



# Využití technologického odpadu polyamidu 12 z technologie Multi Jet Fusion pro vstřikované díly vystavené atmosférickému stárnutí

## Bakalářská práce

*Studijní program:*  
*Studijní obor:*

B2301 Strojní inženýrství  
Strojní inženýrství

*Autor práce:*  
*Vedoucí práce:*

**Ondřej Louda**  
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 polyamidu 12 z technologie Multi Jet Fusion pro vstřikované díly vystavené atmosférickému stárnutí

*Jméno a příjmení:* **Ondřej Louda**  
*Osobní číslo:* S18000064  
*Studijní program:* B2301 Strojní inženýrství  
*Studijní obor:* Strojní inženýrství  
*Zadávací katedra:* Katedra strojírenské technologie  
*Akademický rok:* **2020/2021**

### Zásady pro vypracování:

1. Vypracování literární rešerše na dané téma.
2. Vstřikování a 3D tisk zkušebních těles technologií Multi Jet Fusion z práškového polymeru PA12.
3. Vstřikování a 3D tisk zkušebních těles z technologického odpadu PA12 a ze směsi nového a odpadového materiálu.
4. Umělé atmosférické stárnutí zkušebních těles.
5. Stanovení základních mechanických a tepelných vlastností materiálů před a po umělém atmosférickém stárnutí.
6. Vyhodnocení výsledků, diskuse a 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.

27. června 2021

Ondřej Louda

## **Název**

Využití technologického odpadu polyamidu 12 z technologie Multi Jet Fusion pro vstříkované díly vystavené atmosférickému stárnutí.

## **Anotace**

Tato bakalářská práce se zabývá studii využitelnosti technologického odpadu polyamidu 12 z aditivní technologie Multi Jet Fusion pro vstříkované díly vystavené atmosférickému stárnutí. Teoretická část práce se zaměřuje na popis technologie vstříkování, aditivní technologie Multi Jet Fusion a základní charakteristiku použitého materiálu polyamidu 12. V experimentální části práce je popsán postup výroby zkušebních vzorků a následně zkoušení jejich mechanických vlastností a tvarové stálosti dle teploty měknutí podle Vicata. Na základě naměřených hodnot bylo provedeno celkové zhodnocení využitelnosti technologického odpadu.

## **Klíčová slova**

polyamid 12, technologie vstříkování, aditivní technologie, Multi Jet Fusion, technologický odpad, atmosférické stárnutí

## **Title**

Use of polyamide 12 technological waste from Multi Jet Fusion technology for injection molded parts exposed atmospheric aging.

## **Annotation**

This bachelor thesis deals with the study of the usability of technological waste polyamide 12 from the additive technology Multi Jet Fusion for injection molded parts exposed to atmospheric aging. The theoretical part of the work focuses on description of injection molding technology, additive technology Multi Jet Fusion and the basic characteristics of the used material polyamide 12. The experimental part of the work describes the process of production of test specimens and subsequent testing of their mechanical properties and shape stability according Vicat softening temperature. Based on the measured values, an overall evaluation of the usability of technological waste was performed.

## **Key words**

polyamide 12, injection molding, additive manufacturing, Multi Jet Fusion, technological waste, atmospheric aging

## **Poděkování**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce panu Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D. za jeho velmi laskavý přístup, pomoc při řešení problémů a za jeho cenné rady a připomínky. Dále bych chtěl poděkovat konzultantovi práce panu Ing. Jiřímu Šafkovi, Ph.D. za poradenství v oblasti aditivních technologií. Velké poděkování pak patří mé rodině a přátelům, kteří mě podporovali po celou dobu mého studia.

## Obsah

1	Úvod .....	11
2	Teoretická část .....	13
2.1	Technologie Multi Jet Fusion .....	13
2.2	Technologie vstřikování termoplastů.....	18
2.2.1	Vstřikovací stroje .....	19
2.2.2	Vstřikovací formy .....	21
2.2.3	Proces vstřikování .....	22
2.2.4	Základní technologické parametry vstřikování a jejich vliv na kvalitu výrobků .....	23
3	Experimentální část.....	27
3.1	Příprava zkušebních těles.....	27
3.1.1	Příprava zkušebních těles technologií vstřikování .....	28
3.1.2	Příprava zkušebních těles technologií MJF .....	30
3.1.3	Atmosférické stárnutí zkušebních těles .....	31
3.2	Zkoušky mechanických vlastností .....	33
3.2.1	Statická zkouška tahem.....	33
3.2.2	Stanovení ohybových vlastností.....	36
3.2.3	Stanovení vrubové houževnatosti metodou Charpy.....	38
3.3	Stanovení teploty měknutí podle Vicata.....	41
4	Vyhodnocení a diskuze výsledků.....	43
4.1	Hodnocení vlastností vzorků zhotovených technologií vstřikování .....	43
4.2	Hodnocení vlastností vzorků zhotovených technologií MJF .....	49
5	Závěr.....	56
	Literatura a použité zdroje.....	58
	Seznam příloh.....	61



## Seznam použitých zkratk a symbolů

$D$	[mm]	průměr šneku vstřikovacího stroje
$E_c$	[J]	korigovaná energie spotřebovaná pro přeražení zkušebního tělesa
$E_f$	[MPa]	modul pružnosti v ohybu
$L$	[mm]	délka šneku vstřikovacího stroje
$VST$	[°C]	teplota měknutí podle Vicata (Vicatův stupeň)
$a_{cA}$	[kJ/m <sup>2</sup> ]	vrubová houževnatost Charpy
$b$	[mm]	šířka zkušebního tělesa
$b_A$	[mm]	šířka zkušebního tělesa pod vrubem
$h$	[mm]	tloušťka zkušebního tělesa
$p_i$	[MPa]	tlak v dutině formy
$p_z$	[MPa]	zbytkový tlak v dutině formy
$s$	[dle veličiny]	výběrová směrodatná odchylka
$t_D$	[s]	doba dotlaku
$t_{chl}$	[s]	doba chlazení
$t_m$	[s]	doba manipulace
$t_{pl}$	[s]	doba plastifikace
$t_{s1}$	[s]	doba uzavírání vstřikovací formy
$t_{s2}$	[s]	doba přisouvání vstřikovací jednotky k formě
$t_{s3}$	[s]	doba otevírání vstřikovací formy
$t_v$	[s]	doba vstřikování
$x$	[dle veličiny]	průměrná hodnota
$\varepsilon_{f1}$	[%]	deformace v ohybu 0,05 %
$\varepsilon_{f2}$	[%]	deformace v ohybu 0,25 %
$\varepsilon_m$	[%]	poměrné prodloužení na mezi pevnosti v tahu

$\varepsilon_{tb}$	[%]	jmenovité poměrné prodloužení při přetržení
$\varepsilon_y$	[%]	poměrné prodloužení na mezi kluzu
$\sigma_{f1}$	[MPa]	napětí v ohybu při deformaci $\varepsilon_{f1}$
$\sigma_{f2}$	[MPa]	napětí v ohybu při deformaci $\varepsilon_{f2}$
$\sigma_{fM}$	[MPa]	mez pevnosti v ohybu
$\sigma_m$	[MPa]	mez pevnosti v tahu
$\sigma_y$	[MPa]	napětí na mezi kluzu
MJF		Multi Jet Fusion
PA		polyamid
TPA		termoplastický polyamid
TPU		termoplastický polyuretan

## 1 Úvod

Plasty patří mezi jedny z nejpoužívanějších materiálů, jejichž využitelnost neustále roste. Oproti jiným materiálům mají výhodu, že jsou snáze zpracovatelné a mají mnohem širší možnosti, pokud jde o modifikaci jejich vlastností. Zpracovávají se různými postupy: vstřikováním, vytlačováním, rotačním tvářením, vyfukováním, zvlákněním apod. Setkat se s nimi lze jak v konstrukčních aplikacích, tak i u dílů spotřební techniky nebo při výrobě prototypových součástí, pro jejichž výrobu je užíváno technologií rapid prototyping, někdy označovaných také jako aditivní technologie, které jsou v posledních několika letech na vzestupu, a každým rokem se vývoj v této oblasti posouvá značně kupředu. Odbornou, ale i širokou veřejností přestávají být vnímány jen jako technologie prototypové, neboť řada z nich umožňuje malosériovou nebo i středně sériovou výrobu, která vyhovuje z technologického i ekonomického hlediska současným požadavkům. Velmi často bývají aditivní technologie 3D tisku prezentovány jako technologie bezodpadové a tím pádem velmi efektivní z hlediska využití zpracovávaného materiálu. Tato skutečnost však není pravidlem. Například při technologii Multi Jet Fusion (MJF), která patří k nejmodernějším technologiím 3D tisku, zabývající se zpracováním polymerního prášku, vzniká technologický odpad, který lze z části nebo vůbec použít opět pro 3D tisk. Jedná se o technologický odpad nevyužitého prášku při 3D tisku součásti, který slouží zároveň jako jeho podpěra (v omezeném množství lze použít pro 3D tisk) nebo o odpad práškového polymeru, který je získán z očištěných dílů (pro opakovaný 3D tisk již není používán).

Plastikářský průmysl si postupně vybudoval pozici jednoho z klíčových hráčů. Velký důraz je kladen na inovace, vzniká tu celá řada zajímavých projektů. Jedním z nich je i projekt, zabývající se myšlenkou využití technologického odpadu práškového polymeru PA 12 z aditivní výroby technologií MJF pro výrobu dílů technologií vstřikování. Na řešení dílčí části tohoto projektu se podílí i tato bakalářská práce, jejímž cílem je zhodnotit možnosti využití tohoto technologického odpadu v procesu vstřikování. V rámci řešení bakalářské práce budou vstřikováním zhotoveny zkušební vzorky z polymerního odpadu, které budou podrobeny studii mechanických vlastností z hlediska jeho typu a použití. Tyto vlastnosti budou sledovány před a v průběhu atmosférického stárnutí, které bude realizováno pomocí solární klimatické komory simulující sluneční záření na úrovni zemského povrchu. K experimentálnímu měření a studiu užitečných vlastností výstřiků bude použit nový práškový polymer PA 12 a jeho technologický odpad z 3D tisku. Vstřikovány budou vzorky z polymerního odpadu ze sudu (odsátého z výrobní jednotky), který při 3D tisku slouží současně jako podpěra dílu, vzorky, které jsou tvořeny směsí tohoto odpadu a nového polymeru

v poměru 80:20 a také vzorky, které budou zhotovené z práškového odpadu získaného po očištění dílů.

## 2 Teoretická část

V souladu se zadáním a vytyčenými cíli se teoretická část bakalářské práce zabývá literární rešerší aditivní technologie Multi Jet Fusion, dále jen MJF, která se profiluje jako možná konkurence technologie vstřikování termoplastů, a to jak z hlediska mechanických vlastností a povrchové kvality výrobků, tak i z hlediska produktivity výroby. Vzhledem k použitému polymeru na bázi polyamidu 12 se teoretická část zaměřuje na jeho základní charakteristiku. Jak již bylo zmíněno v úvodu práce, jednou z nevýhod technologie MJF, je vznik technologického odpadu. Vzhledem k tomu, že by bylo možné využít tento odpad například pro výrobu dílů technologií vstřikování, zabývá se rovněž teoretická část práce charakteristikou tohoto výrobního procesu.

### 2.1 Technologie Multi Jet Fusion

Jedná se o aditivní technologii výroby (3D tisk) plastových výrobků. Tato technologie byla uvedena na trh v roce 2016 firmou Hewlett-Packard.[1] Oproti ostatním metodám 3D tisku vyniká zejména vyšší produktivitou výroby. Z tohoto hlediska je technologie MJF vnímána jako možná konkurence pro technologii vstřikování termoplastů a to nejen z hlediska výrobní produktivity, ale i kvalitou povrchu a mechanických vlastností vyráběných výrobků.[1] Principem se jedná o 3D tisk, kdy je polymer ve formě prášku nanášen postupně v jednotlivých vrstvách na sebe, až se vytvoří požadovaný výrobek. Materiál se zpracovává za působení činidel a dodané světelné energie infračervených osvitových lamp. Touto technologií je možno zpracovávat polyamidy (PA 11, PA 12 nebo PA 12 v kombinaci se skleněnými kuličkami), ale také termoplastické elastomery (TPU, TPA), které vykazují výborné elastické vlastnosti.[2]

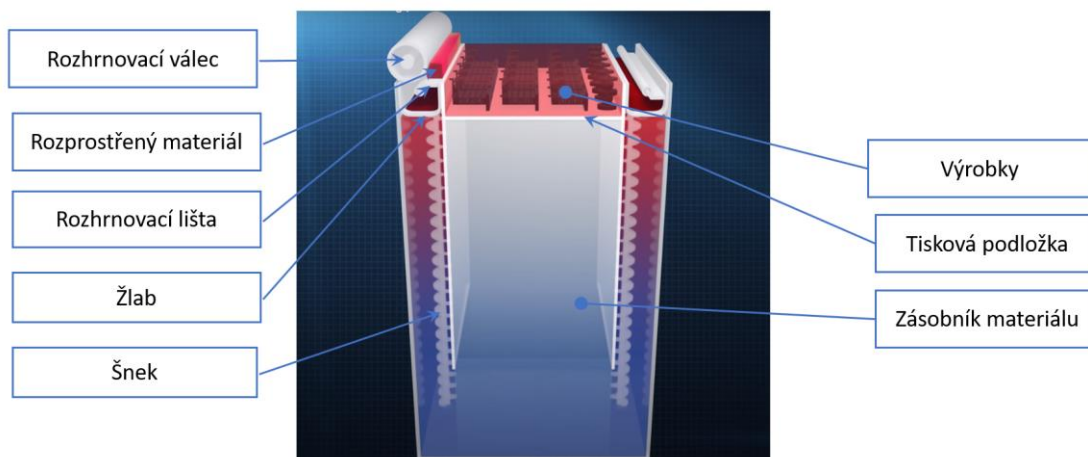
Celé tiskové řešení se skládá z 3D tiskárny, procesní stanice a výrobní jednotky, viz obr. 2.1. 3D tiskárna je zařízení sloužící k vlastnímu procesu 3D tisku. Je opatřena tiskovými hlavami pro nanášení činidel (tavicího činidla a činidla pro povrchovou úpravu), rozhrnovacím válcem, systémem pro odvod tepla z tiskového prostoru a řídicí jednotkou. V horní části tiskového prostoru se nachází osvitové lampy zajišťující rovnoměrný osvit nanesené vrstvy polymerního prášku a činidla. Výrobní jednotka je zařízení, které slouží jako zásobník práškového polymeru a zároveň jako výrobní komora. Výrobní jednotka není součástí 3D tiskárny, ale jedná se o vyjmutelné zařízení. Toto řešení umožňuje velmi efektivní způsob výroby, protože proces chlazení hotových výrobků nemusí probíhat v prostoru 3D tiskárny a blokovat tak její využití pro další tiskovou úlohu, ale může probíhat odděleně v procesní stanici. Další velkou předností takového řešení je možnost střídavého tisku z několika různých materiálů po sobě. Procesní stanice slouží k přípravě výrobní jednotky před tiskem. Obsahuje systém pro čerpání a mísení polymerního prášku. Po vytištění slouží procesní

jednotka jako systém pro řízené chlazení výrobků. Obsahuje také nástroje pro odstranění nevyužitého polymerního prášku (technologického odpadu) z výrobní jednotky po dokončení tisku. Takto znehodnocený prášek již nemusí mít odpovídající mechanické vlastnosti, jako prášek nový, protože může být částečně znehodnocen činností a dodanou tepelnou energií.[3–5]



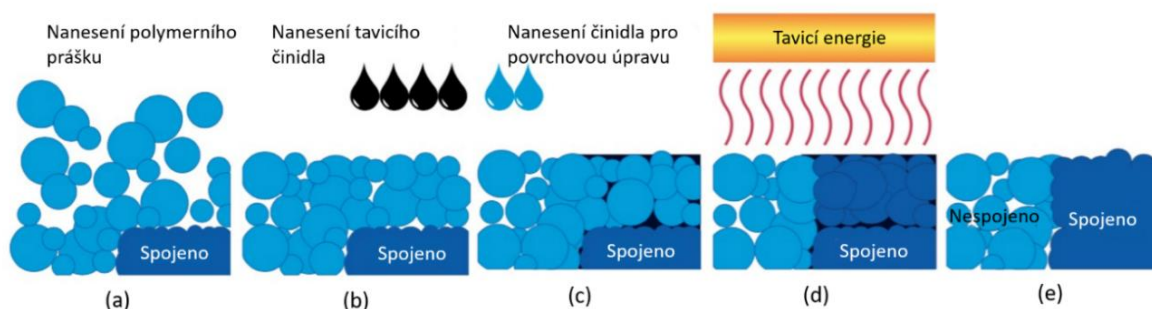
Obr. 2.1 Tiskové řešení HP Jet Fusion 4200 3D [6]

Před vlastním 3D tiskem je v přípravné fázi výrobní jednotka zavezena do procesní stanice, kde je následně naplněna dostatečným množstvím práškového polymeru. Použit lze nový polymer, případně i směs nového polymeru s odpadním. Poté se provede kalibrace trysek podle interaktivního průvodce řídicí jednotky 3D tiskárny. Po dokončení kalibračního procesu je výrobní jednotka zavezena do 3D tiskárny a je spuštěn proces 3D tisku. Samotný 3D tisk začíná s tiskovou podložkou v horní části výrobní jednotky a během tisku se po jednotlivých krocích (vrstvách) postupně posouvá dolů. Práškový materiál se nachází v zásobníku výrobní jednotky bezprostředně pod tiskovou podložkou. Ze zásobníku je dodáván do žlabů na obou protilehlých stranách výrobní jednotky prostřednictvím dvou šneků. Po naplnění je materiál ze žlabu odebírán rozhrnovací lištou a nanesen na okraj tiskové podložky. Poté válec 3D tiskárny rozhrne materiál rozprostřený na okraji tiskové podložky postupně po celé její ploše a zároveň ho upěchuje, aby vznikla homogenní vrstva prášku. Válec zůstane v zadní části stroje. Tento proces je znázorněn na obr. 2.2.[4, 7]



Obr. 2.2 Výrobní jednotka technologie MJF během tisku [8]

Nad takto připravenou vrstvou práškového materiálu, viz obr. 2.3a, přejede následně tisková hlava a do materiálu vstříkne činidlo. To je dvojího typu. V místech budoucího výrobku se vstříkne tzv. tavicí činidlo, viz obr. 2.3b, které obsahuje velké množství uhlíku, aby docházelo k co možná největší absorpci energie ze světla.[3] Na místa, která jsou v bezprostřední blízkosti ploch, jež mají být součástí budoucího výrobku, je pak vstříknuto činidlo pro povrchovou úpravu, viz obr. 2.3c. To je z větší části tvořeno vodou a má za úkol odvádět přebytečné teplo z okolí kontur výrobku a snížit tak jeho deformaci.[3] Následně je vždy celá vrstva osvětlena osvitovými lampami, které vyzařují infračervené světlo, viz obr. 2.3d.[5] Vlivem dodané tepelné energie ze světla dojde k chemické reakci mezi práškovým polymerem a tavicím činidlem, která způsobí spojení (roztavení) jednotlivých částíček a vytvoření vrstvy součástí, viz obr. 2.3e. Poté se tisková hlava vrátí do své výchozí polohy. Válec opět nanese další vrstvu prášku a celý proces se opakuje tak dlouho, než je dosaženo požadovaného tvaru výrobku.[3, 7]



Obr. 2.3 Postup vytváření jednotlivých vrstev při 3D tisku technologií MJF [9]

Vlivem dodávaného tepla od osvitových lamp je v celé výrobní jednotce naakumulované velké množství tepelné energie. Tepelnou energii je nutné řízeně odebrat, aby nedocházelo k velkým nežádoucím deformacím vyrobených součástí. Teplo je z tiskového prostoru odebíráno prostřednictvím proudícího vzduchu a následně jeho odvodem mimo 3D tiskárnu. Po dokončení

tisku se výrobní jednotka vyjme z tiskárny a místo ní se může do tiskárny vložit nová naplněná výrobní jednotka, se kterou může být spuštěna další tisková úloha. Výrobní jednotka je zavezena do procesního zařízení, kde zchladne. Po vychladnutí je možno provést vyjmutí dílů, které se provádí opatrným odsáváním přebytečného prášku (technologického odpadu) z výrobního prostoru jednotky. Jelikož je prášek již částečně znehodnocen činností a teplem od osvitových lamp, je odsáván do zvláštního zásobníku. I takto použitý prášek lze využít pro další tisk jako část nové náplně (po smíchání s novým polymerem, avšak dle doporučení výrobce v maximálním poměru 80:20).[5] Po odsátí veškerého přebytečného prášku (technologického odpadu) a očištění dílů se mohou díly podrobit dalším dokončovacím operacím. Prášek z očištěného povrchu dílu se k opakovanému 3D tisku již dále nepoužívá, jedná se o technologický odpad bez dalšího využití technologií MJF. Mezi nejčastější dokončovací operace pro technologii MJF patří proces pískování. Vzduchem unášená jemná zrníčka abraziva dopadající na povrch součástí dokážou uvolnit z pórů výrobků přebytečný prášek polymeru (technologický odpad). Další povrchové úpravy zahrnují barvení, tvorbu ochranné povrchové vrstvy apod.[2, 4, 5]

Technologie MJF nalézá uplatnění jak v malosériové a prototypové výrobě, viz obr. 2.4, tak i v sériové výrobě součástí, pro které by bylo (vzhledem k počtu vyráběných dílů) nevýhodné vyrábět vstříkovací formy.[1] K výrobě součástí libovolného tvaru není zapotřebí žádných forem nebo přípravků. Z tohoto důvodu nachází uplatnění všude tam, kde je vyžadována velká flexibilita konstrukčních změn modelů výrobků. V porovnání s ostatními aditivními technologiemi patří tato technologie mezi nejproduktivnější.[1] Jak již bylo uvedeno v předchozím odstavci, jednou z nevýhod této technologie je vznik odpadního materiálu, který lze, dle doporučení výrobce, dodatečně zpracovávat pouze v omezeném poměru s novým materiálem.



Obr. 2.4 Výrobky zhotovené pomocí technologie MJF [2]



Jedním z nejvíce používaných materiálů v technologii MJF je polyamid 12 (PA 12), který se řadí mezi semikrystalické polymery. Jedná se o termoplast, který je vyráběn polykondenzací z  $\omega$ -aminolaurové kyseliny nebo polymerací z lauro-laktamu, tj. z monomerů, které obsahují v molekule dvanáct atomů uhlíku, odtud název polyamid 12.[10] U tohoto polymeru se teplota tání pohybuje v rozmezí 170 °C až 180 °C.[11] Díky tomu lze u výrobků minimalizovat vznik vnitřních napětí a nežádoucích deformací. Polyamid 12 bývá také někdy vyztužován různými plnivými. Nejčastěji se plní uhlíkovými vlákny, skleněnými kuličkami, hliníkovými nanotrubičkami apod.[12] Tato plniva dokážou velmi výrazně zlepšit mechanické vlastnosti tištěných součástí, především jejich pevnost. Polyamidy patří obvykle k polymerům navlhavým.[11] Polyamid 12 však oproti jiným polyamidům vyniká podstatně nižší navlhavostí, při standardních podmínkách: teplotě 23 °C a relativní vlhkosti 50 % nepřekračuje míra absorpce vlhkosti hodnotu vyšší než 0,7 %.[13] Výrobky zhotovené z PA 12 jsou tvarově a rozměrově velmi dobře stabilní i v prostředí se zvýšenou vlhkostí. To umožňuje jeho použití při aplikacích ve vlhkém prostředí. Materiál dále vyniká nízkou hustotou (1,01 g/cm<sup>3</sup>), výbornou chemickou odolností vůči olejům a tukům, odolností korozi za napětí, vysokou rázovou houževnatostí a rovněž vykazuje dobré vlastnosti z hlediska kluzného tření a dobrou odolnost vůči opotřebení.[14] Základní porovnání užitečných vlastností polyamidu 12 s ostatními alifatickými typy polyamidů je uvedeno v tab. 2.1.

