

Vliv beta záření na mikro-tvrdotost polymerů

Ing. Lenka Hýlová, Ph.D.

Teze disertační práce

Teze disertační práce

Vliv beta záření na mikro-tvrдость polymerů

The Influence of Beta Radiation on Micro-Hardness of Polymers

Autor: **Ing. Lenka Hýlová, Ph.D.**

Studijní program: P3909 – Procesní inženýrství

Studijní obor: 3909V013 Nástroje a procesy

Školitel: doc. Ing. Michal Staněk, Ph.D.

Oponenti: prof. Ing. Ivan Hudec, Ph.D.
prof. Ing. Karel Kocman, DrSc.

Zlín, listopad 2019

© Lenka Hýlová

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně** v edici **Doctoral Thesis Summary**.
Publikace byla vydána v roce 2019.

Klíčová slova: polyamid 6, záření elektronového paprsku, síťování, mikro-mechanické vlastnosti, mikro-tvrdot

Key words: *polyamide 6, electron beam radiation, cross-linking, micro-mechanical properties, micro-hardness*

Plná verze disertační práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

ISBN 978-80-7454-868-0

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat in memoriam panu doc. Ing. Davidovi Maňasovi, Ph.D. za to, že mne přivedl k doktorskému studiu a první dva roky mého studia mne vedl správným směrem, bez něj bych na doktorské studium nešla. Dále děkuji mému školiteli panu doc. Ing. Michalovi Staňkovi, Ph.D. za odborné vedení a rady, a také za trpělivost. Mé díky patří také panu Ing. Martinovi Ovsíkovi, Ph.D. za jeho konzultanství. Veliké poděkování patří panu Ing. Alešovi Mizerovi, Ph.D., který mi byl během mého doktorského studia dobrým rádcem. Mé obrovské poděkování patří také panu doc. Ing. Karlovi Stoklasovi, CSc., který mi byl po celou dobu mého studia na vysoké škole vždy nenahraditelným rádcem. Za odbornou pomoc děkuji také doc. Dr. Ing. Vladimírovi Patovi, za jeho obrovskou pomoc při vyhodnocování dat. Také chci mockrát poděkovat za pomoc panu Ing. Martinovi Řezníčkovi, Ph.D., paní doc. Ing. Martině Hřibové, Ph.D. a panu Ing. Marošovi Eckertovi, Ph.D. za odborné poradenství a ochotu pomoci mi. Mé díky patří také všem akademikům a doktorandům z Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně z Ústavu výrobního inženýrství za společně strávená léta, která pro mne byla přínosem a na která budu vždy ráda vzpomínat.

V neposlední řadě děkuji mé mamince, která je pro mne vším, a bez které bych to nikdy nezvládla.

Tato disertační práce byla financována z projektu IGA/FT/2019/002.

ABSTRAKT

Tato studie se zabývá vlivem záření elektronového paprsku v dávkách 0, 66, 99 a 132 kGy na mikro-mechanické vlastnosti polymerů, konkrétně polyamidu 6 plněného 1 – 6 hm. % síťovacím urychlovačem triallylisokyanurátem (TAIC). Z mikro-mechanických vlastností byla naměřena indentační tvrdost, indentační modul pružnosti a indentační kríp. Pro ověření zesíťování materiálu byla zvolena metoda termo-mechanické analýzy (TMA) a pro důkaz degradace materiálu byla zvolena Fourierova transformační infračervená spektroskopie (FTIR). Pro doplnění byla zkoumána také topografie povrchu pomocí mikroskopie atomárních sil (AFM).

ABSTRACT

The study deals with the influence of electron beam radiation in the doses of 0, 66, 99 and 132 kGy on micro-mechanical properties of polymers, especially polyamide 6 filled with 1 – 6 wt. % of crosslinking agent triallylisocyanurate (TAIC). Indentation hardness, indentation elasticity modulus and indentation creep were measured from micro-mechanical properties. As a proof of cross-linking, the method of thermo-mechanical analysis (TMA) and of degradation, the Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) were chosen. In addition, surface topography using atomic force microscopy (AFM) was also investigated.

ÚVOD

Tato disertační práce je zaměřena na problematiku ozařování polyamidu 6 s různou koncentrací síťovacího urychlovače při třech radiačních dávkách. V dnešní době je kladen velký důraz na vylepšování materiálových vlastností polymerů, které je možné modifikovat mnoha způsoby. Jedním z nich je jejich ozařování. Poněvadž je síťování polymerů pomocí elektronového záření environmentálně bezpečné a je to lehce kontrolovatelný proces bez odpadů, byl tento způsob modifikace materiálů vybrán pro tuto disertační práci. Pomocí síťování je možné dosáhnout výrazného zlepšení jak teplotní, tak mechanické odolnosti výsledných produktů. V této disertační práci jsou zkušební tělesa z polyamidu 6 ozařována elektronovým zářením a to dávkami 66, 99 a 132 kGy. Síťovací urychlovač triallylisokyanurát (TAIC) byl obsažen ve směsích určených pro vstřikování v koncentracích 1, 2, 3, 4, 5 a 6 hm. %. Mezi důležité materiálové vlastnosti patří i mikro-mechanické vlastnosti, které ukazují mechanické chování povrchové vrstvy materiálu. Disertační práce se zaměřuje zejména na indentační tvrdost, neboli mikro-tvrdost, dále na indentační modul pružnosti a indentační kříp. Poněvadž ozařování dávkou 33 kGy stojí cca 1 euro na 1 kg materiálu, je důležité stanovit, jaká dávka záření je nejvhodnější pro dosažení nejlepších mikro-mechanických vlastností, aby nedošlo ke zbytečnému zvyšování nákladů v případě násobení radiační dávky. Důležité je také stanovení dávky síťovacího urychlovače, která zajišťuje dostatečné zesíťování. Je zbytečné plnit polyamid 6 nadměrou TAICu, poněvadž toto se také projeví na ekonomické stránce výroby. Výhodou tohoto typu síťování je možnost vytvořit si hotový produkt, který v sobě má zatím neaktivní síťovací urychlovač a přepravit jej do místa, kde dojde k následnému ozáření a tím i zesíťování produktu.

OBSAH:

1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	1
2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	5
3. TEORETICKÝ RÁMEC.....	6
3.1 Úvod do polymerů	6
3.1.1 Rozdělení polymerů dle tvaru makromolekul	6
3.1.2 Rozdělení polymerů na termoplasty, reaktoplasty a elastomery	8
3.1.3 Polyamid 6.....	8
3.2 Vysoce energetická záření	9
3.2.1 Záření elektronového paprsku	10
3.3 Síťování polymerů	11
3.3.1 Síťovací urychlovač triallylisokyanurát (TAIC)	11
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	13
4.1 Materiál	13
4.2 Příprava zkušebních těles.....	13
4.3 Síťování zkušebních těles	13
4.4 Mikro-mechanické vlastnosti.....	14
4.5 Termo-mechanická analýza (TMA).....	14
4.6 Fourierova transformační infračervená spektrometrie (FTIR)	15
4.7 Mikroskopie atomárních sil (AFM).....	15
5. VÝSLEDKY	17
5.1 Mikro-mechanické vlastnosti.....	17
5.1.1 Indentační tvrdost	17
5.1.1 Indentační modul pružnosti	19
5.1.2 Indentační kríp.....	21
5.2 Termo-mechanická analýza (TMA).....	23
5.3 Fourierova transformační infračervená spektrometrie (FTIR)	28
5.4 Mikroskopie atomárních sil (AFM).....	31
6. PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI.....	33

7. ZÁVĚR	34
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	35
SEZNAM OBRÁZKŮ	38
SEZNAM TABULEK.....	38
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	39
PŘÍLOHY	41
PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA.....	43
ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	50

1. SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Všechny následující chronologicky seřazené odborné publikace jsou zaměřeny na problematiku metody ozařování PA 6 za různých procesních podmínek a dohromady tvoří stručný průzkum vědecké oblasti, na kterou je tato disertační práce také zaměřena.

Za každým odstavcem s uvedeným zdrojem článku je komentář (psaný kurzívou), jakým způsobem se tato práce liší od již provedeného výzkumu a v čem tato disertační práce doplňuje danou problematiku.

V roce 2005 zkoumal tým vědců z Íránu síťování PA 6 pomocí zrychlených elektronů po přidavku 1-3 hm. % síťovacího urychlovače triallylkyanurátu (TAC). Použili urychlovač elektronů s energií 5 MeV s různými dávkami od 40 do 150 kGy. Zjistili, že molekulární hmotnost polymerních vzorků rostla s rostoucí radiační dávkou, což potvrdili měřením viskozity. Obsah gelu poukázal, že PA 6 s přidavkem TAC zesíťoval efektivně již při malých radiačních dávkách. Obsah absorbované vody klesl s rostoucím množstvím TAC a absorbované radiační dávky. [1]

Tento článek se nezaměřoval na mikro-mechanické vlastnosti PA 6 a ozařování zkušebních vzorků bylo provedeno nižší energií elektronů. Zároveň byla použita nižší dávka síťovacího urychlovače, v tomto případě TAC. V této disertační práci je použit jako síťovací urychlovač TAIC v koncentraci 1 – 6 hm. %.

Pramanik a spol. z Indie v roce 2009 zesíťovali PA 6 s TAC pomocí zrychlených elektronů o energii 2 MeV aplikováním radiačních dávek 100, 200, 300, 400, 500 a 600 kGy při pokojové teplotě na vzduchu. Tvrdost, pevnost, ohybové a rázové vlastnosti PA 6 se výrazně zlepšily po zesíťování. Dávku 400 kGy zhodnotili jako optimální pro dosažení nejlepších výše zmiňovaných vlastností. Množství absorbované vody klesalo se zvyšující se radiační dávkou. [2]

V této disertační práci je aplikována nižší energie elektronů a jako síťovací urychlovač TAIC.

Zdeněk Holík a spol. z Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, v roce 2011 zkoumali jaký vliv má množství síťovacího urychlovače na vlastnosti ozářeného polyamidu 6. K zesíťování použili zrychlených elektronů o energii 10 MeV a

dávky záření 66, 99 a 132 kGy. Jako optimální dávku síťovacího urychlovače pro získání nejlepších materiálových vlastností stanovili množství 5 % a radiační dávku 132 kGy. [3]

V tomto článku bylo použito stejné energie elektronů jako v této disertační práci, avšak rozmezí síťovacího urychlovače je odlišné.

Dalším rokem vědci ze zlínské univerzity studovali změnu mikro-mechanických vlastností po použití ionizačního beta záření jako zdroje pro zesíťování PA 6. Do PA 6 přidali 6 obj. % síťovacího urychlovače TAIC, vzorky ozářili dávkami 0, 15, 30, 45, 66 a 99 kGy. Výsledkem jejich práce bylo zjištění, že mikro-povrchové vlastnosti PA 6 po zesíťování měli trend výrazného zlepšení. Například mikro-tvrдость vzrostla o 41 % v porovnání s neozářeným vzorkem. Mikro-houževnatost o 50 %, mikro-krípkové vlastnosti klesly o 16 %. Jako nejvhodnější radiační dávku určili 30 kGy. Se zvyšujícími se dávkami mikro-mechanické vlastnosti klesali. [4]

Tento výzkum byl zaměřen na povrchové mikro-mechanické vlastnosti PA 6. Obsah TAIC byl rozdílný a dávky záření byly v menším rozmezí a byly aplikovány po 15 kGy, na rozdíl od aplikace po 33 kGy na jeden průjezd pod urychlovačem elektronů, což může mít také vliv na rozdílné výsledky výzkumu.

Mária Porubská, která se zabývá ozařováním polymerních materiálů pomocí různých zdrojů záření, se v roce 2014 zabývala ozařováním neplněného a plněného PA 6 z 30 hm. % skelnými vlákny. Vzorky připravené technologií vstříkovaní poté nechala ozářit zrychlenými elektrony o energii 10 MeV dávkami 50, 100, 200, 300 a 500 kGy s 50 % dávky aplikované po obou stranách vzorků. Po měřeních zjistila, že samotné ozařování je výhodnější pro získání lepších materiálových vlastností u neplněného PA 6. [5]

Tento výzkum se zaměřoval jak na ozařování neplněného, tak plněného PA 6 z 30 hm. % skelnými vlákny, avšak z výsledků je zřejmé, že ozařování je vhodnější na neplněný PA 6, což jsem vzala v potaz při mé studii. Také rozsah radiačních dávek ve výše popsaném výzkumu je větší s většími skoky a navíc byly aplikovány po obou stranách. V mé práci se zaměřuji na ozařování vzorků z jedné strany s menšími skoky mezi dávkami v menším rozmezí dávek.

E. Adem a spol. ozářili 0,6 mm tenké polymerní filmy z PA 6 a PA 66 ionizačním beta zářením s energií 1,3 MeV dávkami od 50 do 1000 kGy v rozmezí od pokojové teploty do 70 °C. Co se týká mechanických vlastností,

tak zjistili, že napětí při přetržení a prodloužení při přetržení vzorků bylo silně redukováno, zatímco Yongův modul pružnosti a napětí na mezi kluzu silně vzrostli s rostoucí radiační dávkou. Obsah gelu poukázal na fakt, že zesíťování bylo vyšší u PA 6 v porovnání s PA 66. Teplota tání a teplota krystalizace klesla s rostoucí dávkou záření kvůli větvení a síťování v amorfni části polymeru a na rozhraní krystalů. [6]

V této studii bylo použito velké rozmezí radiační dávky, zároveň bylo použito nižší energie elektronů a většího teplotního rozpětí a to do 70 °C. Navíc bylo radiační záření aplikováno na 0,6 mm tenké polymerní filmy. V mém případě dochází k ozařování zkušebních těles, které mají znatelně větší tloušťku. Také používám nižších dávek záření s větší energií elektronů a ozařování proběhlo za pokojové teploty.

David Mañas a spol. v roce 2015 studoval vliv množství síťovacího urychlovače na mikro-mechanické vlastnosti sklem plněného PA 6. Jako koncentraci skelných vláken použil 30 % množství. Vzorky byly připraveny technologií vstřikování. Síťovacího urychlovače TAIC bylo použito 0, 1, 2 a 3 obj. %. Tento síťovací urychlovač způsobil rozličné mikro-mechanické vlastnosti. U indentační tvrdosti tvrdost klesala s rostoucím množstvím TAIC, podobný trend měl i indentační elastický modul, zatímco indentační kríp rostl s množstvím TAIC. Tyto výsledky jsou způsobeny přítomností TAIC jak monomeru ve směsi, který před samotným ozařováním zhoršuje mikro-mechanické vlastnosti. [7]

Tento výzkum se zabýval mikro-mechanickými vlastnostmi povrchové vrstvy PA 6, avšak plněného skelnými vlákny. Byl použit stejný síťovací urychlovač v menších koncentracích nežli v mém případě. Navíc uvedený výzkum zkoumal vliv mikro-mechanických vlastností před samotným ozařováním vzorků, avšak v případě této práce jsou vzorky ozářeny a následně měřeny již zmíněné vlastnosti.

