

Disertační práce

Vliv beta záření na mikro-tvrдость polymerů

The Influence of Beta Radiation on Micro-Hardness of Polymers

Autor: **Ing. Lenka Hýlová**

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.
prof.h.c. prof. Ing. Karol Velíšek, CSc.

Zlín, listopad 2019

© Lenka Hýlová

Vydala **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně**

Publikace byla vydána v roce 2019

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

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

Práce je dostupná v Knihovně UTB ve Zlíně.

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 Hříbové, 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 kríp. 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 PRÁCE	5
3. TEORETICKÝ RÁMEC.....	6
3.1 Úvod do polymerů	6
3.1.1 Rozdělení polymerů dle tvaru makromolekul	8
3.1.2 Rozdělení polymerů na termoplasty, reaktoplasty a elastomery	10
3.1.3 Nadmolekulární struktura polymerů.....	10
3.2 Polyamidy	12
3.2.1 Využití polyamidů	14
3.2.2 Polyamid 6.....	16
3.3 Vysoce energetická záření	17
3.3.1 Zdroje vysoce energetických záření	17
3.3.2 Záření elektronového paprsku	18
3.4 Síťování polymerů	19
3.4.1 Výhody a nevýhody síťování polymerů pomocí záření elektronového paprsku	20
3.4.2 Vliv procesu síťování na polyamidy	21
3.4.3 Síťovací urychlovač triallylisokyanurát (TAIC)	22
4. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ	24
4.1 Vstříkování.....	24
4.1.1 Postup vstříkování	24
4.2 Instrumentální zkouška tvrdosti – DSI (Depth Sensing Indentation).....	27
4.2.1 Indentační tvrdost - H_{IT}	27
4.2.2 Indentační elastický modul - E_{IT}	28
4.2.3 Indentační kríp - C_{IT}	28
4.2.4 Faktory ovlivňující přesnost měření mikro-mechanických vlastností	29
4.3 Fourierova transformační infračervená spektrometrie (FTIR)	30

4.3.1	Princip metody	30
4.3.2	Metoda ATR.....	31
4.3.3	Popis zařízení	32
4.4	Dynamická mechanická analýza (DMA)	34
4.4.1	Princip metody	34
4.4.2	Aplikace DMA	34
4.4.3	Popis zařízení	35
4.5	Mikroskopie atomárních sil (AFM – atomic force microscopy)	37
4.5.1	Popis metody a zařízení	37
4.5.2	Využití AFM	38
5.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	39
5.1	Materiál.....	39
5.2	Příprava zkušebních těles	39
5.3	Sít'ování zkušebních těles.....	39
5.4	Mikro-mechanické vlastnosti	41
5.5	Termo-mechanická analýza (TMA)	42
5.6	Fourierova transformační infračervená spektrometrie (FTIR).....	44
5.7	Mikroskopie atomárních sil (AFM)	46
6.	VÝSLEDKY	48
6.1	Mikro-mechanické vlastnosti	48
6.1.1	Indentační tvrdost.....	48
6.1.2	Indentační modul pružnosti.....	56
6.1.3	Indentační kríp	64
6.2	Termo-mechanická analýza (TMA).....	72
6.3	Fourierova transformační infračervená spektrometrie (FTIR).....	92
6.4	Mikroskopie atomárních sil (AFM)	95
7.	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	99
8.	PŘÍNOS PRO VĚDU A PRAXI	101
9.	ZÁVĚR	102

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	103
SEZNAM OBRÁZKŮ	108
SEZNAM TABULEK	112
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	113
PŘÍLOHY	115
PUBLIKAČNÍ AKTIVITY AUTORA	117
ODBORNÝ ŽIVOTOPIS AUTORA	124

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 zesítňoval 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 zesítňovali 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 zesítňování. 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 zesítňování 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-tvrdost 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 vstříkování poté nechala ozářit zrychlenými elektrony o energii 10 MeV dávkami 50, 100, 200, 300 a 500 kGy s 50 % dávkou 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 popsáního článku ve větším rozmezí koncentrací TAIC při nižších radiálních dávkách.

2. CÍLE 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

Teoretická část je věnována charakterizaci polymerů, jejich rozdělení a vlastnostem. Dále zahrnuje charakterizaci polyamidů všeobecně a polyamidu 6, popis záření elektronového paprsku (jeho výhod a nevýhod) a popis procesu síťování polymerů a charakterizaci jeho vlivu na materiálové vlastnosti polymeru.

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.

Avšak také plasty mají své nevýhody jako je jejich nedostatečná biodegradabilita a také těžba ropy, která je nezbytná pro jejich výrobu. Tyto problémy by měly být řešeny recyklací a vývojem biodegradabilních plastů a dalšími ekologicky přijatelnými vylepšeními. Také aplikace plastů pro denní lidskou spotřebu jsou limitující. Výrobky z plastů je možné najít všude. Největší celosvětovou aplikací pro plasty je obalový průmysl zahrnující nespočet produktů, jako jsou kontejnery, lahve, barely, podnosy, boxy, kelímky a prodejní balení, produkty pro děti a ochranné obaly. Typickými materiály používanými v této oblasti jsou nízkohustotní polyetylen, vysokohustotní polyetylen, polypropylen, polystyren a polyethylentereftalát.

Dalšími největšími konzumenty plastických produktů je stavebnictví. Poněvadž mají plastické materiály všestrannost použití a kombinaci excelentního poměru pevnost k hmotnosti, trvanlivost, efektivnost nákladů, odolnost vůči

korozí, nízké náklady na údržbu, jsou atraktivním výběrem pro stavební sektor. Trubky, obkladové desky, izolace, střešní materiál, dveřní a okenní rámy, tyto všechny výrobky jsou z plastu a použité materiály nejsou limitovány pouze materiály používanými v obalovém průmyslu, ale jsou také vyráběny z jiných typů materiálů, jako je například polyvinylchlorid.

Dalšími důležitými odvětvími jsou elektrické a elektronické zařízení. Většina vodičů z elektronických přístrojů jsou uzavřeny v plastech. Většina venkovních elektronických zařízení, telefony, mobilní telefony, svítidla, ventilátory, počítače a televize, jsou také z plastů. V této oblasti se nejvíce používají materiály jako polykarbonát, polyamid, akrylonitrilbutadienstyren a styrenakrylonitril. V současné době je mnoho kritických částí automobilů vyrobeno z plastových materiálů, jako jsou volanty, sběrné sací potrubí, stěrače čelního skla, nárazníky, světlomety, palivová čerpadla.