Tab. 2.1 Užité vlastnosti vybraných polyamidů [11]

Polyamid	Hustota [g/cm <sup>3</sup> ]	Modul pružnosti [MPa]		Teplota tání [°C]	Krátkodobá teplotní odolnost [°C]	Navlhavost [%]
		Suchý stav	Navlhlý stav			
PA 6	1,10 ÷ 1,14	1 100 ÷ 3 500	1 000 ÷ 2 500	215 ÷ 225	140 ÷ 180	2,5 ÷ 3,0
PA 66	1,12 ÷ 1,14	2 600 ÷ 3 600	1 000 ÷ 2 800	250 ÷ 260	170 ÷ 200	2,5 ÷ 2,8
PA 46	1,17 ÷ 1,19	až 3 500	1 200	190 ÷ 295	až 280	1,3 ÷ 3,7
PA 610	1,06 ÷ 1,08	2 400	1 500	210 ÷ 215	210 ÷ 220	1,4
PA 11	1,01 ÷ 1,04	1 200 ÷ 1600	1 000	175 ÷ 187	140 ÷ 150	1,0
PA 12	1,01 ÷ 1,03	1 300 ÷ 2 100	1 200	170 ÷ 180	140 ÷ 150	0,9 ÷ 1,8

Vlastnosti polyamidů jsou velmi zásadně ovlivněny stupněm krystalinity (čím vyšší je krystalický podíl, tím vyšší je pevnost a tuhost materiálu) a obsahem vody. Absorpce vody způsobuje změny rozměrů součásti, pokles pevnosti, tuhosti a zvýšení rázové houževnatosti.[11] Se zvyšujícím se počtem atomů uhlíku v monomeru schopnost polyamidu navlhat klesá. Díky tomu má PA 12 menší navlhavost než např. PA 6. Nevýhodou je však jeho cena, která je přibližně dvakrát vyšší než v případě PA 6.[15] Vzhledem k dobrým mechanickým vlastnostem v prostředí se zvýšenou vlhkostí nalézá široké uplatnění v automobilovém, elektrotechnickém a sportovním průmyslu. Používá se zejména na součásti s velkým namáháním, např. ložiska, pouzdra, šrouby ozubená kola apod.

Vzhledem k dobré chemické odolnosti se v automobilovém průmyslu používá zejména k výrobě trubek odolných proti oleji a benzínu, v oblasti elektrotechniky se používá ke krytí kabelů a jako izolační materiál. Díly s tenkou stěnou vykazují velmi dobré elastické vlastnosti.[16]

## 2.2 Technologie vstřikování termoplastů

Jedná se o nejpoužívanější technologii pro zpracování termoplastů, termoplastických elastomerů, polymerních směsí, kompozitů, ale i reaktoplastů, kaučuků a pryží.[17] Technologie umožňuje výrobu výrobků, které dále nepotřebují žádné dodatečné úpravy, ale i výrobu polotovarů pro další zpracování. Velkou předností této technologie je zejména její vysoká produktivita, díky které se uplatňuje zejména při výrobě velmi velkých sériích výrobků.[15] Nevýhodou technologie vstřikování jsou velmi vysoké počáteční investice do strojního vybavení. Samotný vstřikovací lis může být pro různé výrobky univerzální, ale forma je pro každý typ výrobku jedinečná. Z tohoto hlediska rozhoduje počáteční investice do forem (s ohledem na množství vyrobených výrobků) obvykle o tom, zda je technologie vhodná pro výrobu požadovaných výrobků. Díly zhotovené touto technologií nacházejí uplatnění v mnoha odvětvích průmyslu, ale i jako výrobky denní potřeby, viz příklady obr. 2.5.[15, 17]

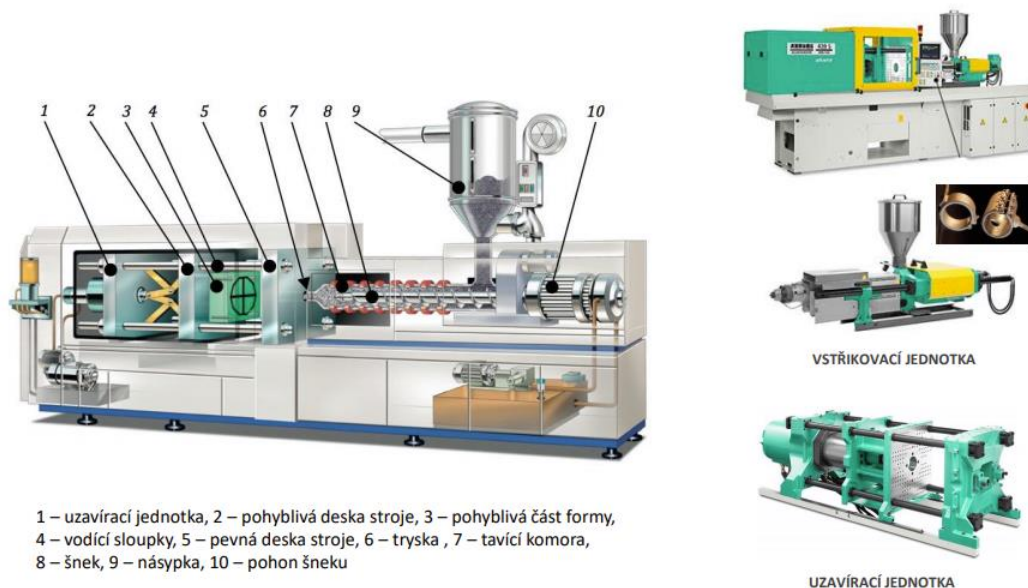


*Obr. 2.5 Výrobky zhotovené vstřikováním plastů [18]*

Svou podstatou a principem je tato technologie velmi podobná technologii tlakového lití kovů, oproti které se liší hodnotami teplot a tokových vlastností vstřikovaného materiálu i konstrukcí stroje.[19]

### 2.2.1 Vstřikovací stroje

Základními částmi vstřikovacího stroje jsou: vstřikovací jednotka, základna stroje s hydraulickým nebo elektrickým systémem, řídicí jednotka zařízení a uzavírací jednotka s formou.[15] Jednotlivé konstrukční části jsou zobrazeny na obr. 2.6.[15]



Obr. 2.6 Konstrukční části vstřikovacího stroje [20]

Vstřikovací jednotka má za úkol vytvářet homogenní taveninu plastu a zajistit její vstříknutí do tvarové dutiny vstřikovací formy. Celá vstřikovací jednotka sestává z násypky, plastifikační komory (válce) se šnekem (nebo pístem) a topnými tělesy, zpětného uzávěru na šneku a trysky. Z hlediska konstrukce může být konstruována jako šneková nebo pístová (pístové se používají jen ve speciálních případech). Základním určujícím parametrem vstřikovací jednotky je tzv. plastifikační kapacita. Jedná se o množství plastu, které je vstřikovací jednotka schopna zplastifikovat za určitý čas. Tento parametr je dán zejména tavicím výkonem vstřikovací jednotky. Jednotka má po celé délce několik topných segmentů, které mohou být nezávisle na sobě regulovány. Je tedy možné přesně regulovat průběh teplot v tavicí komoře. Dalším důležitým parametrem je vstřikovací kapacita, která je dána maximálním objemem taveniny, který lze vstříknout do vstřikovací formy na jeden zdvih šneku, nebo pístu.[15, 19]

Násypka slouží jako zásobník materiálu (granulátu, prášku nebo drtě) během procesu vstřikování. Její kónický tvar by měl zajistit, aby materiál byl plynule dodáván vlivem gravitace do plastifikační komory vstřikovací jednotky. Její hlavní funkcí je zajistit konzistentní dodávku granulátu pro dávkovací část vstřikovacího šneku. Celá násypka by měla být od horké části vstřikovací jednotky dobře tepelně izolována. V opačném případě by se u polymerů s nižší teplotou tavení mohlo stávat,

že by došlo k natavení ještě před vstupem do plnicí části a ucpávání tak vstupu do plastifikační komory.[15]

Plastifikační a vstřikovací šnek plní hned několik úkolů. Jeho šroubovice se po jeho délce průběžně mění, podle toho, jakou funkci má v dané fázi vykonávat. Obecně lze říci, že standartní šneky, používané pro zpracování termoplastů, se skládají ze tří odlišných funkčních částí: dopravní, kompresní a homogenizační. Velikosti dílčích částí jsou dány vlastnostmi materiálu, pro který byl šnek navržen.[15] Základním parametrem šneku je tzv. L/D poměr. Je to poměr délky šneku ku jeho průměru. Obvyklé hodnoty tohoto poměru u univerzálních šneků jsou 16 : 1 až 22 : 1, přičemž typická hodnota kompresního poměru, definovaného jako objem jednoho závitu šneku pod násypkou ku objemu jednoho závitu u špičky, pak bývá u těchto šneků 1 : 2.[15, 21]

Tavicí komora má za úkol dodávat materiálu teplo, aby se postupně roztavil v homogenní taveninu. Vzhledem k tomu, že plasty mají mnohem menší součinitel tepelné vodivosti než například kovy, je žádoucí, aby v tavicí komoře byl co nejmenší objem plastu mezi šnekem a válcem.[15] Další teplo k tavení plastu vzniká vlivem tření materiálu navzájem o sebe a o stěny šneku. Teplo, které je schopna celá komora vytvořit pak přímo určuje plastifikační kapacitu vstřikovací jednotky. Zpětný uzávěr na šneku na konci plastifikační jednotky zabraňuje, aby tavenina plastu se po vstříknutí do formy za vysokého tlaku vracela zpět do vstřikovací jednotky. To umožňuje zajistit, aby do vstřikovací formy bylo možno opakovaně vstříknout při každém cyklu přesné množství taveniny. Správná funkce zpětného uzávěru na šneku je nutná pro optimalizaci a správné nastavení vstřikovacího cyklu stroje.[21] Tryska slouží ke spojení vstřikovací jednotky spolu se vstřikovací formou. Tryska by měla zajistit plynulou dopravu materiálu do formy s minimálním odběrem tepla a s minimálními třecími ztrátami. Hrot trysky je zašroubován do těla trysky, aby byl jednoduše vyměnitelný v případě opotřebení. Teplota trysky musí být velmi citlivě regulována, aby nedocházelo k chladnutí a následnému tuhnutí materiálu anebo naopak vlivem vyšších teplot k jeho degradaci.[15, 21]

Uzavírací jednotka slouží k uchycení formy a jejímu následnému otevírání a uzavírání. Skládá se z pevné a pohyblivé části. Během vstřikování taveniny musí uzavírací jednotka „udržet“ obě dvě části uzavírací formy u sebe tak, aby se tavenina vůbec nedostala do dělicí roviny formy. V takovém případě by výsledný výlisek měl po svém obvodu v dělicí rovině nežádoucí přetoky. Síla, udržující obě části formy u sebe, se nazývá uzavírací a je definována jako součin průmětné plochy všech dutin výstřiků v dělicí rovině a tlaku taveniny. Nejčastější konfigurace při vstřikování je horizontálně umístěná vstřikovací i uzavírací jednotka se vstřikem kolmo na dělicí rovinu. Pro některé komplikovanější metody může být vstřikovací jednotka umístěna kolmo vůči uzavírací jednotce tak,

aby vstřík byl proveden do dělicí roviny formy. Uzavírací jednotka zajišťuje rovněž vyhadování (odformování) vyrobených dílů z formy.[19, 21]

### 2.2.2 Vstříkovací formy

Vstříkovací formy jsou výrobním nástrojem pro technologii vstříkování. Jedná se o velmi složitá zařízení zajišťující dlouhodobou správnou funkci při velkém množství opakování výrobních cyklů. Dutina formy je navržena tak, aby po vstříknutí taveniny vznikl výrobek v požadované kvalitě a tolerancích. Dále celá forma musí zajistit správné teplotní podmínky pro žádaný průběh ochlazování taveniny, musí tedy z taveniny odvádět teplo a v neposlední řadě musí zajistit odpovídající odformování dílu z tvarové dutiny. Mezi základní konstrukční části formy patří tedy: vtokový, temperační a vyhadovací systém.[15, 21]

Vtokový systém formy slouží k přivedení taveniny do dutiny formy. Formy často obsahují několik tvarových dutin pro výrobu více výrobků na jeden vstřík. V takovém případě musí být vtokový systém navržen tak, aby se tavenina rovnoměrně dopravila do všech těchto dutin a došlo k jejich správnému naplnění. Z hlediska konstrukce se vtokový systém dělí na dva základní typy: studený a horký.[19] U studeného vtoku tavenina vychladne a ztuhne ve vtokovém kanálu, a následně se tedy stává součástí hotového výrobku. U horkého vtoku je tavenina po celé jeho délce vyhřívána tak, aby i po zchlazení výrobku zůstala taveninou a výrobek byl vyjmut bez nežádoucího vtoku. Temperační systém udržuje ve formě požadované teplotní podmínky. Formou je vedena soustava kanálů, jimiž protéká temperační medium. Správná teplota formy ovlivňuje krystalizaci polymeru a smrštění výrobků. Vyhadovací systém má za úkol odformovat výrobek z dutiny formy, aby se mohl cyklus vstříkování opakovat. Řešení může být pomocí vyhadovacích kolíků, stírací desky, kroužků apod.[19] Je nutné zajistit, aby vyhadovací systém dokázal vždy odformovat výrobek bez jeho porušení a pokud možno bez zanechání větších stop. Vyhadovat by se tak měl výrobek ztuhlý, aby se např. na jeho povrchu netvořily nežádoucí stopy od vyhadovacích kolíků.[15, 19]

Důležitou součástí vstříkovací formy je také odvzdušňovací systém, který slouží k odvedení vzduchu z trvalých dutin vstříkovací formy během jejich plnění. Při vstříknutí taveniny do formy se začne vzduch v dutinách stlačovat a svým tlakem bude působit proti tavenině. Odvzdušňovací systém musí tedy zajistit, aby vzduch mohl z formy unikat. V opačném případě by mohlo dojít k vadám na výrobku, např. k jeho nedostříknutí. Běžně se odvzdušňování provádí prostřednictvím kanálů v dělicí rovině tak, aby vzduch mohl těmito kanály opustit formu. Zároveň, ale musí být navrženy tak, aby tavenině kladly dostatečný odpor a zamezily jejímu úniku z formy. V současné době je možné provádět odvzdušňovací systém i prostřednictvím porézních tvarových vložek, které propustí pouze vzduch, nikoliv taveninu.[15]



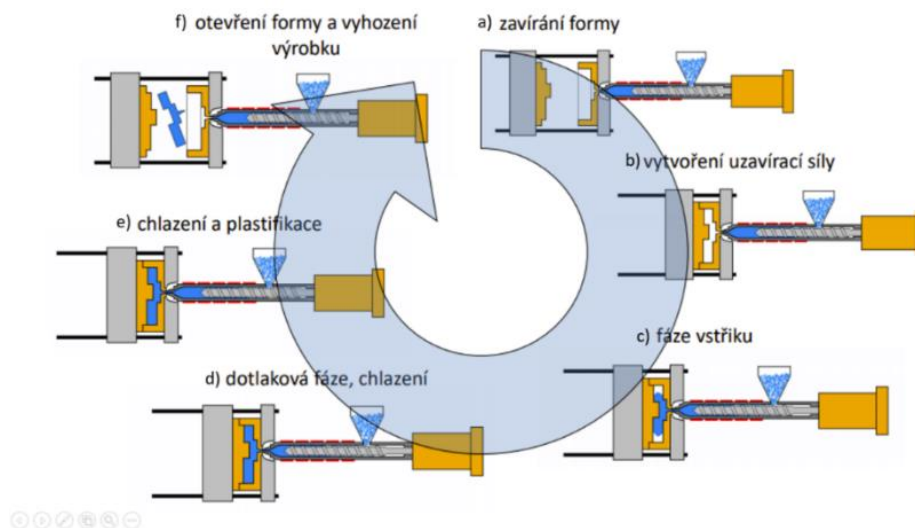
*Obr. 2.7 Ukázka vstřikovací formy včetně výstřiků [22]*

### 2.2.3 Proces vstřikování

Materiál, který se nejčastěji vyskytuje ve formě granulátu je nasypán do násypky umístěné nad šnekem. Odtud je dopravován prostřednictvím šneku do tavicí komory. Granulát je následně taven a intenzivně hněten a přeměňován v taveninu. Tato fáze se nazývá plastifikace. Je nezbytně nutné, aby tavenina plastu byla zcela homogenní bez zbytků nenataveného granulátu. Dále je žádoucí, aby byla minimalizována doba, po kterou je plast vystaven plastifikační teplotě. V důsledku vysokých teplot a nepřiměřené době plastifikace dochází k nebezpečí degradace materiálu a ke snižování mechanických vlastností budoucích výrobků. Tento jev je důsledkem štěpení řetězců makromolekul.[15, 19, 21]

V první fázi celého výrobního cyklu dochází k uzavření vstřikovací formy, viz obr. 2.8a a vytvoření uzavírací síly viz obr. 2.8b. V další fázi je přesné množství materiálu vstříknuto do dutiny vstřikovací formy prostřednictvím šneku či pístu tak, aby tavenina zaplnila většinu (cca 95 % ÷ 97 %) objemu dutiny formy, viz obr. 2.8c.[19] Je žádoucí, aby tento proces trval co nejkratší dobu. V opačném případě může dojít k předčasnému ztuhnutí čela taveniny plastu ještě před vniknutím do vstřikovací formy. Následuje fáze dotlaku, viz obr. 2.8d. Ten je prováděn za účelem do vyplnění dutiny formy taveninou plastu a eliminaci jejího smrštění. Dotlak musí být dostatečně velký, aby dokázal vyrovnat veškeré propadliny, nerovnosti a zamezil vzniku vnitřních staženin ve výstřiku. Nutnou podmínkou pro fázi dotlaku je rezerva objemu naplastifikované taveniny před čelem šneku. Vzhledem k tomu, že polymer dlouhodobě udržovaný na teplotě pro vstřikování degraduje, je žádoucí, aby tento objem nebyl příliš velký. Jelikož je teplota vstřikovací formy podstatně nižší než teplota taveniny, dochází bezprostředně po vstříknutí taveniny do formy k procesu chlazení,

viz obr. 2.8. Tavenina začíná postupně měnit svou konzistenci, až dojde k úplnému zchladnutí na teplotu, při které je již finální výrobek dostatečně tuhý, aby mohl být z formy vyjmut. Po skončení dotlaku, viz obr. 2.8e, dochází k plastifikaci nové dávky materiálu. Po vychladnutí a ztuhnutí polymeru se pohyblivá část formy odsune od pevné části formy, viz obr. 2.8f a dojde k odformování výstřiku. Následně se pohyblivá část opět přisune k pevné části formy (dojde k uzavření formy) a celý cyklus se opakuje. Této fázi může předcházet např. ošetření povrchu formy separačním prostředkem, případně zakládání zálisků do formy.[15, 19, 21]



Obr. 2.8 Vstřikovací cyklus [20]

#### 2.2.4 Základní technologické parametry vstřikování a jejich vliv na kvalitu výrobků

Základními technologickými parametry vstřikování jsou: teploty taveniny a formy, rychlost vstřikování, tlak taveniny v dutině formy a jednotlivé časy výrobních fází. Tyto parametry se mohou částečně ovlivňovat i navzájem. Nastavení správné kombinace těchto parametrů vyžaduje znalost zejména technologických vlastností vstřikovaného polymeru. Dále jsou ovlivněny tvarem a velikostí vstřikovaného výrobku. Jelikož přesné odladění těchto parametrů bývá obvykle složitý proces, bývají často některé technologické parametry upravovány technologem až při výrobě prvních kusů, na základě jeho zkušeností. Nevhodná volba parametrů vstřikování může velmi zásadně ovlivnit hodnoty mechanických vlastností budoucích výrobků. Jejich vlastnosti pak nemusí být stejné, jako jsou mechanické vlastnosti vstupního materiálu a mohou se lišit i navzájem v závislosti na použitém stroji, formě a na podmínkách, při kterých proces vstřikování probíhá. Výrobce polymeru obvykle dodává doporučené hodnoty technologických parametrů pro daný materiál. Tyto hodnoty jsou však pouze orientační a mohou se mírně lišit dle použitého vstřikovacího stroje a konstrukce výrobku. Parametrů pro popis vstřikovacího procesu je celá řada, v této kapitole jsou popsány pouze ty nejvýznamnější.[15, 19, 21]

Jedním z nejvýznamnějších technologických parametrů je tlak taveniny během vstřikování (vstřikovací tlak). Vstřikovací tlak musí být dostatečně velký, aby tavenina dokázala zaplnit v dostatečně krátkém čase celou dutinu formy tak, aby nedošlo k nedostříknutí formy. Velikost vstřikovacího tlaku obvykle souvisí s požadovanou rychlostí plnění dutiny vstřikovací formy.[15] Pokud by tlak nebyl dostatečně velký, dutina formy by se nenaplnila taveninou požadovanou vstřikovací rychlostí. V ideálním případě by měla být celá dutina formy zaplněna taveninou ještě před dotlakovou fází. Velmi vysoký tlak však může způsobit vznik nežádoucích přetoků. Teplota taveniny ovlivňuje její tekutost, ale zároveň i dobu chlazení výstřiku. V tavicí komoře nemá tavenina jednu hodnotu teploty, ale může se v různých částech lišit.[21] Souvisí to zejména s nižší tepelnou vodivostí polymerů a s tím spojenou delší dobou prostupu tepla taveninou.[15] Tavenině je dodáváno teplo z topných segmentů plastifikační jednotky, ale také vlivem třecí práce vznikající jako důsledek hnětení taveniny šnekem. Teplota taveniny je tak ovlivňována nejen nastavením teplot topných segmentů plastifikační jednotky, ale i obvodovou rychlostí na šneku (přímo závislou na otáčkách). Zvyšování teploty taveniny snižuje její viskozitu a tím zvyšuje její zatékavost. Vyšší teplota taveniny eliminuje také vznik studených spojů, zmenšuje tlakové ztráty v dutině formy a u semikrystalických polymerů zvyšuje stupeň krystalinity ve výrobku. Jedním z nežádoucích vlivů vyšší teploty taveniny je zejména větší tepelné zatížení vstřikovaného polymeru, které může mít za následek jeho tepelný rozklad.[21] Vyšší teplota taveniny může dále prodloužit dobu chlazení výrobku a napomáhá vzniku nežádoucích přetoků.[23, 24]

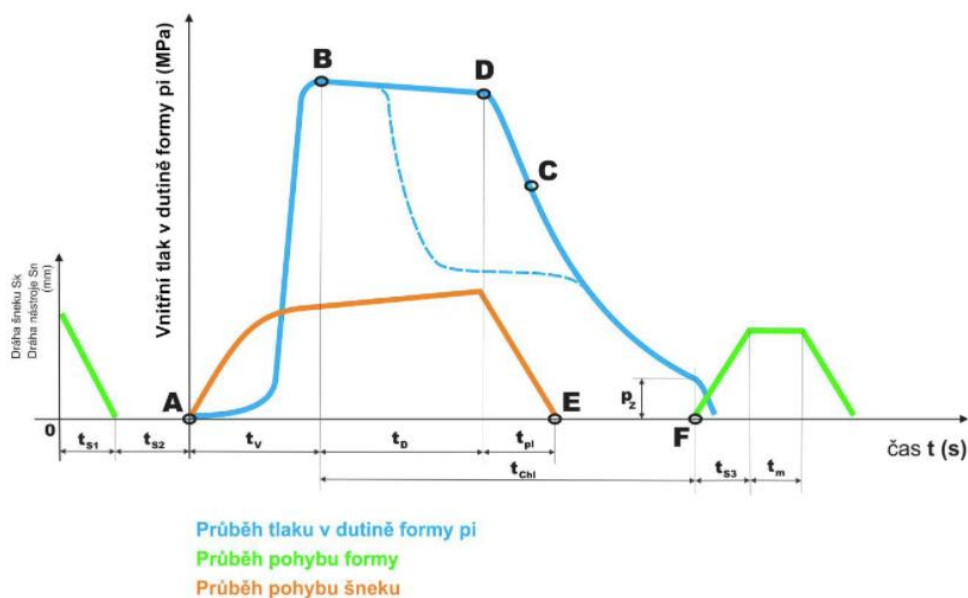
Vstřikovací forma je svou podstatou fungování tepelným výměníkem. Díky tomu se v různých částech formy obvykle vyskytují různé teploty. V praxi je pro popis teplotního stavu formy užívána pouze jediná hodnota teploty (teplota formy). Jedná se o teplotu, kterou lze naměřit na stěně dutiny formy ještě před vstříknutím taveniny. Teplota formy významně ovlivňuje dobu chladnutí, ale i kvalitu vyrobeného výrobku. Zvyšování teploty formy má také vliv na smrštění výstřiků. Vyšší teplota formy může zvýšit hodnotu výrobního smrštění výrobku, ale snížit jeho dodatečné smrštění.[21] Vyšší teplota dále umožní mnohem lepší zatečení taveniny do všech částí dutiny formy a předchází tak nedostříknutí výstřiků. Vyšší teplota formy také pomáhá potlačit některé nežádoucí povrchové vady výstřiků jakými jsou: efekt gramofonové desky, vrásnění povrchu, studené tokové linie nebo propadliny.[23, 24]

