4,26	3,6
3	0,079	4,26	2,3
4	0,094	4,26	2,8
5	0,086	4,26	2,5
6	0,082	4,26	2,4
7	0,083	4,26	2,4
8	0,112	4,26	3,3
9	0,118	4,26	3,5
10	0,112	4,26	3,3
Průměr			2,9
Směrodatná odchylka			0,5

Příloha 37: Vrbová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (1000 h) z čistého prášku

Čistý PA12 - S1000			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,078	4,21	2,3
2	0,079	4,21	2,3
3	0,082	4,21	2,4
4	0,104	4,21	3,1
5	0,079	4,21	2,3
6	0,079	4,21	2,3
7	0,072	4,21	2,1
8	0,085	4,21	2,5
9	0,075	4,21	2,2
10	0,075	4,21	2,2
Průměr			2,4
Směrodatná odchylka			0,3

Příloha 38: Vrbová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (1000 h) ze směsi 80/20

Směs 80/20 - S1000			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,082	4,20	2,4
2	0,078	4,20	2,3
3	0,079	4,20	2,4
4	0,082	4,20	2,4
5	0,082	4,20	2,4
6	0,079	4,20	2,4
7	0,082	4,20	2,4
8	0,082	4,20	2,4
9	0,078	4,20	2,3
10	0,082	4,20	2,4
Průměr			2,4
Směrodatná odchylka			0,1

Příloha 39: Vrbová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu ze sudu

Odpad ze sudu - S1000			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,079	4,20	2,4
2	0,082	4,20	2,4
3	0,078	4,20	2,3
4	0,078	4,20	2,3
5	0,082	4,20	2,4
6	0,082	4,20	2,4
7	0,079	4,20	2,4
8	0,085	4,20	2,5
9	0,079	4,20	2,4
10	0,079	4,20	2,4
Průměr			2,4
Směrodatná odchylka			0,1

Příloha 40: Vrbová houževnatost Charpy stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu z dílu

Odpad z dílu - S1000			
Vzorek	E_c [J]	h [mm]	a_{ca} [kJ/mm ²]
1	0,085	4,16	2,6
2	0,082	4,16	2,5
3	0,096	4,16	2,9
4	0,082	4,16	2,5
5	0,09	4,16	2,7
6	0,101	4,16	3,0
7	0,082	4,16	2,5
8	0,079	4,16	2,4
9	0,082	4,16	2,5
10	0,082	4,16	2,5
Průměr			2,6
Směrodatná odchylka			0,2

Příloha 41: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z čistého prášku ve vlhkém stavu

Čistý PA12 (vlhký stav) - S0						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,21	9,94	1175	40,6	6,3	316,0
2	4,21	9,94	1083	40,5	6,4	298,0
3	4,21	9,94	1043	38,7	5,6	322,5
4	4,21	9,94	1176	42,3	6,4	304,6
5	4,21	9,94	1077	39,3	6,1	311,7
6	4,21	9,94	1050	38,7	7,0	272,7
7	4,21	9,94	1135	40,4	6,1	323,9
8	4,21	9,94	1063	39,9	6,5	320,5
9	4,21	9,94	1097	39,9	6,5	317,4
10	4,21	9,94	1116	39,9	6,7	321,2
Průměr			1101	40,0		310,9
Směrodatná odchylka			45	1,0		15,0

Příloha 42: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 ve vlhkém stavu

Směs 80/20 (vlhký stav) - S0						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,22	10,00	1147	41,9	5,8	236,1
2	4,22	10,00	1165	41,3	5,9	236,0
3	4,22	10,00	1145	41,2	6,4	230,6
4	4,22	10,00	1094	39,8	7,0	235,6
5	4,22	10,00	1139	40,6	6,6	211,6
6	4,22	10,00	1113	40,4	6,8	229,3
7	4,22	10,00	1133	41,3	6,2	223,7
8	4,22	10,00	1133	41,6	5,8	228,1
9	4,22	10,00	1153	41,3	6,1	227,4
10	4,22	10,00	1152	41,1	6,1	230,3
Průměr			1137	41,0		228,9
Směrodatná odchylka			20	0,6		6,9

Příloha 43: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu ze sudu ve vlhkém stavu