Vzhledem k rychlému vývoji plastových materiálů a jejich použití v posledních desetiletích tato materiálová rodina stále roste. V posledních letech vědci a inženýři v oblasti materiálů vyvinuli plastové materiály s tvarovou pamětí, které jsou polymerními inteligentními materiály mající schopnost vrátit se z deformovaného stavu vyvolaného vnějším stimulem, jako je změna teploty, na původní nebo trvalé tvary. S nárůstem nanotechnologie se nanoplast stává novou inženýrskou oblastí. S nanostrukturními jednotkami nanokompozitů přidanými k původním plastickým materiálům mohou mít výsledné nanoplasty některé jedinečné vlastnosti, jako je odolnost vůči vodě a bakteriím, vysoká teplotní tolerance a vysoká pevnost.

Polymer je druh organického polymerního materiálu s obrovskými molekulami, jejichž základními složkami jsou stovky nebo tisíce monomerů připravených synteticky nebo polosynteticky, většinou organických molekul jako je uhlík, vodík, kyslík nebo dusík. Poněvadž jsou polymery materiálovou skupinou s velkou rozmanitostí, mohou také obsahovat anorganické složky, jako je síra, chlor, fluor nebo brom. [11]



Obr. 1: Výrobky z plastu [12]

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

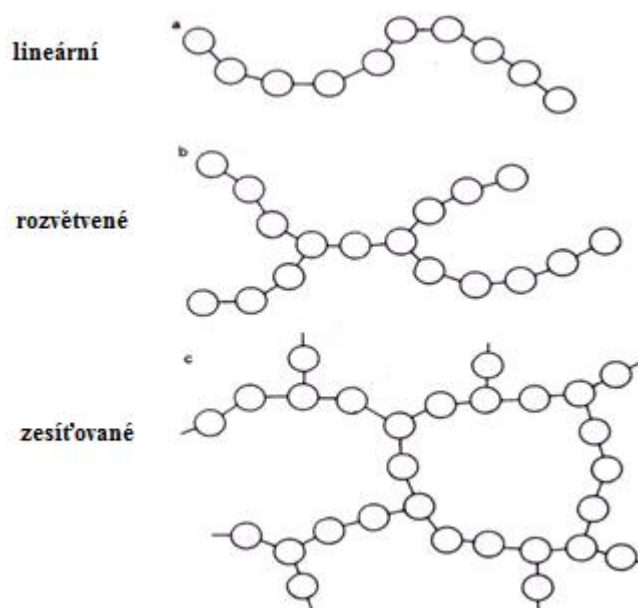
Blokový kopolymer by měl být uspořádán s dvěma polymerními jednotkami připojenými jedna k druhé.

Např.: AAAAAAAAAAAAAAABBBBBBBBBBBBBBBB. [13]

- **rozvětvené** - Tyto polymery mají boční řetězce, které tvoří sterickej efekt. Toto může často způsobovat redukovanou hustotu. Nízkohustotní polyethylen či polyethylen se střední hustotou jsou polyethyleny, které mají boční řetězce. Tyto boční řetězce vytváří sterickej překážky, které omezují

sousedící polymerní řetězce v pohybu a tím dochází ke vzniku nižší hustoty a tuhosti. [14]

- **zesíťované** - Zesíťované 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. [15]



Obr. 2: Lineární, větvené a zesíťované polymery [16]

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 Waalovi 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. [15]
- **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. [15]
- **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 Waalovými přitažlivými silami. Zahříváním elastomerů nad jejich T_g vede k degradaci jejich zesíťovaných částí uvnitř jejich struktury. [15]

3.1.3 Nadmolekulární struktura polymerů

Termoplasty se v závislosti na jejich uspořádanosti rozdělují na amorfní a krystalické neboli semi-krystalické. Když je jakýkoliv termoplast zahřátý z velmi nízké teploty, je podroben fyzikálnímu přechodu z nízkoteplotního skelného stavu do stavu kaučkovitého. Ačkoliv je tento přechod složen z několika stupňů, pouze jedna teplota je označována jako T_g . Polymery mající pouze T_g jsou nazývány amorfními polymery, např. polystyren, polyvinylchlorid a polykarbonát. Když polymery prochází ještě druhým fyzikálním přechodem a to z kaučkovitého stavu do taveniny, jedná se o krystalické neboli semi-krystalické

polymery, např. polyetylen, polypropylen, polyamid atd. Tato teplota je nazvána teplotou tání (T_m). Všechny polymery vlastní T_g , pouze krystalické polymery mají navíc T_m . [17]

Segmenty polymerního řetězce se pohybují pomocí tzv. Mikrobrownova pohybu, který lze pozorovat ve všech částicích hmoty, které konají rotačně vibrační pohyby a jejichž intenzita a amplituda je úměrná teplotě. Při zvyšování teploty dochází u polymerů k viditelným změnám vlastností. Tyto změny jsou vázány k charakteristickým teplotám. Při zvýšení teploty dochází k uvolnění pohybu segmentů řetězců a ke změně chování, a to z křehkého na chování viskoelastické. Teplota, při níž dochází k této změně, se nazývá teplota skelného přechodu – T_g . Tuto teplotu má každý polymer, poněvadž i v semi-krystalických polymerech (žádný polymer nedosáhne nikdy 100 % krystalinity) je vždy obsažena i amorfní část. Pod T_g jsou termoplasty tvrdé a křehké – stav sklovitý. Namáháním makromolekul dojde jen k malým elastickým deformacím. [18]