Rychlost vstřikování velmi zásadně ovlivňuje proces plnění formy taveninou. Její velikost je závislá na teplotě taveniny (její viskozitě). V okamžiku, kdy tavenina je vstříknuta do formy, dochází vlivem rozdílu teplot formy a taveniny k jejímu tuhnutí. Pokud by tedy rychlost plnění byla příliš nízká, mohlo by dojít vlivem velkého rozdílu teplot v tavenině ke vzniku efektu gramofonové desky.[15] Může také dojít k nedokonalému naplnění formy taveninou, neboť forma ve svých



nejvzdálenějších dutinách bude vyplňována taveninou o nižší teplotě s mnohem vyšší viskozitou.[23] Pokud by však vstřikovací rychlost byla příliš velká, může se stát, že vzduch vytlačovaný taveninou z dutiny formy nebude mít dostatek času z dutiny uniknout, a ve výsledném výrobku se mohou objevit stopy po odcházejícím vzduchu, vytvořit se mohou také přetoky.[23, 24] Vysoká vstřikovací rychlost může rovněž způsobit velmi velké smykové namáhání vstřikovaného materiálu, které může vést až k jeho rozkladu.[21]

Zvláštním druhem parametrů vstřikování jsou strojní a technologické časy (doby), protože neovlivňují jenom kvalitu výstřiků, ale i produktivitu celé výroby. Různé fáze vstřikovacího procesu trvají různé strojní časy, které jsou zásadně ovlivněny konstrukcí výstřiku, vstřikovaným materiálem i konstrukcí vstřikovací formy. Průběh jednotlivých hodnot, popisujících proces vstřikování s vyznačenými časy, je zachycen na obr. 2.9.[17]



Obr. 2.9 Diagram průběhu vstřikování [17]

V první fázi vstřikovacího cyklu dochází k uzavírání vstřikovací formy. Doba trvání tohoto procesu je označována jako  $(t_{s1})$ , viz obr. 2.9. Je-li vstřikovací jednotka přisouvána ke vstřikovací formě, je nutné započítat strojní čas přisunutí označovaný jako  $(t_{s2})$ , viz obr. 2.9. V bodě A diagramu (viz obr. 2.9) zahajuje šnek axiální pohyb (u pístových vstřikovacích strojů píst), aby vstříknul přesné množství taveniny do vstřikovací formy. Doba fáze vstřikování (někdy též nazývána jako doba plnění) je označována jako  $(t_v)$ . Doba vstřikování je v diagramu ukončena v bodě B. Doba vstřikování souvisí s velikostí vstřikovací rychlosti (při malé vstřikovací rychlosti bude doba vstřikování větší). Z tohoto důvodu se při dlouhé době vstřikování projeví nežádoucí jevy stejné jako při nízké rychlosti plnění: přetoky v dělicí rovině, větší obsah vnitřního napětí, přeplnění dutiny (vyšší hmotnost výstřiků), ale i mechanické problémy jakými jsou zvýšené mechanické namáhání

formy a uzavírací jednotky stroje. Velmi krátký čas vstřikování mívá za následek propad tlaku, neúplné doplnění dutiny formy taveninou a s tím spojené snížení hmotnosti výrobků, větší smrštění výrobků, vznik staženin, propadliny, nedokonale vykopírovaný povrch dutiny taveninou.[21] Z obr. 2.9 je patrné, že během fáze vstřikování dosáhne tlak taveniny v dutině formy své maximální hodnoty. Bezprostředně po vstříknutí taveniny do dutiny formy začíná současně s dalšími ději proces chlazení, jehož trvání je na obr. 2.9 označeno ( $t_{chl}$ ).[19]

Po vstříknutí taveniny dojde k přepnutí na dotlak. Doba dotlaku, označována jako ( $t_D$ ), viz obr. 2.9, je závislá na rychlosti chladnutí taveniny (jakmile tavenina ztuhne, není možné dotlak vykonávat). V opačném případě by mohlo dojít k přetlačení taveniny, což by mělo za následek vznik velmi vysokého napětí v oblasti vtoku. Doba dotlaku končí v diagramu v bodě D, viz obr. 2.9. Během dotlaku je obvykle snižován tlak v tavenině. Při dlouhodobém působení maximálního tlaku, by totiž mohlo dojít ke vzniku tlakové špičky, což by mělo za následek krátké pootevření vstřikovací formy (tzv. dýchnutí formy). Dobu dotlaku lze experimentálně optimalizovat vážením hotových výrobků. Výrobky se váží po jednotlivých cyklech, přičemž po každém cyklu je prodloužena doba dotlaku. Optimální doba dotlaku je poté hodnotou, u které již nedochází k přírůstku hmotnosti mezi výrobky vyrobených v po sobě jdoucích cyklech. Po fázi dotlaku dochází k plastifikaci nové dávky pro další výrobní cyklus. Doba plastifikace je označována jako ( $t_{pl}$ ), viz obr. 2.9. Současně po skončení dotlakové fáze probíhá samotné chlazení výstřiku. Doba chlazení ( $t_{chl}$ ) by měla být pouze tak dlouhá, aby vystříknutý výrobek měl dostatek času zatuhnout, aby nedošlo k nežádoucí deformaci během jeho vyjímání (vyhazování) z formy.[21] Během chlazení tlak taveniny ve formě plynule klesá až na hodnotu zbytkového tlaku označovaného jako ( $p_z$ ).[19]

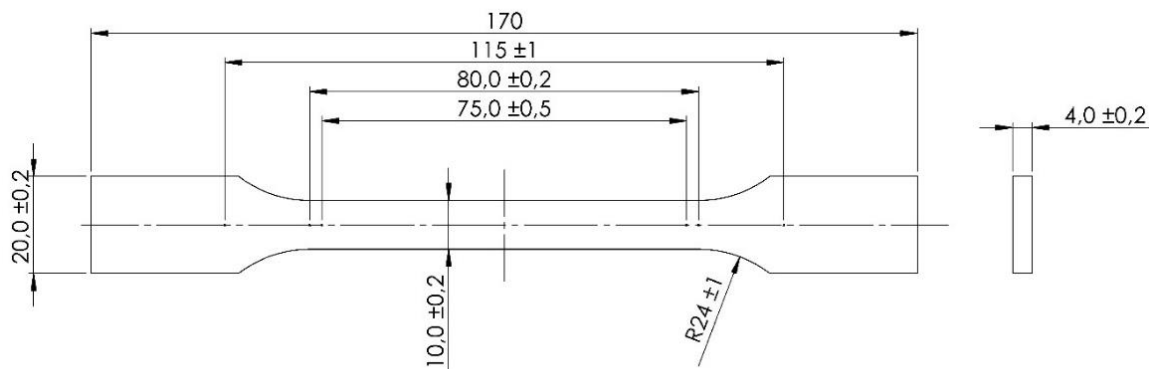
V bodě F diagramu, viz obr. 2.9, dochází k otevření vstřikovací formy a vyhození (odformování) výstřiku. Doba otevírání formy je označována jako strojní čas ( $t_{s3}$ ), viz obr. 2.9. V případě, že se jedná o proces vstřikování s přisouváním vstřikovací jednotky, předchází procesu odformování její odsunutí. Po otevření vstřikovací formy a odformování výstřiku nastává manipulační čas označovaný jako ( $t_m$ ), viz obr. 2.9. Tento čas je vyhrazen pro vyjmutí výstřiku v případě, že je vyjímán manipulátorem, ale například i pro pohledovou kontrolu vstřikovací formy obsluhou či nanesení separátoru na stěny formy. Po skončení této doby dochází opětovným uzavíráním vstřikovací formy k opakování celého cyklu.[19]

### 3 Experimentální část

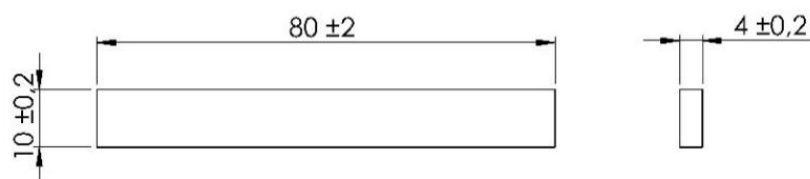
Jak již bylo uvedeno v úvodu bakalářské práce cílem její experimentální části je posoudit možnost využití technologického odpadu z aditivní technologie MJF pro výrobu vstřikovaných dílů. Hodnocení je provedeno na základě porovnání mechanických vlastností výstřiků zhotovených vstřikováním z odpadního prášku PA 12. Popsány jsou zde technologické podmínky jejich výroby a také podmínky mechanických vlastností, které byly měřeny před a v průběhu atmosférického stárnutí. Mechanické vlastnosti výstřiků jsou porovnávány mezi díly zhotovenými z nového PA 12, technologického odpadu a ze směsi nového a odpadního prášku. Kromě zkoušek mechanických vlastností byla pro zjištění maximální teploty, za které lze výrobky bezpečně provozovat, stanovena teplota měknutí podle Vicata. Nad rámec zadání bakalářské práce jsou tyto vlastnosti porovnány také s vlastnostmi dílů, které byly zhotoveny aditivní výrobou technologií MJF.

#### 3.1 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa pro stanovení mechanických vlastností PA 12 byla připravována vstřikováním (viz kapitola 3.1.1) a aditivní výrobou MJF (viz kapitola 3.1.2). Zhotoveny byly dva typy zkušebních těles. Jeden typ zkušebních těles byl určen pro statickou zkoušku tahem dle ČSN EN ISO 527 a druhý typ pro zkoušky ohybem a vrubové houževnatosti dle ČSN EN ISO 178 a ČSN EN ISO 179-1, viz obr. 3.1 a obr. 3.2. Vstřikovaná zkušební tělesa byla zhotovena po čtyřech šaržích, tělesa z aditivní výroby po třech šaržích. První šarže byla vyrobena ze 100 % nového materiálu PA 12. Další šarže byly vyrobeny ze 100 % použitého materiálu a ze směsi, která byla tvořena 80 % použitého a 20 % nového materiálu. Použitým materiálem byl technologický odpad ze sudu odstátý z výrobní jednotky 3D tiskárny, který mohl být teplotně ovlivněn při 3D tisku. V případě výroby zkušebních vzorků technologií vstřikování byla jedna šarže vyrobena také z odpadního prášku po očištění povrchu součástí vyrobených technologií MJF, který již není použitelný pro opakovaný 3D tisk. Po výrobě byla zkušební tělesa kondicionována v souladu ČSN EN ISO 16396-2, resp. ČSN EN ISO 1110 za teploty 70 °C a relativní vlhkosti 62 % po dobu deseti dnů. Zkušební tělesa tak byla z hlediska mechanických vlastností hodnocena ve vlhkém (kondicionovaném) stavu, který odpovídá jejich užívání v technické praxi a umožňuje srovnání s tělesy po atmosférickém (klimatickém) stárnutí, které bylo realizováno za podmínek uvedených v kap. 3.1.3.



Obr. 3.1 Zkušební těleso typu 1A pro zkoušku tahem



Obr. 3.2 Zkušební těleso pro zkoušku ohybem a rázové houževnatosti Charpy

### 3.1.1 Příprava zkušebních těles technologií vstřikování

Vstřikovaná zkušební tělesa pro hodnocení mechanických charakteristik materiálu byla zhotovena dle mezinárodních předpisů ČSN EN ISO 294-1 a ČSN EN ISO 16396-2. Jedná se o tzv. víceúčelová zkušební tělesa typu A dle ČSN EN ISO 3167, resp. 1A dle ČSN EN ISO 527, umožňující hodnocení tahových vlastností materiálu. Zkušební vzorky pro hodnocení rázové (vrubové) houževnatosti a ohybových vlastností byly upraveny mechanickým obrobením střední části víceúčelových zkušebních těles v souladu s ČSN EN ISO 16396-2. Zkušební tělesa byla vstřikována na hydraulickém vstřikovacím stroji ARBURG Allrounder 270 S 400-100, viz obr. 3.3, za technologických podmínek uvedených v tab. 3.1. K výrobě bylo použito ISO formy typu A s dvěma tvarovými dutinami, kuželovým vtokem a štěrbinovým ústím vtoku, jejichž geometrie je specifikována předpisem ČSN EN ISO 294-1, viz obr. 3.4. Temperace (chlazení) tvarových částí formy bylo zajištěno pomocí chladícího média (vody) cirkulující v temperačních kanálech v oblasti tvarových dutin. Polyamidový prášek byl před vstřikováním sušen ve vakuové sušárně Maguire při teplotě 80 °C po dobu 4 hodin, tak aby zbytková vlhkost materiálu byla  $\leq 0,02$  % a zabránilo se jeho hydrolytickému rozkladu i během vstřikování, případně vnitřním nebo vnějším vadám vstřiků.

Tab. 3.1 Technologické podmínky pro vstřikování zkušebních těles z PA 12

Parametr	Hodnota	Jednotka
Uzavírací síla formy	400	kN
Přítlačná síla trysky	30	kN
Rychlost vstřikování	25	cm <sup>3</sup> /s
Dávkování	25	m/min
Zpětný tlak	0,15	MPa
Bod přepnutí na dotlak	11	cm <sup>3</sup>
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)	45/190/200/205/210/210	°C



Obr. 3.3 Vstřikovací lis ARBURG 270 S 400-100



Obr. 3.4 Vstřikovací forma

### 3.1.2 Příprava zkušebních těles technologií MJF

Pro výrobu zkušebních vzorků bylo ve spolupráci s laboratoří prototypových technologií Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace použito 3D tiskárny HP 4200 od společnosti Hewlett-Packard, viz obr. 2.1 v teoretické části práce. Před vlastním tiskem byla provedena příprava tiskového souboru pro 3D tiskárnu. Modely zkušebních těles byly prostřednictvím softwaru SmartStream 3D Build Manager zpracovány na tiskový soubor. Následně byla provedena kalibrace 3D tiskárny dle instrukcí interaktivního průvodce na ovládacím panelu. Kalibrační proces je prováděn pro zajištění požadované přesnosti vyrobených součástí, a to jak rozměrové, tak i geometrické. Po úspěšném dokončení kalibrace bylo nutné připravit výrobní jednotku. Výrobní jednotka byla v procesní stanici naplněna dostatečným množstvím polyamidového prášku. Dle vyráběné šarže se jednalo buď o nový nebo již použitý polyamidový prášek, případně o směs použitého (technologického odpadu) a nového prášku v poměru 80:20. Po dokončení procesu plnění byla výrobní jednotka zavezena do 3D tiskárny, viz obr. 3.5. Po dokončení přípravných prací bylo možné zahájit samotný proces 3D tisku. Proces vrstvení jedné z vrstev výrobků je zachycen na obr. 3.6.



*Obr. 3.5 Zavezení výrobní jednotky do 3D tiskárny*



*Obr. 3.6 Průběh 3D tisku technologií MJF*

Po dokončení tiskové úlohy bylo nutné provést chladicí proces. Ten se skládal ze dvou fází. První fází bylo přirozené chlazení, kdy je teplo předáváno z výrobní jednotky okolnímu prostředí (cca 3 až 4 hodiny). Poté bylo provedeno rychlé chlazení. Pro rychlé chlazení bylo nutné zavést výrobní jednotku do procesní stanice. K zajištění maximální kvality výrobků je vhodné provádět chladicí proces přesně dle instrukcí výrobce. Po dokončení rychlého chladicího procesu následovalo očištění dílů. V procesní jednotce byl nejprve odsán přebytečný prášek ze stavebního prostoru výrobní jednotky do sudu. Takto odsátý prášek může být použit pro další proces 3D tisku v podobě odpadní složky nové náplně. Po odsátí přebytečného prášku následovalo ruční mechanické očištění povrchu samotných dílů, viz obr. 3.7.



*Obr. 3.7 Proces vyjmutí dílů z výrobní jednotky*

Prášek odstraněný přímo z povrchu dílů se již dále 3D tiskem nezpracovává, a to ani jako odpadní složka nové náplně. Takto získaný odpadní prášek může být znečištěn čidly, se kterými mohl přijít během procesu 3D tisku do kontaktu. Vzhledem k tomu, že vyrobené výrobky mají oproti vstřikovaným výrobkům velmi drsný a pórovitý povrch, zůstává část přebytečného prášku zadržována těmito póry na povrchu součástí. Z tohoto důvodu byly následně všechny vyrobené součásti ještě po očištění podrobeny procesu pískování. Během tohoto procesu dochází vlivem kinetické energie dopadajících zrníček písku na povrch součásti k uvolňování polymerního prášku z povrchu součástí.

### **3.1.3 Atmosférické stárnutí zkušebních těles**

Vzhledem k zadání bakalářské práce byla část vyrobených zkušebních těles vystavena atmosférickému stárnutí, aby bylo možné pozorovat změnu mechanických vlastností materiálu po vystavení atmosférickým podmínkám. Atmosférické stárnutí bylo prováděno v souladu s normou DIN 75 220. Pro hodnocení vlivu atmosférického stárnutí byly provedeny dvě různé zkoušky. Obě tyto zkoušky byly realizovány v solární klimatické skříni SUN 3600 Vötsch, viz obr. 3.8 a obr. 3.9.

Nejprve byla jedna sada zkušebních těles podrobena *dlouhodobé zkoušce* stárnutí za konstantních podmínek, odpovídajících venkovnímu vlhkému klimatu. Při této zkoušce byla zkušební tělesa ozařována dvěma metal-halogenovými zářiči o příkonu 4 kW simulující působení slunečního svitu o intenzitě záření  $(1000 \pm 100) \text{ W/m}^2$  nepřetržitě po dobu 240 hodin. Podmínky venkovního klimatu byly při dané intenzitě záření simulovány teplotou vzduchu ve zkušební skříni  $(42 \pm 3) ^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti  $(65 \pm 5) \%$ .

Další zkouškou, která byla na zkušební tělesa aplikována, byla *cyklická zkouška*. Při této zkoušce se střídaly cykly suchého a vlhkého klimatu. Nejprve byla zkušební tělesa vystavena patnácti po sobě následně prováděných cyklech v suchém arizonském klimatu, při kterém dochází ke střídání klimatických podmínek během dne i noci. Cyklus suchého klimatu trval 24 hodin, během kterého se vystřídal den i noc dvakrát. Cyklus se skládal z 8 hodin denního venkovního suchého klimatu při teplotě vzduchu  $(42 \pm 3) ^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti  $(25 \pm 5) \%$ , 3,5 hodin nočního suchého klimatu při teplotě  $(10 \pm 3) ^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti  $(65 \pm 5) \%$ , které vystřídalo opět denní suché klima po dobu 8 hodin a noční suché klima po dobu 3,5 hodin. Na konci cyklu probíhalo po dobu 1 hodiny klima umožňující údržbu zařízení. Další část cyklické zkoušky zahrnovala deset cyklů vlhkého klimatu, které simuluje přibližně vlhké teplé floridské klima během dne a mrazivé alpské klima v noci. Cyklus vlhkého klimatu trval 24 hodin a sestával se z 5 hodin nočního mrazivého klima při teplotě  $(-10 \pm 3) ^\circ\text{C}$  s orosením, 12 hodin denního vlhkého klima při teplotě  $(42 \pm 3) ^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti  $(65 \pm 5) \%$  následované opět 6 hodinami nočního mrazivého klimatu a 1 hodinou pokojového klimatu pro údržbu zařízení. Intenzita záření byla během denního cyklu  $(1000 \pm 100) \text{ W/m}^2$ . V jednotlivých časech klimatického zatížení jsou obsaženy přechodové fáze na začátku každého klimatického stupně.



Obr. 3.8 Solární klimatická komora





*Obr. 3.9 Zkušební vzorky během zkoušky atmosférického (klimatického) stárnutí*

## **3.2 Zkoušky mechanických vlastností**

### **3.2.1 Statická zkouška tahem**

Stanovení tahových vlastností zkoušeného materiálu bylo provedeno podle normy ČSN EN ISO 527, na trhacím zařízení TiraTest 2300 s průtahoměrem MFX 500 – B, viz obr. 3.10. Vyhodnocení průběhu tahové zkoušky probíhalo v řídicím softwaru LabNET. Stanovení mechanických vlastností probíhalo vždy po deseti vzorcích z každé šarže materiálu.



*Obr. 3.10 Trhací zařízení TiraTest 2300*



Obr. 3.11 Digitální úchylkoměr Mitutoyo ID-H0530

Před vlastním průběhem zkoušky byly pomocí úchylkoměru Mitutoyo ID-H0530, viz obr. 3.11, naměřeny oba příčné rozměry zkušebního tělesa, šířka ( $b$ ) a tloušťka ( $h$ ), jejichž hodnoty byly zadány do řídicího softwaru. Dále byla nastavena počáteční měřená délka 50 mm a upínací vzdálenost mezi čelistmi 115 mm a požadovaná zkušební rychlost. Pro určení modulu pružnosti byla použita zkušební rychlost 1 mm/min, pro určení meze kluzu a jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení 50 mm/min dle předpisů ČSN EN ISO 16396-2. Následně bylo zkušební těleso upnuto do čelistí trhacího zařízení. Vlivem stlačení upínacích konců zkušebního tělesa došlo k deformaci zkušebního tělesa. Tato deformace měla za následek vznik tlakového napětí před započítáním vlastní zkoušky. Z tohoto důvodu byla na měřicím zařízení nastavena počáteční hodnota předpětí 2 N, aby byl tento nežádoucí jev kompenzován a na začátku diagramu napětí/poměrné prodloužení nevznikala náběhová oblast. Po upnutí zkušebního tělesa byl spuštěn samotný proces zkoušky. Průběh zkoušky byl ukončen v okamžiku, kdy došlo k přetržení zkušebního tělesa. Pro hodnocení tahových vlastností byly zaznamenány hodnoty napětí na mezi kluzu ( $\sigma_y$ ), které jsou pro polyamidové vzorky současně napětím na mezi pevnosti v tahu ( $\sigma_m$ ). Další důležitou mechanickou vlastností získanou z tahové zkoušky je modul pružnosti v tahu ( $E_t$ ), který byl určený jako sečna křivky napětí/poměrné prodloužení. Pro určení tahových vlastností byly dále zaznamenány hodnoty poměrného prodloužení na mezi pevnosti/kluzu ( $\epsilon_m$ ) = ( $\epsilon_y$ ) a hodnoty jmenovitého poměrného prodloužení při přetržení ( $\epsilon_{tb}$ ). Výsledné hodnoty tahových vlastností byly zprůměrovány a byla určena jejich výběrová směrodatná odchylka. Průměrné hodnoty tahových vlastností jsou uvedeny v tab. 3.2 až tab. 3.4. Dílčí hodnoty z měření jsou uvedeny v příloze 1 a v příloze 5.