V roce 2016 Boo Young Shin, Man Ho Ha a Do Hung Han zkoumali vliv elektronového záření na morfologii, reologii a mechanické vlastnosti polymerní směsi složené z PA 6 a PP. Zjistili, že elektronové záření zlepšuje kompatibilitu na rozhraní mezi PA 6 a PP. [8]

V tomto případě byla zkoumána kompatibilita směsi z PA 6 a PP na jejich rozhraní a vliv elektronového záření na jejich kompatibilitu. I v tomto případě

ozařování způsobilo zlepšení vlastností, avšak nebyly měřeny mikro-mechanické vlastnosti povrchové vrstvy.

V roce 2018 byl zkoumán vliv elektronového záření na mechanické a tepelné vlastnosti vybraných typů polymerů. Bylo zjištěno, že i když různé polymery reagují na ozařování různě, v případě nalezení optimální radiální dávky dochází ke zlepšení materiálových vlastností. [9]

V této studii byla ozařována celá řada polymerů. V mé práci rozšiřuji koncentraci síťovacího urychlovače a zaměřuji se pouze na PA 6 pro detailnější prozkoumání této problematiky.

Bradler a spol. testovali komerčně dostupné neplněné a plněné polyamidy z 30 a 35 hm.% skelným vláknem, které zesítňovali pomocí TAIC (5 hm. %) dávkami elektronového záření 50, 100, 150 a 200 kGy. Poté zkoumali růst únavové trhliny při 23 a 80 °C. U neplněného PA 66 nebyl detekován žádný účinek ozáření při teplotě 23 °C, zatímco škodlivý účinek se projevil při teplotě 80 °C ve stavu nasyceného vodou. U plněných polyamidů docházelo k opačnému trendu. [10]

V této disertační práci se zabývám vlivem elektronového záření na mikro-mechanické vlastnosti PA 6 za pokojové teploty. Na rozdíl od výše popsaného článku ve větším rozmezí koncentrací TAIC při nižších radiálních dávkách.

2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Cílem dizertační práce je studium PA 6 a jeho ozařování pomocí elektronového záření dávkami 0, 66, 99 a 132 kGy. Jako síťovací urychlovač byl použit TAIC a to v koncentracích 1 – 6 hm. % pro podrobnější zjištění, jaká je optimální koncentrace TAIC a dávka záření pro dosažení nejlepších mikro-mechanických vlastností.

Nejdůležitější kroky k dosažení výše popsaného cíle jsou:

- Literární rešerše, která bude popisovat polymery všeobecně, polyamidy, PA 6, síťování polymerů pomocí elektronového záření, popis použitých metod pro měření atd.
- Příprava zkušebních vzorků, které byly vyrobeny pomocí technologie vstřikování.
- Síťování vzorků pomocí elektronového záření dávkami 0, 66, 99, 132 kGy.
- Měření mikro-mechanických vlastností.
- Měření pomocí přístroje dynamické – mechanické analýzy (DMA) ve statickém nastavení termální – mechanické analýzy (TMA) pro důkaz zesíťování materiálů.
- Měření pomocí techniky infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací pro potvrzení degradace materiálu po překročení určité radiační dávky.
- Měření topografie povrchu pomocí mikroskopu atomárních sil pro zjištění, jakým způsobem síťování mění topografii povrchu zkušebních vzorků.

Zpracování a vyhodnocení naměřených dat.

3. TEORETICKÝ RÁMEC

3.1 Úvod do polymerů

Historii lidstva je možné rozdělit z hlediska materiálu na dobu ledovou, bronzovou a železnou. Proto je akceptovatelné současnou dobu označit za dobu polymerní. Od dvacátého století se polymerní materiály včetně plastů, vláken, elastomerů a proteinů objevují téměř v každé oblasti lidského každodenního života. Polymery jsou používány v různých aplikacích v zemědělství, průmyslu a také v obranném průmyslu. Plasty jsou všudypřítomné v moderní společnosti s aplikacemi od hraček po elektronické komponenty, interiérové nebo konstrukční části automobilů a různé komponenty v letadlech a vlacích. Téměř neexistuje odvětví, kde by se plasty v moderní společnosti nepoužívaly. Hlavní výhody, které odlišují plasty od ostatních materiálů jako je dřevo či kov, jsou zřejmé.

Plasty mají dobré fyzikální a chemické vlastnosti jako je nízká hustota (nízká hmotnost), chemická odolnost, trvanlivost a jsou termostaticky a elektricky izolující. Dále jsou ekonomické z hlediska velkého množství produkce. Plasty je většinou možné snadně zpracovávat a energetické náklady na jejich zpracování jsou výrazně redukovány, na rozdíl od kovů.

3.1.1 Rozdělení polymerů dle tvaru makromolekul

Polymery je možné rozdělit dle tvaru makromolekul:

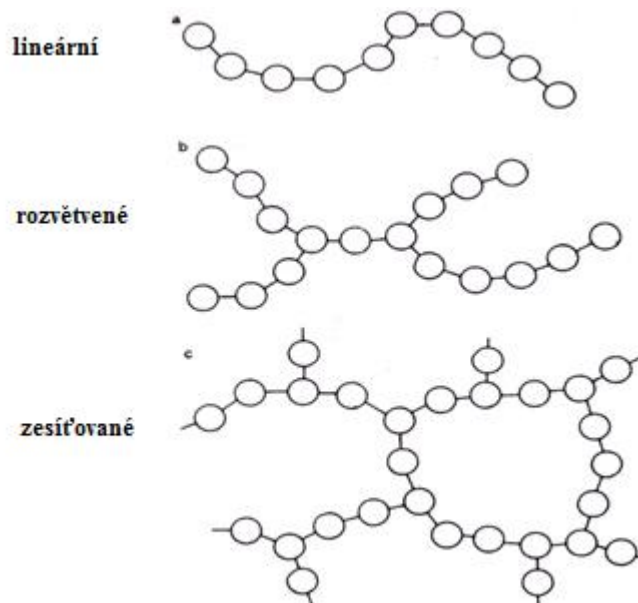
- **lineární** - V lineárních polymerech jsou molekuly navzájem propojeny do řetězce s nízkým nebo žádným větvením. Tato struktura je typická pro vysokohustotní polyethylen (HDPE). Lineární polymery mohou zahrnovat také náhodné kopolymery a blokové kopolymery. Náhodný kopolymer bývá zpravidla složen z dvou či více typů monomerů, které by měly být uspořádány v náhodném pořadí.

Např.: AABAABBBAAAABBBBAABBAAABABAA, kde je A jeden typ monomeru a B druhý typ monomeru.

Blokový kopolymer by měl být uspořádán s dvěma polymerními jednotkami připojenými jedna k druhé.

Např.: AAAAAAAAAAAAAAAAAABBBBBBBBBBBBBBBB. [11]

- **rozvětvené** - Tyto polymery mají boční řetězce, které tvoří sterickeý efekt. Toto může často způsobovat redukovanou hustotu. Nízkohustotní polyethylen či polyethylen se střední hustotou jsou polyethyleny, které mají boční řetězce. Tyto boční řetězce vytváří sterickeé překážky, které omezují sousedící polymerní řetězce v pohybu a tím dochází ke vzniku nižší hustoty a tuhosti. [12]
- **zesít'ované** - Zesít'ované polymery mohou obsahovat miliony merů, ve kterých se mohou vyskytovat kovalentní vazby podél a uvnitř polymerních řetězců. Výsledkem může být produkt složený z jediné polymerní molekuly. [13]



Obr. 1: Lineární, větvené a zesít'ované polymery [14]

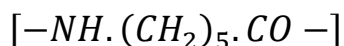
3.1.2 Rozdělení polymerů na termoplasty, reaktoplasty a elastomery

Polymery je možné rozdělit na:

- **termoplasty** – Termoplastické polymery obsahují lineární nebo rozvětvené polymerní řetězce, které nejsou za běžných okolností zesíťovány do trojrozměrné sítě. Díky tomu jsou schopny se pohybovat kolem sebe navzájem, když jsou zahřáty nad teplotu skelného přechodu (T_g). Během tohoto procesu se Van der Waalsovi přitažlivé síly mezi polymerními řetězci přerušují. Po zchlazení může být polymerní tavenina zformována do požadovaného tvaru, což znamená, že termoplasty jsou schopny být roztaveny a znovu recyklovány do nových tvarů. Avšak tepelné procesy během zpracování způsobují chemickou degradaci, což vede ke změně jejich struktury a fyzikálních vlastností. [13]
- **reaktoplasty** – Reaktoplasty tvoří trojrozměrnou síť, která zachovává při zahřátí svůj tvar až do jejího teplotního limitu. Reaktoplasty nemohou být znovu tvarovány nad jejich T_g , poněvadž degradují ještě předtím, než začnou tát. [13]
- **elastomery** – Elastomery mají náhodně uspořádanou větvenou zesíťovanou strukturu, která tvoří tvrdou část jejich struktury. Měkkou flexibilní část jejich struktury tvoří lineární řetězce spojené Van der Waalsovými přitažlivými silami. Zahříváním elastomerů nad jejich T_g vede k degradaci jejich zesíťovaných částí uvnitř jejich struktury. [13]

3.1.3 Polyamid 6

PA 6 patřící do alifatických polyamidů vzniká polymerací ϵ -kaprolaktamu a to buď hydrolytickou anebo alkalickou. Ve své struktuře má -CONH- chemickou amidovou vazbu. Číslo 6 značí počet uhlíku v monomerní jednotce. PA 6 byl vyvinut a poprvé vyroben v roce 1952. [15]



Obr. 2: Strukturní vzorec PA 6

Mezi hlavní oblasti použití PA 6 patří:

- **automobilový průmysl** (vstupní vzduchové potrubí, spojky, napínače řetězů, ozubené převody, kryty motorů, komory na airbagy, vyfukovaná vzduchová potrubí, dveřní kliky, zrcátka, kryty kol atd.),
- **elektronika** (rozvody elektrické energie – spínací zařízení nízkého napětí, svorkovnice, vypínače atd.),
- **průmysl** (kryty a vnitřní části a součástky elektrických nástrojů, lyžařská vázání, in-line brusle, kolečka a kola, železniční podložky kolejí, potrubí do moře, balící fólie atd.), [15]

Polyamid 6 je semi-krystalický termoplastický polymer vlastnicí unikátní materiálové vlastnosti. Tento polymer je často zpracováván pomocí technologie vstřikování díky jeho lehké zpracovatelnosti, skvělým mechanickým vlastnostem a také nízké viskozitě jeho taveniny. Podle podmínek krystalizace je PA 6 schopen krystalizovat do dvou odlišných krystalických fází a to do α a γ fáze. γ fáze způsobuje u PA 6 vyšší tažnost, zatímco α fáze má vyšší molekulovou hmotnost a vyšší Youngův modul pružnosti. PA 6 je vysoce elastický, tvrdý, houževnatý materiál s vysokou odolností vůči abrazi a vysokou pevností v tahu. [16, 17]

I přesto, že PA 6 patří ke kvalitním polymerním materiálům s dobrými materiálovými vlastnostmi, dnešní trh si žádá neustále zlepšování polymerních materiálů a posouvání jak komoditních, tak inženýrských plastů do vyšších úrovní polymerů. Existuje mnoho způsobů, jak modifikovat polymery a získat tak polymerní materiály s lepšími materiálovými vlastnostmi. Fyzikální metodou je plnění polymeru vhodným plnivem. V případě polyamidů je vhodné plnivo nejčastěji skelné vlákno. Další metodou modifikace je modifikace chemická, která zajišťuje tvorbu nových chemických vazeb v polymerní matici pomocí peroxidů. Další možnou modifikací, jak obdržet lepší vlastnosti polymerů je jejich síťování pomocí zdroje záření. [18]

3.2 Vysoce energetická záření

Efekt vysoce energetického ozařování polymerních materiálů byl intenzivně studován posledních 70 let. Tyto studie probíhaly souběžně s růstem typů a využitím polymerních materiálů a dostupností elektricky generovaných zdrojů

záření. Záření elektronového paprsku se stalo komerčně akceptovatelnou procesní technikou za posledních 60 let a stalo se preferovaným zdrojem záření pro modifikaci polymerů. [19]

Vliv záření na materiály má svou důležitost v oblastech izolací drátů a kabel, teplem smrštitelných produktů, ošetřování elastomerů, plastů, nátěrů a inkoustů, sterilizaci lékařských přístrojů, modifikaci polymerních vlastností a v kosmonautice. [19]

Všeobecně při vystavení polymerů vysoce energetického záření dojde ke změnám vlastností polymerů. Samotná interakce s vysoce energetickým zářením je komplexní a náhodný proces. Související energie jsou mnohem větší než energie vázající elektrony libovolného elektronu k atomovému jádru. [19]

Mezinárodní jednotkou absorbované dávky záření je Gray (Gy), který je roven energii dané ionizujícím zářením na hmotu látky odpovídající 1 joulu na kilogram. Další speciální užívanou jednotkou radiační dávky je, rad, který je roven absorbované energii 0,01 joulu na kilogram, což je 0,01 Gray [19].

3.2.1 Záření elektronového paprsku

Záření elektronového paprsku může být generováno dodáním energie a akcelerací proudu elektronů přes elektromagnetické nebo elektrostatické pole. Industriální elektronové urychlovače jsou většinou složeny z elektronového děla, urychlovací trubice, systému napájení, vakuového systému, paprskového okna a skeneru. V dnešní době je dostupných mnoho typů elektronových urychlovačů. Akcelerace elektronů může být provedena pomocí stejnosměrného proudu anebo radiofrekvenční energie. Zdroj energie je většinou vysokonapěťový stejnosměrný napájecí zdroj. Odlišné metody jsou používány pro přenos střídavého proudu do stupňů usměrňovače, včetně sériové nebo paralelní indukční spojky a sériové nebo paralelní kapacitní vazby. [20]

Elektrony jsou generovány z termionické katody na záporném konci trubky svazku a jsou zrychlovány směrem k anodě. Katoda bývá složena z vyhřívaného drátu z wolframu. Proud paprsku je obvykle řízen změnou teploty katody nebo mřížkou s proměnlivým napětím umístěným před katodou. Elektrony získají okamžitě kinetickou energii při průchodu trubicí. Po akceleraci se koncentrované elektronové paprsky skenují pomocí elektromagnetu. Paprsek se rozbíhá ve vakuované komoře a pak prochází tenkou kovovou fólií (okno

paprsku, obvykle vyrobené z titanové slitiny) do vzduchu s malou ztrátou energie ($> 100 \text{ keV}$) skrz okno. [20]

Průmyslové elektronové urychlovače mají rozsah od 300 keV do 5 MeV . Urychlovače s vysokou energií obvykle mají energii $> 5 \text{ MeV}$, ačkoli pro průmyslové aplikace se nepoužívají energie $> 15 \text{ MeV}$, protože takto vysokou energii může být indukována radioaktivita. Radioaktivita je zanedbatelná u většiny polymerních materiálů ošetřovaných energiemi elektronů menších než 10 MeV [20].