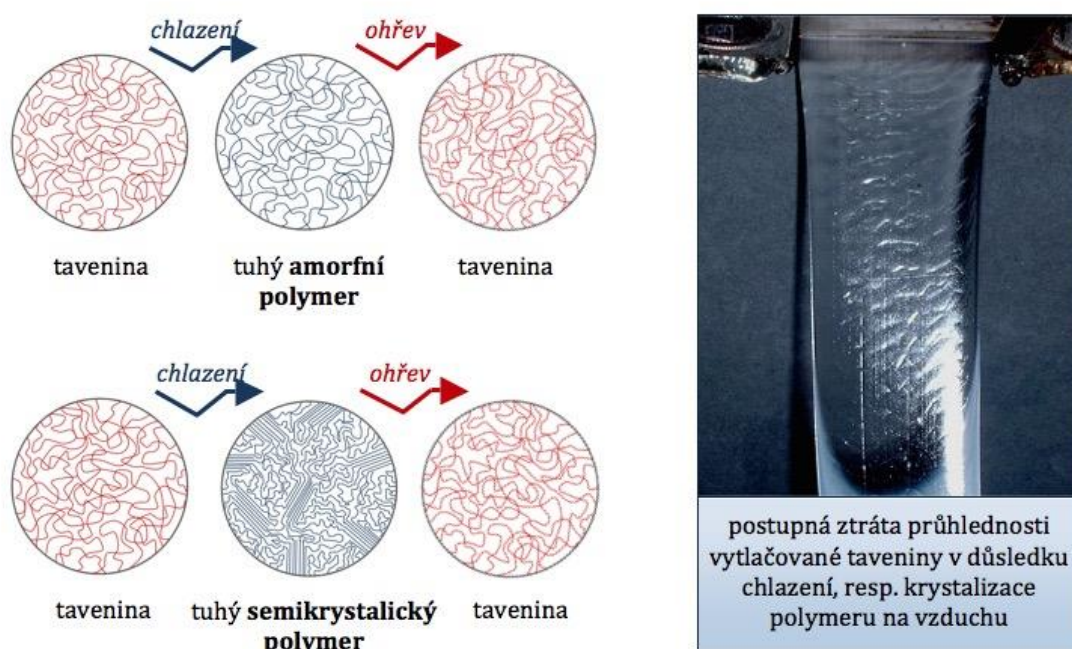
Polymery (zejména málo větvené a lineární) jsou schopné dosáhnout určitého stupně krystalizace, a to z taveniny nebo ze zředěných roztoků. Krystalizace v tomto případě vzniká skládáním se do lamel (destičkové útvary s tloušťkou cca 10 nm s plošnými rozměry v řádech mikrometrů) do pravidelných struktur. Lamely se skládají dendritickým způsobem do kulovitého útvaru tzv. sferolitu. Prostory mezi lamelami jsou v případě částečné krystalizace vyplněny amorfní strukturou.

V případě, když polymer není schopen samovolného uspořádání se při přechodu z kapalného do tuhého stavu, zůstávají jeho řetězce v tzv. statistickém klubku i ve stavu tuhém. Tyto polymery bez pravidelné nadmolekulární struktury jsou označovány jako amorfní.

U semi-krystalických i amorfních polymerů jsou jejich makromolekulární řetězce pevně vázány mezimolekulárními silami (v pevném stavu). Na intenzitě těchto sil závisí zejména mechanické vlastnosti polymerů. Síla působení mezimolekulárních sil je nepřímo závislá na vzájemné vzdálenosti molekul. V případě semi-krystalických polymerů je vzdálenost nejmenší, z tohoto důvodu mají tyto polymery oproti polymerům amorfním lepší mechanické vlastnosti, které jsou méně závislé na teplotě. Krystalické fáze polymerů mají také vyšší hustotu než amorfní. Krystalické polymery mají také větší smrštění, poněvadž při krystalizaci dochází ke zmenšování objemu.

Stupeň krystalinity závisí na složení a velikosti sférolitů a na chemické struktuře polymeru, jeho délce a větvení řetězce. Podle typu polymeru lze obsah krystalické části charakterizovat do 90 % objemu. Semi-krystalické polymery mají smrštění v případě absence plniv 1 – 3,5 %, zatímco polymery amorfnní 0,2 – 0,8 %. Semi-krystalické polymery bývají obvykle neprůhledné a jejich tepelná odolnost je vysoce nad T_g , zatímco amorfnní polymery, jsou obvykle transparentní a použitelné do teploty T_g .

Existují nově vyvinuté katalyzátory (metallocenní), které ovlivňují dělení polymerů na semi-krystalické a amorfnní. Tento katalytický systém umožňuje např. vyrobit transparentní PP a naopak umožňuje vyrobit částečně krystalický PS [18].



Obr. 3: Struktura amorfnních a semikrystalických polymerů v závislosti na teplotě [14]

3.2 Polyamidy

Polyamidy se vyrábějí buď reakcí kyseliny s aminem, nebo polymerizací otevřením kruhu laktamů. Mohou být alifatické, semi-aromatické nebo plně aromatické. Aromatické polyamidy nazývané aramidy, mají vyšší pevnost, vyšší odolnost vůči plameni a teplotě a také mají lepší rozměrovou stálost než všechny alifatické polyamidy. Jejich nevýhodou je dražší cena a obtížnější výroba.

Mezi nejdůležitější aromatické polyamidy patří poly(p-fenylentereftalamid) známý také jako Kevlar a poly (m-fenylenisoftalamid). Plně aromatická struktura a silné vodíkové vazby mezi aramidovými řetězci vedou k vysokým teplotám tavení (obecně nad teplotou rozkladu $> 750 \text{ K}$), extrémně vysokou pevnost v tahu při nízké hmotnosti a vynikající odolnosti proti plameni a teplu, stejně jako dobrá rozměrová stabilita a odolnost vůči rozpouštědlům při pokojové a zvýšené teplotě.

Alifatické polyamidy jsou vyráběny v mnohem větším měřítku než plně aromatické polyamidy a jsou nejdůležitější třídou technických termoplastů. Jsou amorfní nebo jen středně krystalické při vstřikování, ale stupeň krystalinity může být mnohem větší u aplikace vláken či filmů pomocí orientace mechanickým roztažením. Dva nejdůležitější polyamidy jsou poly (hexametylenadipamid) (polyamid 6.6) a polykaprolaktam (polyamid 6). Oba mají vynikající mechanické vlastnosti, včetně vysoké pevnosti v tahu, vysoké pružnosti, nízkého krípu a vysoké houževnatosti. [18]



Obr. 4: Výrobky z polyamidů [19]

Jsou snadno barvitelné a vykazují vynikající odolnost proti opotřebení díky nízkému koeficientu tření (samomazné). Oba polyamidy mají vysokou teplotu tání ($500 - 540 \text{ K}$) a teplotu skelného přechodu, což vede k dobrým mechanickým vlastnostem při zvýšených teplotách. Například teplota tepelného průhybu (HDT) PA 6.6 je typicky mezi 180 a $240 \text{ }^\circ \text{C}$, která přesahuje teplotu polykarbonátu a polyesteru. Mají také dobrou odolnost vůči olejům, zásadám, plísním a mnoha rozpouštědlům. Hlavním omezením je silná citlivost na vlhkost (voda působí jako změkčovadlo) a výsledné změny mechanických vlastností. Například pevnost v tahu vlhkého polyamidu může být o více než 50% nižší než u suchého polyamidu.