Tab. 3.2 Tahové vlastnosti zkušebních vzorků z PA 12 před atmosférickým stárnutím

Typ vzorků a materiál		$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\epsilon_y = \epsilon_m$ [%]	$\epsilon_{tb}$ [%]
Vstříkované	nový PA 12	40,0 ± 1,0	1 101 ± 45	6,4 ± 0,4	309,7 ± 15,8
	směs 80:20 (odpad/nový)	41,0 ± 0,6	1 137 ± 20	6,3 ± 0,4	227,8 ± 6,8
	odpad ze sudu	41,7 ± 0,3	1 186 ± 31	6,0 ± 0,1	220,4 ± 7,9
	odpad z dílu	40,8 ± 0,3	1 146 ± 33	6,4 ± 0,3	218,4 ± 5,7
Aditivní	nový PA 12	46,4 ± 0,5	1 208 ± 47	14,9 ± 1,0	19,4 ± 2,5
	směs 80:20 (odpad/nový)	46,2 ± 0,7	1 269 ± 70	13,2 ± 1,8	15,7 ± 4,4
	odpad ze sudu	46,1 ± 0,3	1 215 ± 56	14,5 ± 0,7	18,6 ± 2,2

Tab. 3.3 Tahové vlastnosti zkušebních vzorků z PA 12 po dlouhodobé zkoušce stárnutí

Typ vzorků a materiál		$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\epsilon_y = \epsilon_m$ [%]	$\epsilon_{tb}$ [%]
Vstříkované	nový PA 12	41,3 ± 0,6	1 171 ± 25	5,9 ± 0,1	259,8 ± 13,0
	směs 80:20 (odpad/nový)	43,8 ± 0,6	1 315 ± 36	5,3 ± 0,3	244,6 ± 5,5
	odpad ze sudu	45,1 ± 0,3	1 378 ± 24	5,0 ± 0,2	244,4 ± 7,0
	odpad z dílu	35,0 ± 18,4	1 276 ± 55	4,7 ± 2,5	213,3 ± 45,9
Aditivní	nový PA 12	49,5 ± 0,5	1 377 ± 79	12,9 ± 0,8	15,5 ± 1,8
	směs 80:20 (odpad/nový)	44,6 ± 6,6	1 610 ± 57	6,4 ± 3,4	6,5 ± 3,2
	odpad ze sudu	49,2 ± 2,3	1 442 ± 153	12,1 ± 2,6	14,8 ± 3,8

Tab. 3.4 Tahové vlastnosti zkušebních vzorků z PA 12 po cyklické zkoušce stárnutí

Typ vzorků a materiál		$\sigma_y = \sigma_m$ [MPa]	$E_t$ [MPa]	$\epsilon_y = \epsilon_m$ [%]	$\epsilon_{tb}$ [%]
Vstříkované	nový PA 12	43,2 ± 0,7	1249 ± 33	5,4 ± 0,2	254,9 ± 18,4
	směs 80:20 (odpad/nový)	42,4 ± 0,8	1212 ± 57	6,0 ± 0,3	243,8 ± 13,9
	odpad ze sudu	39,2 ± 13,8	1369 ± 56	4,9 ± 1,8	239,8 ± 11,5
	odpad z dílu	37,8 ± 8,7	1258 ± 42	4,4 ± 1,9	114,8 ± 118,0
Aditivní	nový PA 12	44,7 ± 6,2	1399 ± 59	8,2 ± 4,5	8,7 ± 4,9
	směs 80:20 (odpad/nový)	41,4 ± 6,8	1500 ± 70	5,7 ± 4,2	5,8 ± 4,1
	odpad ze sudu	48,1 ± 3,3	1413 ± 49	10,5 ± 3,2	12,0 ± 4,1

### 3.2.2 Stanovení ohybových vlastností

Pro určení ohybových vlastností byla provedena zkouška dle normy ČSN EN ISO 178. Během této zkoušky docházelo k zatěžování zkušební tělesa tříbodovým ohybem. Pro zkoušku bylo použito zkušební těleso ve tvaru hranolu o rozměrech  $(80 \pm 2) \times (4,0 \pm 0,2) \times (10,0 \pm 0,2)$  mm. Cílem této zkoušky bylo naměřit mez pevnosti v ohybu ( $\sigma_{fM}$ ) a modul pružnosti v ohybu ( $E_f$ ). Zkouška byla prováděna na zkušebním zařízení Hounsfield H10KT, viz obr. 3.12. Záznam a vyhodnocení zkoušky probíhalo za pomoci řídicího programu Qmat 3.89. Každá šarže materiálu byla zkoušena po pěti vzorcích.



Obr. 3.12 Zkušební zařízení Hounsfield H10KT

Před započítím zkoušky byly pomocí úchylkoměru Mitutoyo ID-H0530 změřeny oba příčné rozměry tělesa, šířka ( $b$ ) a tloušťka ( $h$ ). Tyto hodnoty byly zadány do řídicího softwaru zařízení. Poté byla nastavena zkušební rychlost 2 mm/min dle ČSN EN ISO 16396-2. Následně byl zkušební vzorek (dle ČSN EN ISO 16396-2) umístěn na dvě podpěry a uprostřed zatěžován trnem. Pro zkušební těleso o tloušťce 4 mm bylo dle ČSN EN ISO 178 nastaveno rozpětí podpěr 64 mm. Vzhledem k tomu, že zkoušený materiál vykazoval velmi dobrou odolnost vůči namáhání v ohybu a během zkoušky u něj nedocházelo k porušení, viz obr. 3.13, bylo měření realizováno do okamžiku, kdy napětí dosáhlo meze pevnosti v ohybu ( $\sigma_{fM}$ ), která byla vyhodnocena v programu Qmat. Pro zjištění hodnoty modulu pružnosti v ohybu ( $E_f$ ) byla použita rovnice (1). Modul pružnosti tak byl stanoven jako sečna křivky napětí/deformace.



Obr. 3.13 Průběh zkoušky ohybem

$$E_f = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \cdot 100 \text{ [MPa]} \quad (1)$$

kde značí:

$E_f$ ... modul pružnosti v ohybu [MPa],

$\sigma_{f1}$ ... napětí v ohybu [MPa] měřené při deformaci ohybem  $\varepsilon_{f1}$ ,

$\sigma_{f2}$ ... napětí v ohybu [MPa] měřené při deformaci ohybem  $\varepsilon_{f2}$ ,

$\varepsilon_{f1}$ ... deformaci ohybem 0,05 %,

$\varepsilon_{f2}$ ... deformaci ohybem 0,25 %.

Výsledné průměrné hodnoty napětí na mezi pevnosti v ohybu a modulu pružnosti v ohybu včetně výběrových směrodatných odchylek jsou uvedeny v tab. 3.5 až tab. 3.7. Záznam dílčích hodnot z měření je uveden v příloze 2 a v příloze 6.

Tab. 3.5 Ohybové vlastnosti zkušebních vzorků z PA 12 před atmosférickým stárnutím

Typ vzorků a materiál		$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
Vstříkované	nový PA 12	63,4 ± 0,4	1 437 ± 28
	směs 80:20 (odpad/nový)	53,0 ± 0,2	1 146 ± 41
	odpad ze sudu	54,4 ± 0,5	1 183 ± 10
	odpad z dílu	51,7 ± 0,7	1 160 ± 23
Aditivní	nový PA 12	56,3 ± 1,3	1 312 ± 37
	směs 80:20 (odpad/nový)	56,9 ± 2,9	1 368 ± 131
	odpad ze sudu	55,3 ± 1,7	1 341 ± 132

Tab. 3.6 Ohybové vlastnosti zkušebních vzorků z PA 12 po dlouhodobé zkoušce stárnutí

Typ vzorků a materiál		$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
Vstříkované	nový PA 12	56,7 ± 0,8	1 251 ± 77
	směs 80:20 (odpad/nový)	58,8 ± 1,1	1 307 ± 92
	odpad ze sudu	59,4 ± 0,5	1 307 ± 26
	odpad z dílu	56,0 ± 1,1	1 256 ± 56
Aditivní	nový PA 12	59,9 ± 2,6	1 429 ± 84
	směs 80:20 (odpad/nový)	64,3 ± 1,7	1 565 ± 110
	odpad ze sudu	61,5 ± 1,6	1 483 ± 42

Tab. 3.7 Ohybové vlastnosti zkušebních vzorků z PA 12 po cyklické zkoušce stárnutí

Typ vzorků a materiál		$\sigma_{fM}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
Vstříkované	nový PA 12	54,2 ± 0,5	1197 ± 23
	směs 80:20 (odpad/nový)	55,2 ± 0,6	1216 ± 43
	odpad ze sudu	56,3 ± 0,9	1244 ± 30
	odpad z dílu	55,1 ± 0,5	1230 ± 26
Aditivní	nový PA 12	59,5 ± 1,3	1396 ± 85
	směs 80:20 (odpad/nový)	58,2 ± 4,1	1451 ± 62
	odpad ze sudu	61,5 ± 1,9	1527 ± 56

### 3.2.3 Stanovení vrubové houževnatosti metodou Charpy

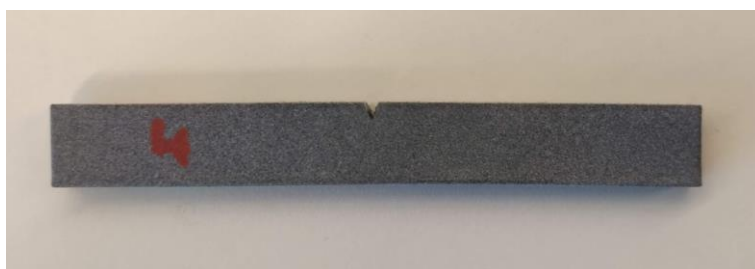
Pro určení vrubové houževnatosti metodou Charpy byla provedena zkouška dle normy ČSN EN ISO 179-1. Pro každou šarži bylo hodnoceno deset vzorků. Zkouška vrubové houževnatosti byla prováděna na zkušebním zařízení Resil Ceast 5.5, viz obr. 3.14. U každého zkušebního tělesa byly opět nejprve změřeny oba příčné rozměry, šířka ( $b$ ) a tloušťka ( $h$ ) pomocí úchylkoměru Mitutoyo ID-H0530. Poté bylo nutné do zkušebního tělesa vytvořit vrub. Pro danou zkoušku byl použit standardní vrub typu A s poloměrem kořene vrubu 0,25 mm. Vrub byl do zkušebního tělesa obroben pomocí mechanické vrubovačky Ceast, viz obr. 3.15 tak, aby šířka tělesa pod vrubem ( $b_A$ ) byla  $(8,0 \pm 0,2)$  mm. Těleso s obrobeným vrubem je zobrazeno na obr. 3.16.



Obr. 3.14 Rázové kladivo Resil Ceast 5.5



Obr. 3.15 Mechanická vrubovačka Ceast



Obr. 3.16 Zkušební těleso s obrobeným vrubem typu A

Po naměření rozměrů zkušebního tělesa, byla provedena příprava zkušebního zařízení. Následovala kontrola rozpětí podpěr, které při této zkoušce bylo 62 mm. Stanovením ztrát třením byla opravena hodnota absorbované energie podle ISO 13802. Poté bylo rázové kladivo zvednuto do předepsané výšky a zajištěno. Na podpěry bylo umístěno zkušební těleso tak, aby střed vrubu byl umístěn přesně v rovině rázu, vrubem směrem od břitu kladiva, viz obr. 3.17. Po umístění zkušebního tělesa byla uvolněním rázového kladiva změřena hodnota korigované energie spotřebované na přeražení tělesa ( $E_c$ ) při rázové rychlosti 2,9 m/s, z níž byla stanovena rázová

houževnatost Charpy ( $a_{cA}$ ). Jedná se o hodnotu mechanické energie potřebné k přeražení zkušební tělesa vztaženou na plochu průřezu pod vrubem, viz rovnice (2). Výsledné průměrné hodnoty rázové houževnatosti Charpy včetně směrodatných odchylek jsou uvedeny v tab. 3.8. Dílčí záznamy z měření jsou dokladovány v příloze 3 a příloze 7.



Obr. 3.17 Umístění zkušební tělesa na podpěry

$$a_{cA} = \frac{E_c}{h \cdot b_A} \text{ [kJ/mm}^2\text{]} \quad (2)$$

kde značí:

$a_{cA}$ ... vrubovou houževnatost pro zkušební těleso s vrubem typu A [kJ/mm<sup>2</sup>],

$E_c$ ... korigovanou energii potřebnou k přeražení zkušební tělesa [J],

$h$ ... tloušťku zkušební tělesa [mm],

$b_A$ ... šířku zkušební tělesa pod vrubem [mm].

Tab. 3.8 Vrbová houževnatost Charpy zkušebních vzorků z PA 12 před i po atmosférickém stárnutí

Typ vzorků a materiál		před stárnutím	dlouhodobé stárnutí	cyklické stárnutí
		$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
Vstřikované	nový PA 12	4,9 ± 0,5	4,3 ± 0,2	5,1 ± 0,6
	směs 80:20 (odpad/nový)	6,8 ± 0,9	5,6 ± 1,0	6,5 ± 0,8
	odpad ze sudu	6,4 ± 0,3	4,8 ± 0,4	5,7 ± 0,8
	odpad z dílu	7,0 ± 0,7	5,5 ± 0,6	5,8 ± 1,1
Aditivní	nový PA 12	4,4 ± 0,6	3,0 ± 1,0	2,5 ± 0,9
	směs 80:20 (odpad/nový)	3,2 ± 0,7	2,0 ± 1,3	2,0 ± 0,6
	odpad ze sudu	4,4 ± 0,4	2,9 ± 1,0	2,4 ± 0,7



### 3.3 Stanovení teploty měknutí podle Vicata

Teplota měknutí podle Vicata byla stanovena podle normy ČSN EN ISO 306. Tato zkouška probíhala na zkušebním zařízení HDT/Vicat A metodou B50, viz obr. 3.18. Tato metoda používá zatížení o velikosti  $(50 \pm 1)$  N a rychlost ohřevu  $(50 \pm 5)$  K/h. Pro každou zkoušku byla testována tři zkušební tělesa.



Obr. 3.18 Zkušební zařízení Vicat / HDT

Při této zkoušce byla zkušební tělesa umístěna do zkušebního zařízení pod zatěžující jehlu kruhového průřezu o ploše průřezu  $(1,000 \pm 0,015)$  mm<sup>2</sup>, viz obr. 3.19. Po umístění byla zkušební tělesa ponořena do olejové lázně s teplotou 25 °C. Následně byla zatížena silou  $(50 \pm 1)$  N. Po pěti minutách zatížení se vynuloval úchylkoměr a teplota lázně se začala zvyšovat stálou rychlostí  $(50 \pm 5)$  K/h. Výsledkem této zkoušky je teplota, při které se jehla vtlačila do zkušebního tělesa do hloubky  $(1,00 \pm 0,01)$  mm. Výsledné průměrné hodnoty teploty měknutí podle Vicata jsou pro jednotlivé šarže materiálu včetně výběrových směrodatných odchylek uvedeny v tab. 3.9. Dílčí hodnoty jsou dokumentovány v příloze 4 a v příloze 8.



Obr. 3.19 Zkušební těleso zatížené jehlou

Tab. 3.9 Porovnání hodnot teploty měknutí podle Vicata

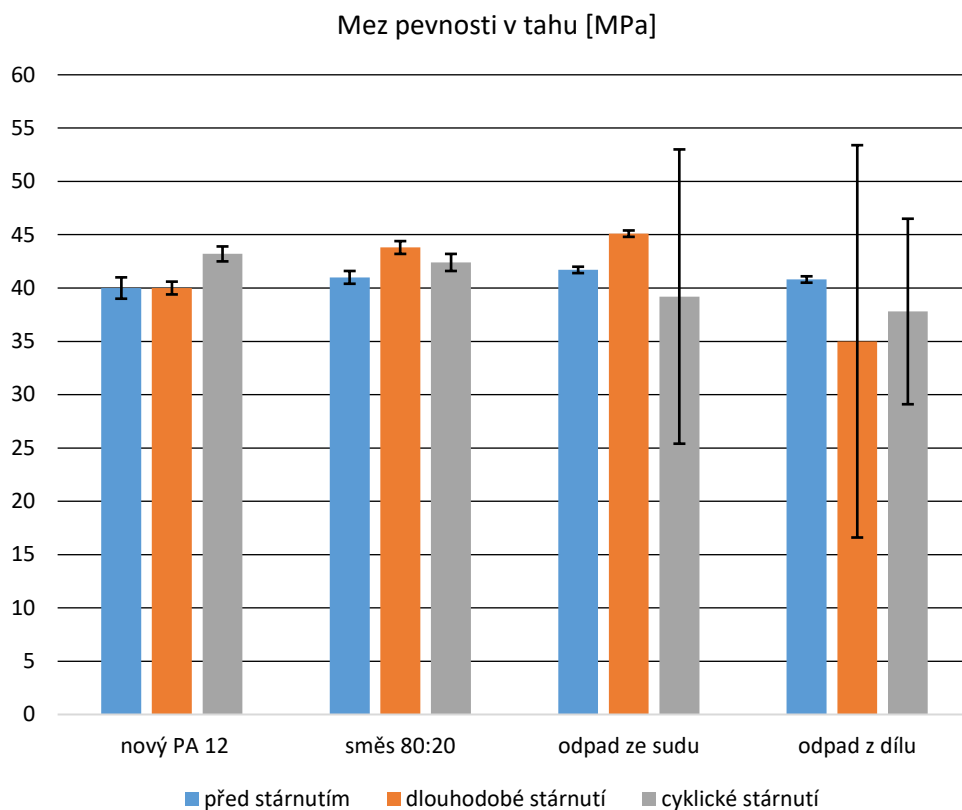
Typ vzorků a materiál		před stárnutím	dlouhodobé stárnutí	cyklické stárnutí
		VST [°C]	VST [°C]	VST [°C]
Vstřikované	nový PA 12	134 ± 1	135 ± 2	134 ± 3
	směs 80:20 (odpad/nový)	137 ± 1	136 ± 1	135 ± 1
	odpad ze sudu	138 ± 2	136 ± 1	135 ± 1
	odpad z dílu	137 ± 1	138 ± 2	136 ± 1
Aditivní	nový PA 12	159 ± 0	160 ± 0	160 ± 1
	směs 80:20 (odpad/nový)	163 ± 0	159 ± 0	159 ± 1
	odpad ze sudu	159 ± 0	161 ± 1	160 ± 1

## 4 Vyhodnocení a diskuze výsledků

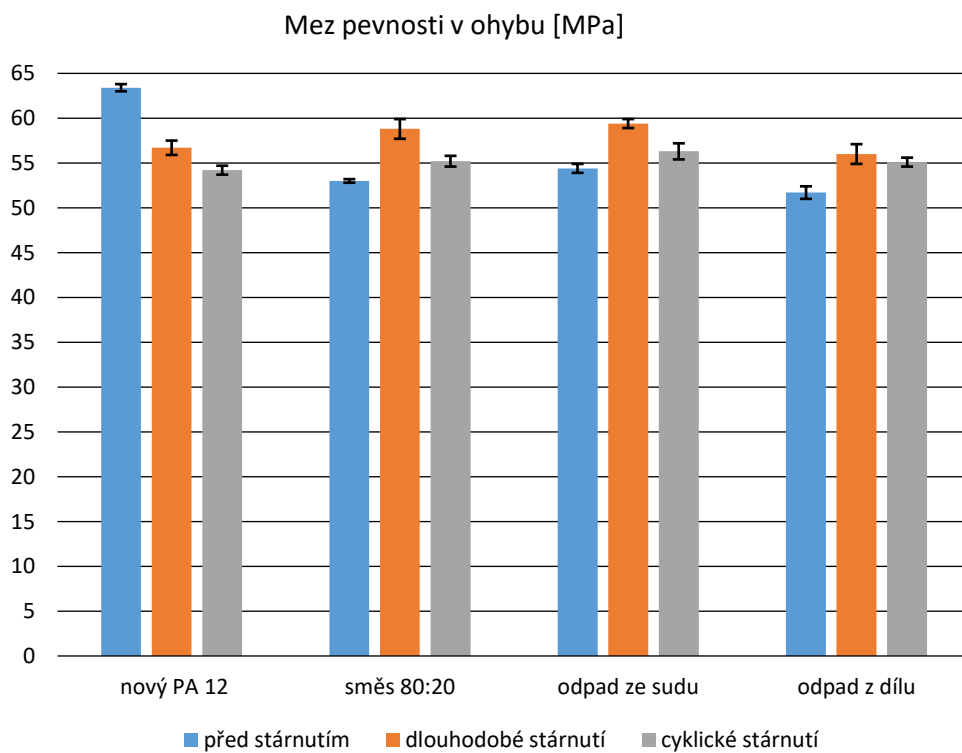
V experimentální části bakalářské práce bylo provedeno měření mechanických vlastností a teploty měknutí podle Vicata u vstřikovaných a aditivních dílů vyrobených z nového práškového polymeru PA 12 a z jeho technologického odpadu. Tato měření byla prováděna po kondicionaci zkušebních těles dle ČSN EN ISO 1110 v krátkém časovém horizontu a po atmosférickém stárnutí dle DIN 75 220, jehož cílem bylo posoudit možnost využití technologického odpadu pro vstřikované díly z hlediska jejich životnosti. Vyhodnocení a diskuze výsledků experimentální studie je pro vstřikované a aditivní díly rozdělena do dvou samostatných kapitol.

### 4.1 Hodnocení vlastností vzorků zhotovených technologií vstřikování

Z naměřených hodnot tahových vlastností vyplývá, že mez pevnosti v tahu se pro jednotlivé vzorky před stárnutím neliší, viz obr. 4.1. V případě meze pevnosti v ohybu, viz obr. 4.2, byl u výstřiků zhotovených z technologického odpadu zaznamenán pokles až o cca 18 %, přičemž nejnižší hodnotu meze pevnosti v ohybu dosahují díly zhotovené z technologického odpadu po očištění dílů. Jedná se o materiál, který byl při aditivní výrobě nejvíce tepelně zatížen a u kterého nelze vyloučit termooxidační stárnutí. Po atmosférickém stárnutí došlo u výstřiků zhotovených z nového PA 12 k nárůstu meze pevnosti v tahu, v případě cyklické zkoušky stárnutí o 8 %. Obdobný nárůst byl zaznamenán také u výstřiků ze směsi 80:20 a z technologického odpadu získaného ze sudu výrobní jednotky vystavených dlouhodobé zkoušce stárnutí. Naopak výstřiky zhotovené z odpadu po očištění dílů vykazovaly pokles pevnosti v tahu až o 14 %. Lze se domnívat, že je to dáno chemickými změnami ve struktuře materiálu (zejména štěpením řetězců makromolekul), zatímco u výstřiků zhotovených z nového PA 12 a technologického odpadu ze sudu došlo k nárůstu meze pevnosti v tahu vlivem fyzikálních pochodů, které atmosférické stárnutí provází, zejména vlivem změny nadmolekulární struktury. Obdobného nárůstu meze pevnosti bylo zaznamenáno také při ohybovém zatěžování, a to i v případě výstřiků zhotovených z technologického odpadu po očištění dílu. Naopak u výstřiků z nového PA 12 došlo vlivem stárnutí k poklesu meze pevnosti v ohybu. Tuto nuanci by bylo vhodné objasnit pomocí strukturální analýzy výstřiků v navazující studii. Vstřikované vzorky z technologických odpadů vykazovaly po atmosférickém stárnutí také větší rozptyl měřených hodnot meze pevnosti v tahu, což koresponduje s předpokladem jejich degradace.