Odpad ze sudu (vlhký stav) - S0						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,21	9,99	1234	41,8	6,1	229,5
2	4,21	9,99	1150	41,8	6,0	215,2
3	4,21	9,99	1183	42,1	6,0	225,5
4	4,21	9,99	1221	41,7	6,0	221,6
5	4,21	9,99	1156	41,8	5,8	230,2
6	4,21	9,99	1222	41,9	5,9	216,6
7	4,21	9,99	1142	40,8	6,0	219,6
8	4,21	9,99	1176	41,8	5,9	219,6
9	4,21	9,99	1208	41,8	6,3	233,2
10	4,21	9,99	1170	41,5	6,1	205,3
Průměr			1186	41,7		221,6
Směrodatná odchylka			31	0,3		7,9

Příloha 44: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu z dílu ve vlhkém stavu

Odpad z dílu (vlhký stav) - S0						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,16	10,00	1222	40,8	5,8	221,6
2	4,16	10,00	1175	40,9	6,2	215,7
3	4,16	10,00	1161	40,7	6,5	228,4
4	4,16	10,00	1129	41,2	6,3	222,5
5	4,16	10,00	1161	41,4	6,1	226,8
6	4,16	10,00	1115	40,4	6,8	219,8
7	4,16	10,00	1109	40,6	6,5	210,4
8	4,16	10,00	1130	40,2	6,8	211,5
9	4,16	10,00	1142	40,9	6,5	224,6
10	4,16	10,00	1115	40,6	6,5	219,3
Průměr			1146	40,8		220,1
Směrodatná odchylka			33	0,3		5,7

Příloha 45: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z čistého prášku v suchém stavu

Čistý PA12 (suchý stav) - S0						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,31	10,07	1474	44,7	2,4	340,4
2	4,32	10,06	1410	44,5	2,4	237,1
3	4,19	10,04	1455	45,9	2,4	262,4
4	4,32	10,06	1499	46,4	2,4	368,6
5	4,25	10,05	1462	46,4	2,4	297,9
6	4,35	10,06	1447	44,2	2,4	337,6
7	4,31	10,07	1441	45,1	2,4	306,4
8	4,18	10,03	1488	46,9	2,4	378,6
9	4,29	10,05	1465	45,8	2,3	375,4
10	4,17	10,04	1451	44,7	2,4	295,5
Průměr			1459	45,5		320,0
Směrodatná odchylka			24	0,9		45,9

Příloha 46: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků ze směsi 80/20 v suchém stavu

Směs 80/20 (suchý stav) - S0						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,24	10,04	1470	46,1	2,4	315,9
2	4,25	10,04	1407	43,2	2,4	387,2
3	4,22	10,06	1341	42,4	2,5	297,4
4	4,23	10,06	1364	42,9	2,5	329,5
5	4,25	10,04	1400	43,2	2,4	315,2
6	4,25	10,04	1335	41,6	2,5	336,0
7	4,24	10,06	1322	41,3	2,5	387,0
8	4,24	10,06	1369	42,6	2,5	305,8
9	4,24	10,06	1336	42,2	2,5	341,0
10	4,24	10,06	1331	42,2	2,5	324,7
Průměr			1368	42,8		334,0
Směrodatná odchylka			44	1,3		29,4

Příloha 47: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu ze sudu v suchém stavu

Odpad ze sudu (suchý stav) - S0						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,20	10,03	1397	42,7	2,4	282,7
2	4,24	10,03	1419	43,0	2,4	307,0
3	4,16	10,04	1430	43,5	2,4	245,9
4	4,20	10,03	1426	43,9	2,4	284,5
5	4,25	10,04	1358	42,5	2,5	245,8
6	4,15	10,04	1364	42,1	2,5	285,2
7	4,15	10,04	1433	44,2	2,5	236,0
8	4,15	10,04	1402	42,6	2,4	226,4
9	4,13	10,04	1357	42,0	2,5	330,8
10	4,19	10,04	1437	44,2	2,3	277,1
Průměr			1402	43,1		272,1
Směrodatná odchylka			30	0,8		31,5

Příloha 48: Tahové vlastnosti nestárnutých vzorků z odpadu z dílu v suchém stavu

Odpad z dílu (suchý stav) - S0						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,26	10,03	1486	45,6	2,4	332,2
2	4,24	10,04	1482	45,1	2,4	284,2
3	4,25	10,04	1463	44,5	2,3	342,2
4	4,23	10,04	1479	45,1	2,4	337,7
5	4,23	10,04	1449	44,2	2,4	305,3
6	4,22	10,04	1480	45,2	2,3	309,6
7	4,24	10,03	1453	44,4	2,4	348,9
8	4,24	10,03	1513	45,3	2,4	324,0
9	4,25	10,03	1457	44,4	2,3	319,0
10	4,24	10,03	1454	44,0	2,4	300,1
Průměr			1472	44,8		320,3
Směrodatná odchylka			19	0,5		19,5