Dalším důležitým polyamidem je polyamid 6.12. Je méně hydrofilní než polyamid 6.6 a 6 kvůli většímu počtu metylenových skupin v polymerním řetězci. Z tohoto důvodu má lepší odolnost proti vlhkosti, rozměrovou stabilitu a elektrické vlastnosti, ale stupeň krystalinity, teplota tání a mechanické vlastnosti jsou nižší. Další komerčně dostupné polyamidy zahrnují polyamid 4.6, polyamid 6.10 a polyamid 11.

Další důležitou třídou polyamidů jsou semi-aromatické polyamidy, známé také jako polyftalamidy (PPA). Jsou to tavitelné, semi-krystalické termoplastické pryskyřice vyrobené kondenzací alifatického diaminu, jako je hexametylendiamin s kyselinou tereftalovou a / nebo izoftalovou. Aromatická část typicky obsahuje alespoň 55 molárních % opakujících se jednotek v polymerním řetězci. Kombinace aromatických a alifatických skupin výrazně snižuje absorpci vlhkosti, což vede k malým rozměrovým změnám a mnohem stabilnějším vlastnostem. PPA tak vyplňují mezery výkonu mezi alifatickými polyamidy, jako jsou PA 6.6 a PA 6, a mnohem dražšími polyaramidy. Jsou většinou krystalické a nabízejí vysokou pevnost a tuhost při zvýšených teplotách. Nicméně tyto pryskyřice jsou dražší než alifatické polyamidy a je obtížnější je zpracovávat kvůli jejich vyšší teplotě tání. Pro zlepšení zpracovatelnosti a snížení nákladů jsou někdy smíchány s alifatickými polyamidy, jako je polyamid 6.6.

Mezi nejčastěji používané semi-aromatické polyamidy patří poly (hexametylentetraftalamid) (PA 6T) a poly (hexamethylenisoftalamid) (6I). Tyto pryskyřice mají velmi vysokou teplotu tání (6T: $T_m \approx 595$ K) a teplotu skelného přechodu (6T: $T_g \approx 410$ K). Jsou známé díky vynikající rozměrové stabilitě, nízkému tečení při zvýšených teplotách a dobré chemické odolnosti srovnatelné s o mnoho více výkonnými technickými plasty.

Polyamidy mají několik výhod oproti jiným třídám technických polymerů. Například jsou odolnější vůči alkalické hydrolyze než polyestery, ale nejsou odolné vůči kyselé hydrolyze. Mají také lepší odolnost proti rozpouštědlům vůči mnoha organickým tekutinám ve srovnání s PET a PC. [18]

3.2.1 Využití polyamidů

Alifatické polyamidy jako polyamid 6.6 a polyamid 6 jsou široce používány pro strojírenské a průmyslové aplikace. Nevyztužené polyamidy mají horní teplotu pro nepřetržité použití kolem 340 – 350 K, zatímco sklem a minerálními plnivými vyztužené polyamidy kolem 370 – 390 K. Aplikace zahrnují téměř každý průmysl a trh. Například v automobilovém průmyslu se používají polyamidy pro

oplaštění drátů a kabelů, ventilátory, přívod vzduchu, turbo vzduchové kanály, kryty ventilů a motorů, nádržky brzd a posilovače řízení, ozubená kola pro stěrače a tachometry. Inženýrské polyamidy se také používají pro skříně, ventily a prodejní automaty pro různé stroje a čerpadla a pro mnoho elektrických / elektronických součástí včetně spínačů, zásuvek, zástrček a zařízení pro upevnění antény.

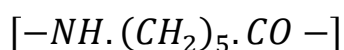
Více než 60 % vyrobených alifatických polyamidů se používá v komerčních aplikacích pro výrobu vláken. Patří sem koberce, oděvy, bezpečnostní pásy, čalounění, lana a vyztužení pneumatik. I přes to, že textilie vyrobené z polyamidu mají menší odolnost proti pomačkání nežli tkanina vyrobená z polyesteru, je dražší. Z těchto důvodů polyamidová vlákna v průběhu let ztratila určitý podíl na trhu s PET vlákny.

Aromatické polyamidy jsou mnohem dražší, ale mají vynikající mechanické vlastnosti. Používají se pro velmi náročné aplikace v mnoha průmyslových odvětvích. Příklady zahrnují lana a kabely, neprůstřelné vesty, tenisové struny, hokejky (jako kompozit), snowboardy, kryty tryskových motorů, části brzdového a převodového součásti a těsnění.

Semi-aromatické polyamidy jsou často nákladově efektivní alternativou dražších plně aromatických aramidů. Vyplňují výkonnostní mezery mezi alifatickými polyamidy a mnohem dražšími polyaramidy. Často jsou dobrou volbou, když výrobky musí odolat dlouhodobému vystavení drsnějším chemikáliím anebo vyšším teplotám. Mezi běžné aplikace patří části motoru, konektory palivového vedení, čerpadla chladicí kapaliny, pouzdra, ložiska v leteckých motorech, chladiče náboje, rezonátory, součásti krytu motoru a tepelné štíty, ventily rozdělovače paliva a ohřivače vody, konektory, vysokonapěťová pouzdra, a součásti reflektorů. [18]

3.2.2 Polyamid 6

PA 6 patří 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. [20]



Obr. 5: 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.), [20]

Polyamid 6 je semi-krystalický termoplastický polymer vlastní 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. [21, 22]

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. [23]

3.3 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. [24]

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. [24]

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. [24]