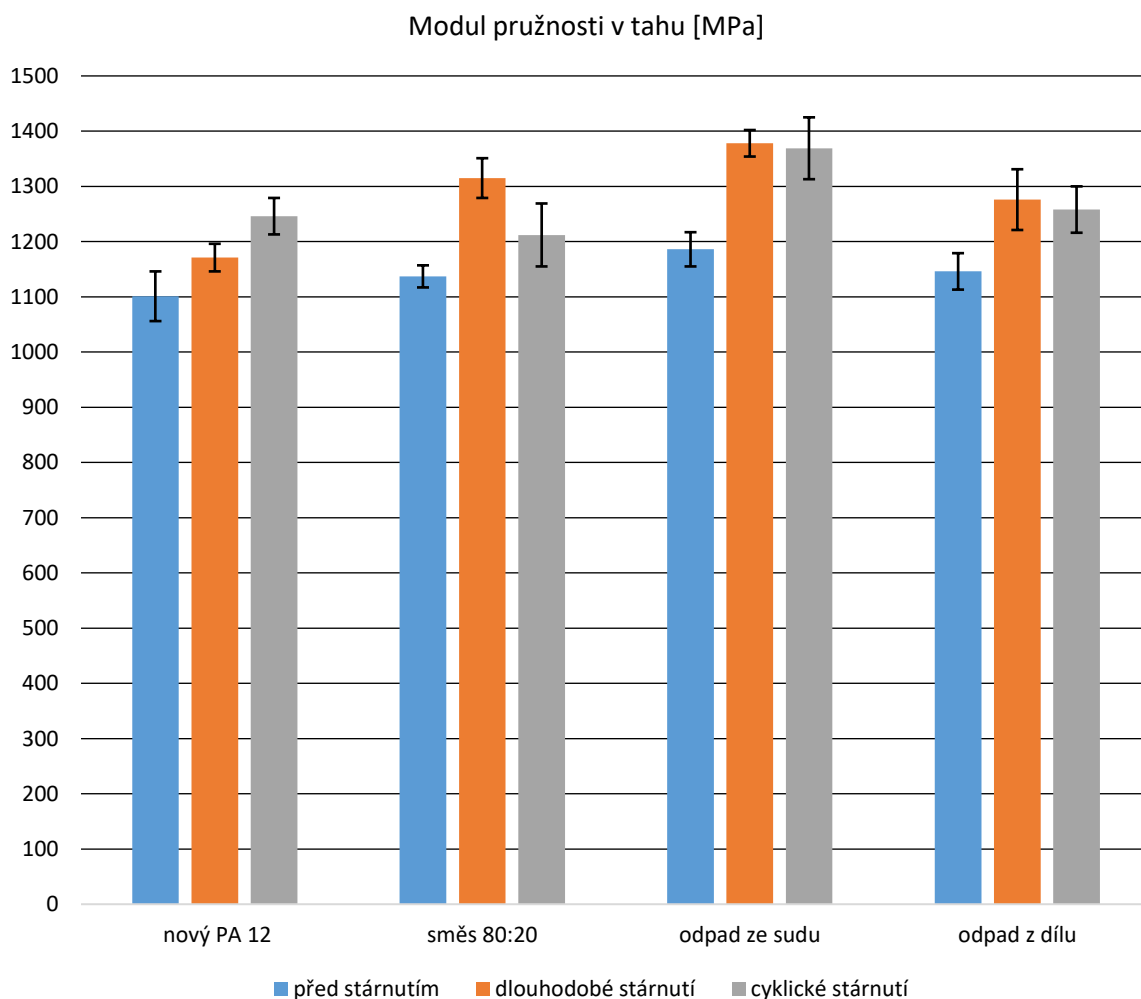


Obr. 4.1 Mez pevnosti v tahu vstříkovaných vzorků

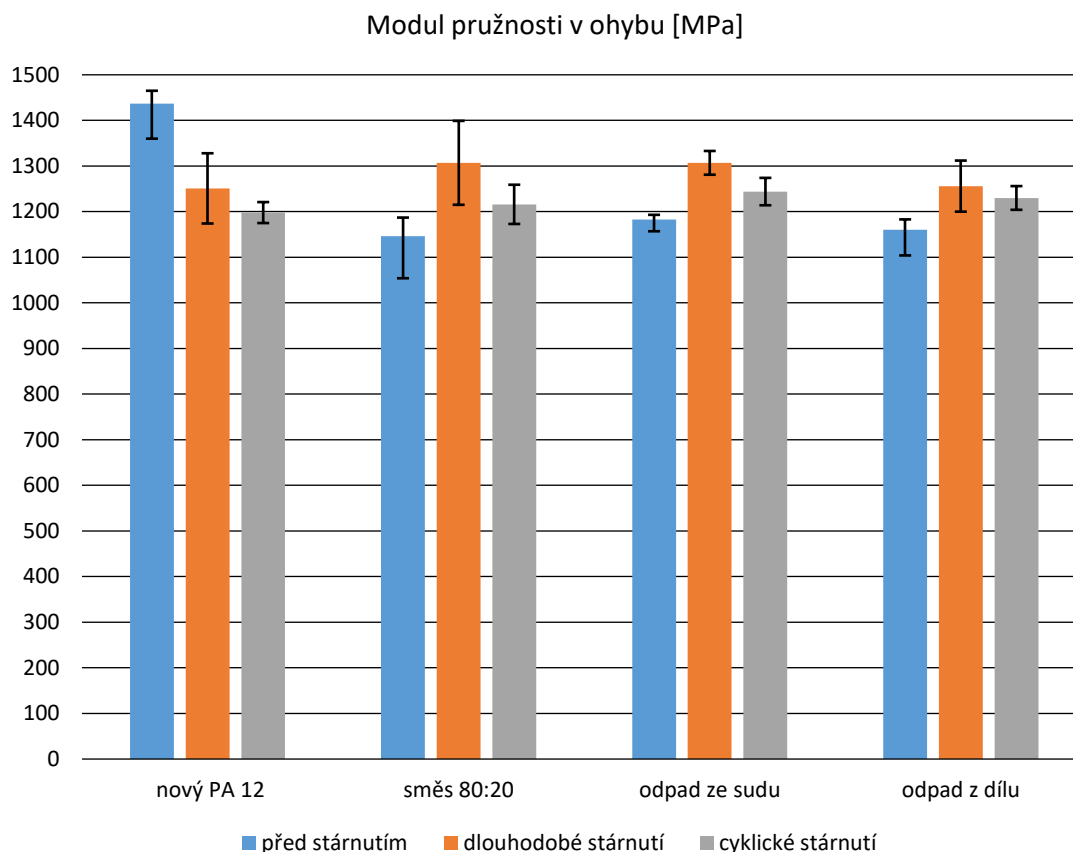


Obr. 4.2 Mez pevnosti v ohybu vstříkovaných vzorků

Další důležitou mechanickou vlastností, která byla u vzorků měřena, byl modul pružnosti v tahu a modul pružnosti v ohybu. Z obr. 4.3. je patrné, že modul pružnosti v tahu se před stárnutím pro různé materiálové šarže nemění. Naopak u modulu pružnosti v ohybu, viz obr. 4.4, vykazovaly výstřiky z nového PA 12 podstatně vyšší hodnotu než ostatní materiálové šarže. V případě modulu pružnosti v tahu došlo téměř u všech šarží po atmosférickém stárnutí k jeho zvýšení, přičemž největší nárůst (16 %) je pozorován u šarží ze směsi 80:20 a technologického odpadu ze sudu, viz obr. 4.3. Zároveň u těchto dvou šarží došlo k nárůstu modulu pružnosti v ohybu (o 14 %), viz obr. 4.4. Současný nárůst modulů pružnosti v tahu i ohybu, doprovázený nárůstem mezí pevnosti v tahu i ohybu u šarží vyrobených ze směsi 80:20 a technologického odpadu po stárnutí, opět poukazuje na možnou změnu vnitřní struktury polymeru v důsledku fyzikálních pochodů během stárnutí (např. dokrystalizace). U výstřiků z PA 12 tedy nedošlo po atmosférickém stárnutí k negativní změně jejich tuhosti v důsledku použití technologického odpadu při jejich výrobě.

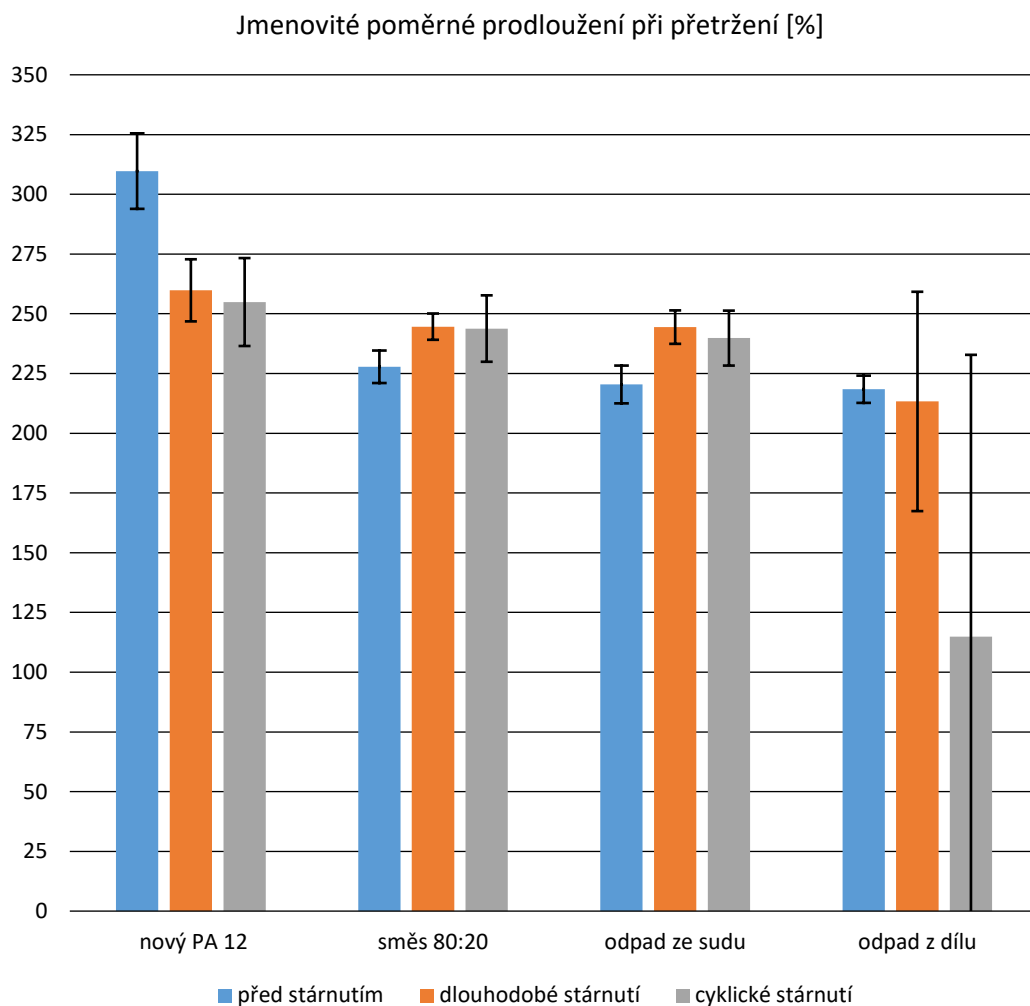


Obr. 4.3 Modul pružnosti v tahu vstřikovaných vzorků



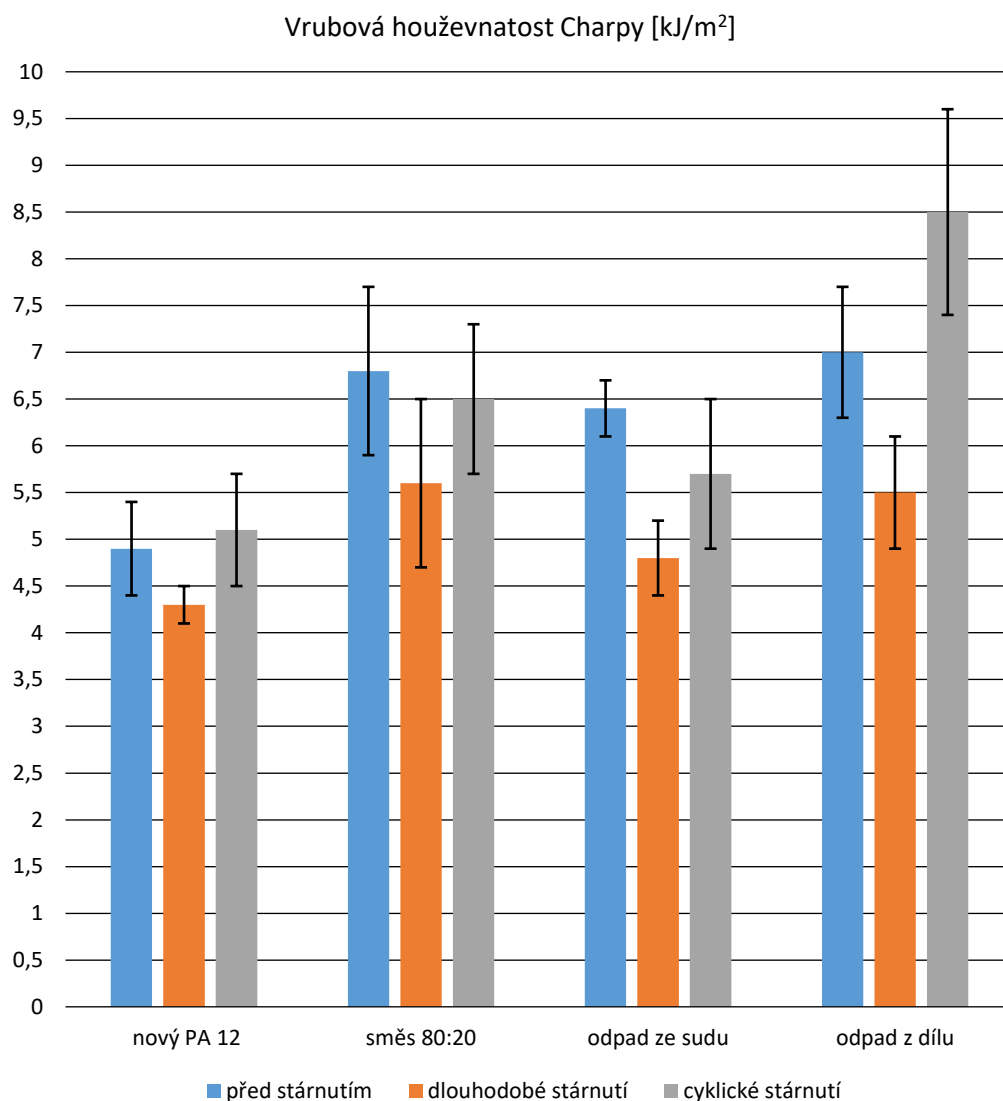
Obr. 4.4 Modul pružnosti v ohybu vstříkovaných vzorků

Z obr. 4.5. je patrné, že použitím technologického odpadu se u výtřiků snižuje jejich jmenovité poměrné prodloužení při přetržení, resp. celková tažnost, a to až o 30 %, přičemž největší pokles byl zaznamenán u výtřiků zhotovených z technologického odpadu po očištění dílů. Je to pravděpodobně dáno tepelnými (chemickými) změnami v materiálu při aditivní technologii MJF. U výtřiků zhotovených z nového PA 12, které byly vystaveny atmosférickému stárnutí, je zaznamenán pokles celkové tažnosti o 18 %, u výtřiků z technologického odpadu ze sudu a ze směsi nového materiálu a technologického odpadu po očištění dílu byl zaznamenán naopak mírný nárůst, který je však vzhledem ke struktuře PA 12 a rozptylu měřených hodnot na hranici statistické významnosti, viz obr. 4.5. U vzorků, které byly vyrobeny z technologického odpadu z dílu, došlo po atmosférickém stárnutí k poklesu jejich celkové tažnosti až o 48 % a k velmi velkému nárůstu rozptylu měřených hodnot, které poukazují na změny ve struktuře materiálu, např. v důsledku štěpení řetězců makromolekul, které by bylo vhodné prokázat v průběhu navazující studie na tuto bakalářskou práci. V případě použití technologického odpadu PA 12 z výrobního procesu MJF bude u vstříkovaných dílů nutné počítat s výrazným poklesem jejich celkové tažnosti, lze to přisuzovat tepelnému namáhání polyamidového prášku v průběhu 3D tisku, případně jeho „znehodnocení“ činidly, která jsou v průběhu aditivní technologie MJF používána, viz kap. 2.1.



Obr. 4.5 Jmenovité poměrné prodloužení při přetržení vstřikovaných vzorků

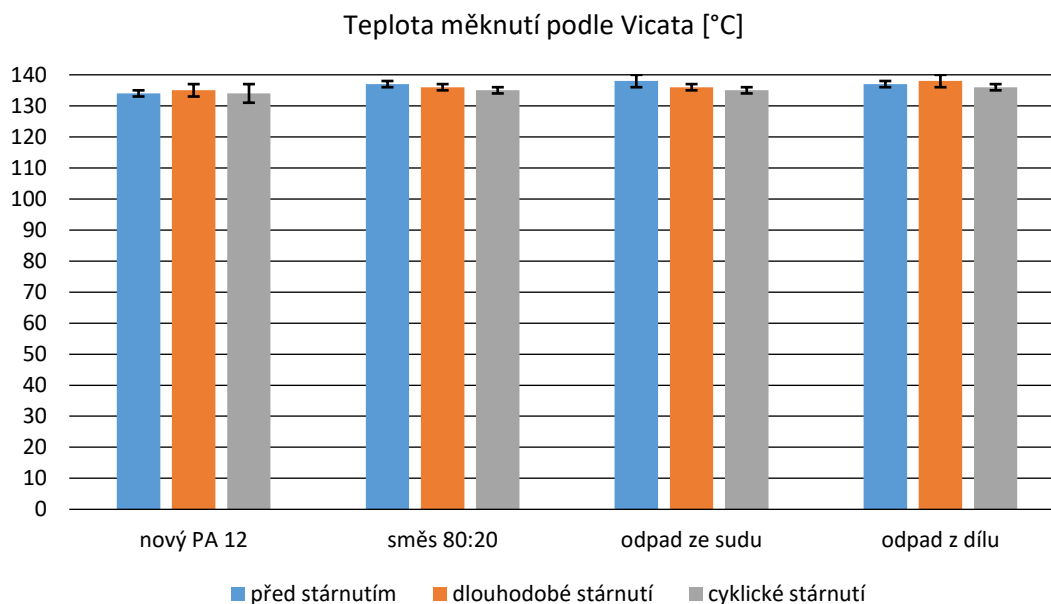
Z naměřených hodnot vrubové houževnatosti Charpy vyplývá, že u vzorků před stárnutím vykazují nejnižší hodnotu vrubové houževnatosti výstřiky zhotovené z nového PA 12, viz obr. 4.6. U všech ostatních šarží byla naměřena vyšší hodnota vrubové houževnatosti, a to až o 43 %. Dále je možné pozorovat, že u vzorků vystavených dlouhodobému osvětlení (dlouhodobé zkoušky stárnutí) dochází k poklesu vrubové houževnatosti, a to až o 25 %, na rozdíl od výstřiků vystavených cyklickému stárnutí, kde se vrubová houževnatost téměř nemění vzhledem k rozptylu měřených hodnot. Pokles vrubové houževnatosti po dlouhodobém stárnutí je zaznamenán zejména u výstřiků zhotovených z technologických odpadů. Rozdílné chování výstřiků vystavených různým metodám atmosférického stárnutí je dáno rozdílnými klimaty. V případě cyklické zkoušky stárnutí dochází ke střídání denního a nočního, suchého a vlhkého klima na rozdíl od dlouhodobého osvětlení, které mohlo způsobit strukturální změny, jež se odrazí v poklesu vrubové houževnatosti výstřiku. Pro objasnění konkrétní příčiny navrhuji v rámci navazující studie detailní analýzu vnitřních a povrchových strukturálních změn výstřiků.



Obr. 4.6 Vrubová houževnatost Charpy vstříkovaných vzorků

U vzorků, které neprošly procesem stárnutí, mají nejnižší teplotu měknutí podle Vicata a tím i nejnižší tvarovou stálost výstřiky zhotovené z nového PA 12. Vzorky vyrobené ze směsi 80:20, odpadu ze sudu a odpadu z dílu mají teplotou měknutí podle Vicata cca o 3 °C vyšší. Materiály těchto šarží byly během procesu MJF vystaveny tepelnému namáhání, které mohlo mít za následek jejich strukturální změny způsobující zvýšení teplotní odolnosti polymeru, například vznik nových funkčních skupin v důsledku termooxidačních dějů apod. Na druhou stranu je třeba uvést, že tento rozdíl není z aplikačního, ale ani ze statistického hlediska výrazný. V případě vzorků, které prošly dlouhodobou nebo cyklickou zkouškou stárnutí, lze konstatovat, že klimatické podmínky stárnutí neměly negativní vliv na změnu teplotní odolnosti polymerů. Z hlediska teplotní odolnosti polymerů nebyly tedy zjištěny rozdíly mezi výstřiky vyrobenými z nového PA 12 a jeho technologického odpadu, který vzniká v procesu aditivní technologie 3D tisku.



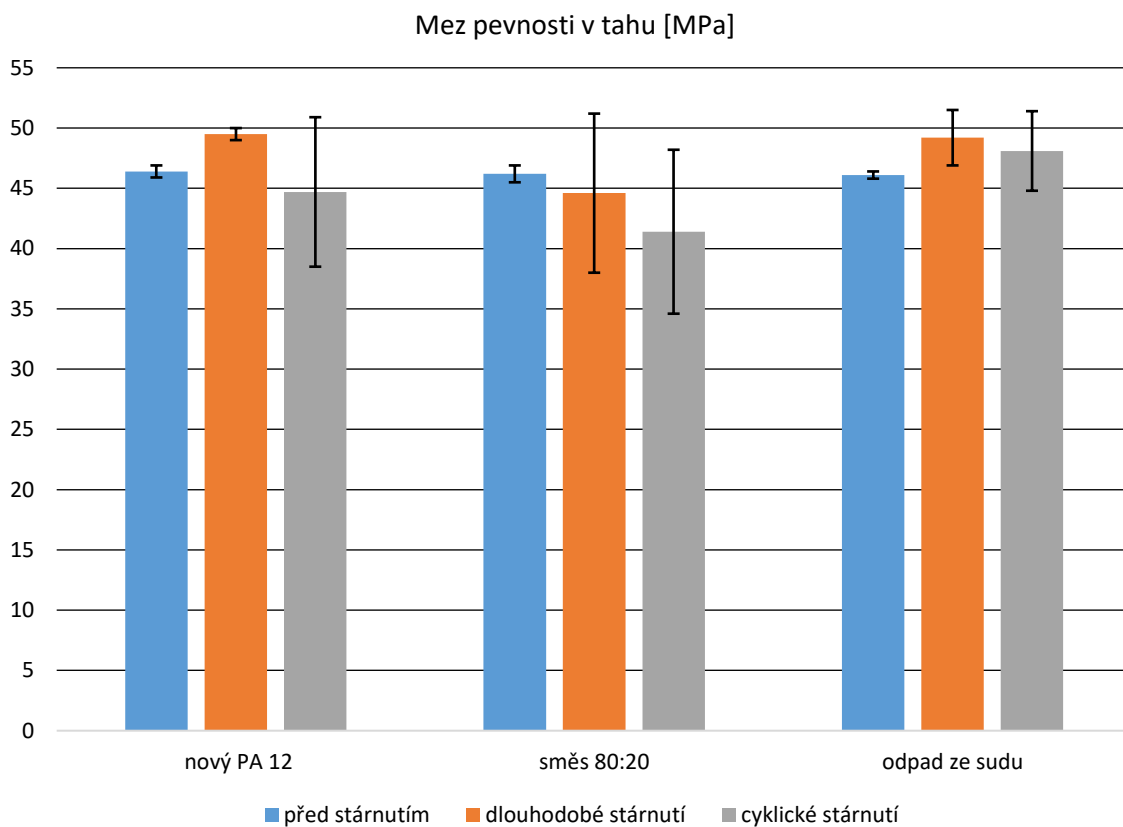


Obr. 4.7 Teplota měknutí podle Vicata vstříkovaných vzorků

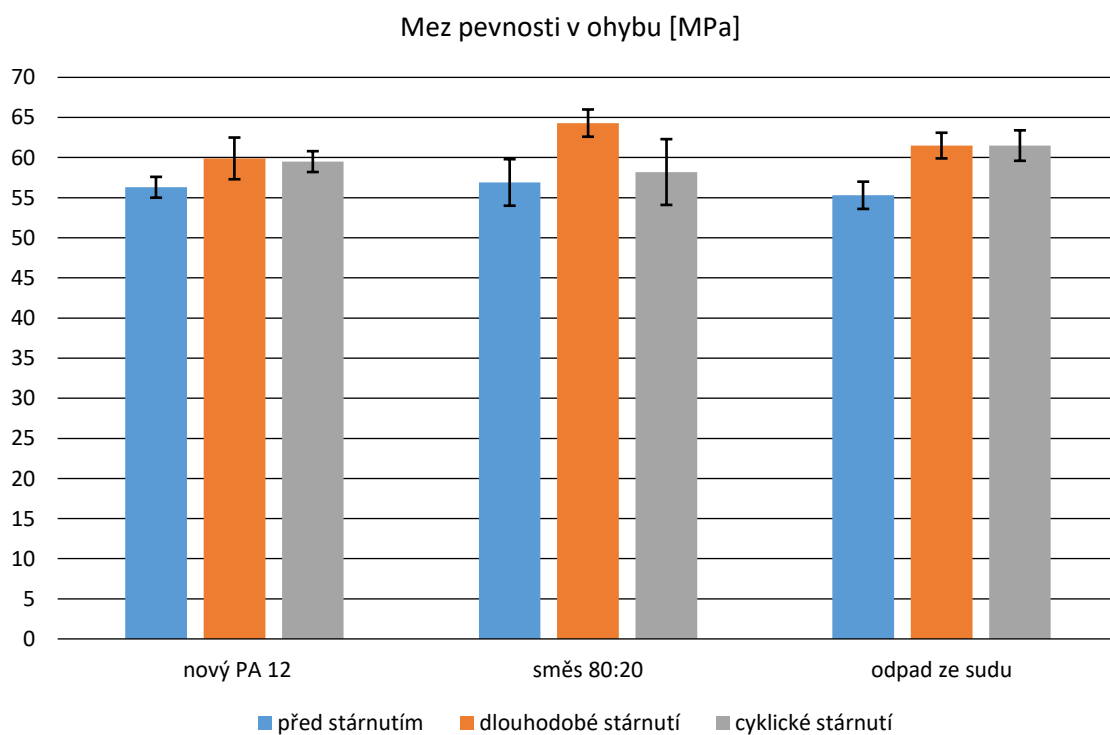
## 4.2 Hodnocení vlastností vzorků zhotovených technologií MJF

Měření mechanických vlastností u dílů z aditivní výroby bylo provedeno nad rámec zadání bakalářské práce. Záměrem bylo porovnat rozdíly mechanických vlastností mezi díly vyráběnými vstříkovaním a aditivní technologií výroby a posouzení jejich odolnosti vůči působení nepříznivých klimatických podmínek, které byly simulovány zkouškami atmosférického stárnutí. Vzorky zhotovené aditivní technologií MJF, které neprošly procesem stárnutí, vykazovaly téměř stejné hodnoty mechanických vlastností stanovené při tahovém, ohybovém a rázovém namáhání, viz obr. 4.8 až obr. 4.12. Z tohoto hlediska lze konstatovat, že použití technologického odpadu při opětovné aditivní výrobě nemělo negativní vliv na pevnost a tuhost materiálu, ani na jeho celkovou tažnost, na rozdíl od dílů zpracovaných vstříkovaním.