3.3 Síťování polymerů

Síťování polymerů je chemický proces, při kterém dochází k tvorbě příčných vazeb ve skruktuře polymeru. Díky těmto příčným vazbám dochází ke vzniku nekonečné trojrozměrné struktury – prostorové sítě neboli gelu. Síťování pomocí radiačního záření je výsledkem různých kombinací pohybujících se volných radikálů polymerů, a to převážně v amorfních oblastech polymerů. Během síťování dochází obvykle ke dvěma protichůdným dějům najednou, a to k síťování a k degradaci (rozpad hlavního řetězce). Tyto procesy způsobují v polymerech nárůst molekulové hmotnosti, snížení rozpustnosti v organických rozpouštědlech, zlepšení chemických i tepelných vlastností a zlepšení mechanických vlastností. To, jaký polymer je možné síťovat, popřípadě do jaké míry záleží na mnoha faktorech např. krystalinitě, teplotě skelného přechodu, chemické struktury polymeru atd.). Pro dosažení co nejlepších výsledků síťování je třeba vzít tyto faktory v úvahu. [19]

Dalším důležitým faktorem při síťování polymerů je velikost absorbované dávky, která je funkcí výstupní rychlosti ozařovací jednotky, při dané struktuře polymeru. Díky tomu je síťování spolehlivým procesem, poněvadž všechny zásadní parametry je možné regulovat [19].

3.3.1 Síťovací urychlovač triallylisokyanurát (TAIC)

Pro dosažení lepšího síťování inženýrských polymerů se používají tzv. polyfunkční monomery obsahující více než dvě $\text{C}=\text{C}$ vazby. Tyto sloučeniny se nazývají síťovacími urychlovači. Mnoho těchto urychlovačů např. diakryláty, dimethakryláty, triakryláty a trimethakryláty byly vyvinuty pro síťování polymerů pomocí peroxidů a pro tepelné nebo UV/EB úpravy oligomerů [20].

Nicméně, vysoce reaktivní polyfunkční monomery jsou náchylné na polymerizaci mícháním či tvářením za zvýšených teplot, což vede ke ztrátě jejich schopnosti urychlovat síťování. Polyfunkční monomer TAIC má vyšší odolnost vůči vyšším teplotám než mají akrylátové a metakrylátové síťovací urychlovače [20].

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V experimentální části jsou popsány podmínky měření pro testování mikro-mechanických vlastností (indentační tvrdost, indentační modul pružnosti a indentační kríp), TMA, FTIR a AFM.

4.1 Materiál

Pro testovací účely této disertační práce byl vybrán polyamid 6 s obchodním názvem PA 6 FRIANYL B63 VN od německé firmy Frisseta. Materiálový list je k nalezení v příloze. Ve spolupráci s firmou BGS Beta Gamma Service GmbH & Co, KG byly vytvořeny směsi s koncentracemi 1, 2, 3, 4, 5 a 6 hm. % síťovacího činidla TAIC.

4.2 Příprava zkušebních těles

Dle normy ČSN EN ISO 179-1 byly vyrobeny zkušební tělesa o rozměrech 4×80×10 mm pomocí technologie vstřikování na vstřikovacím stroji Arburg Allrounder 470 H za následujících procesních podmínek:

- vstřikovací tlak – 80 MPa
- vstřikovací rychlost – 50 mm/s
- dráha dávkování – 26 mm
- teplota pod násypkou – 70 °C
- teplota pásma 1 – 220 °C
- teplota pásma 2 – 230 °C
- teplota pásma 3 – 245 °C
- teplota pásma 4 – 265 °C
- teplota formy – 80 °C
- čas chlazení – 20 s
- dotlak – 68 MPa
- čas dotlaku – 10 s

4.3 Síťování zkušebních těles

Připravené zkušební tělesa byly odeslány do německé firmy sídlící v Saal an der Donau, BGS Beta Gamma Service GmbH & Co, KG, kde byly ozařovány elektronovou energií 10 MeV radiačními dávkami 0, 66, 99 a 132 kGy na vzduchu při pokojové teplotě. Kde jeden průjezd pod elektrony činil 33 kGy.

Cena jednoho průjezdu pod elektrony s dávkou 33 kGy se pohybuje okolo 1 eura za 1 kg materiálu.

Následující metody zpracování byly využity pro výrobu zkušebních těles (technologie vstřikování), měření mikro-mechanických vlastností (instrumentální zkouška tvrdosti), vyhodnocení degradace materiálu (infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací), důkaz zesíťování materiálu (termo-mechanická analýza) a zhodnocení vlivu ozařování na topografii povrchu zkušebních těles (mikroskop atomárních sil).

4.4 Mikro-mechanické vlastnosti

Mikro-mechanické vlastnosti byly naměřeny na Micro Combi Testeru od švýcarské firmy CSM Instruments dle normy CSN EN ISO 14577-1. Každé zkušební těleso bylo nalepeno na kovové držáky a každá hodnota byla změřena $3 \times$ na 3 zkušebních tělesech u každé dávky ozáření a koncentrace síťovacího činidla TAIC. Výsledky měření byly dále zpracovány v softwaru MINITAB 14.

Podmínky měření byly následující:

- zatěžovací a odtěžovací rychlost – 10 N/s
- maximální zatížení zkušebních těles 5 N po dobu 90 s a poté odtížení na 0 N.

4.5 Termo-mechanická analýza (TMA)

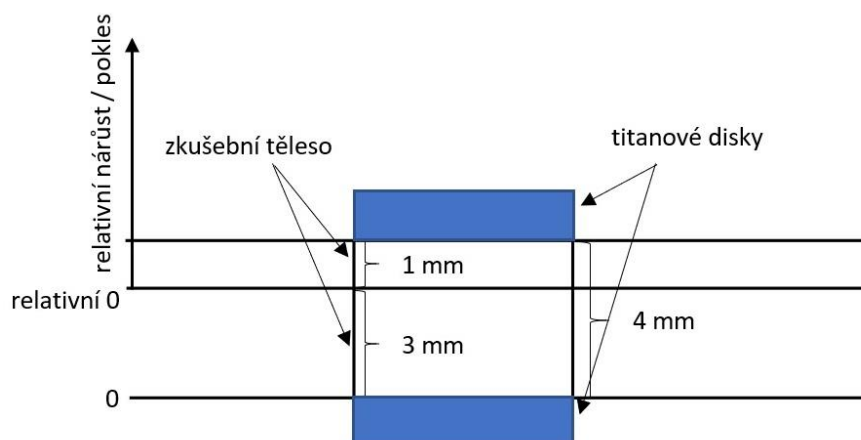
Měření deformace zkušebních těles bylo provedeno na DMA přístroji od firmy METTLER TOLEDO pomocí termomechanické analýzy krípu. Podmínky měření byly následující:

- počáteční teplota – 180 °C
- ustálení teploty 180 °C – 10 min
- zatížení – 1 N (po ustálení teploty 180 °C)
- rychlost ohřevu – 1 K/min
- konečná teplota – 250 °C
- měření na vzduchu

Měření probíhalo na 3 zkušebních tělesech o rozměrech 10×4×10 mm a to u všech koncentrací TAIC a všech radiačních dávek. Výsledky měření byly zpracovány pomocí softwaru Microsoft Excel 2016.

Výpočet deformace zkušebních těles:

$$\frac{\text{deformace zkušebního tělesa } (\mu\text{m})}{\text{tloušťka zkušebního tělesa } (\mu\text{m})} \times 100 = \text{deformace } (\%) \quad (1)$$



Obr. 3: Princip měření TMA

4.6 Fourierova transformační infračervená spektrometrie (FTIR)

Měření FTIR spekter bylo provedeno na přístroji AVATAR 320 od firmy Nicolet. Byla použita odrazová metoda ATR s krystalem ZnSe (selenid zinečnatý). Pro měření bylo využito softwaru OMNIC, kde bylo nastaveno rozlišení 4 cm⁻¹ pomocí 64 snímků. Pro přesnější měření bylo na začátku měření, po každém vzorku a na konci měření snímáno a odečteno FTIR spektrum pozadí, což byl v tomto případě vzduch. Měření bylo provedeno na třech zkušebních tělesech od každé koncentrace TAIC a radiační dávky. Zpracování naměřených dat proběhlo pomocí softwaru Microsoft Excel 2016.

4.7 Mikroskopie atomárních sil (AFM)

Měření mikroskopie atomárních sil probíhalo v rámci výjezdu CEEPUS na Univerzitu Alexandra Dubčeka v Trenčíně na Slovensku na Fakultu speciálních technologií. Měření probíhalo pod vedením Ing. Maroše Eckerta, Ph.D. na přístroji MFP-3D Infinity od firmy Oxford Instruments. Měření bylo provedeno na třech zkušebních tělesech od každé koncentrace TAIC a radiační dávky, přibližně na stejném místě pro snadnější vyhodnocování, pomocí křemíkové sondy AC160TS-R3, jejíž tuhost byla $k = 26$ N/m. Tato sonda má viditelnou špičku a je vhodná pro pokleповý režim, kterým bylo měřeno. Tato sonda je

vhodná pro měření v rozmezí frekvencí 200 – 400 kHz. Výsledky byly vyhodnoceny pomocí softwaru ARgyle Light.

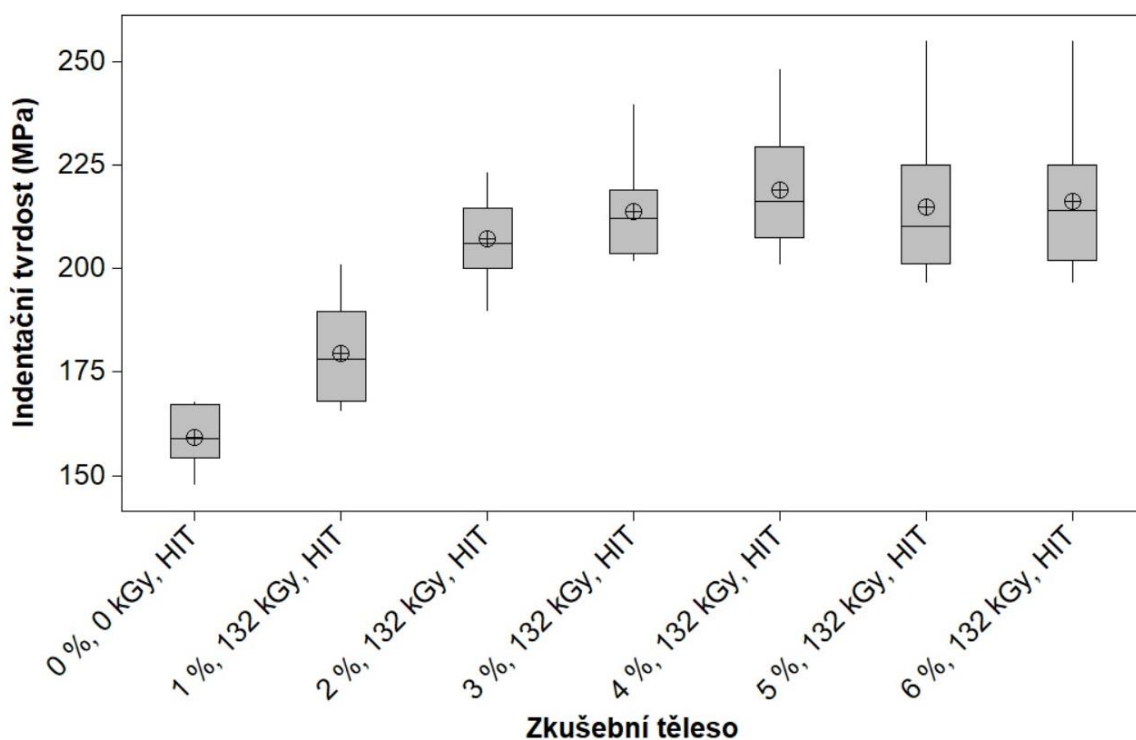
5. VÝSLEDKY

V této kapitole jsou zpracovány výsledky všech 4 výše zmíněných metod. Každá podkapitola popisuje výsledky jedné metody.

5.1 Mikro-mechanické vlastnosti

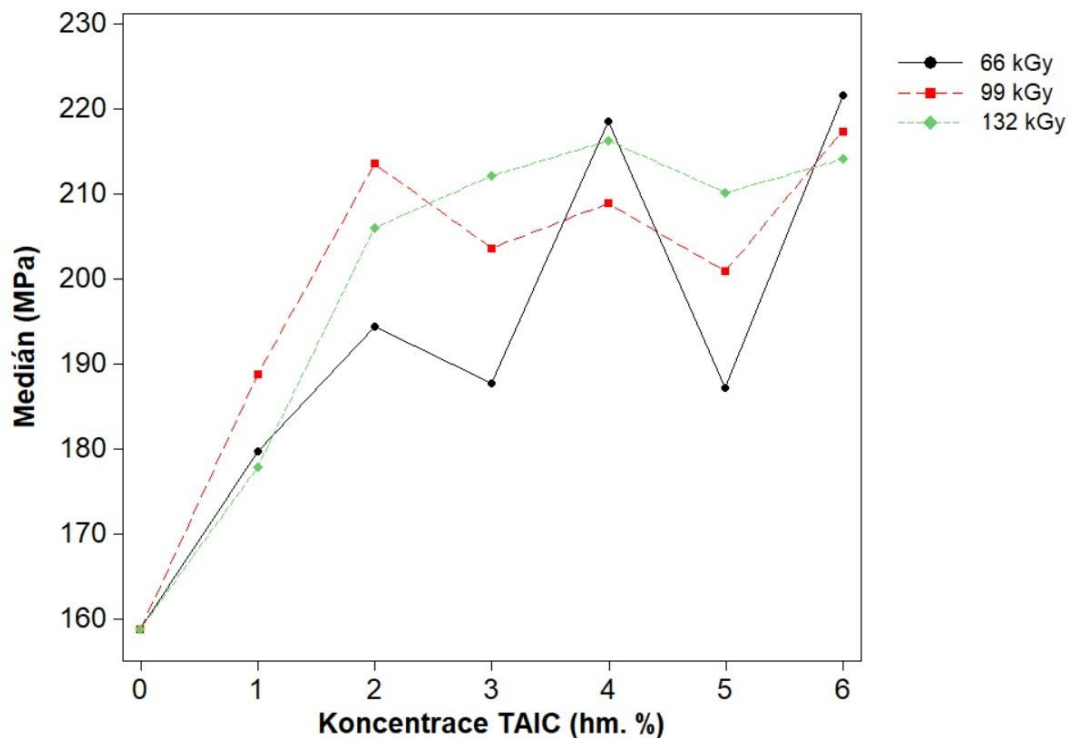
Výsledky indentační tvrdosti a indentačního modulu pružnosti zkušebních těles ozářených 132 kGy jsou zobrazeny pomocí boxplotů, ve kterých jsou porovnávány závislosti koncentrace TAIC na radiční dávce. V případě indentačního krípu jsou zobrazeny výsledky zkušebních těles ozářených radiční dávkou 99 kGy, poněvadž v této radiční dávce docházelo k nejvýraznějším změnám této mikro-mechanické vlastnosti. Dále jsou vytvořeny porovnávací grafy, které zobrazují medián. Křivky zobrazené v grafech jsou pouze trendového charakteru. Ostatní výsledky radičních dávek 66, 99 a 132 kGy jsou zobrazeny a diskutovány v disertační práci.