Příloha 49: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) z čistého prášku

Čistý PA12 - S200						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,21	9,94	1605	51,3	12,9	29,3
2	4,21	9,94	1704	51,3	12,7	27,7
3	4,21	9,94	1564	51,4	12,9	28,1
4	4,21	9,94	1650	51,5	13,1	100,0
5	4,21	9,94	1670	51,2	12,8	37,2
6	4,11	9,96	1638	52,7	11,3	61,3
7	4,11	9,96	1834	54,0	10,6	71,7
8	4,11	9,96	1623	53,7	9,1	78,8
9	4,11	9,96	1741	53,2	11,3	68,4
10	4,11	9,96	1588	51,8	12,2	41,0
Průměr			1662	52,2		54,3
Směrodatná odchylka			76	1,0		23,9

Příloha 50: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) ze směsi 80/20

Směs 80/20 - S200						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,22	9,95	1566	50,6	14,3	157,5
2	4,22	9,95	1553	51,5	13,3	157,3
3	4,22	9,95	1566	49,8	12,9	201,1
4	4,22	9,95	1572	50,2	13,8	148,2
5	4,22	9,95	1559	50,3	13,3	146,5
6	4,22	9,95	1618	51,5	12,9	21,4
7	4,22	9,95	1612	50,7	13,7	33,0
8	4,22	9,95	1593	50,5	13,3	48,2
9	4,22	9,95	1599	50,5	12,6	223,5
10	4,22	9,95	1547	49,9	13,8	251,6
Průměr			1579	50,6		138,8
Směrodatná odchylka			24	0,5		76,0

Příloha 51: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) z odpadu ze sudu

Odpad ze sudu - S200						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y=\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y=\varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,21	9,94	1571	50,8	12,3	200,8
2	4,21	9,94	1538	49,6	13,7	204,8
3	4,21	9,94	1519	49,0	13,9	247,7
4	4,21	9,94	1552	50,2	12,9	253,5
5	4,21	9,94	1526	49,4	13,3	241,6
6	4,21	9,94	1519	48,8	14,2	66,1
7	4,21	9,94	1539	49,7	14,5	193,0
8	4,21	9,94	1473	49,6	12,9	186,8
9	4,21	9,94	1551	49,9	13,5	147,1
10	4,21	9,94	1584	50,2	13,1	223,8
Průměr			1537	49,7		196,5
Směrodatná odchylka			29	0,6		53,2

Příloha 52: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (200 h) z odpadu z dílu

Odpad z dílu - S200						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y=\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y=\varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,21	9,94	1591	51,5	12,9	107,6
2	4,21	9,94	1625	51,4	13,7	42,1
3	4,21	9,94	1670	52,5	13,1	57,8
4	4,21	9,94	1618	51,6	13,6	150,7
5	4,21	9,94	1624	51,5	13,5	116,5
6	4,21	9,94	1638	52,3	13,7	74,9
7	4,21	9,94	1625	51,9	13,8	86,2
8	4,21	9,94	1605	51,7	13,5	127,9
9	4,21	9,94	1644	52,3	13,1	160,9
10	4,21	9,94	1638	52,3	13,0	146,6
Průměr			1628	51,9		107,1
Směrodatná odchylka			21	0,4		38,7

Příloha 53: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z čistého prášku

Čistý PA12 - S500						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,26	9,96	1856	32,9	2,0	2,0
2	4,26	9,96	1882	35,9	2,1	2,1
3	4,26	9,96	1810	29,7	1,7	1,7
4	4,26	9,96	1797	52,4	6,1	6,1
5	4,26	9,96	1810	53,6	21,9	21,9
6	4,21	9,95	1988	57,6	10,8	41,6
7	4,21	9,95	2053	57,9	10,4	15,6
8	4,21	9,95	2009	57,7	10,4	43,2
9	4,21	9,95	1993	55,0	4,1	4,5
10	4,21	9,95	1989	58,1	10,3	46,5
11	4,16	9,96	1867	54,4	11,5	15,0
12	4,16	9,96	1916	54,5	11,2	20,8
13	4,16	9,96	1860	54,7	11,2	22,4
14	4,16	9,96	1990	35,3	1,9	2,4
15	4,16	9,96	1832	29,6	1,6	1,9
Průměr			1910	48,0		16,5
Směrodatná odchylka			83	11,0		15,6