3.3.1 Zdroje vysoce energetických záření

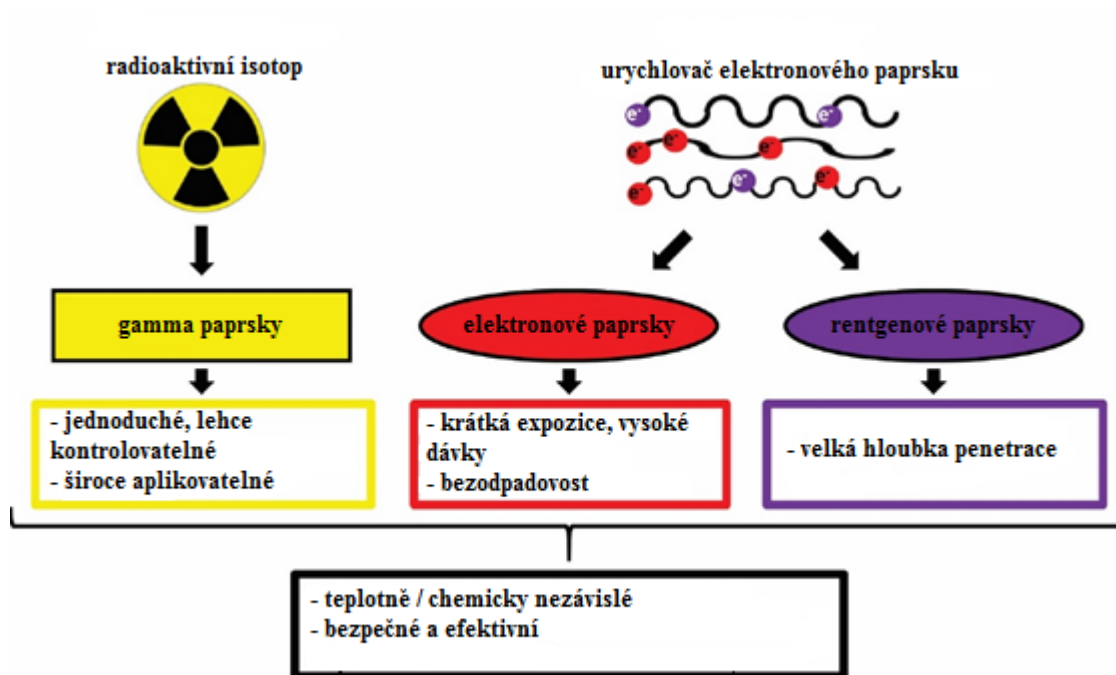
Zdroje vysoce energetických záření je možné rozdělit na:

- kobalt-60 je zdrojem γ -paprsků (1,17-1,33 MeV),
- cesium-137 je také zdrojem γ -paprsků (0,66 MeV),
- elektronové urychlovače (0,1-12 MeV),
- rentgenové záření z urychlovačů (3-10 MeV). [24]

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 [24].

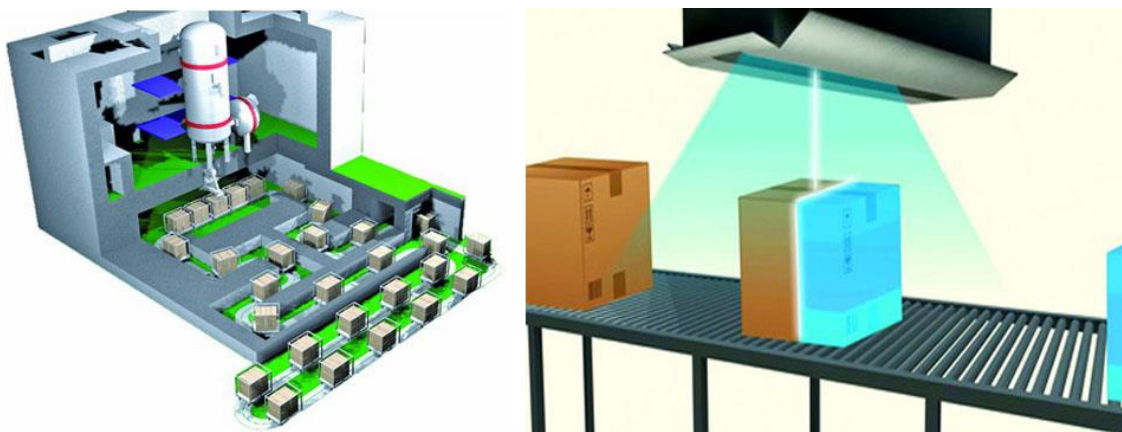
Zdroj γ záření poskytuje hlubší penetraci do materiálu, avšak za delší dobu, zatímco záření elektronového paprsku poskytuje rychlejší ozařování s mělčí penetrací do vzorku. [24]



Obr. 6: Porovnání vysoce energetických záření [25]

3.3.2 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. [26]



Obr. 7: Zdroj elektronového záření – elektronový urychlovač [27]

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. [26]

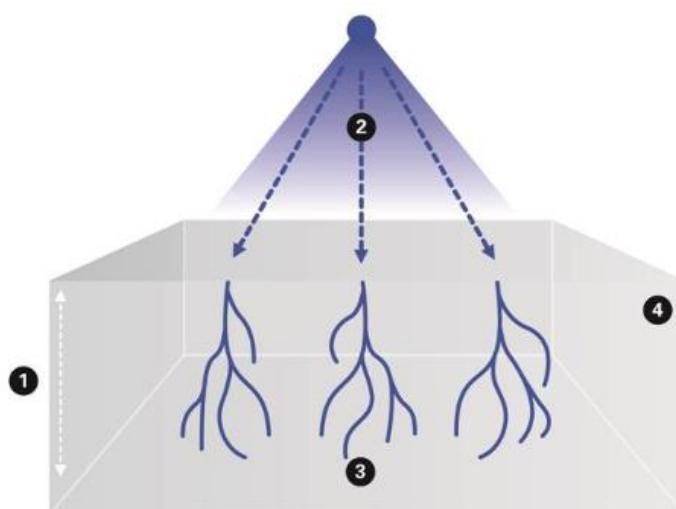
Průmyslové elektronové urychlovače mají rozsah od 300 keV do 5 MeV . Urychlovače s vysokou energií obvykle mají energii $> 5 \text{ MeV}$, ačkoli pro průmyslové aplikace se nepoužívají energie $> 15 \text{ MeV}$, protože takto vysokou energii může být indukována radioaktivita. Radioaktivita je zanedbatelná u většiny polymerních materiálů ošetřovaných energiemi elektronů menších než 10 MeV [26].

3.4 Síťování polymerů

Síťování polymerů je chemický proces, při kterém dochází k tvorbě příčných vazeb ve sktruktuře 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. [24]

Dalším důležitým faktorem při síťování polymerů je velikost absorbované dávky, která je funkcí výstupní rychlosti ozařovací jednotky, při dané struktury polymeru. Díky tomu je síťování spolehlivým procesem, poněvadž všechny zásadní parametry je možné regulovat [24].