5.1.1 Indentační tvrdost



Obr. 4: Indentační tvrdost PA 6 ozářeného 132 kGy v závislosti na koncentraci TAIC

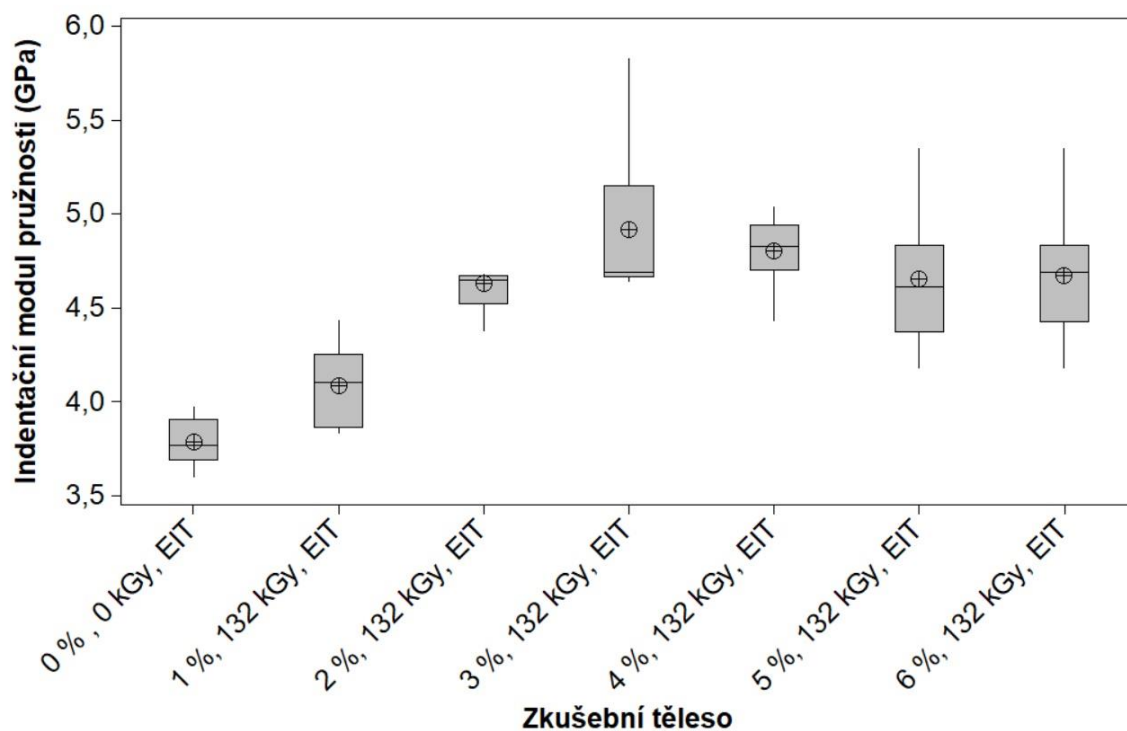
Na Obr. 4 je jasně patrné, že při radiační dávce 132 kGy dochází k růstu indentační tvrdosti až do koncentrace TAIC 4 hm. %, poté dochází k nepatrnému poklesu, což může být jako doprovodný jev degradace materiálu způsobené při ozařování.



Obr. 5: Medián indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

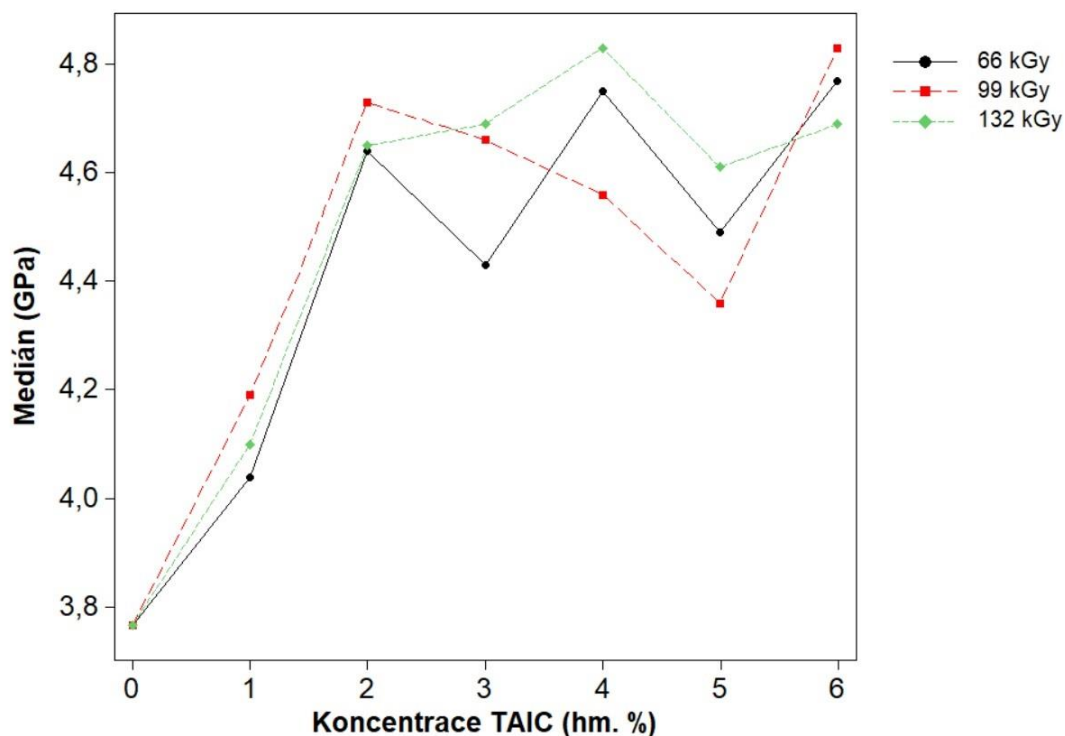
Obr. 5 poukazuje na to, že nejlepší hodnoty indentační tvrdosti bylo dosaženo při ozáření 132 kGy a koncentrací TAIC 4 hm. % a to hodnoty přibližně 218 MPa. Dávkou 66 kGy při stejné koncentraci TAIC bylo dosaženo hodnoty indentační tvrdosti blíží se k 220 MPa, avšak má obrovské rozptyly, například u koncentrace TAIC 3 hm. % je hodnota indentační tvrdosti pouhých 188 MPa, podobně jako u koncentrace 5 hm. %.

5.1.1 Indentační modul pružnosti



Obr. 6: Indentační modul pružnosti PA 6 ozářeného 132 kGy v závislosti na koncentraci TAIC

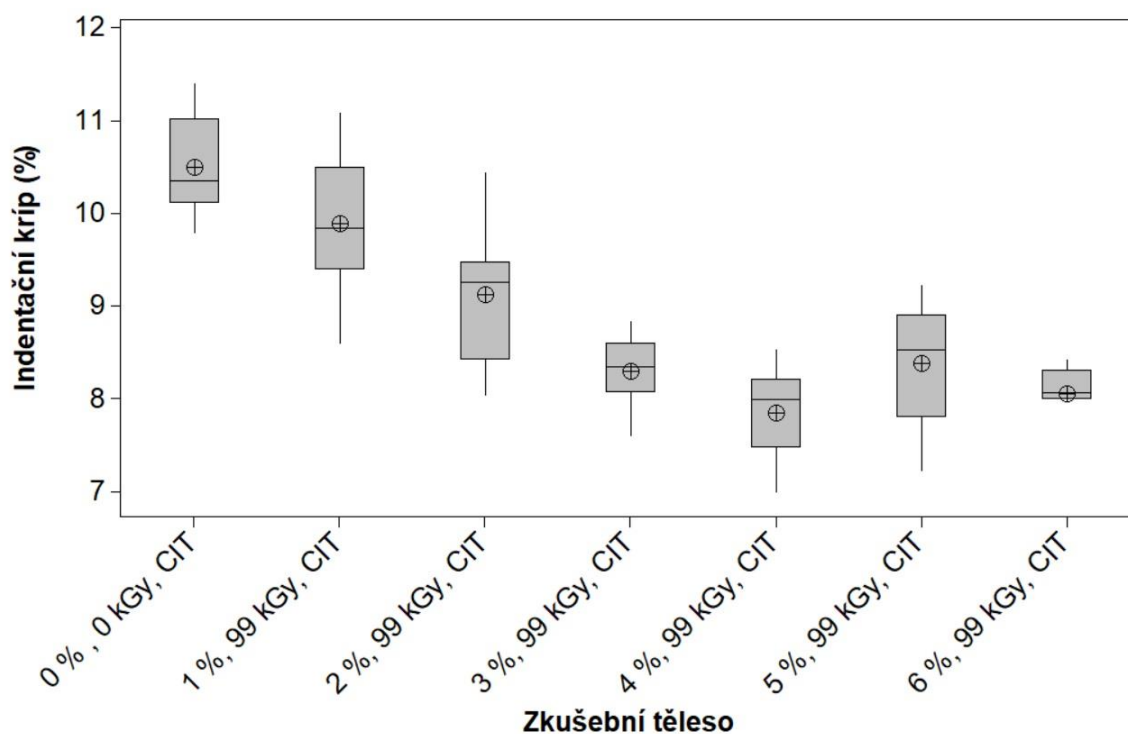
Jako ideální koncentrace TAIC se v případě ozařování radiační dávkou 132 kGy jeví 4 hm. %. Hodnoty indentačního modulu pružnosti při této koncentraci se pohybují v rozmezí od 4,71 do 4,94 GPa. Takto modifikovaný PA 6 se jeví jako dostatečně rovnoměrně zesíťovaný.



Obr. 7: Medián indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

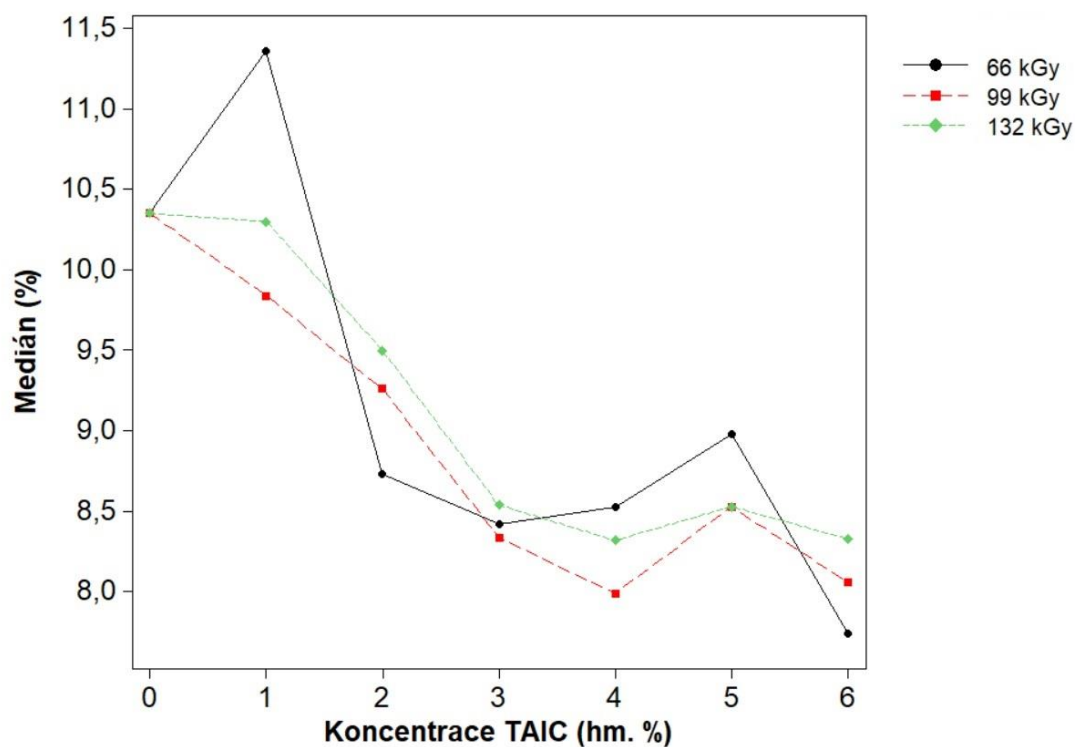
Medián naměřených hodnot poukazuje na výrazné zlepšení indentačního modulu pružnosti z 0 hm. % koncentrace TAIC na 2 hm. %. Radiační dávka 66 kGy má střídavě rostoucí a klesající trend s velkými rozptyly, zatímco dávka 99 kGy má rozptyly menší, avšak od koncentrace TAIC 2 hm. % až do 5 hm. % klesající trend, což není žádoucí. Dávka ozáření 132 kGy se jeví jako nejvhodnější, a to do koncentrace 4 hm. % TAIC, kde dochází k narůstajícímu trendu a k hodnotě přes 4,8 GPa.

5.1.2 Indentační kríp



Obr. 8: Indentační kríp PA 6 ozářeného 99 kGy v závislosti na koncentraci

U radiační dávky 99 kGy dochází k požadovanému snižování indentačního krípu až do 4 hm. % TAIC, poté dochází k nárůstu krípu, což může být způsobeno dominancí degradace materiálu nad síťováním.