V porovnání se vstříkovanými díly byla mez pevnosti v tahu u aditivních dílů vyšší, a to až o 16 % (v případě nového PA 12), viz obr. 4.1. a obr. 4.8. Tento rozdíl je způsoben pravděpodobně přítomností uhlíku z tavícího činidla, které je používáno při 3D tisku technologií MJF. Po atmosférickém stárnutí došlo k mírnému nárůstu meze pevnosti v tahu a ohybu u vzorků vyrobených z nového PA 12 i u vzorků vyrobených z technologického odpadu ze sudu. U vzorků ze směsi 80:20 je vzhledem k rozptýlům hodnot změna pevnosti statisticky nevýznamná. Díly, které prošly procesem stárnutí, vykazovaly větší výběrové směrodatné odchyly, viz obr. 4.8. a obr. 4.9. Z tohoto důvodu je možné usuzovat, že v materiálu může docházet k podobným změnám vnitřní struktury jako v případě vstříkovaných vzorků, pravděpodobně v důsledku fyzikálních dějů, k nimž dochází při stárnutí v důsledku zvýšené povrchové teploty dílů.

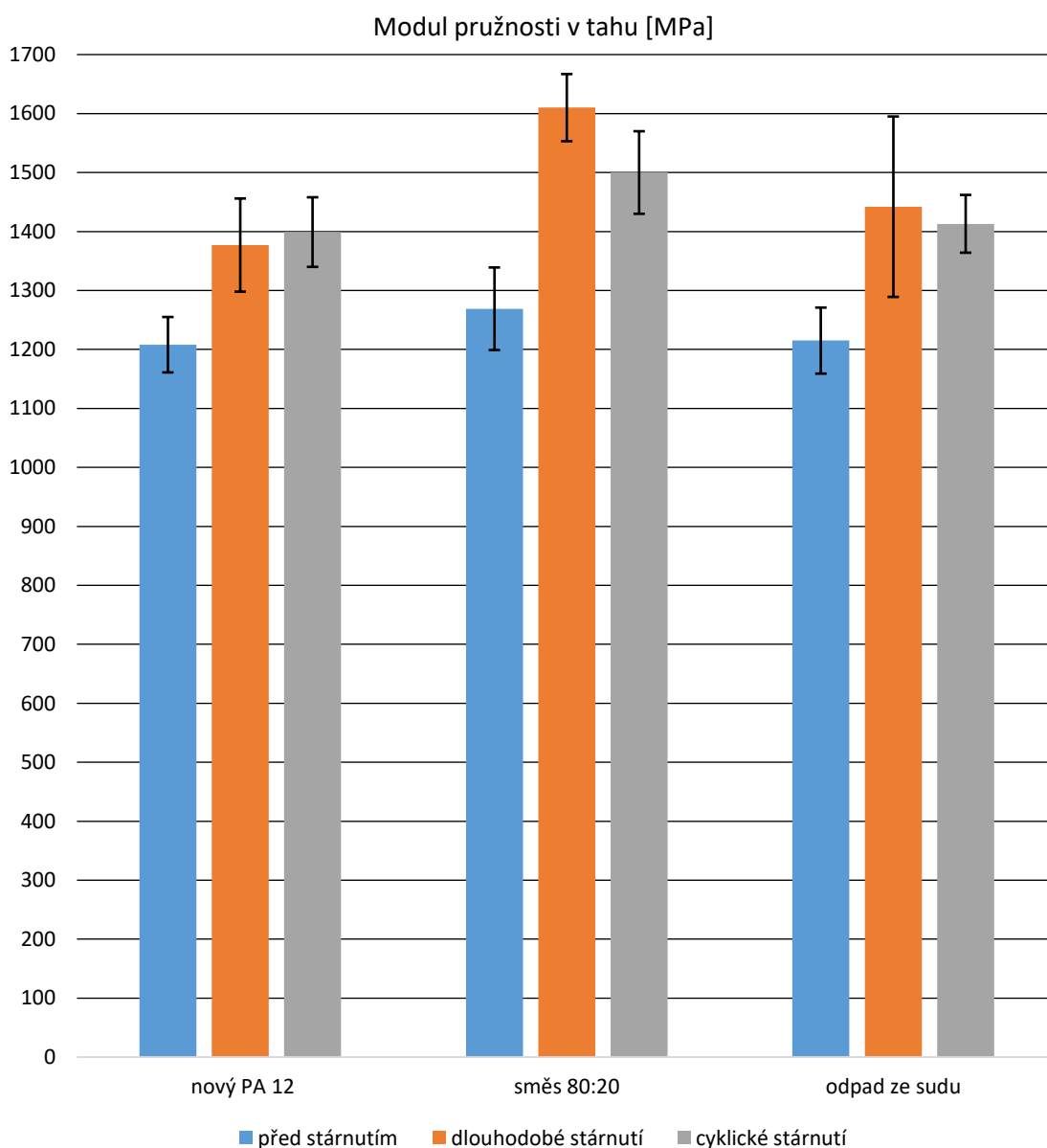


Obr. 4.8 Mez pevnosti v tahu aditivních vzorků

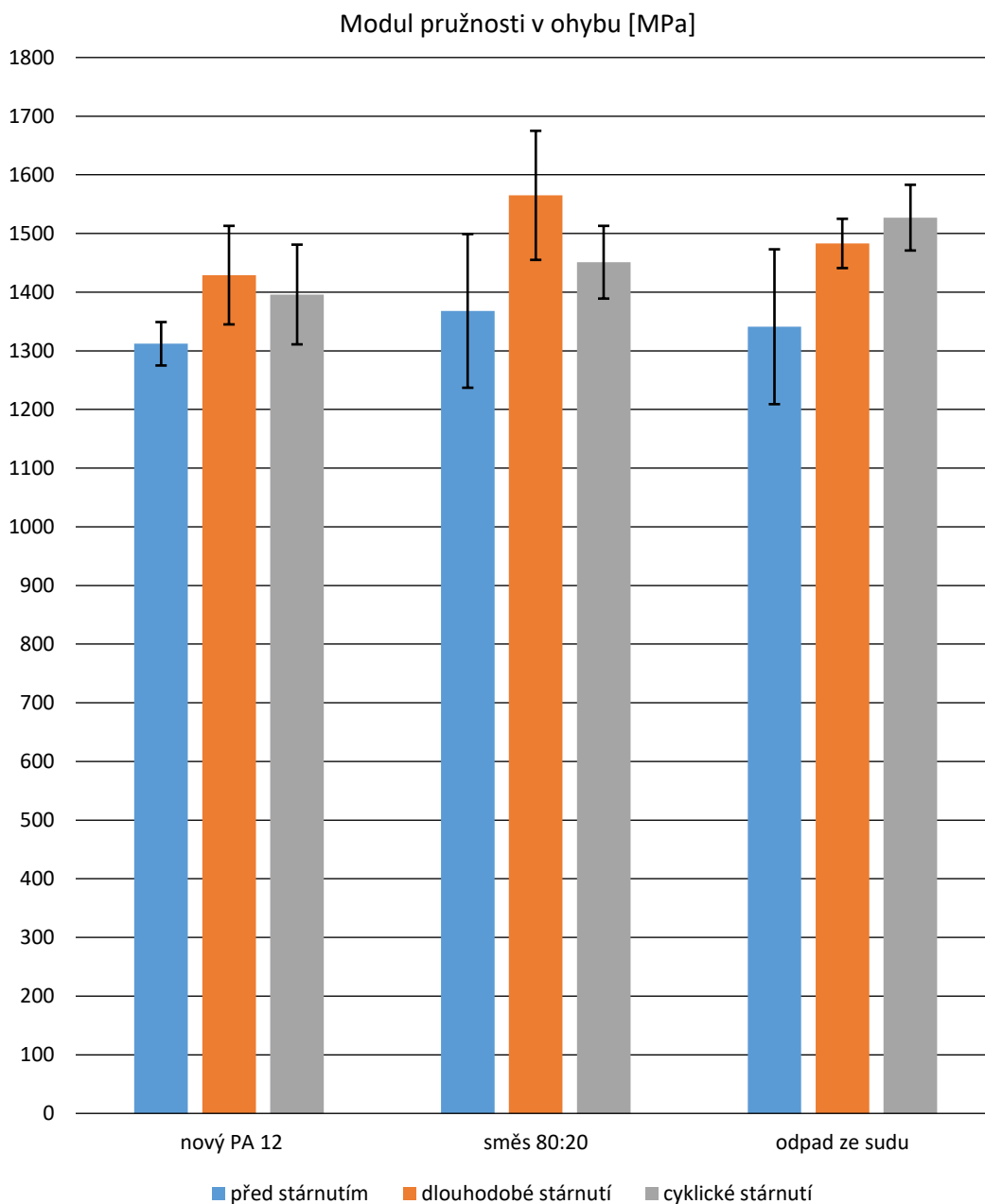


Obr. 4.9 Mez pevnosti v ohybu aditivních vzorků

Z obr. 4.10 a obr. 4.11 vyplývá, že se u vzorků, které neprošly procesem atmosférického stárnutí, moduly pružnosti v tahu i ohybu pro jednotlivé šarže materiálu neliší. U vzorků které prošly procesem atmosférického stárnutí došlo k nárůstu obou modulů pružnosti a to u všech šarží materiálu, viz obr. 4.10 a 4.11. Nejvyšší změny v důsledku atmosférického stárnutí bylo zaznamenáno při měření modulu pružnosti v tahu – až 27 %, zatímco změna modulu pružnosti v ohybu dosahovala max. 14 %. Nárůst tuhosti výstřiků po atmosférickém stárnutí koresponduje i se zvýšením jejich pevnosti v důsledku strukturních změn, které mohou být způsobeny zejména fyzikálními procesy souvisejícími se změnou nadmolekulární struktury polyamidu.

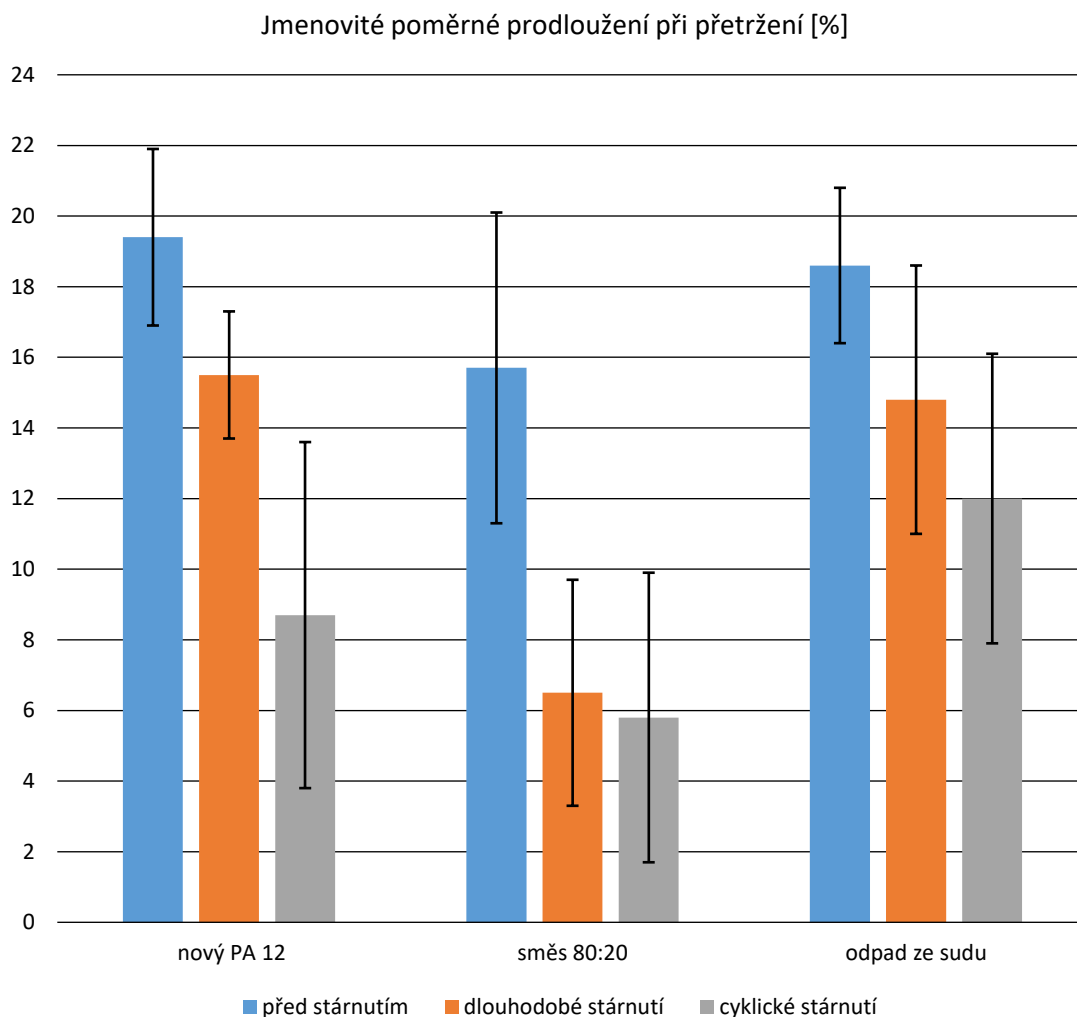


Obr. 4.10 Modul pružnosti v tahu aditivních vzorků



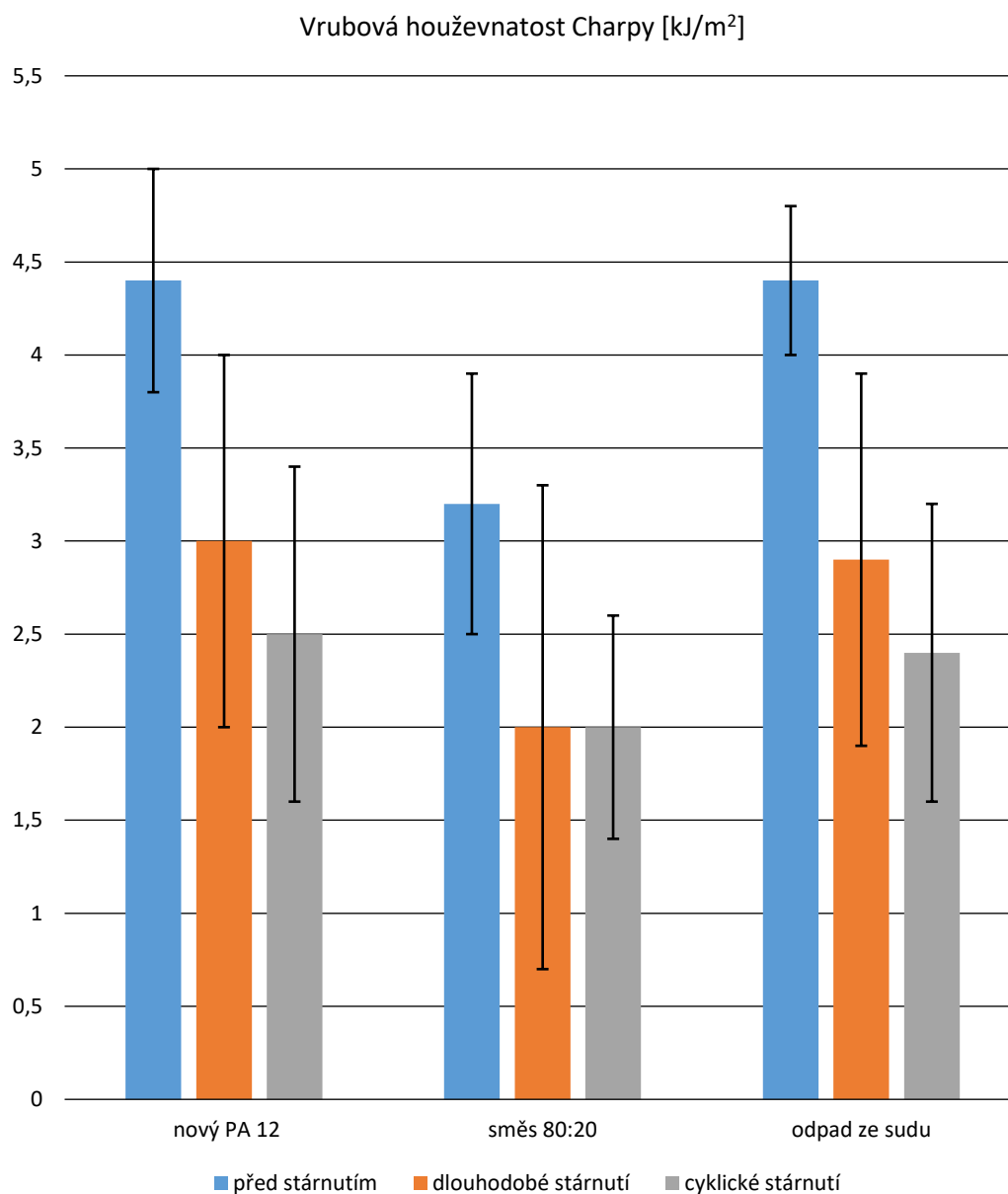
Obr. 4.11 Modul pružnosti v ohybu aditivních vzorků

Jmenovité poměrné prodloužení (resp. celková tažnost) u vzorků, které nebyly vystaveny účinkům atmosférického stárnutí, se pro jednotlivé šarže (s ohledem na rozptyl naměřených hodnot) výrazně nemění, viz obr. 4.12. Po atmosférickém stárnutí však dochází k velmi významnému poklesu, a to až 2,7krát v případě vzorků ze směsi 80:20. V porovnání s díly vyrobenými technologií vstřikování je celková tažnost aditivních dílů výrazně menší, viz obr. 4.5 a obr. 4.12, příčinou může být přítomnost uhlíku z tavicího činidla ve struktuře dílů, případně strukturální změny k nimž může při aditivní výrobě docházet vlivem působení záření z infračervených lamp.



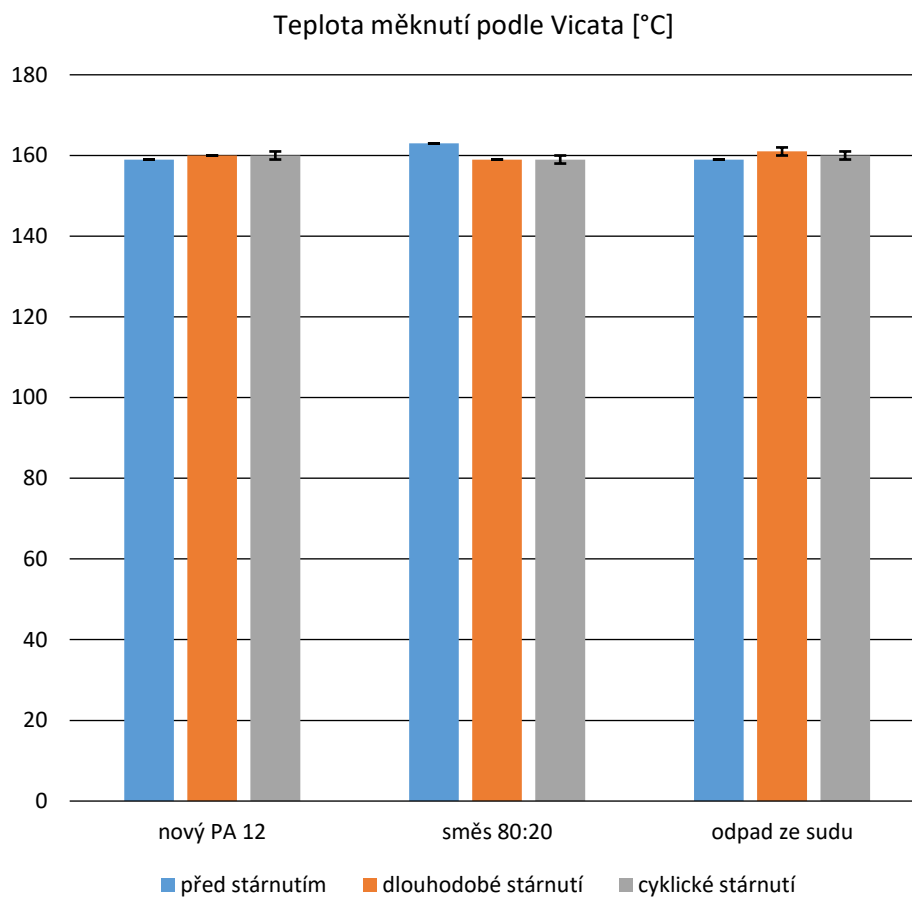
Obr. 4.12 Jmenovité prodloužení při přetržení aditivních vzorků

Naměřené hodnoty vrubové houževnatosti Charpy u aditivních dílů obecně vykazovaly velmi velké směrodatné odchylky pro všechny materiály, viz obr. 4.13. Ani zde není významný rozdíl mezi jednotlivými šaržemi materiálu právě vzhledem k rozptýlům měřených hodnot. Celková tažnost aditivních dílů je z důvodů uvedených v předchozím odstavci při hodnocení celkové tažnosti materiálu 14,5krát menší než u vstřikovaných dílů. V důsledku atmosférického stárnutí došlo na rozdíl od vstřikovaných dílů k poklesu vrubové houževnatosti. Je zřejmé, že strukturální změny mezi vstřikovanými a aditivními díly se liší a nelze vyloučit, že významnou úlohu u aditivních dílů sehraje jejich zbarvení do tmavého odstínu (v důsledku tavicího činidla), které má za následek zvýšení jejich povrchové teploty v průběhu umělého atmosférického stárnutí (v důsledku infračervené složky globálního slunečního záření). Z naměřených výsledků lze říci, že použitím technologického odpadu nedochází v důsledku atmosférického stárnutí ke změně rázové odolnosti 3D tisknutých dílů, neboť stejné změny vykazují i díly vyrobené z nového PA 12.



Obr. 4.13 Vrubová houževnatost Charpy aditivních vzorků

Podobně jako u vstřikovaných vzorků se teplota měknutí podle Vicata pro jednotlivé materiálové šarže neliší, a to ani u vzorků po atmosférickém stárnutí, viz obr. 4.14. Použitím technologického odpadu pro 3D tisk polyamidových dílů nedošlo tedy k ovlivnění jejich tvarové stálosti za působení teploty. Při srovnání teploty měknutí vstřikovaných a aditivních dílů lze konstatovat, že aditivní díly vykazují o 21 °C až 26 °C vyšší teplotní odolnost. Lze se domnívat, že je to způsobeno přítomností uhlíku, případně strukturními změnami materiálu za přítomnosti tavicího činidla při působení záření infračervených lamp během aditivního procesu MJF, které způsobují nárůst pevnosti, tuhosti a tvarové stálosti dílů a na druhou stranu snižují jejich rázovou odolnost i celkovou tažnost.