Obr. 8: Princip ozařování urychlenými elektrony

*1 - hloubka vniknutí elektronů, 2 - primární elektrony, 3 - sekundární elektrony,
4 - ozářený materiál [24]*

3.4.1 Výhody a nevýhody síťování polymerů pomocí záření elektronového paprsku

Ve srovnání s chemickými procesy pro úpravu polymerních vlastností s podobnou reakcí, ale použitím chemikálií, často s teplem, má radiační zpracování polymerů výhody i nevýhody. Mezi výhody patří vyšší výkonnost kvůli rychlejšímu zpracování, úspora energie díky zpracování při pokojové teplotě, menší citlivost na vlhkost, významná redukce těkavých organických

sloučenin, protože se nepoužívá žádné rozpouštědlo a vyšší čistota a nižší toxicita, protože není zapotřebí žádných nebo méně toxických chemikálií. Záření elektronového paprsku je v porovnání například s γ zářením bez environmentálních rizik. Má vyšší energii, avšak kvůli velmi malé hmotnosti elektronů má ionizační beta záření rychlou energetickou ztrátu po interakci s ozařovaným materiálem, a tak i nízkou penetraci. Penetrace záleží na energii záření, hustotě ozařovaného materiálu a na geometrii produktu [24].

Mezi další výhody sítování termoplastů záření elektronového paprsku je zlepšení jejich materiálových vlastností na takovou úroveň, že to takto upravené termoplasty posouvá kvalitativně na úroveň vyšších tříd polymerů. Modifikace pomocí ozařování zároveň umožňuje využívání stávajících materiálů v nových aplikacích [24].

Radiační zpracování polymerů má také několik nevýhod. Ačkoli denní provozní náklady nemusí být vysoké, systém ozařování je obvykle drahý pro slušnou průmyslovou výkonnost a kapacitu, takže vyžaduje značnou investici. Provozní náklady na zpracování záření závisí silně na objemu materiálu, takže může být výrazně vyšší než chemická modifikace, pokud objem modifikovaného materiálu není dostatečně vysoký. V některých případech jsou vlastnosti dosahované ozařováním stále nižší než vlastnosti, které lze dosáhnout chemickou modifikací. Nedostatek porozumění a přijetí radiační technologie veřejností je také překážkou. Je důležité si uvědomit, že hlavní konkurencí při zpracování záření je chemická modifikace. Aby se dosáhlo skutečného potenciálu přidané hodnoty ozařování polymerů, je rozhodující pro komerční úspěch, aby zpracování ozařování poskytlo více výhod než nevýhod a snížit náklady na stejnou úroveň a zlepšení vlastností ve srovnání s konkurenčními chemickými modifikacemi [26].

Současná ozařovací centra jsou schopna dosahovat velmi vysokých rychlostí (mnoha set metrů za minutu) a proto je tento proces schopen konkurovat chemickým metodám sítování [24].

3.4.2 Vliv procesu sítování na polyamidy

Vliv vysoce energetického záření na vlastnosti polymerních materiálů je komplexní a závislý na struktuře polymerů, molekulové hmotnosti, polymerním stavu a úrovni krystalinity. Rychlost ozařování a atmosféra během ozařování jsou

hlavními faktory. Síťování, degradace a tvorba plynů jsou hlavními procesy. Tyto procesy vedou ke změně vlastností polymerů [28].

Polyamidy jsou přiřazeny do rodiny polymerů, které je možné síťovat jak pomocí záření elektronového paprsku, tak pomocí γ paprsků. U tohoto polymeru se objevuje jak síťování, tak štěpení řetězce. Výtěžek síťování velmi dobře koreluje s množstvím methylových skupin ($-\text{CH}_2-$), které jsou přítomny ve struktuře polyamidu. Absorbovaná voda v polyamidu zlepšuje síťování při vyšší koncentraci, a zároveň tlumí proces při nízké koncentraci [28].

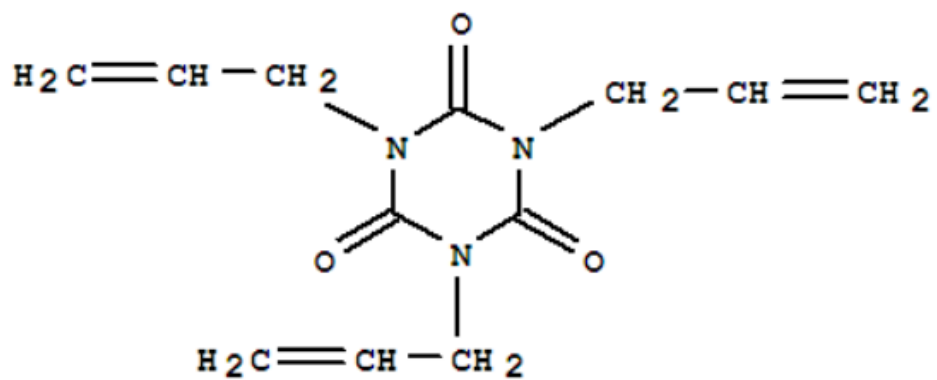
Polyamidy vykazují změnu barvy jak při ozařování pomocí záření elektronového paprsku, tak pomocí γ paprsků. Změna barvy je důsledek tvorby radikálů. Radikál je většinou vytvořen na α uhlíku sousedícího s amidovým dusíkem. Blokací vodíkového atomu na α uhlíku například fenylovou skupinou dochází k vysoké redukci výtěžku jak síťování, tak štěpení [28].

Tak jako u mnoha dalších polymerů, vliv ozařování na fyzikální vlastnosti polyamidů je silně ovlivněn atmosférou během ozařování. Aromatické polyamidy jsou mnohem více odolné vůči ozařování v porovnání s alifatickými polyamidy [28].

3.4.3 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 [26].

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 [26].



Obr. 9: Strukturní vzorec síťovacího urychlovače TAIC [29]

4. ZVOLENÉ METODY ZPRACOVÁNÍ

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 (dynamická mechanická analýza) a zhodnocení vlivu ozařování na topografii povrchu zkušebních těles (mikroskop atomárních sil).

4.1 Vstřikování

Technologie vstřikování je používána pro výrobu buď konečných výrobků, polotovarů anebo dílů pro následnou kompletaci celku. Výrobky vyrobené touto technologií mají velmi dobrou tvarovou i rozměrovou přesnost a reprodukovatelnost fyzikálních i mechanických vlastností. Technologie vstřikování patří mezi nejrozšířenější technologie zpracování plastů. Jedná se o cyklický výrobní proces, díky kterému lze zpracovávat téměř všechny termoplasty a v jisté míře i kaučuky a reaktoplasty.