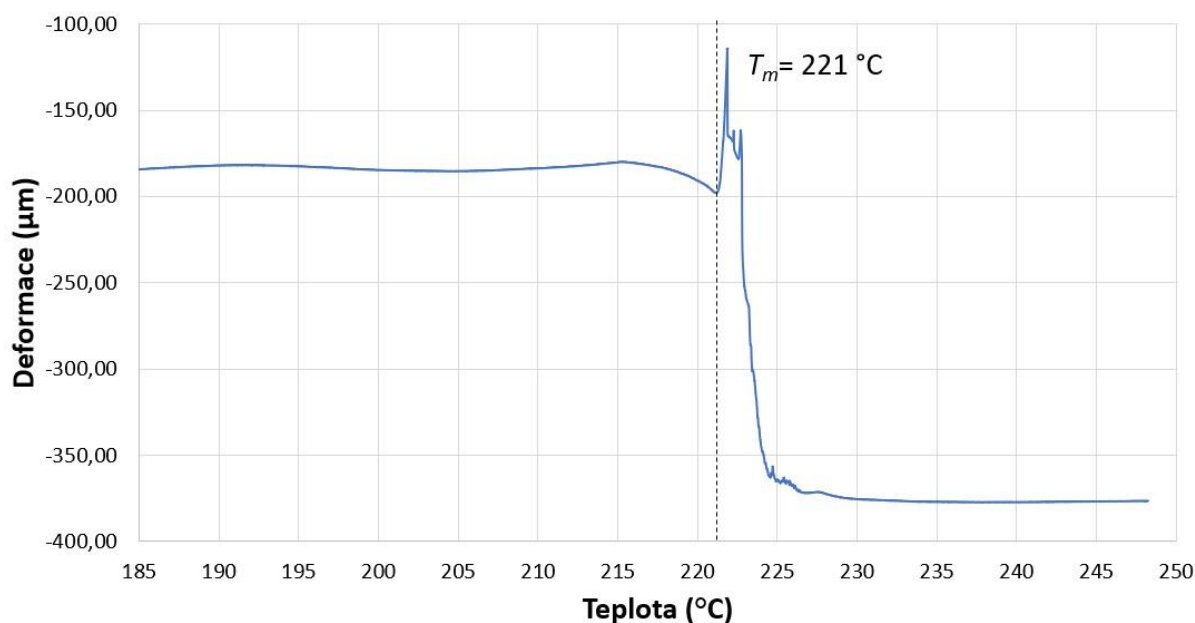


Obr. 9: Medián indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

Na Obr. 9 lze vidět, že radiační dávka 99 kGy u PA 6 s koncentrací TAIC 4 hm. % poukazuje na nejnižší hodnotu indentačního krípu a to přibližně 8 %.

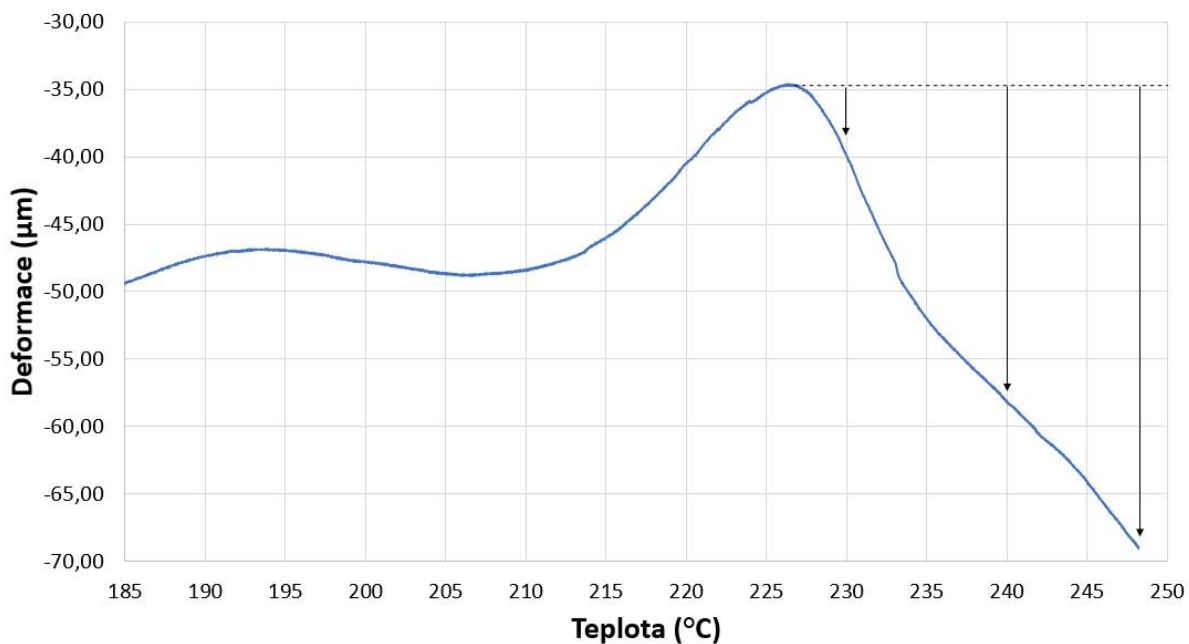
5.2 Termo-mechanická analýza (TMA)

V případě tohoto měření docházelo k měření dvou dějů, a to teplotní roztažnosti a toku nezesíťované části. Tyto dva děje se navzájem ovlivňují a v závislosti na tom, který děj zrovna dominuje, tak křivka buď roste vlivem teplotní roztažnosti či klesá vlivem teplotní deformace. Křivky v grafech jsou vytvořeny z mediánu třech měření. Pro lepší představu trendu naměřených křivek byla deformace materiálu odečtena při třech teplotách a to 230, 240 a 248 °C. V této části jsou zobrazeny výsledky pouze pro neozářené zkušební těleso, zkušební těleso ozářené 66 kGy s 1 hm. % TAIC a zkušební těleso s koncentrací TAIC 4 hm. % ozářené 132 kGy, které ukazovalo stupeň nejvyššího zesíťování. V tabulce 1 jsou zobrazeny souhrnné výsledky pro teplotu 248 °C. Zbylé výsledky pro teploty 230 a 240 °C jsou zobrazeny v disertační práci.



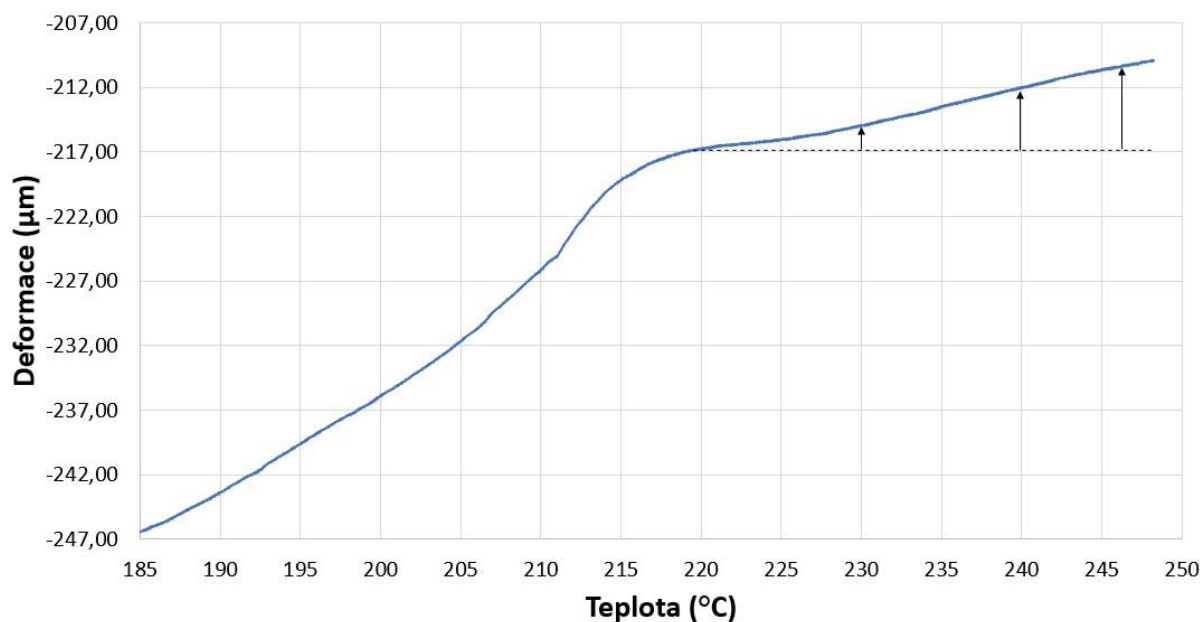
Obr. 10: Vliv teploty na deformaci u neozářeného zkušební tělesa

Obr. 10 ukazuje na deformaci čistého PA 6. Jak je vidno, tak teplota tání tohoto polymeru je 221 °C.



Obr. 11: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 1 hm. % koncentrací TAIC

Na Obr. 11 lze vypořadovat, že PA 6 s 1 hm. % TAIC ozářený 66 kGy vykazuje jiné mechanické chování nežli neozářený PA 6. Přerušovaná čára značí tečnu, odkud byly odečteny deformace pro 3 teploty a to 230, 240 a 248 °C. Od teploty 185 °C do 192 °C dochází k teplotní roztažnosti tuhé částečně krystalické fáze, od teploty 192 °C do 207 °C dochází k deformaci zkušebního tělesa, kde poté začne opět převládat teplotní roztažnost tuhé fáze. Od teploty 227 °C dochází k rapidní deformaci zkušebního tělesa, která převládá až do teploty 248 °C. Deformace při 230 °C je -0,13 %, -0,59 % při 240 °C a při 248 °C -0,86 %.

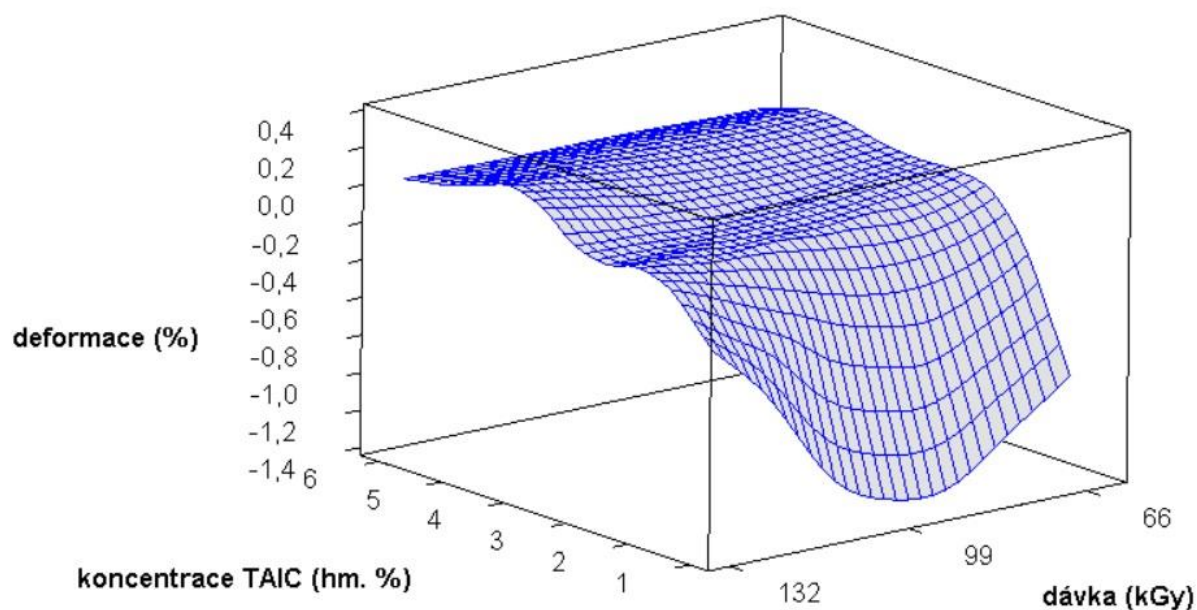


Obr. 12: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 4 hm. % koncentrací TAIC

U PA 6 ozářeného 132 kGy dochází od 220 °C k teplotní roztažnosti a to při 230 °C 0,05 %, při 240 °C 0,12 % a při 248 °C 0,17 %. K deformaci v tomto případě vůbec nedošlo. Při takto vysoké teplotní roztažnosti je velmi pravděpodobné, že materiál je již natolik dostatečně zesíťovaný, že není třeba zvyšovat koncentraci TAIC, ani radiační dávky.

Tabulka 1 Výsledky deformace zkušebních těles při 248 °C

deformace [vlastní deformace (-) + teplotní roztažnost (+)] (%)	deformace (μm)	dávka (kGy)	koncentrace TAIC (hm. %)
-0,86	-34,01	66	1
-1,32	-52,94	99	1
-0,33	-13,33	132	1
-0,12	-4,96	66	2
-0,23	-9,30	99	2
-0,03	-1,09	132	2
0,03	1,32	66	3
-0,06	-3,00	99	3
-0,04	-1,65	132	3
0,04	1,74	66	4
0,03	1,14	99	4
0,17	6,92	132	4
0,10	3,92	66	5
0,11	4,24	99	5
0,12	4,74	132	5
0,01	0,52	66	6
0,03	1,20	99	6
0,04	1,69	132	6

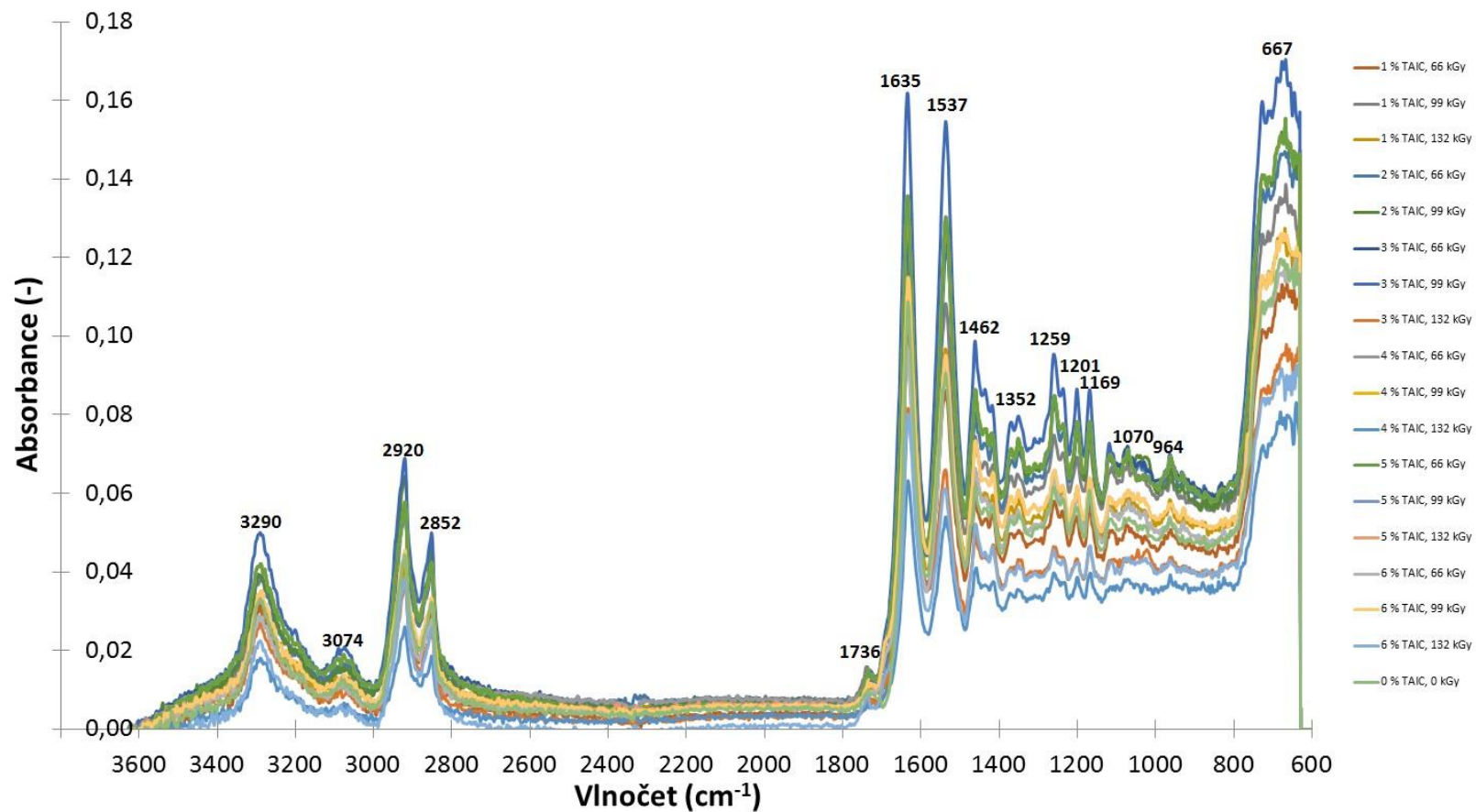


Obr. 13: Vliv dávky záření a koncentrace TAIC na deformaci zkušebního tělesa při 248 °C

V tabulce 1 a na Obr. 13 jsou shrnuty výsledky deformace a teplotní roztažnosti při teplotě 248 °C v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce.