Příloha 54: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) ze směsi 80/20

Směs 80/20- S500						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,26	9,96	1889	53,4	6,1	5,4
2	4,26	9,96	2030	54,4	4,3	4,0
3	4,26	9,96	1888	41,3	2,4	2,3
4	4,26	9,96	1862	44,3	2,7	2,6
5	4,26	9,96	1941	55,3	9,4	8,1
6	4,26	9,96	1950	49,6	7,2	7,5
7	4,19	9,95	1969	56,0	10,5	18,2
8	4,19	9,95	2029	40,6	2,2	2,7
9	4,19	9,95	2009	57,9	10,7	19,3
10	4,19	9,95	2064	57,4	10,6	20,5
11	4,23	9,95	1918	51,8	3,8	4,4
12	4,23	9,95	1956	52,9	4,6	4,9
13	4,23	9,95	1935	38,3	2,1	2,5
14	4,17	9,95	1913	35,7	1,9	2,3
15	4,17	9,95	1899	54,6	8,2	7,8
Průměr			1950	49,6		7,5
Směrodatná odchylka			58	7,2		6,2

Příloha 55: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z odpadu ze sudu

Odpad ze sudu - S500						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y=\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y=\varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,26	9,96	2032	55,7	12,0	9,8
2	4,26	9,96	1856	55,9	12,5	12,9
3	4,26	9,96	1940	41,9	2,3	2,3
4	4,26	9,96	1849	37,6	2,2	2,1
5	4,26	9,96	1810	54,5	9,1	7,6
6	4,19	9,94	2002	57,1	10,8	49,3
7	4,19	9,94	2002	58,7	11,6	21,8
8	4,19	9,94	1986	57,2	11,1	44,3
9	4,19	9,94	1920	56,9	10,8	41,0
10	4,19	9,94	2058	56,7	10,8	46,5
11	4,32	9,96	1944	53,6	6,6	6,4
12	4,32	9,96	1833	53,7	6,2	6,2
13	4,32	9,96	1880	55,2	11,0	9,8
14	4,26	9,96	1910	37,6	2,0	2,5
15	4,26	9,96	1888	54,6	7,5	7,1
Průměr			1927	52,5		18,0
Směrodatná odchylka			74	6,9		17,2

Příloha 56: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (500 h) z odpadu z dílu

Odpad z dílu - S500						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y=\sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y=\varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,26	9,96	1895	55,0	11,4	16,2
2	4,26	9,96	1908	56,1	11,5	17,1
3	4,26	9,96	1882	55,0	7,3	6,3
4	4,26	9,96	1797	55,0	11,6	53,1
5	4,26	9,96	1797	54,8	11,9	47,9
6	4,16	9,94	1899	54,6	11,5	44,7
7	4,16	9,94	1928	54,8	11,6	61,9
8	4,16	9,94	1946	55,4	11,9	44,0
9	4,16	9,94	1893	54,5	11,6	60,0
10	4,16	9,94	1899	55,3	11,7	65,6
11	4,30	9,96	1881	52,8	5,0	5,2
12	4,30	9,96	1956	52,9	5,2	5,4
13	4,30	9,96	1993	53,1	5,2	5,3
14	4,22	9,96	1870	54,6	14,0	11,8
15	4,22	9,96	1880	53,6	7,4	6,9
Průměr			1895	54,5		30,1
Směrodatná odchylka			50	0,9		23,2

Příloha 57: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) z čistého prášku

Čistý PA12 - S1000						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,21	9,95	1929	40,4	2,2	2,6
2	4,21	9,95	1898	58,6	11,2	16,3
3	4,21	9,95	1838	56,5	6,6	6,4
4	4,21	9,95	1832	58,2	11,4	13,4
5	4,21	9,95	1914	44,6	2,5	3,0
6	4,21	9,95	1901	58,7	11,3	10,1
7	4,21	9,95	1920	57,8	8,0	7,5
8	4,21	9,95	1867	55,8	5,6	5,7
9	4,21	9,95	1887	42,9	2,4	2,9
10	4,21	9,95	1870	55,4	5,3	5,4
Průměr			1886	52,9		7,3
Směrodatná odchylka			32	6,9		4,4