Obr. 4.14 Teplota měknutí podle Vicata aditivních vzorky

## 5 Závěr

V současné době je ve strojírenském průmyslu kladen velký důraz na co největší ekologičnost výroby. Tento trend se velmi významně projevuje i v plastikářském průmyslu, kdy je cílem využít zpracovávané materiály (plasty) na 100 %, ideálně bez vzniku technologického odpadu. U technologií, kde i přes veškeré snahy co nejvíce využít vstupní materiál vzniká technologický odpad, je snaha najít pro něj plnohodnotné využití v podobě opakovaného zpracování nebo pomocí dalších vhodných technologických procesů. Cílem této bakalářské práce bylo posoudit možnosti využití technologického odpadu PA 12 z aditivní technologie MJF pro technologií vstřikování, a to i z pohledu životnosti výstřiků, která byla urychlována atmosférickým stárnutím. Posouzení probíhalo na základě hodnocení mechanických vlastností materiálu a tvarové stálosti za působení zvýšené teploty prostřednictvím teploty měknutí podle Vicata.

Z naměřených hodnot mechanických vlastností vyplývá, že z krátkodobého hlediska, které nezohledňuje proces stárnutí plastů, lze technologický odpad PA 12 z aditivní technologie MJF využít pro vstřikování polyamidových dílů, které budou vystaveny především tahovému nebo rázovému namáhání, neboť jejich pevnost, tuhost a rázová odolnost je při těchto způsobech zatěžování stejná nebo lepší než u dílů z nového PA 12. V případě rázové odolnosti byl zaznamenán nárůst více jak o 40 %. Na druhou stranu bude potřeba počítat se snížením jejich celkové tažnosti (cca o 30 %), která i tak zůstává poměrně vysoká ( $\geq 200$  %). Z hlediska teploty měknutí podle Vicata nebyl u výstřiků zaznamenán negativní vliv technologického odpadu na jejich tvarovou stálost, a to ani v průběhu jejich stárnutí. Tyto závěry jsou obzvláště důležité pro technologický odpad po očištění dílů, který již pro technologii MJF nemá žádné využití. V případě dílů namáhaných na ohyb není využití ani jednoho z použitých typů technologického odpadu vhodné, resp. při jeho použití bude nutné počítat se snížením pevnosti a tuhosti v ohybu oproti novému práškovému polymeru PA 12 o cca 20 %. Z hlediska umělého atmosférického stárnutí, jehož cílem bylo urychlit životnost dílů, lze jednoznačně říci, že nebyl shledán negativní vliv použití technologického odpadu ze sudu na životnost dílu z pohledu jeho pevnosti a tuhosti jak při tahovém, tak i ohybovém namáhání. Výjimkou je technologický odpad získaný po očištění dílů, který byl v procesu aditivní výroby nejvíce tepelně zatěžován. U výstřiků z tohoto odpadu nelze toto tvrzení jednoznačně konstatovat, neboť jsou zde náznaky poklesu pevnosti v tahu i celkové tažnosti během životnosti dílů a mezi vzorky byl zaznamenán značný rozptyl měřených hodnot. Výsledky vrubové houževnatosti sice ukazují, že za specifických podmínek stárnutí může technologický odpad jeho průběh negativně ovlivnit, ale stále



bylo při použitých klimatických podmínkách naměřeno vyšší rázové odolnosti než u dílů z nového PA 12, u nichž byla životnost urychlena stejným způsobem.

Se záměrem porovnat rozdíly mezi mechanickými vlastnostmi dílů vyrobených technologií vstřikování a aditivní výrobou MJF byly naměřeny i hodnoty mechanických vlastností aditivních vzorků. Aditivní vzorky vykazovaly vyšší pevnost, vyšší tuhost i vyšší tvarovou stálost, a naopak nižší tažnost a rázovou, resp. vrubovou houževnatost. Je to dáno technologickým procesem aditivní výroby, kdy je k polyamidovému prášku přidáváno tavící činidlo obsahující uhlík a také činidlo pro povrchovou úpravu aditivního dílu. Aditivní díly PA 12 jsou tak pevnější a tužší, ale podstatně křehčí než díly z technologie vstřikování. Další zajímavostí je, že oproti vstřikovaným dílům nebyl u aditivních vzorků, které neprošly procesem atmosférického stárnutí, pozorován negativní vliv technologického odpadu na jejich pevnost a tuhost v ohybu. Z krátkodobého hlediska užívání není tedy mezi aditivními díly vyrobenými z technologického odpadu a nového PA 12 rozdíl v jejich sledovaných vlastnostech (drobné nuance jsou vzhledem k rozptylu měřených hodnot na hranici statistické významnosti). Z dlouhodobého hlediska užívání dílů (v důsledku klimatického stárnutí) je zřejmé, že použití technologického odpadu se negativně projeví v postupné změně jejich celkové tažnosti a rázové, resp. vrubové houževnatosti, které se u aditivních výrobků časem snižují. Naopak pevnost a tuhost se zvyšuje.

## Literatura a použité zdroje

- [1] *Unikátní průmyslová 3D tiskárna HP Jet Fusion vstupuje na český trh - Strojirenstvi.cz* [online]. [vid. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.strojirenstvi.cz/unikatni-prumyslova-3d-tiskarna-hp-jet-fusion-vstupuje-na-cesky-trh>
- [2] *HP JET FUSION 4200 | 3Dees* [online]. [vid. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://www.3dees.cz/hp-jetfusion-3d>
- [3] 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, 259–266. ISSN 2214-8604.
- [4] *Jak funguje 3D tiskárna HP Jet Fusion 4200 v české verzi* [online]. 2018 [vid. 2021-05-18]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=lx3spKD3tCo&ab\\_channel=3Dees](https://www.youtube.com/watch?v=lx3spKD3tCo&ab_channel=3Dees)
- [5] *Tiskové řešení HP Jet Fusion 4200 3D* [online]. B.m.: HP Development Company, L.P. Dostupné z: <https://support.hp.com/cz-cs/product/hp-jet-fusion-3d-4200-printer/11461058/manuals>
- [6] ŠTEFEK, Ondřej. *První instalace 3D tiskárny HP Multi Jet Fusion v České republice* [online]. [vid. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.cad.cz/hardware/78-hardware/8771-prvni-instalace-3d-tiskarny-hp-multi-jet-fusion-v-ceske-republice.html>
- [7] *Powering the New HP Jet Fusion 3D Printers | Jet Fusion 3D Printing | HP* [online]. 5 2016 [vid. 2021-01-02]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=VXntI3ff5tc&t=59s&ab\\_channel=HP](https://www.youtube.com/watch?v=VXntI3ff5tc&t=59s&ab_channel=HP)
- [8] PAPAGEORGIU, Marianna. How to design for HP Multi Jet Fusion technology. *3D Printing Blog: Tutorials, News, Trends and Resources | Sculpteo* [online]. [vid. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/10/25/how-to-design-for-hp-multi-jet-fusion-technology/>
- [9] GARTNER, Johannes. HP Officially Launches Multi Jet Fusion 3D Printers. *3Printr.com* [online]. [vid. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.3printr.com/hp-officially-launches-multijet-fusion-3d-printers-0839036/>
- [10] GRIEHL, Wolfgang a Djavid RUESTEM. Nylon-12-Preparation, Properties, and Applications. *Industrial & Engineering Chemistry*. 1970, 62.3, 16–22.
- [11] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery 1, Díl II. Základní přehled polymerů, vlastnosti a aplikace*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Studentská 1402/2, Liberec, 2020. ISBN 978-80-7494-515-1.
- [12] O'CONNOR, Heater 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, 22, 381–387.
- [13] PLASTICPORTAL.EU. EMS-GRIVORY nabízí alternativní materiály k PA12. *www.plasticportal.eu* [online]. [vid. 2021-06-11]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.eu/cs/ems-grivory-nabizi-alternativni-materialy-k-pa12/c/5099>

- [14] *HP-PA12-Datasheet.pdf* [online]. [vid. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://cimquest-inc.com/resource-center/HP/Materials/HP-PA12-Datasheet.pdf>
- [15] GOODSHIP, Vanessa a ARBURG GMBH + CO KG, ed. *Practical guide to injection moulding*. 2nd edition. Shawbury, Shrewsbury, Shropshire, United Kingdom: Smithers Rapra, 2017. ISBN 978-1-910242-94-0.
- [16] *Nylon PA12 přírodní 1,75mm 800g Devil Design* [online]. [vid. 2021-01-03]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/nylon-filament/nylon-pa12-prirodni-1-75mm-800g-devil-design/>
- [17] LENFELD, Petr. *Technologie vstřikování* [online]. 2015. ISBN 978-80-88058-74-8. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [18] *Plastic Injection Molding. Subcontracting Vietnam, stamping, laser cutting, injection molding, die casting, injection molding, extrusion, tube processing, spring fabrication, and assembly* [online]. [vid. 2021-01-04]. Dostupné z: <https://www.subcontracting-vietnam.com/service/plastic-injection-molding/>
- [19] BĚHÁLEK, Luboš, Pavel BRDLÍK, Martin BORŮVKA a Irena LENFELDOVÁ. *Úvod do technologií zpracování plastů*. první. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. ISBN 978-80-7494-460-4.
- [20] BĚHÁLEK, Luboš. *Technologie vstřikování plastů*. [online prezentace]. Liberec. [vid. 2021-01-03] Dostupné z: <https://elearning.tul.cz/>
- [21] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů: teorie a praxe*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-271-0614-1.
- [22] WEBY, IQ. *Molds. CNC, výroba forem, vstřikování plastů* [online]. [vid. 2021-01-03]. Dostupné z: <http://formy-plasty.cz/molds?lang=en>
- [23] NEUHÄUSL, Emil. *Vady výstřiků – 2. díl: Vady tvaru a rozměrové vady* [online]. [vid. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-2-dil-vady-tvaru-a-rozmerove-vady.html>
- [24] NEUHÄUSL, Emil. *Vady výstřiků – 3. díl: Vady vzhledové* [online]. [vid. 2021-02-20]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vady-vystriku-3-dil-vady-vzhledove.html>
- [25] ČSN EN ISO 16396-2. *Plasty - Polyamidy (PA) pro tváření - Část 2: Příprava zkušebních těles a stanovení vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci a státní zkušebnictví. 2017. Třídící znak: 643610
- [26] ČSN EN ISO 527-1. *Plasty - Stanovení tahových vlastností - Část 1: Obecné principy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2020. Třídící znak: 640604
- [27] ČSN EN ISO 178. *Plasty - Stanovení ohybových vlastností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2019. Třídící znak: 640607
- [28] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty - Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy - Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2011. Třídící znak: 640612

- [29] ČSN EN ISO 1110. *Plasty - Polyamidy - Zrychlené kondicionování zkušebních těles*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2020. Třídící znak: 643607
- [30] ČSN EN ISO 294-1. *Plasty - Vstřikování zkušebních těles z termoplastů - Část 1: Obecné principy a vstřikování víceúčelových zkušebních těles a zkušebních těles tvaru pravouhlého hranolu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2018. Třídící znak: 640210
- [31] ČSN EN ISO 3167. *Plasty - Víceúčelová zkušební tělesa*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2015. Třídící znak: 640209
- [32] ČSN EN ISO 306. *Plasty - Termoplasty - Stanovení teploty měknutí podle Vicata (VST)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. 2014. Třídící znak: 640521

## Seznam příloh

**Příloha 1:** Zkouška tahem vstřikovaných dílů

**Příloha 2:** Zkouška ohybem vstřikovaných dílů

**Příloha 3:** Vrubová houževnatost Charpy vstřikovaných dílů

**Příloha 4:** Teplota měknutí podle Vicata vstřikovaných dílů

**Příloha 5:** Zkouška tahem aditivních dílů

**Příloha 6:** Zkouška ohybem aditivních dílů

**Příloha 7:** Vrubová houževnatost Charpy aditivních dílů

**Příloha 8:** Teplota měknutí podle Vicata vstřikovaných dílů

**Příloha 9:** Záznam solární klimatické komory (dlouhodobý zkouška dle DIN 75220)

**Příloha 1: Zkouška tahem vstříkovaných dílů**

výstřiky PA 12 - před stárnutím						
Nový PA 12	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,21	9,94	1175	41	6,3	316
2	4,21	9,94	1083	41	6,4	296
3	4,21	9,94	1043	39	5,6	322
4	4,21	9,94	1176	42	6,4	304
5	4,21	9,94	1077	39	6,1	311
6	4,21	9,94	1050	39	7,0	269
7	4,21	9,94	1135	40	6,1	323
8	4,21	9,94	1063	40	6,5	319
9	4,21	9,94	1097	40	6,5	317
10	4,21	9,94	1116	40	6,7	321
<b>x</b>			<b>1101</b>	<b>40</b>	<b>6</b>	<b>310</b>
<b>s</b>			48	1	0	17
výstřiky PA 12 - před stárnutím						
Směs 80:20	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,22	10,00	1147	42	5,8	234
2	4,22	10,00	1165	41	5,9	235
3	4,22	10,00	1145	41	6,4	230
4	4,22	10,00	1094	40	7,0	235
5	4,22	10,00	1139	41	6,6	210
6	4,22	10,00	1113	40	6,8	228
7	4,22	10,00	1133	41	6,2	223
8	4,22	10,00	1133	42	5,8	227
9	4,22	10,00	1153	41	6,1	226
10	4,22	10,00	1152	41	6,1	229
<b>x</b>			<b>1137</b>	<b>41</b>	<b>6</b>	<b>228</b>
<b>s</b>			21	1	0	7
výstřiky PA 12 - před stárnutím						
Odpad ze sudu	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,21	9,99	1234	42	6,1	228
2	4,21	9,99	1150	42	6,0	214
3	4,21	9,99	1183	42	6,0	223
4	4,21	9,99	1221	42	6,0	220
5	4,21	9,99	1156	42	5,8	230
6	4,21	9,99	1222	42	5,9	216
7	4,21	9,99	1142	41	6,0	219
8	4,21	9,99	1176	42	5,9	217
9	4,21	9,99	1208	42	6,3	232
10	4,21	9,99	1170	42	6,1	204
<b>x</b>			<b>1186</b>	<b>42</b>	<b>6</b>	<b>220</b>
<b>s</b>			33	0	0	8

výstřiky PA 12 - před stárnutím						
Odpad z dílu	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,16	10,00	1222	41	5,8	216
2	4,16	10,00	1175	41	6,2	215
3	4,16	10,00	1161	41	6,5	227
4	4,16	10,00	1129	41	6,3	221
5	4,16	10,00	1161	41	6,1	225
6	4,16	10,00	1115	40	6,8	218
7	4,16	10,00	1109	41	6,5	209
8	4,16	10,00	1130	40	6,8	210
9	4,16	10,00	1142	41	6,5	224
10	4,16	10,00	1115	41	6,5	218
<b>x</b>			<b>1146</b>	<b>41</b>	<b>6</b>	<b>218</b>
s			35	0	0	6
výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Nový PA 12	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,2	9,99	1210	41	5,7	267
2	4,2	9,99	1153	41	5,9	279
3	4,2	9,99	1185	42	6,1	257
4	4,2	9,99	1143	41	6,0	255
5	4,2	9,99	1184	42	5,9	257
6	4,2	9,99	1144	41	5,9	235
7	4,2	9,99	1179	41	5,9	254
8	4,2	9,99	1204	42	5,8	256
9	4,2	9,99	1158	41	6,1	257
10	4,2	9,99	1150	42	5,8	281
<b>x</b>			<b>1171</b>	<b>41</b>	<b>6</b>	<b>260</b>
s			25	1	0	13
výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Směs 80:20	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,19	9,98	1270	43	5,8	235
2	4,19	9,98	1270	43	5,6	244
3	4,19	9,98	1313	44	5,1	251
4	4,19	9,98	1294	44	5,2	246
5	4,19	9,98	1283	44	5,5	241
6	4,19	9,98	1360	44	5,2	241
7	4,19	9,98	1334	44	5,6	254
8	4,19	9,98	1314	44	5,2	246
9	4,19	9,98	1349	45	4,9	248
10	4,19	9,98	1366	45	5,1	241
<b>x</b>			<b>1315</b>	<b>44</b>	<b>5</b>	<b>245</b>
s			36	1	0	6

výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Odpad ze sudu	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,19	9,97	1364	45	5,3	244
2	4,19	9,97	1340	45	5,0	255
3	4,19	9,97	1398	45	4,8	240
4	4,19	9,97	1396	45	5,1	231
5	4,19	9,97	1377	45	5,1	239
6	4,19	9,97	1353	45	5,0	253
7	4,19	9,97	1424	46	4,8	244
8	4,19	9,97	1379	45	5,0	248
9	4,19	9,97	1370	45	5,1	246
10	4,19	9,97	1381	45	4,7	244
<b>x</b>			<b>1378</b>	<b>45</b>	<b>5</b>	<b>244</b>
s			24	0	0	7
výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Odpad z dílu	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,17	9,98	1287	44	5,9	246
2	4,17	9,98	1276	43	6,0	220
3	4,17	9,98	1262	44	6,0	220
4	4,17	9,98	1290	44	5,8	227
5	4,17	9,98	1262	44	6,0	232
6	4,17	9,98	1288	44	5,7	233
7	4,17	9,98	1217	0	0,0	89
8	4,17	9,98	1174	42	6,2	235
9	4,17	9,98	1355	0	0,0	195
10	4,17	9,98	1352	45	5,3	238
<b>x</b>			<b>1276</b>	<b>35</b>	<b>5</b>	<b>213</b>
s			55	18	2	46
výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Nový PA 12	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,2	10,00	1312	44	5,5	279
2	4,2	10,00	1259	43	5,4	252
3	4,2	10,00	1260	43	5,5	270
4	4,2	10,00	1255	43	5,3	243
5	4,2	10,00	1203	42	5,6	254
6	4,2	10,00	1281	44	5,4	215
7	4,2	10,00	1234	42	5,4	255
8	4,2	10,00	1254	44	4,9	273
9	4,2	10,00	1203	44	5,2	260
10	4,2	10,00	1233	43	5,4	271
<b>x</b>			<b>1249</b>	<b>43</b>	<b>5</b>	<b>255</b>
s			33	1	0	18



výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Směs 80:20	h	b	E <sub>t</sub>	σ <sub>y</sub> =σ <sub>m</sub>	ε <sub>y</sub> =ε <sub>m</sub>	ε <sub>tb</sub>
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,21	10,00	1114	42	6,0	240
2	4,21	10,00	1146	42	6,3	238
3	4,21	10,00	1169	41	5,8	245
4	4,21	10,00	1279	42	5,6	248
5	4,21	10,00	1253	43	6,1	246
6	4,21	10,00	1182	42	6,4	259
7	4,21	10,00	1273	43	5,6	251
8	4,21	10,00	1208	42	6,1	245
9	4,21	10,00	1240	44	6,0	209
10	4,21	10,00	1253	43	5,8	256
<b>x</b>			<b>1212</b>	<b>42</b>	<b>6</b>	<b>244</b>
<b>s</b>			57	1	0	14
výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Odpad ze sudu	h	b	E <sub>t</sub>	σ <sub>y</sub> =σ <sub>m</sub>	ε <sub>y</sub> =ε <sub>m</sub>	ε <sub>tb</sub>
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,21	10,02	1205	42	5,9	245
2	4,21	10,02	1250	43	5,9	240
3	4,21	10,02	1278	43	5,7	234
4	4,21	10,02	1341	44	5,4	242
5	4,21	10,02	1323	44	5,6	241
6	4,21	10,02	1375	44	4,9	221
7	4,21	10,02	1329	44	5,2	261
8	4,21	10,02	1369	44	5,1	245
9	4,21	10,02	1369	45	5,3	245
10	4,21	10,02	1339	0	0,0	224
<b>x</b>			<b>1369</b>	<b>39</b>	<b>5</b>	<b>240</b>
<b>s</b>			56	14	2	12
výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Odpad z dílu	h	b	E <sub>t</sub>	σ <sub>y</sub> =σ <sub>m</sub>	ε <sub>y</sub> =ε <sub>m</sub>	ε <sub>tb</sub>
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,18	9,99	1221	26	2,1	2
2	4,18	9,99	1273	25	1,9	2
3	4,18	9,99	1224	43	4,4	199
4	4,18	9,99	1262	39	3,7	4
5	4,18	9,99	1254	44	5,8	235
6	4,18	9,99	1286	44	6,6	6
7	4,18	9,99	1222	44	5,8	228
8	4,18	9,99	1227	44	5,9	224
9	4,18	9,99	1254	44	5,8	246
10	4,18	9,99	1358	25	1,6	2
<b>x</b>			<b>1258</b>	<b>38</b>	<b>4</b>	<b>115</b>
<b>s</b>			42	9	2	118

**Příloha 2: Zkouška ohybem vstřikovaných dílů**

<b>výstřiky PA 12 - před stárnutím</b>				
<b>Nový PA 12</b>	$\sigma_{fM}$ [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
<b>x</b>	<b>63,4</b>			<b>1437</b>
<b>s</b>	<b>0,4</b>			<b>28</b>
<b>výstřiky PA 12 - před stárnutím</b>				
<b>Směs 80:20</b>	$\sigma_{fM}$ [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
<b>x</b>	<b>53,0</b>			<b>1146</b>
<b>s</b>	<b>0,2</b>			<b>41</b>
<b>výstřiky PA 12 - před stárnutím</b>				
<b>Odpad ze sudu</b>	$\sigma_{fM}$ [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
<b>x</b>	<b>54,4</b>			<b>1183</b>
<b>s</b>	<b>0,5</b>			<b>10</b>
<b>výstřiky PA 12 - před stárnutím</b>				
<b>Odpad z dílu</b>	$\sigma_{fM}$ [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
<b>x</b>	<b>51,7</b>			<b>1160</b>
<b>s</b>	<b>0,7</b>			<b>23</b>

výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Nový PA 12	$\sigma_{fM}$ [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
<b>x</b>	<b>63,4</b>			<b>1437</b>
<b>s</b>	<b>0,4</b>			<b>28</b>
výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Směs 80:20	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	57	1,662	3,964	1151
2	59,9	1,76	4,468	1354
3	59,4	1,786	4,533	1374
4	59,2	1,769	4,490	1361
5	58,3	1,842	4,434	1296
<b>x</b>	<b>58,8</b>			<b>1307</b>
<b>s</b>	<b>1,1</b>			<b>92</b>
výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Odpad ze sudu	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	59,7	1,851	4,387	1268
2	59,1	1,851	4,455	1302
3	59,5	1,837	4,490	1327
4	59,8	1,777	4,443	1333
5	58,7	1,854	4,464	1305
<b>x</b>	<b>59,4</b>			<b>1307</b>
<b>s</b>	<b>0,5</b>			<b>26</b>
výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Odpad z dílu	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	54	1,836	4,228	1196
2	56	1,856	4,331	1238
3	56,6	1,792	4,412	1310
4	56,7	1,806	4,447	1321
5	56,5	1,81	4,246	1218
<b>x</b>	<b>56,0</b>			<b>1256</b>
<b>s</b>	<b>1,1</b>			<b>56</b>

výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Nový PA 12	$\sigma_{fM}$ [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
<b>x</b>	<b>63,4</b>			<b>1437</b>
<b>s</b>	<b>0,4</b>			<b>28</b>
výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Směs 80:20	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	55,1	1,839	4,358	1260
2	55,8	1,77	4,222	1226
3	55,7	1,77	4,222	1226
4	54,3	1,743	4,031	1144
5	55,3	1,77	4,222	1226
<b>x</b>	<b>55,2</b>			<b>1216</b>
<b>s</b>	<b>0,6</b>			<b>43</b>
výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Odpad ze sudu	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	56,3	1,846	4,306	1230
2	57,9	1,846	4,443	1299
3	55,9	1,846	4,306	1230
4	55,6	1,775	4,238	1232
5	56	1,846	4,306	1230
<b>x</b>	<b>56,3</b>			<b>1244</b>
<b>s</b>	<b>0,9</b>			<b>30</b>
výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Odpad z dílu	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	55,1	1,775	4,161	1193
2	56	1,803	4,230	1214
3	54,8	1,831	4,327	1248
4	54,7	1,831	4,327	1248
5	55	1,775	4,271	1248
<b>x</b>	<b>55,1</b>			<b>1230</b>
<b>s</b>	<b>0,5</b>			<b>26</b>