Z daných výsledků lze konstatovat, že pro PA 6 je nejvhodnější koncentrace TAIC 4 hm. % a ozáření radiační dávkou 132 kGy z hlediska nejlepšího mechanického chování nad T_m .

5.3 Fourierova transformační infračervená spektrometrie (FTIR)



Obr. 14: FTIR spektrum všech zkušebních těles

Křivky ve spektru jsou vytvořeny z mediánu třech měření pro každé zkušební těleso. Pro velké množství dat jsou v disertační práci na CD přiloženy spektra od každého zkušební tělesa zvlášť, vytvořené pomocí minima, mediánu a maxima.

Pomocí infračervené spektroskopie byla stanovena přítomnost jednotlivých chemických skupin. Obr. 14 zobrazuje FTIR všech zkušebních těles. Při porovnání IR spekter byla prokázána nepatrná degradace materiálu, která je reprezentována pásem 1736 cm^{-1} typickou pro karbonylové skupiny. Na degradaci také běžně poukazují hydroxylové skupiny, které se nacházejí v pásu $3\ 500\text{ cm}^{-1}$ a u měřených těles nebyly naměřeny. Vibrace u 3290 , 3074 , 1635 , 1537 , 964 a 667 cm^{-1} prokazují přítomnost amidové skupiny. Vibrace u 2920 , 2852 , 1462 , 1352 a 1259 cm^{-1} prokazují přítomnost $-\text{CH}_2$ skupiny, což ukazuje na přítomnost alifatického řetězce. Intenzita těchto páسů klesá s rostoucí radiační dávkou, což ukazuje na snížení pohyblivosti $-\text{CH}_2$ skupin. Pás nacházející se v oblasti 667 cm^{-1} je vibrace amidu v krystalické fázi α a β . Krystalickou fázi α zobrazuje vibrace s vlnočtem 1201 cm^{-1} , která pochází z deformační vějířovité vibrace $-\text{CH}_2$, rameno tohoto pásu u ozářených zkušebních těles roste. Pás s vlnočtem 1697 cm^{-1} , který je přiřazován síťovacímu urychlovači TAIC nebyl nalezen ani na jednom zkušebním tělese, což značí, že byl s největší pravděpodobností spotřebován při reakci u ozařování PA 6.

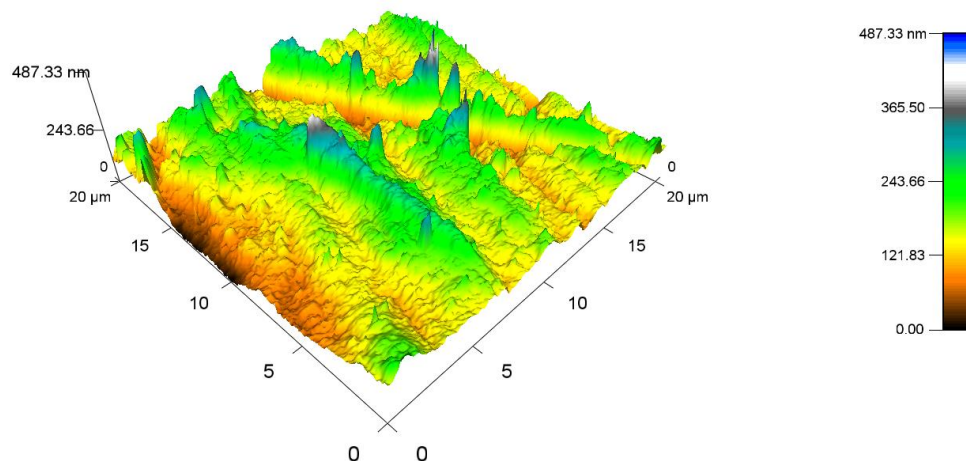
Tabulka 2 zobrazuje hodnoty absorbance při vlnočtu 1736 cm^{-1} , který je typický pro karbonylové skupiny ukazující na degradaci PA 6. Zeleně vyznačená absorbance je nejnižší a to s hodnotou $0,00613$, což koresponduje s výsledky mikro-mechanických vlastností, kde PA 6 ozářený 132 kGy s 4 hm. \% TAIC vykazuje nejlepší indentační tvrdost a modul pružnosti. Zároveň, z výsledků TMA, je tento materiál nejlépe zesíťován. Červeně vyznačená hodnota absorbance $0,01552$ patří zkušebnímu tělesu ozářenému 99 kGy s 1 hm. \% TAIC . Toto zkušební těleso vykazovalo největší degradaci.

Tabulka 2 Hodnota absorpance při vlnočtu 1736 cm⁻¹

zkušební těleso	absorbance
0 % TAIC, 0 kGy	0,00979
1 % TAIC, 66 kGy	0,00805
1 % TAIC, 99 kGy	0,01552
1 % TAIC, 132 kGy	0,01097
2 % TAIC, 66 kGy	0,01230
2 % TAIC, 99 kGy	0,01453
2 % TAIC, 132 kGy	0,01448
3 % TAIC, 66 kGy	0,01519
3 % TAIC, 99 kGy	0,01529
3 % TAIC, 132 kGy	0,00751
4 % TAIC, 66 kGy	0,01519
4 % TAIC, 99 kGy	0,01519
4 % TAIC, 132 kGy	0,00613
5 % TAIC, 66 kGy	0,01519
5 % TAIC, 99 kGy	0,00988
5 % TAIC, 132 kGy	0,01225
6 % TAIC, 66 kGy	0,00988
6 % TAIC, 99 kGy	0,01225
6 % TAIC, 132 kGy	0,00848

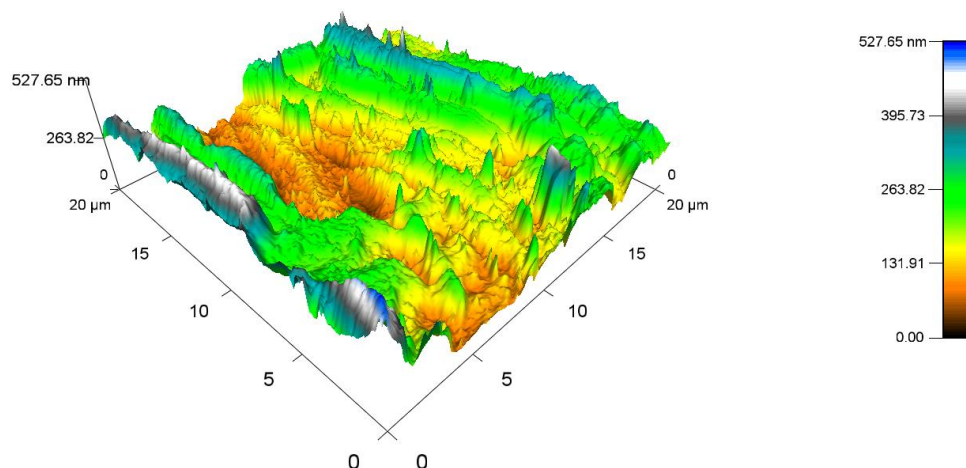
5.4 Mikroskopie atomárních sil (AFM)

Pomocí AFM byla zmapována topografie povrchu zkušebních těles. Ze získaných výsledků nelze jednoznačně určit vliv ozařování PA 6 na jeho topografii povrchu. Z důvodů velkého množství dat jsou výsledné snímky zkušebních těles, které nejsou zobrazeny v této kapitole, přiloženy na CD k výtisku disertační práce.



Obr. 15: Topografie povrchu neozářeného zkušebního tělesa

Na Obr. 15 je zobrazena topografie povrchu neozářeného PA 6. Nejvyšší vrchol zde má 487,33 nm, nejnižší se blíží k 0 nm.



Obr. 16: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 4 hm. % TAIC

U 4 hm. % TAIC je nejvyšší bod 527,65 nm vysoký, což je srovnatelné se zkušebním tělesem obsahující 1 hm. % TAIC.

6. PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI

V dnešní době, kdy se kovové materiály v mnoha industriálních odvětvích nahrazují plasty a kompozity je velmi důležité přijít na vhodný způsob modifikace materiálu, který je šetrný k životnímu prostředí, není ekonomicky příliš náročný a pozitivně modifikuje materiál. Každá aplikace vyžaduje jiné mechanické, teplotní či chemické vlastnosti materiálu. V materiálových listech lze většinou najít základní materiálové vlastnosti. Povrchové vlastnosti většinou nebývají součástí materiálových listů.

Ozařování pomocí elektronového záření patří k jedné z moderních modifikací polymerů všeobecně. Pro zesíťování PA 6 je důležitý přídavek síťovacího urychlovače, pro snadnější a rychlejší zesíťování. V této disertační práci byl jako síťovací urychlovač použit TAIC a to v koncentracích 1, 2, 3, 4, 5 a 6 hm. %. Radiační dávky byly 66, 99 a 132 kGy.

Pomocí měření TMA bylo zjištěno, že k největšímu zesíťování PA 6 došlo v případě zkušebních těles s koncentrací TAIC 4 hm. %, ozářeného radiační dávkou 132 kGy, což potvrzují i výsledky indentační tvrdosti, kde u těchto zkušebních těles docházelo k nejvyšším hodnotám s nejmenšími rozptyly. Nejvyšších hodnot indentačního modulu pružnosti bylo také dosaženo při radiační dávce 132 kGy s koncentrací TAIC 4 hm. %. Pro dosažení nejnižších hodnot indentačního krípu byla opět nejvhodnější koncentrace TAIC 4 hm. %, avšak radiační dávka 99 kGy, což v případě aplikace, kde je nejdůležitější nízký indentační kríp, znamená úsporu o 1 průjezd pod zrychlenými elektrony a tím pádem přibližně 1 eura za 1 kg ozařovaného materiálu.

7. ZÁVĚR

V této dizertační práci byl zkoumán vliv koncentrace síťovacího urychlovače TAIC na výsledné mikro-mechanické vlastnosti PA 6 ozářeného 66, 99 a 132 kGy. Pro důkaz zesíťování byla zkušební tělesa testována na teplotní deformaci a roztažnost pomocí TMA analýzy. Pro důkaz degradace byla provedena FTIR spektroskopie. Pro dokreslení topografie povrchu byla provedena AFM mikroskopie.

Z výsledků mikro-mechanických vlastností je patrné, že nejlepší koncentrace TAIC a dávka záření je 4 hm. % a 132 kGy a to jak pro dosažení nejvyšší indentační tvrdosti, tak pro dosažení nejvyššího indentačního modulu pružnosti. Naopak pro dosažení nejnižší hodnoty indentačního krípu je u stejné koncentrace TAIC nejvhodnější dávka 99 kGy.

FTIR spektroskopie ukázala nepatrnou degradaci zkušebních těles, a to přítomností karbonylových skupin ve vibračním pásmu 1736 cm^{-1} . Nepřítomnost pásu s vlnočtem 1697 cm^{-1} , který poukazuje na přítomnost TAIC ukazuje na spotřebování tohoto síťovacího urychlovače v PA 6 matrici během procesu ozařování.