Vstřikování je technologie, při které je dávka zpracovávaného polymeru vstříknuta velkou rychlostí z pomocné do uzavřené dutiny kovové formy, kde nastane díky ochlazení ztuhnutí materiálu do tvaru finálního výrobku. Dutina formky je v průběhu cyklu doplňována materiálem (dotlak).

Mezi největší výhody vstřikování patří jeho krátký čas cyklu, možnost výroby složitých součástí s drobnými tolerancemi rozměrů a výbornou povrchovou kvalitou a v neposlední řadě konstrukční flexibilita, která je schopna nahradit konečné úpravy povrchu a montážní operace.

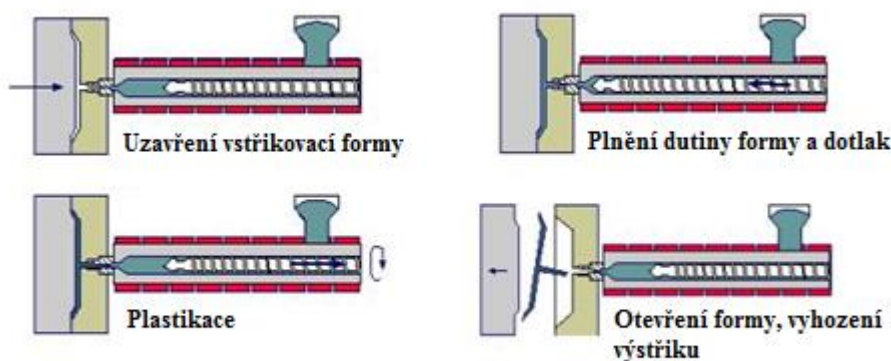
Hlavní nevýhoda této technologie je finanční náročnost (stroj a nástroj), dlouhá doba nutná pro výrobu forem a potřeba využívání strojního zařízení, které je neúměrně velké v porovnání se vstřikovaným výrobkem. [30]

4.1.1 Postup vstřikování

Plast v podobě granulátu je z násypky odebírán pracovní částí vstřikovacího stroje (šnekem), který materiál dopravuje do tavicí komory. Tam dochází pomocí tření a topení k tavení granulátu a k tvorbě taveniny, která je vstřikována do dutiny formy. Tavenina dutinu formy zcela vyplní a ponechá si její tvar. Poté následuje tlaková fáze (dotlak), která eliminuje rozměrové změny a smrštění materiálu,

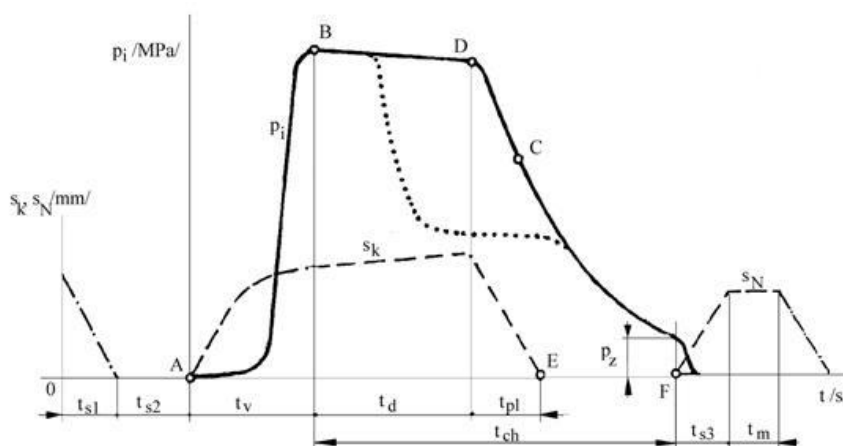
který předává formě teplo a vnějším ochlazováním formy finální výrobek ztuhne do požadovaného tvaru. Po otevření formy je výrobek vyhozen pomocí vyhazovačů a celý cyklus je možné opakovat.

Vstřikovací cyklus je tvořen přesným sledem specifikovaných úkonů. Jedná se o neizotermický proces, při němž dochází k teplotním cyklům materiálu. [30]



Obr. 10: Vstřikovací cyklus [30]

Vstřikovací cyklus je možné také definovat pomocí závislosti tlaku v dutině formy na čase. Tento tzv. vnitřní tlak se značí p_i . Tlak vztažený na jednotku plochy průřezu šneku se značí p a jedná se o tzv. vnější tlak.



Obr. 11: Průběh vnitřního tlaku v dutině formy během procesu vstřikování
 p_i - vnitřní tlak, s_k - pohyb šneku, s_n - pohyb nástroje [30]

Dutina formy je na počátku vstřikovacího cyklu otevřená a prázdná. Po obdržení impulsu k zahájení vstřikovacího cyklu se začne pohyblivá část formy přisouvat k pevné a forma se uzavře a uzamkne – strojní časy. Pro přisouvání

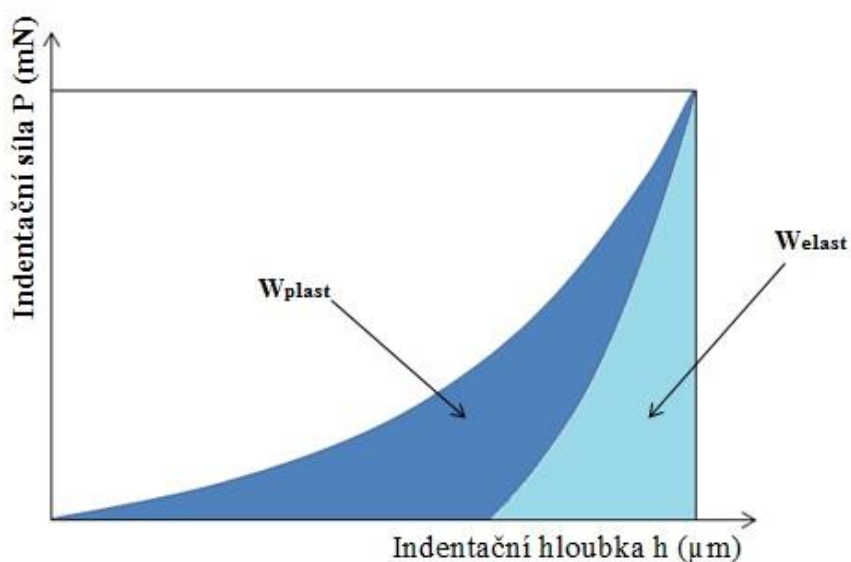
formy je potřeba jen malé přisouvací síly F_p , zatímco na uzamknutí formy je třeba vynaložit o mnohem vyšší uzavírací síly F_u , která je až třikrát vyšší, a to z důvodu, aby se forma vlivem tlaku taveniny neotevřela. Poté dochází k pohybu šneku v tavicí komoře a dochází k vlastnímu vstřikování do dutiny formy. V této fázi cyklu vykonává šnek pouze axiální pohyb bez rotace, tímto plní funkci pístu. Po vyplnění dutiny formy taveninou dochází k jejímu stlačení až na maximální hodnotu tlaku.