Příloha 58: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) ze směsi 80/20

Směs 80/20- S1000						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,20	9,94	1946	49,7	3,4	4,9
2	4,20	9,94	1929	41,3	2,3	3,3
3	4,20	9,94	1915	47,9	3,4	7,8
4	4,20	9,94	1991	31,7	1,6	2,0
5	4,20	9,94	1852	54,3	4,3	4,6
6	4,20	9,94	1898	57,8	11,3	21,3
7	4,20	9,94	1945	53,0	3,8	4,2
8	4,20	9,94	1947	34,9	1,8	2,2
9	4,20	9,94	1873	35,0	1,9	2,2
10	4,20	9,94	1816	56,0	5,6	5,6
Průměr			1911	46,2		5,8
Směrodatná odchylka			50	9,2		5,4

Příloha 59: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu ze sudu

Odpad ze sudu - S1000						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,20	9,95	1796	49,4	3,1	3,5
2	4,20	9,95	1860	44,5	2,5	3,0
3	4,20	9,95	1970	57,3	7,4	7,0
4	4,20	9,95	1829	50,6	3,2	3,6
5	4,20	9,95	1793	45,3	2,6	3,1
6	4,20	9,95	1854	49,7	3,1	3,6
7	4,20	9,95	1864	57,8	11,3	15,4
8	4,20	9,95	1792	56,2	6,1	5,9
9	4,20	9,95	2056	43,7	2,4	2,9
10	4,20	9,95	1828	58,4	10,7	9,6
Průměr			1864	51,3		5,8
Směrodatná odchylka			81	5,5		3,8

Příloha 60: Tahové vlastnosti stárnutých vzorků (1000 h) z odpadu z dílu

Odpad z dílu - S1000						
Vzorek	h [mm]	b [mm]	E_t [MPa]	$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$\varepsilon_y = \varepsilon_m$ [%]	ε_{tb} [%]
1	4,16	9,95	1795	57,7	12,1	15,9
2	4,16	9,95	1904	58,3	11,9	16,4
3	4,16	9,95	1831	58,1	11,9	25,6
4	4,16	9,95	1835	57,7	12,0	25,3
5	4,16	9,95	2337	57,2	11,6	47,7
6	4,16	9,95	1861	57,9	11,6	36,5
7	4,16	9,95	1857	58,5	9,5	8,7
8	4,16	9,95	1765	57,6	12,4	21,9
9	4,16	9,95	1703	58,0	12,4	19,5
10	4,16	9,95	1648	58,2	11,7	21,1
Průměr			1854	57,9		23,9
Směrodatná odchylka			177	0,4		10,5

Příloha 61: Teplota měknutí dle Vicata nestárnutých vzorků ve vlhkém stavu

VST [°C] - S0 (vlhký stav)				
Vzorek	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
1	135,5	135,9	139,9	137,9
2	133,1	136,7	137,0	135,8
3	134,2	137,8	137,8	137,0
Průměr	134	137	138	137
Směrodatná odchylka	1	1	1	1

Příloha 62: Teplota měknutí dle Vicata nestárnutých vzorků v suchém stavu

VST [°C] - S0 (suchý stav)				
Vzorek	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
1	134,6	135,0	136,7	135,9
2	134,1	134,7	136,3	135,0
3	135,5	135,8	136,9	136,0
Průměr	135	135	137	136
Směrodatná odchylka	1	0	0	0

Příloha 63: Teplota měknutí dle Vicata stárnutých vzorků (200 h)

VST [°C] - S200				
Vzorek	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
1	157,6	155,1	158,2	157,7
2	157,8	154,7	159,1	157,7
3	157,7	155,6	158,6	158,3
Průměr	158	155	159	158
Směrodatná odchylka	0	0	0	0

Příloha 64: Teplota měknutí dle Vicata stárnutých vzorků (500 h)

VST [°C] - S500				
Vzorek	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
1	162,1	161,8	162,9	162,0
2	161,2	162,2	162,0	162,4
3	162,3	161,9	162,2	161,6
Průměr	162	162	162	162
Směrodatná odchylka	0	0	0	0

Příloha 65: Teplota měknutí dle Vicata stárnutých vzorků (1000 h)

VST [°C] - S1000				
Vzorek	Čistý PA12	Směs 80/20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
1	166,7	165,5	165,9	164,1
2	166,2	165,5	165,0	164,6
3	166,6	165,5	165,3	164,7
Průměr	167	166	165	164
Směrodatná odchylka	0	0	0	0