AFM mikroskopie neprokázala natolik výrazné změny v topografii povrchu zkušebních těles, aby se dalo konstatovat, že ozařování má vliv na topografii PA 6.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DADBİN, Susan, Masoud FROUNCHI a Davood GOUDARZI. Electron beam induced crosslinking of nylon 6 with and without the presence of TAC. *Polymer Degradation and Stability* [online]. 2005, vol. 89, 436-441. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141391005000807>
- [2] PRAMANIK, N.K., R.S. HALDAR, Y.K. BHARDWAJ, S. SABHARWAL, U.K. NIYOGI a R.K. KHANDAL. Radiation processing of Nylon 6 by e-beam for improved properties. *Radiation Physics and Chemistry* [online]. 2009, vol. 78, 199-205. [cit. 2019-08-24] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X08002818>
- [3] HOLIK, Zdenek, Michal DANEK, Miroslav MANAS a Jakub CERNY. Influence of the Amount of Cross-linking Agent on Properties of Irradiated Polyamide 6. *International Journal of Mechanics* [online]. 2011, vol. 5, 218-225. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://pdfs.semanticscholar.org/7adf/8aa2fe3752fdbddca1283e1bbe3216564366.pdf>
- [4] OVSIK, M., D. MANAS, M. MANAS, M. STANEK, S. SANDA, K. KYAS a M. REZNICEK, Microhardness of PA6 Influenced by Beta Low Irradiation Doses. *International Journal of Mathematics and Computer in Simulation* [online]. 2012, vol. 6, 575-583. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <http://www.naun.org/multimedia/NAUN/mcs/16-595.pdf>
- [5] PORUBSKÁ, Mária, Ivica JANIGOVÁ, Klaudia JOMOVÁ a Ivan CHODÁK, The effect of electron beam irradiation on properties of virgin and glass fiber-reinforced polyamide 6. *Radiation Physics and Chemistry* [online]. 2014, vol. 102, 159-166. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X1400173X>
- [6] ADEM, E. G. BURILLO, L.F. del CASTILLO, M. VÁSQUEZ, M. AVALOS-BORJA a A. MARCOS-FERNÁNDEZ, Polyamide-6: The effects on mechanical and physiochemical properties by electron beam irradiation at different temperatures. *Radiation Physics and Chemistry* [online]. 2014, vol. 97, 165-171. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X13005884>

- [7] MANAS, David, Martin OVSIK, Miroslav MANAS, Michal STANEK, Marcela SPANHELOVA, Martin BEDNARIK a Vojtech SENKERIK, Influence of Content of Crosslinking Agent on the Micromechanical Properties of Glass-Filled Polyamide 6. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2015, 357-362. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMM.752-753.357>
- [8] SHIN, Boo Yong, Man Ho HA a Do Hung HAN, Morphological, Rheological, and Mechanical Properties of Polyamide 6/Polypropylene Blends Compatibilized by Electron-Beam Irradiation in the Presence of a Reactive Agent. *Materials* [online]. 2016, vol. 9. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28773466>
- [9] MAŇAS, David, Martin OVSIK, Aleš MIZERA, Miroslav MAŇAS, Lenka HÝLOVÁ, Martin BEDNAŘÍK a Michal STANĚK. The Effect of Irradiation on Mechanical and Thermal Properties of Selected types of Polymers. *Polymers* [online]. 2018, vol. 10, iss. 2 [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/2014725182?pq-origsite=summon>
- [10] BRADLER, Patrick R., FISCHER, Joerg, WALLNER, Gernot M., LANG a Reinhold W. Characterization of irradiation crosslinked polyamides for solar thermal applications – Fatigue properties. *Composites Science and Technology* [online]. 2019, vol. 175. [cit. 2019-08-24]
- [11] BEAUMONT, John P., R. L. NAGEL a R. SHERMAN. *Successful injection molding: process, design, and simulation*. Munich: Hanser Publishers, 2002. ISBN 1-56990-291-7. [cit. 2019-08-24]
- [12] *Struktura polymerů a vliv na její vlastnosti* [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html> [cit. 2019-08-24]
- [13] ASHCROFT, William R. *Industrial polymer applications: essential chemistry and technology*. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2017. ISBN 978-1-78262-814-9. [cit. 2019-08-21]
- [14] *polymerinnovationblog.com* [online]. Dostupné z: <https://polymerinnovationblog.com/wp-content/uploads/2018/01/linear-branched-and-crosslinked-polymers.jpg> [cit. 2019-08-21]

- [15] *resinex.cz*: Polymerové typy. [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pa.html>
- [16] FERREIRA, Tânia, Paulo E. LOPES, Antonio Jose PONTES a Maria Conceição PAIVA. Microinjection molding of polyamide 6. *Polym. Adv. Technol.* [online]. 2016, vol. 25, 891-895. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/pat.3322>
- [17] OVSÍK, Martin, David MANAS, Miroslav MANAS, Michal STANEK a Martin REZNICEK, The Effect of Cross-Linking on Nano-Mechanical Properties of Polyamide, *Key Engineering Materials* [online]. 2016, vol. 699, 37-42. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://search.proquest.com/docview/1802533233?pq-origsite=summon>
- [18] PORUBSKÁ, Mária, Dragan BABIĆ, Ivica JANIGOVÁ, Miroslav ŠLOUF, JOMOVÁ Klaudia a Ivan CHODÁK, The effect of gamma irradiation in air and inert atmosphere on structure and properties of unfilled or glass fibre-reinforced polyamide 6, *Polym. Bull.* [online]. 2016, vol. 73, 1775-1794. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00289-015-1576-0.pdf>
- [19] *PlasticPortalEU*. Radiační síťování – metoda zlepšování vlastností polymerů, 1. Část [online]. [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/radiacni-sitovani-%E2%80%93-metoda-zlepsovani-vlastnosti-polymeru1-cast/c/2641/>
- [20] MAKUUCHI, Keizo a Song CHENG. *Radiation processing of polymer materials and its industrial applications*. New Jersey: A JOHN WILEY AND SONS, INC., PUBLICATION, 2012. ISBN 978-0-470-58769-0. [cit. 2019-08-24]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Lineární, větvené a zesíťované polymery [14]</i>	<i>7</i>
<i>Obr. 2: Strukturální vzorec PA 6.....</i>	<i>8</i>
<i>Obr. 3: Princip měření TMA</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 4: Indentační tvrdost PA 6 ozářeného 132 kGy v závislosti na koncentraci TAIC.....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 5: Medián indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce.....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 6: Indentační modul pružnosti PA 6 ozářeného 132 kGy v závislosti na koncentraci TAIC.....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 7: Medián indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 8: Indentační kríp PA 6 ozářeného 99 kGy v závislosti na koncentraci.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 9: Medián indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 10: Vliv teploty na deformaci u neozářeného zkušební tělesa.....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 11: Vliv teploty na deformaci u zkušební tělesa ozářeného 66 kGy s 1 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 12: Vliv teploty na deformaci u zkušební tělesa ozářeného 132 kGy s 4 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 13: Vliv dávky záření a koncentrace TAIC na deformaci zkušební tělesa při 248 °C</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 14: FTIR spektrum všech zkušebních těles</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 15: Topografie povrchu neozářeného zkušební tělesa.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 16: Topografie povrchu zkušební tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 4 hm. % TAIC</i>	<i>32</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 Výsledky deformace zkušebních těles při 248 °C</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka 2 Hodnota absorpance při vlnočtu 1736 cm⁻¹</i>	<i>30</i>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

α	Alfa
AFM	Mikroskopie atomárních sil
ATR	Zeslabený úplný odraz
$^{\circ}C$	Stupně Celsia
C_{IT}	Indentační kríp (%)
cm^{-3}	Centimetr krychlový
cm^{-1}	Reciproký centimetr
DMA	Dynamická - mechanická analýza
E	Energie elektronů (MeV)
E_{IT}	Indentační elastický modul (GPa)
eV	Elektronvolt
FTS	Fourierův transformační spektrometr
$FTIR$	Fourierova transformační infračervená spektroskopie
g	Gram
γ	Gamma
GPa	Giga pascal
Gy	Gray
HDT	Teplota teplotního průhybu
H_{IT}	Indentační tvrdost (MPa)
$Hm. \%$	Hmotnostní procenta
Hz	Hertz
K	Stupeň Kelvina
kg	Kilogram
mm	Milimetr
MPa	Mega pascal
N	Newton

<i>Obj. %</i>	Objemová procenta
<i>PA</i>	Polyamid
<i>PET</i>	Polyethylentereftalát
<i>PP</i>	Polypropylen
<i>PVC</i>	Polyvinylchlorid
ρ	Hustota (g.cm^{-3})
<i>s</i>	Sekunda
<i>TAC</i>	Triallylkyanurát
<i>TAIC</i>	Triallylisokyanurát
<i>TMA</i>	Termo-mechanická analýza
<i>UV/EB</i>	Ultrafialové záření/elektronové záření
%	Procento

Technical data sheet

AWT 8/96 002/002

FRIANYL B63 VN

Nylon 6 for injection moulding, modified with reticulating agent., values after crosslinking.

	Testing Standard	Unit	Values
Product Features			
Abbreviation	ISO 1043	--	----
Density	ISO 1183	g/cm ³	1.12
Vicat A (with the force of 10 N)	ISO 62	°C	>300
Vicat B (with the force of 50 N)	ISO 306	°C	>300
Material Constants for Flammability			
Glow wire	DIN EN 60695-2-1/2	°C	750
Gel content	FRISSETTA	%	>65
Mechanical features			
Charpy impact (+23 °C)	ISO 179/1eU	kJ/m ²	NB
Charpy impact (-30 °C)	ISO 179/1eU	kJ/m ²	NB
Charpy impact, notched (+23 °C)	ISO 179/1eA	kJ/m ²	9
Charpy impact, notched (-30 °C)	ISO 179/1eA	kJ/m ²	9
Thermal features			
Flammability	UL-94	HB-V0	HB
Distorsion temp. under load (Meth. A)	ISO 75	°C	>300
Distorsion temp. under load (Meth. C)	ISO 75	°C	>300
Continuous service temperature	FRISSETTA	°C	125
Electrical features			
Tracking index (CTI 100)	IEC 112	---	600

* All values freshly molded, for variations please look in the product description

** Plate 60x60x2mm

Tensile strength ISO 527 (temperature dependent)

Temperature (°C)	Flexural modulus (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Tensile elongation at break (%)
-40	3708	106	4
-20	3523	112	6
0	3314	100	6
23	3176	87	16
50	2004	61	20
80	666	41	41
100	558	37	61
150	353	24	63
200	178	8	---
220	22	2	---

Technical data sheet

AWT 8/96 001/004



Product

FRIANYL B63 VN

Applications

Parts for the electrical-, construction- and traffic industry, parts with a high demand of temperature.

Processing Guidelines

Recommended material temperature 240-270°C, mold temperature 60-80°C, granular clamp <0,1%. Build-up pressure about 5-10bar hydraulic pressure. Please read our brochure "Processing guidelines of injection molding" for further information.

Pre-Treatment and Drying

The moisture proof and vacuum packed PA-granular can usually be processed without any special pre-treatment, except for large packages. The drying time depends on the humidity. We recommend at about 0,2% humidity a drying time of 4-8 hours at 80°C. The maximum humidity for injection molding should be less than 0,15%, of sensitive parts less than 0,1%. Because of the reactive groups in the granular, a gentle pre-drying is important! FRIANYL-granulars are packed with a residual moisture content of <0,15%. Limited ageing period of 12 months!

Post-Treatment and conditioning

Our PA-types must be annealed to achieve their specific characteristics. The conditions should be the same as of the surroundings of the end product. Usually the humidity at standard conditioning atmosphere is about 1,5-2,5%, at immersion in water 7-9%. There might be slight changes like a volume- or longitudinal increase of about 0,1-0,3% / per weight percentage of type and process.

Our publications, leaflets and technical data are for information and advice. Therefore no obligation can be derived from it. Please adapt the processing and application of the products to the prevailing conditions.
Revision : 01.01.2010

PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA

2 kvalifikační práce:

1. HÝLOVÁ, Lenka. Povrchová úprava medicínských materiálů. *Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně*, 2013, 57 s. (7 867 slov). Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/25299>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů. [cit. 2019-08-27]. Vedoucí práce Lehocký, Marián.
2. HÝLOVÁ, Lenka. Povrchová modifikace kopolymeru styrenu a akrylonitrilu a jeho charakterizace. *Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně*, 2015, 65 s. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/33694>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav inženýrství polymerů. [cit. 2019-08-27]. Vedoucí práce Lehocký, Marián.

20 publikací uvedených v databázi Web of Science:

1. MANAS, David, Martin OVSIK, Ales MIZERA, Miroslav MANAS, Lenka HYLOVA, Martin BEDNARIK a Michal STANEK. Effect of irradiation on mechanical and thermal properties of selected types of polymers. *Polymers* [online]. MDPI, 2018, 10(2), 158-179 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.3390/polym10020158. ISSN 20734360. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/10/2/158/htm>
2. MANAS, David, Ales MIZERA, Miroslav MANAS, Martin OVSIK, Lenka HYLOVA, Stanislav SEHNALEK a Pavel STOKLASEK. Mechanical properties changes of irradiated thermoplastic elastomer. *Polymers* [online]. MDPI, 2018, 10(1), 87-100 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.3390/polym10010087. ISSN 20734360. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2073-4360/10/1/87>
3. HÝLOVÁ, Lenka, David MANAS, Miroslav MANAS, Lenka GAJZLEROVA a Ales MIZERA. Local mechanical properties of irradiated cross-linked HDPE. *Materiali in Tehnologije* [online]. 2018, 52(1), 27-29 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.17222/mit.2017.096. ISSN 15802949. Dostupné z: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit181/hylova.pdf>
4. JANOSTIK, Vaclav, Lenka HÝLOVÁ, David MANAS, Miroslav MANAS, Lenka GAJZLEROVA, Ales MIZERA a Michal STANEK. Local mechanical properties of irradiated cross-linked polypropylene. *Materiali in*

Tehnologije [online]. 2018, 52(1), 31-33 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.17222/mit.2017.097. ISSN 15802949. Dostupné z: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit181/janostik.pdf>

5. STOKLASEK, Pavel, Lenka HÝLOVÁ, David MANAS, Miroslav MANAS, Lenka GAJZLEROVA a Ales MIZERA. Local mechanical properties of irradiated cross-linked filled poly (butylene terephthalate) (PBT). *Materiali in Tehnologije* [online]. 2018, 52(1), 35-37 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.17222/mit.2017.098. ISSN 15802949. Dostupné z: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit181/stoklasek.pdf>

6. KUBIŠOVÁ, Milena, Vladimír PATA, Libuše SÝKOROVÁ, Lenka HÝLOVÁ a Oldřich ŠUBA. Multi-parameter surface-quality analysis. *Materiali in Tehnologije* [online]. 2018, 52(1), 23-26 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.17222/mit.2017.095. ISSN 15802949. Dostupné z: <http://mit.imt.si/Revija/izvodi/mit181/kubisova.pdf>

7. MANAS, David; STOKLASEK, Pavel; MANAS, Miroslav; MIZERA, Ales; TOMANOVA, Katarina; HYLOVA, Lenka. Effect of Beta Irradiation on Mechanical Properties of Surface Layer of Injection Moulded Polyamide 11. *KGK Kautschuk Gummi Kunststoffe*. 2018, vol. 71, no. 5 s. 30-33. ISSN:0948-3276

8. HÝLOVÁ, Lenka; MIZERA, Aleš; MIZERA, Martin; GRUND, Roman; OVSÍK, Martin. Mechanical Properties Study of High Impact Polystyrene Under Impact and Static Tests. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/448/1/012044/pdf>

9. OVSÍK, Martin, Lenka HYLOVA a Tomas FIALA. Influence of Process Parameters of Injection on Nano-mechanical Properties of Polypropylene. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, 448(1), 12015 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.1088/1757-899X/448/1/012015. ISSN 17578981. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/448/1/012015/pdf>

10. PATA, Vladimír; KUBIŠOVÁ, Milena; SÝKOROVÁ, Libuše; ŠUBA, Oldřich; HÝLOVÁ, Lenka. The Possibility of Statistically Eliminating Systematic Errors of Replicated Mould Surfaces in Evaluating Their Quality.