**Příloha 3: Vrubová houževnatost Charpy vstříkovaných dílů**

výstřiky PA 12 - před stárnutím				výstřiky PA 12 - před stárnutím			
Nový PA 12	$E_c$ [J]	h [mm]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Směs 80:20	$E_c$ [J]	h [mm]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,158	4,21	4,7	1	0,249	4,215	7,4
2	0,164	4,21	4,9	2	0,253	4,215	7,5
3	0,177	4,21	5,3	3	0,206	4,215	6,1
4	0,207	4,21	6,1	4	0,208	4,215	6,2
5	0,161	4,21	4,8	5	0,295	4,215	8,7
6	0,158	4,21	4,7	6	0,217	4,215	6,4
7	0,154	4,21	4,6	7	0,233	4,215	6,9
8	0,153	4,21	4,5	8	0,231	4,215	6,9
9	0,153	4,21	4,5	9	0,204	4,215	6,0
10	0,158	4,21	4,7	10	0,193	4,215	5,7
x			<b>4,9</b>	x			<b>6,8</b>
s			0,5	s			0,9
výstřiky PA 12 - před stárnutím				výstřiky PA 12 - před stárnutím			
Odpad ze sudu	$E_c$ [J]	h [mm]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Odpad z dílu	$E_c$ [J]	h [mm]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,228	4,21	6,8	1	0,197	4,16	5,9
2	0,229	4,21	6,8	2	0,214	4,16	6,4
3	0,206	4,21	6,1	3	0,239	4,16	7,2
4	0,228	4,21	6,8	4	0,204	4,16	6,1
5	0,206	4,21	6,1	5	0,254	4,16	7,6
6	0,21	4,21	6,2	6	0,214	4,16	6,4
7	0,212	4,21	6,3	7	0,235	4,16	7,1
8	0,201	4,21	6,0	8	0,252	4,16	7,6
9	0,21	4,21	6,2	9	0,27	4,16	8,1
10	0,222	4,21	6,6	10	0,238	4,16	7,2
x			<b>6,4</b>	x			<b>7,0</b>
s			0,3	s			0,7
výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220				výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220			
Nový PA 12	$E_c$ [J]	h [mm]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Směs 80:20	$E_c$ [J]	h [mm]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,14	4,2	4,2	1	0,224	4,2	6,7
2	0,144	4,2	4,3	2	0,246	4,2	7,3
3	0,156	4,2	4,6	3	0,189	4,2	5,6
4	0,148	4,2	4,4	4	0,155	4,2	4,6
5	0,133	4,2	4,0	5	0,197	4,2	5,9
6	0,144	4,2	4,3	6	0,156	4,2	4,6
7	0,141	4,2	4,2	7	0,168	4,2	5,0
8	0,144	4,2	4,3	8	0,179	4,2	5,3
9	0,136	4,2	4,0	9	0,16	4,2	4,8
10	0,148	4,2	4,4	10	0,221	4,2	6,6
x			<b>4,3</b>	x			<b>5,6</b>
s			0,2	s			1,0
výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220				výstřiky PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220			
Odpad ze sudu	$E_c$ [J]	h [mm]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]	Odpad z dílu	$E_c$ [J]	h [mm]	$a_{cA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,152	4,2	4,5	1	0,171	4,17	5,1
2	0,144	4,2	4,3	2	0,166	4,17	5,0
3	0,163	4,2	4,9	3	0,163	4,17	4,9
4	0,174	4,2	5,2	4	0,221	4,17	6,6
5	0,148	4,2	4,4	5	0,174	4,17	5,2
6	0,177	4,2	5,3	6	0,163	4,17	4,9
7	0,168	4,2	5,0	7	0,189	4,17	5,7
8	0,174	4,2	5,2	8	0,209	4,17	6,3
9	0,148	4,2	4,4	9	0,177	4,17	5,3
10	0,174	4,2	5,2	10	0,191	4,17	5,7
x			<b>4,8</b>	x			<b>5,5</b>
s			0,4	s			0,6

výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220				výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220			
Nový PA 12	E <sub>c</sub> [J]	h [mm]	a <sub>cA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]	Směs 80:20	E <sub>c</sub> [J]	h [mm]	a <sub>cA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,2	4,19	6,0	1	0,266	4,2	7,9
2	0,189	4,19	5,6	2	0,224	4,2	6,7
3	0,171	4,19	5,1	3	0,208	4,2	6,2
4	0,149	4,19	4,4	4	0,23	4,2	6,8
5	0,181	4,19	5,4	5	0,245	4,2	7,3
6	0,154	4,19	4,6	6	0,174	4,2	5,2
7	0,154	4,19	4,6	7	0,216	4,2	6,4
8	0,149	4,19	4,4	8	0,193	4,2	5,7
9	0,189	4,19	5,6	9	0,204	4,2	6,1
10	0,178	4,19	5,3	10	0,216	4,2	6,4
x			5,1	x			6,5
s			0,6	s			0,8
výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220				výstřiky PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220			
Odpad ze sudu	E <sub>c</sub> [J]	h [mm]	a <sub>cA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]	Odpad z dílu	E <sub>c</sub> [J]	h [mm]	a <sub>cA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,219	4,19	6,5	1	0,24	4,16	7,2
2	0,173	4,19	5,2	2	0,184	4,16	5,5
3	0,216	4,19	6,4	3	0,138	4,16	4,1
4	0,149	4,19	4,4	4	0,132	4,16	4,0
5	0,23	4,19	6,9	5	0,181	4,16	5,4
6	0,193	4,19	5,8	6	0,221	4,16	6,6
7	0,186	4,19	5,5	7	0,216	4,16	6,5
8	0,196	4,19	5,8	8	0,208	4,16	6,3
9	0,189	4,19	5,6	9	0,181	4,16	5,4
10	0,163	4,19	4,9	10	0,219	4,16	6,6
x			5,7	x			5,8
s			0,8	s			1,1

**Příloha 4: Teplota měknutí podle Vicata vstřikovaných dílů**

VST [°C] - před stárnutím				
Vzorek	Nový PA 12	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
x	134	137	138	137
s	1	1	2	1
VST [°C] - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75 220				
Vzorek	Nový PA 12	Směs 80:20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
1	136,9	133,9	136,5	139,5
2	133,6	136,0	137,4	137,7
3	135,4	136,6	134,8	135,5
x	135	136	136	138
s	2	1	1	2
VST [°C] - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75 220				
Vzorek	Nový PA 12	Směs 80:20	Odpad ze sudu	Odpad z dílu
1	136,3	135,9	135,3	136,7
2	131,2	134,0	134,1	134,9
3	134,9	134,1	135,7	135,3
x	134	135	135	136
s	3	1	1	1

**Příloha 5: Zkouška tahem aditivních dílů**

aditivní PA 12 - před stárnutím						
Nový PA 12	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	4,03	10,23	1253	46,7	15,3	25,2
2	3,98	10,18	1200	46,3	13,9	17,9
3	4,04	10,21	1246	46,9	14,7	18,2
4	4,01	10,20	1182	45,7	14,6	20,7
5	3,9	10,08	1222	46,1	17,7	20,5
6	3,89	10,11	1278	47,2	14,4	15,9
7	3,89	10,11	1102	46,1	15,2	18,5
8	3,88	10,10	1212	46,3	14,1	17,1
9	3,9	10,15	1166	46,0	14,1	19,1
10	3,98	10,10	1215	47,0	14,5	21,0
<b>x</b>			<b>1207,6</b>	<b>46,4</b>	<b>14,9</b>	<b>19,4</b>
<b>s</b>			49,9	0,5	1,1	2,6
aditivní PA 12 - před stárnutím						
80/20	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	3,93	10,17	1335	47,7	12,8	13,0
2	3,91	10,12	1285	46,8	13,7	17,1
3	3,83	10,10	1100	45,9	14,7	21,6
4	3,97	10,17	1285	46,1	14,2	14,7
5	4,01	10,17	1287	46,3	14,1	20,8
6	3,88	10,13	1266	45,9	15,0	21,2
7	3,91	10,14	1198	45,0	13,8	16,5
8	3,88	9,99	1296	47,0	13,7	13,4
9	4	10,21	1366	45,4	8,8	8,0
10	3,91	10,13	1276	45,9	11,4	10,4
<b>x</b>			1269,4	46,2	13,2	15,7
<b>s</b>			73,8	0,8	1,9	4,7
aditivní PA 12 - před stárnutím						
Odpad ze sudu	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	3,89	10,24	1180	46,0	14,5	23,2
2	3,88	10,14	1348	45,8	13,4	16,0
3	3,92	10,09	1187	45,6	13,3	17,0
4	3,86	10,16	1253	46,5	14,9	17,5
5	3,81	10,05	1126	45,9	15,2	19,9
6	3,98	10,19	1192	46,0	14,4	18,8
7	3,87	10,14	1218	46,4	14,5	17,6
8	3,91	10,20	1199	45,5	14,3	16,5
9	3,87	10,07	1198	46,4	15,5	21,8
10	3,85	10,13	1246	46,4	14,6	17,7
<b>x</b>			<b>1214,7</b>	<b>46,1</b>	<b>14,5</b>	<b>18,6</b>
<b>s</b>			58,8	0,4	0,7	2,4

aditivní PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Nový PA 12	h	b	E <sub>t</sub>	σ <sub>y</sub> =σ <sub>m</sub>	ε <sub>y</sub> =ε <sub>m</sub>	ε <sub>tb</sub>
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	3,96	10,20	1411	49,6	12,5	12,9
2	3,91	10,18	1380	50,2	12,6	15,8
3	3,89	10,08	1236	49,2	14,2	16,8
4	3,93	10,12	1387	49,6	11,4	14,3
5	3,96	10,24	1268	48,8	12,8	18,2
6	3,92	10,16	1503	49,5	12,0	14,9
7	3,98	10,19	1431	49,8	13,0	16,4
8	3,89	10,17	1383	49,6	13,3	13,2
9	3,96	10,16	1342	48,7	13,8	17,6
10	3,95	10,17	1426	49,9	13,1	14,8
<b>x</b>			<b>1376,7</b>	<b>49,5</b>	<b>12,9</b>	<b>15,5</b>
<b>s</b>			<b>78,5</b>	<b>0,5</b>	<b>0,8</b>	<b>1,8</b>
aditivní PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220						
80/20	h	b	E <sub>t</sub>	σ <sub>y</sub> =σ <sub>m</sub>	ε <sub>y</sub> =ε <sub>m</sub>	ε <sub>tb</sub>
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	3,85	10,09	1542	51,2	11,0	10,2
2	3,95	10,27	1542	49,5	11,4	11,8
3	3,85	10,19	1619	48,7	7,5	7,2
4	3,96	10,19	1650	42,3	3,6	4,0
5	3,89	10,20	1694	37,7	2,7	3,0
6	3,85	10,08	1651	49,4	7,4	7,2
7	3,97	10,25	1680	34,2	2,2	2,6
8	3,88	10,22	1566	49,5	6,8	7,1
9	3,85	10,14	1562	48,6	8,8	8,4
10	3,9	10,17	1590	35,3	2,9	3,2
<b>x</b>			<b>1609,6</b>	<b>44,6</b>	<b>6,4</b>	<b>6,5</b>
<b>s</b>			<b>57,0</b>	<b>6,6</b>	<b>3,4</b>	<b>3,2</b>
aditivní PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Odpad ze sudu	h	b	E <sub>t</sub>	σ <sub>y</sub> =σ <sub>m</sub>	ε <sub>y</sub> =ε <sub>m</sub>	ε <sub>tb</sub>
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	3,88	10,18	1807	42,8	5,0	5,2
2	3,8	10,04	1325	49,9	13,6	18,4
3	3,83	10,09	1395	50,3	13,5	16,1
4	3,85	10,10	1537	50,3	12,7	13,6
5	3,82	10,05	1454	49,5	12,3	14,2
6	3,94	10,21	1467	49,8	12,6	14,3
7	3,8	10,05	1470	50,4	13,1	16,8
8	3,9	10,17	1402	49,8	11,4	14,1
9	3,86	10,14	1297	49,5	13,4	17,1
10	3,87	10,17	1270	50,1	13,2	17,7
<b>x</b>			<b>1442,4</b>	<b>49,2</b>	<b>12,1</b>	<b>14,8</b>
<b>s</b>			<b>153,4</b>	<b>2,3</b>	<b>2,6</b>	<b>3,8</b>



aditivní PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Nový PA 12	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	3,99	10,24	1418	45,0	5,7	6,0
2	3,88	10,08	1336	44,5	6,0	5,9
3	3,9	10,11	1428	50,3	12,1	13,1
4	3,93	10,14	1380	49,1	12,0	11,1
5	3,92	10,18	1462	50,1	12,6	13,2
6	3,97	10,24	1335	49,5	13,1	13,3
7	3,98	10,14	1456	34,4	2,6	2,9
8	3,95	10,23	1305	49,0	11,9	15,2
9	3,92	10,25	1473	34,8	2,6	2,8
10	3,96	10,12	1397	39,8	3,6	3,9
<b>x</b>			<b>1399,0</b>	<b>44,7</b>	<b>8,2</b>	<b>8,7</b>
<b>s</b>			58,8	6,2	4,5	4,9
aditivní PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220						
80/20	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	3,89	10,16	1550	44,8	5,0	5,0
2	3,97	10,31	1475	40,6	3,6	3,9
3	3,9	10,24	1503	33,8	2,4	2,7
4	3,91	10,24	1620	39,5	3,1	3,6
5	3,83	10,15	1524	39,2	2,9	3,5
6	3,89	10,19	1560	33,9	2,4	2,7
7	3,88	10,18	1360	49,7	12,6	12,8
8	3,84	10,08	1462	32,8	2,4	2,6
9	3,88	10,21	1465	49,7	12,3	12,4
10	3,85	10,15	1482	49,8	9,9	9,2
<b>x</b>			<b>1500,1</b>	<b>41,4</b>	<b>5,7</b>	<b>5,8</b>
<b>s</b>			70,2	6,8	4,2	4,1
aditivní PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220						
Odpad ze sudu	h	b	$E_t$	$\sigma_y = \sigma_m$	$\epsilon_y = \epsilon_m$	$\epsilon_{tb}$
	mm	mm	MPa	MPa	%	%
1	3,82	10,08	1429	40,4	4,1	4,7
2	3,87	10,14	1473	50,3	9,6	11,6
3	3,82	10,12	1422	43,9	5,5	5,6
4	3,82	10,07	1477	49,2	13,2	18,0
5	3,88	10,16	1396	49,0	12,4	14,0
6	3,9	10,10	1371	48,8	10,7	11,4
7	3,81	10,10	1373	49,9	12,5	13,8
8	3,76	10,12	1322	49,9	13,1	12,7
9	3,88	10,18	1453	49,6	11,9	12,9
10	3,84	10,17	1414	49,9	12,3	15,5
<b>x</b>			<b>1413,0</b>	<b>48,1</b>	<b>10,5</b>	<b>12,0</b>
<b>s</b>			49,0	3,3	3,2	4,1

**Příloha 6: Zkouška ohybem aditivních dílů**

aditivní PA 12 - před stárnutím				
Nový PA 12	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	56,6	1,851	4,504	1327
2	57,7	1,7	4,408	1354
3	54,5	1,763	4,414	1326
4	55,6	1,811	4,408	1299
5	57,3	1,883	4,394	1256
<b>x</b>	<b>56,3</b>			<b>1312</b>
<b>s</b>	<b>1,3</b>			<b>37</b>
aditivní PA 12 - před stárnutím				
Směs 80:20	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	57,8	1,409	4,471	1531
2	58,7	1,86	4,526	1333
3	51,7	1,487	4,010	1262
4	57,7	1,886	4,841	1478
5	58,5	1,852	4,321	1235
<b>x</b>	<b>56,9</b>			<b>1368</b>
<b>s</b>	<b>2,9</b>			<b>131</b>
aditivní PA 12 - před stárnutím				
Odpad ze sudu	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	53,9	1,698	3,962	1132
2	57	1,923	4,679	1378
3	53,1	1,754	4,353	1300
4	56,2	1,522	4,433	1456
5	56,2	1,806	4,681	1438
<b>x</b>	<b>55,3</b>			<b>1341</b>
<b>s</b>	<b>1,7</b>			<b>132</b>
aditivní PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Nový PA 12	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	55,3	1,878	4,544	1333
2	61,3	2,011	5,030	1510
3	60,4	2,021	5,050	1515
4	61,3	1,954	4,811	1429
5	61,1	1,963	4,681	1359
<b>x</b>	<b>59,9</b>			<b>1429</b>
<b>s</b>	<b>2,6</b>			<b>84</b>
aditivní PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Směs 80:20	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	64,8	2,014	4,880	1433
2	65,6	2,107	5,110	1502
3	65,7	2,125	5,560	1718
4	61,5	2,065	5,160	1548
5	63,8	2,139	5,390	1626
<b>x</b>	<b>64,3</b>			<b>1565</b>
<b>s</b>	<b>1,7</b>			<b>110</b>

aditivní PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Odpad ze sudu	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	61,8	2,097	5,150	1527
2	61,9	2,132	5,060	1464
3	58,9	2,086	4,954	1434
4	63,3	2,124	5,180	1528
5	61,8	2,132	5,060	1464
<b>x</b>	<b>61,5</b>			<b>1483</b>
s	1,6			42
aditivní PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Nový PA 12	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	59,3	2,027	4,878	1426
2	57,8	1,975	4,507	1266
3	59,2	1,999	4,847	1424
4	61,5	1,981	4,724	1372
5	59,9	2,032	5,020	1494
<b>x</b>	<b>59,5</b>			<b>1396</b>
s	1,3			85
aditivní PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Směs 80:20	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	61,4	2,055	4,795	1370
2	51,5	2,09	4,931	1421
3	58,1	2,013	4,969	1478
4	61,8	2,048	5,120	1536
5	58,2	2,052	4,954	1451
<b>x</b>	<b>58,2</b>			<b>1451</b>
s	4,1			62
aditivní PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Odpad ze sudu	$\sigma_{fM}$ [MPa]	$\sigma_{0,05\%}$ [MPa]	$\sigma_{0,25\%}$ [MPa]	$E_f$ [MPa]
1	61,6	2,139	5,170	1516
2	62,2	2,144	5,230	1543
3	61,8	2,095	5,170	1538
4	63,7	2,154	5,350	1598
5	58,4	1,988	4,874	1443
<b>x</b>	<b>61,5</b>			<b>1527</b>
s	1,9			56

**Příloha 7: Vrubová houževnatost Charpy aditivních dílů**

aditivní PA 12 - před stárnutím					aditivní PA 12 - před stárnutím				
Nový PA 12	E <sub>c</sub> [J]	b <sub>A</sub> [mm]	h [mm]	a <sub>CA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]	Směs 80:20	E <sub>c</sub> [J]	b <sub>A</sub> [mm]	h [mm]	a <sub>CA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,154	8	3,9	4,9	1	0,104	8	3,9	3,4
2	0,172	8	3,9	5,5	2	0,094	8	3,9	3,0
3	0,154	8	4,0	4,9	3	0,099	8	3,9	3,2
4	0,133	8	3,9	4,2	4	0,108	8	3,8	3,5
5	0,15	8	3,9	4,8	5	0,127	8	3,9	4,1
6	0,112	8	3,9	3,6	6	0,109	8	3,9	3,5
7	0,12	8	3,9	3,8	7	0,047	8	3,9	1,5
8	0,135	8	3,9	4,3	8	0,11	8	3,9	3,6
9	0,124	8	3,9	4,0	9	0,087	8	3,9	2,8
10	0,139	8	3,9	4,4	10	0,098	8	3,9	3,2
x				4,4	x				3,2
s				0,6	s				0,7
aditivní PA 12 - před stárnutím					aditivní PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Odpad ze sudu	E <sub>c</sub> [J]	b <sub>A</sub> [mm]	h [mm]	a <sub>CA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]	Nový PA 12	E <sub>c</sub> [J]	b <sub>A</sub> [mm]	h [mm]	a <sub>CA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,126	8	3,8	4,1	1	0,126	8	3,9	4,1
2	0,126	8	3,9	4,0	2	0,076	8	3,9	2,4
3	0,146	8	3,8	4,8	3	0,091	8	4,0	2,9
4	0,132	8	3,8	4,3	4	0,1	8	4,0	3,2
5	0,133	8	3,8	4,3	5	0,134	8	3,9	4,3
6	0,114	8	3,8	3,8	6	0,083	8	3,9	2,7
7	0,156	8	3,8	5,1	7	0,042	8	3,9	1,3
8	0,126	8	3,8	4,2	8	0,089	8	4,0	2,8
9	0,153	8	3,8	5,1	9	0,137	8	3,9	4,4
10	0,135	8	3,8	4,4	10	0,079	8	4,0	2,5
x				4,4	x				3,0
s				0,4	s				1,0
aditivní PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220					aditivní PA 12 - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75220				
80/20	E <sub>c</sub> [J]	b <sub>A</sub> [mm]	h [mm]	a <sub>CA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]	Odpad ze sudu	E <sub>c</sub> [J]	b <sub>A</sub> [mm]	h [mm]	a <sub>CA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,043	8	3,8	1,4	1	0,08	8	3,8	2,6
2	0,015	8	3,8	0,5	2	0,05	8	3,8	1,6
3	0,039	8	3,8	1,3	3	0,069	8	3,8	2,3
4	0,024	8	3,9	0,8	4	0,077	8	3,8	2,6
5	0,106	8	3,9	3,4	5	0,11	8	3,8	3,6
6	0,035	8	3,8	1,1	6	0,05	8	3,8	1,7
7	0,077	8	3,8	2,6	7	0,135	8	3,8	4,4
8	0,135	8	3,8	4,4	8	0,081	8	3,8	2,7
9	0,087	8	3,9	2,8	9	0,142	8	3,8	4,6
10	0,059	8	3,8	2,0	10	0,084	8	3,8	2,8
x				2,0	x				2,9
s				1,3	s				1,0
aditivní PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220					aditivní PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Nový PA 12	E <sub>c</sub> [J]	b <sub>A</sub> [mm]	h [mm]	a <sub>CA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]	80/20	E <sub>c</sub> [J]	b <sub>A</sub> [mm]	h [mm]	a <sub>CA</sub> [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,077	8	3,9	2,5	1	0,082	8	3,9	2,7
2	0,05	8	3,9	1,6	2	0,067	8	3,9	2,2
3	0,089	8	3,9	2,9	3	0,089	8	3,8	2,9
4	0,04	8	3,9	1,3	4	0,04	8	3,9	1,3
5	0,139	8	3,9	4,5	5	0,056	8	3,8	1,8
6	0,082	8	3,9	2,6	6	0,056	8	3,9	1,8
7	0,085	8	3,9	2,7	7	0,077	8	3,8	2,5
8	0,043	8	3,9	1,4	8	0,077	8	3,9	2,5
9	0,097	8	4,0	3,1	9	0,04	8	3,9	1,3
10	0,082	8	3,9	2,64857881	10	0,043	8	3,8	1,4
x				2,5	x				2,0
s				0,9	s				0,6

aditivní PA 12 - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75220				
Odpad ze sudu	$E_c$ [J]	$b_A$ [mm]	$h$ [mm]	$a_{CA}$ [kJ/m <sup>2</sup> ]
1	0,077	8	3,8	2,5
2	0,085	8	3,8	2,8
3	0,04	8	3,8	1,3
4	0,085	8	3,8	2,8
5	0,079	8	3,7	2,7
6	0,086	8	3,8	2,8
7	0,1	8	3,8	3,3
8	0,05	8	3,8	1,6
9	0,079	8	3,8	2,6
10	0,046	8	3,8	1,5
<b>x</b>				<b>2,4</b>
s				0,7

**Příloha 8:** Teplota měknutí podle Vicata vstřikovaných dílů

VST [°C] - před stárnutím			
Vzorek	Nový PA 12	80/20	Odpad ze sudu
1	158,9	163,4	159,3
2	159,5	163,0	158,9
3	159,1	162,8	159,6
<b>x</b>	<b>159</b>	<b>163</b>	<b>159</b>
s	0	0	0
VST [°C] - dlouhodobá zkouška stárnutí dle DIN 75 220			
Vzorek	Nový PA 12	80/20	Odpad ze sudu
1	160,2	158,7	161,9
2	160,4	159,2	160,3
3	159,8	159,0	162,2
<b>x</b>	<b>160</b>	<b>159</b>	<b>161</b>
s	0	0	1
VST [°C] - cyklická zkouška stárnutí dle DIN 75 220			
Vzorek	Nový PA 12	80/20	Odpad ze sudu
1	161,3	159,6	160,3
2	159,2	158,7	159,5
3	160,6	159,7	160,8
<b>x</b>	<b>160</b>	<b>159</b>	<b>160</b>
s	1	1	1

**Příloha 9: Záznam solární klimatické komory (dlouhodobý zkouška dle DIN 75220)**