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/448/1/012049>

11. PATA, Vladimír; KUBIŠOVÁ, Milena; SÝKOROVÁ, Libuše; ŠUBA, Oldřich; HÝLOVÁ, Lenka. Utilization of Cluster Analysis in the Multi-dimensional Evaluation of Mould Surface Quality in Product Correlation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Dostupné z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/448/1/012048/pdf>

12. POSPÍŠILÍK, Martin; MIZERA, Aleš; MAŇAS, Miroslav; HÝLOVÁ, Lenka; PLEVA, Michal. Testing Device Design for Validation of Synchronization Between High Speed Camera and Drop Weight Test Machine. *Proceedings of the 2017 21st International Conference on Process Control, PC 2017*. 2017.

13. MAŇAS, David; MAŇAS, Miroslav; OVSÍK, Martin; STANĚK, Michal; CHVÁTALOVÁ, Lenka; STOKLÁSEK, Pavel; HÝLOVÁ, Lenka. Micro-hardness of Surface Layer of Irradiated Polybutene Terephthalate (PBT). *MATEC Web of Conferences 20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2016)*. 2016.

14. MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Pavel STOKLASEK, Martin BEDNARIK a Lenka HYLOVA. Mechanical properties and temperature stability of modified polybutylene terephthalate by beta rays. *MATEC Web of Conferences* [online]. EDP Sciences, 2016, 76, 2031 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.1051/matecconf/20167602031. ISSN 2261236X.

15. MIZERA, Aleš; MAŇAS, Miroslav; MAŇAS, David; STOKLÁSEK, Pavel; BEDNARÍK, Martin; HÝLOVÁ, Lenka. Mechanical Properties Change of Thermoplastic Elastomer After Using of Different Dosage of Irradiation by Beta Rays. *MATEC Web of Conferences 20th International Conference on Circuits, Systems, Communications and Computers (CSCC 2016)*. 2016.

16. OVSÍK, Martin, Lenka HYLOVA, David MANAS, Miroslav MANAS a Michal STANEK. Nano-hardness of Electron Beam Irradiated Polyamide 11. *MATEC Web of Conferences* [online]. EDP Sciences, 2016, 76, 2030 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.1051/matecconf/20167602030. ISSN 2261236X.

17. OVSÍK, Martin, Lenka HYLOVA, David MANAS, Miroslav MANAS a Michal STANEK. Micro-Hardness of PBT Influenced by Beta Radiation.

MATEC Web of Conferences [online]. EDP Sciences, 2016, 76, 2024 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.1051/mateconf/20167602024. ISSN 2261236X.

18. REZNICEK, Martin, Martin BEDNARIK, Lenka HYLOVA a David MANAS. Influence of measurement conditions and used devices on consequential creep modulus. *MATEC Web of Conferences* [online]. EDP Sciences, 2016, 76, 2025 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.1051/mateconf/20167602025. ISSN 2261236X.

19. MAŇAS, David; OVSÍK, Martin; MAŇAS, Miroslav; STANĚK, Michal; GAJZLEROVÁ, Lenka; MIZERA, Martin; GABKO, Libor; HÝLOVÁ, Lenka. Micro-hardness of Surface Layer of Irradiated Polypropylene. *Proceedings of the 2016 International Conference on Innovative Material Science and Technology (IMST 2016)*. 2016.

20. ŠKROBÁK, Adam; STANĚK, Michal; MAŇAS, David; OVSÍK, Martin; ŠENKERÍK, Vojtěch; ŘEZNÍČEK, Martin; HÝLOVÁ, Lenka. The Influence of the Injection Molding on Mechanical Properties of EPDM Rubber Testing Samples. *Proceedings of the 2016 International Conference on Innovative Material Science and Technology (IMST 2016)*. 2016.

22 publikací uvedených v databázi Scopus:

1. OVSÍK, Martin, Martin ŘEZNÍČEK, Vojtěch ŠENKERÍK, Michal STANĚK a Lenka HÝLOVA. The influence of radiation cross-linking on micro-indentation creep and the gel content of polyamide. *MM Science Journal* [online]. 2019, iss. March, s. 2819-2822. [cit. 2019-08-27]. ISSN 1803-1269. Dostupné z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/march-2019/articles/the-influence-of-radiation-cross-linking-on-micro-indentation-creep-and-the-gel-content-of-polyamide>

2. FIALA, Tomáš, Aleš MIZERA, Pavel STOKLÁSEK, Miroslav MAŇAS, Lenka HÝLOVÁ a Martin BEDNARIK. Study of ABS and SAN failures under dropweight impact test. *MM Science Journal* [online]. 2019, iss. March, s. 2814-2818. [cit. 2019-08-27]. ISSN 1803-1269. Dostupné z: <https://www.mmscience.eu/journal/issues/march-2019/articles/study-of-abs-and-san-failures-under-drop-weight-impact-test>.

3. OVSÍK, Martin, Lenka, HÝLOVÁ, Martin, ŘEZNÍČEK, Vojtěch ŠENKERÍK a Michal STANĚK. The influence of finishing operations on the

surface quality of injected parts. *Manufacturing Technology* [online]. 2019. vol. 19, iss. 3. [cit. 2019-08-27]. Dostupné z: <https://arl.ujep.cz/arl-ujep/cs/csg/?repo=ujeprepo&key=54842848543>

4. JANOŠTÍK, Václav, Michal STANĚK, Vojtěch ŠENKERÍK, Petr FLUXA a Lenka HÝLOVÁ. Effect of the pigment concentration on the dimensional stability and the melt flow index of polycarbonate. *Manufacturing Technology* [online]. 2019, vol. 19, iss. 3, s. 404-408. [cit. 2019-08-27]. ISSN 1213-2489. Dostupné z: <https://arl.ujep.cz/arl-ujep/cs/csg/?repo=ujeprepo&key=11534245111>

5. OVSÍK, Martin; STANĚK, Michal; DOČKAL, Adam; ŘEZNÍČEK, Martin; HÝLOVÁ, Lenka. Improving Surface Properties of Linear Polyethylene by Radiation Measured by Ultra-nano Indentation Test. *Materials Science Forum*. 2019. Dostupné z: <https://www.scientific.net/MSF.952.172>

6. OVSÍK, Martin, Michal STANĚK, Adam DOČKAL, Miroslav MAŇAS a Lenka HÝLOVÁ. Measurement of modified surface properties (Micro-creep) of polyamide by modern indentation method. *Materials Science Forum* [online]. 2019, vol. 952, s. 163-171. [cit. 2019-08-27]. ISSN 0255-5476. Dostupné z: <https://www.scientific.net/MSF.952.163>

7. OVSÍK, Martin; HÝLOVÁ, Lenka; FIALA, Tomáš. The Influence of Process Parameters of Injection on Nano-mechanical Properties of Polypropylene. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018. [cit. 2019-08-27]. Dostupný z: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/448/1/012015>

8. OVSÍK, Martin; HÝLOVÁ, Lenka; HUDEC, Ivan; DOČKAL, Adam. Nano-indentation Test of Electron Beam Irradiated Polyamide 11. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018. [cit. 2019-08-27]. Dostupné z: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/69/mateconf_csc2018_02037/mateconf_csc2018_02037.html

9. STANĚK, Michal, Martin ŘEZNÍČEK, Lenka HÝLOVÁ a Roman GRUND. The influence of the mold quality and injection pressure on the product quality. In: *MATEC Web of Conferences* [online]. Majorca: EDP Sciences, 2018 [cit. 2019-08-30]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/69/mateconf_csc2018_02043/mateconf_csc2018_02043.html

10. ŘEZNÍČEK, Martin, Michal STANĚK, Lenka HÝLOVÁ a David MAŇAS. The influence of the network density on the creep modulus of radiation crosslinked materials. *MM Science Journal* [online]. 2018, iss. June, s. 2350-2353. [cit. 2019-08-30]. ISSN 1803-1269. Dostupné z: <http://www.mmscience.eu/june-2018.html#201755>
11. REZNICEK, Martin, Martin OVSIK, Katerina ZETKOVA a Lenka HYLOVA. Influence of nanofillers on HDPE creep properties. *Materials Science Forum* [online]. Trans Tech Publications, 2018, 919, 120-127 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.919.120. ISSN 02555476. Dostupné z: <https://www.scientific.net/MSF.919.120>
12. HYLOVA, Lenka; REZNICEK, Martin; OVSIK, Martin; JANOSTIK, Vaclav. Correlation of the Prediction Curve of the Creep Behaviour of Polymeric Materials. *WSEAS Transactions on Business and Economics*. 2017, vol. 14 s. 391-396. ISSN:1109-9526.
13. MANAS, David, Miroslav MANAS, Martin OVSIK, Michal STANEK, Pavel STOKLASEK, Tomas FIALA a Lenka HYLOVA. Evaluation of mechanical properties of surface layer injection molded polypropylene by nanoindentation test. *Key Engineering Materials* [online]. Trans Tech Publications, 2016, 699, 86-90 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.699.86. ISBN 9783038355571. ISSN 10139826.
14. OVSIK, Martin, Lenka HYLOVA, David MANAS, Miroslav MANAS a Michal STANEK. Micro-Hardness of PBT Influenced by Beta Radiation. *MATEC Web of Conferences* [online]. EDP Sciences, 2016, 76, 2024 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.1051/mateconf/20167602024. ISSN 2261236X.
15. MAŇAS, David, Martin OVSIK, Miroslav MAŇAS, Michal STANĚK, Lenka HÝLOVÁ, Vojtech ŠENKEŘÍK a Michal OPOČENSKÝ. Micro-hardness of irradiated polyamide. *Defect and Diffusion Forum* [online]. Trans Tech Publications, 2016, 368, 162-165 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.368.162. ISBN 3038357200. ISSN 10120386.
16. OVSIK, Martin, Michal STANEK, Martin REZNICEK a Lenka HYLOVA. Study of nano-creep of unfilled and filled cross-linking polypropylene. *Materials Science Forum* [online]. Trans Tech Publications, 2018, 919, 103-110 [cit. 2019-08-27]. DOI:

10.4028/www.scientific.net/MSF.919.103. ISSN 02555476. Dostupné z: <https://www.scientific.net/MSF.919.103>

17. HÝLOVÁ, Lenka; MIZERA, Aleš; MAŇAS, Miroslav; STOKLÁSEK, Pavel; FIALA, Tomáš. The Multiaxial Behaviour Comparison of Virgin Polypropylene and Polypropylene Reinforced with 30 % Glass Fibres. *International Journal of Mechanics*. 2018.

18. MIZERA, Ales, Miroslav MANAS, David MANAS, Pavel STOKLASEK a Lenka HYLOVA. Impact resistance study of high-density polyethylene through drop-weight and tensile impact tests. *Materials Science Forum* [online]. *Trans Tech Publications*, 2018, 919, 246-253 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.919.246. ISSN 02555476. Dostupné z: <https://www.scientific.net/MSF.919.246>

19. HYLOVA, Lenka; MIZERA, Ales; MANAS, Miroslav; MANAS, David; SEHNALEK, Stanislav; KUBISOVA, Milena. Influence of Fall Height Setting on Drop Weight Tested Polypropylene and Its Crack Growing. *WSEAS Transactions on Environment and Development*. 2018, vol. 14 s. 243-250. ISSN:1790-5079. Dostupné z: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/environment/2018/a495915-011.pdf>

20. HYLOVA, Lenka a Miroslav MANAS. Impact behaviour of acrylonitrile-butadiene-styrene after temperature and humidity load. *MATEC Web of Conferences* [online]. EDP Sciences, 2017, 125, 2048 [cit. 2019-08-27].

21. SENKERIK, Vojtech, Michal STANEK, Martin OVSIK a Lenka HYLOVA. Study of tensile properties of recycled polypropylene with glass fibers at different temperature. *Key Engineering Materials* [online]. *Trans Tech Publications*, 2017, 756, 11-18 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.756.11. ISSN 10139826. Dostupné z: <https://www.scientific.net/KEM.756.11>

22. REZNICEK, Martin, Martin BEDNARIK, Lenka HYLOVA a David MANAS. Influence of measurement conditions and used devices on consequential creep modulus. *MATEC Web of Conferences* [online]. EDP Sciences, 2016, 76, 2025 [cit. 2019-08-27]. DOI: 10.1051/matecconf/20167602025. ISSN 2261236X.

ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA

Vzdělání

2015 – současnost

Studium **doktorského oboru Nástroje a procesy**

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická

Téma disertační práce - Vliv beta záření na mikro-tvrдость polymerů.

2013 – 2015

Studium prezenčního **magisterského oboru Inženýrství polymerů**

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická

Studium úspěšně ukončeno státní závěrečnou zkouškou z předmětů Makromolekulární chemie II., Gumárenská technologie a Kontrolní a zkušební metody

2010 – 2013

Studium prezenčního **bakalářského oboru Chemie a technologie materiálů** – zaměření Farmaceutické a medicínské materiály

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická

Studium úspěšně ukončeno státní závěrečnou zkouškou z Makromolekulární chemie I. a Zpracovatelského inženýrství polymerů

Praxe

Listopad 2018 – současnost

Asistent výzkumu a vývoje ve **Výzkumném a zkušebním leteckém ústavu a.s.** v Praze

Listopad 2015 – srpen 2019

Částečný pracovní úvazek ve společnosti CEBIA-Tech jako výzkumný projektový pracovník.

Červen – srpen 2017

Test inženýrka ve vývojových laboratořích v Hella Autotechnik Nova s.r.o. Mohelnice na DPP.

Leden 2017 – květen 2017

Odborná stáž ve firmě TryMat v Paskově, specializace na vývoj vstříkované měkčené PVC podlahoviny na válcované měkčené PVC potištěné UV vytvrditelným inkoustem.

Rok 2016, 2017 a 2018

Funkce hlavní řešitelky projektů IGA (interní grantová agentura).

Pedagogická činnost

Zimní semestr akademického roku 2017/2018

Výuka 1. ročníku bakalářského studia – Nauka o materiálu I.

Letní semestr akademického roku 2016/2017

Výuka 3. ročníku bakalářského studia – Nauka o materiálu II.

Zimní semestr akademického roku 2016/2017

Výuka 1. ročníku bakalářského studia – Nauka o materiálu I.

Ostatní činnost

- Od ledna 2018 do srpna 2019 členem akademického senátu fakulty technologické (AS FT) UTB Zlín
- Od ledna 2018 do srpna 2019 členem legislativní komise AS FT UTB Zlín
- Od ledna 2018 do srpna 2019 zvolena zástupcem studentů při účastech kolegia děkana FT UTB Zlín

Ing. Lenka Hýlová, Ph.D.

Vliv beta záření na mikro-tvrdotost polymerů

The Influence of Beta Radiation on Micro-Hardness of Polymers

Teze disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,
nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Náklad: vyšlo elektronicky

Sazba: Ing. Lenka Hýlová, Ph.D.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2019

Pořadí vydání: první

ISBN 978-80-7454-868-0