Ihned při vstupu taveniny do dutiny formy začíná tavenina předávat teplo vstřikovací formě a tím začíná chlazení, které trvá až do otevření formy a následného vyjmutí výrobku. Doba chlazení výrobku je závislá na tloušťce stěny výrobku a na teplotě formy. Při ochlazování dochází ke smršťování materiálu a tím pádem ke zmenšování objemu. Pro kompenzaci zmenšování objemu výrobku se používá tzv. dotlak - dodatečné dotlačení taveniny do dutiny formy. Pro zajištění dotlaku je nutné ponechat před čelem šneku určitý objem materiálu, tzv. polštář, na který šnek působí svým čelem. Objem polštáře nesmí být moc velký, většinou bývá 10 – 15 %, což je méně než jednonásobek průměru šneku) a to z důvodu, aby nedocházelo k tepelné degradaci polštáře.

Plastikace nové dávky materiálu začíná po dotlaku a probíhá tak, že šnek nabírá pod násypkou granulát, plastikuje jej a vtlačuje do prostoru před čelo šneku, zároveň ustupuje dozadu, čímž překonává tzv. zpětný tlak či protitlak. Protitlak ovlivňuje svou výší dobu plastikace a tím pádem i kvalitu homogenizace materiálu. V případě příliš vysokého zpětného tlaku by docházelo k degradaci materiálu. K ohřevu materiálu během procesu plastikace dochází převodem tepla ze stěn válce, přeměnou hnětací práce šneku v teplo a také frikčním teplem, které vzniká třením hmoty o povrch šneku a komory. V případě, že je tavicí komora vybavenou samouzavíratelnou tryskou, může plastikace probíhat i při otevřené formě. Poté může a nemusí docházet k odsunutí tavicí komory od formy. Při pokračujícím procesu chlazení klesá tlak ve formě až na hodnotu zbytkového tlaku p_z . Tento tlak je přítomen ve formě těsně před jejím otevřením. V případě příliš vysokého zbytkového tlaku dochází k vysokým vnitřním pnutím ve výrobcích, což může u křehkých materiálů způsobit samovolné prasknutí. Po zchlazení výrobku se forma otevře a výrobek se vyhodí z formy. [30]

4.2 Instrumentální zkouška tvrdosti – DSI (Depth Sensing Indentation)

Princip metody je založen na současné detekci okamžité změny hloubky indentace do zkoumaného materiálu a nárůstu či poklesu zatížení v průběhu celého procesu. Pro tuto metodu je typická indentační křivka zatížení vs. hloubka vtisku (obr. 12.). Během tohoto procesu dochází k postupnému zatěžování zkušebního vzorku, během kterého je na indentor vyvíjena zatěžující síla definovanou rychlostí. Po dosažení definovaného zatížení je často měření indentační kríp při maximální definované zátěži po definovanou dobu, poté dochází k fázi odlehčování. [31]



Obr. 12: Indentační křivka

Metoda DSI je často používána pro měření různých materiálů, od měkkých polymerů po kovy. Pomocí metody DSI je možné získat mikro-mechanické povrchové vlastnosti materiálů (indentační tvrdost, indentační elastický modul, vtiskové tečení a deformační práci). [31]

4.2.1 Indentační tvrdost - H_{IT}

Tvrdost je obecně definována jako odolnost materiálu vůči vniknutí cizího tělesa (indentoru). Indentační tvrdost je definována jako maximální síla zatížení

P_{max} podělena průmětem kontaktní plochy vnikacího tělesa se zkušebním vzorkem A_p . [31]

$$H_{IT} = \frac{P_{max}}{A_p} \quad (1)$$

Kde A_p je určena v případě vnikacího tělesa podle Vickerse vztahem:

$$A_p = 24,50 \cdot h_c^2 \quad (2)$$

Kde h_c je určena hloubkou kontaktu vnikacího tělesa se zkušebním vzorkem.

4.2.2 Indentační elastický modul - E_{IT}

Indentační elastický modul má v ideálním případě stejný význam jako Youngův modul pružnosti. Obecně lze indentační modul určit ze směrnice tečny, která slouží k výpočtu indentační tvrdosti H_{IT} . Pro indentační elastický modul platí následující vztah:

$$E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \quad (3)$$

Kde ν_s je Poissonův poměr zkušebního vzorku. Pro polymerní materiály je zvolen v rozmezí od 0,3 do 0,4 a E^* je komplexní modul.

Redukovaný modul E_r je definován následujícím vztahem:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot C \cdot \sqrt{A_p}} \quad (4)$$

Kde C je kontaktní poddajnost.

Komplexní modul E^* je určen vztahem:

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} \quad (5)$$

Kde E_i je modul vnikacího tělesa a ν_i je Poissonův poměr vnikacího tělesa (v případě diamantu 0,07). [31]

4.2.3 Indentační kríp - C_{IT}

V případě měření hloubky vtisku při konstantním zatížení je možné vypočítat relativní hloubku vtisku, která nám udává hodnotu tečení materiálu – indentačního krípu C_{IT} .

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \quad (6)$$

Kde h_1 je hloubka vtisku v čase dosažení zkušebního zatížení a h_2 je hloubka vtisku při výdrži na maximálním dosaženém zatížení. [31]

4.2.4 Faktory ovlivňující přesnost měření mikro-mechanických vlastností

Přesnost měření je ovlivněna jak okolními podmínkami, které ovlivňují samotný přístroj, tak samotným povrchem zkušebního vzorku.

Podmínky ovlivňující přístroj:

- geometrie indentoru,
- určení bodu prvního dotyku indentoru,
- tuhost měřicího přístroje,
- kolísání teploty.

Vliv povrchu materiálu:

- zbytkové napětí.
- jakost povrchu zkušebního vzorku,
- vliv velikosti vtisku,
- tvar vtisku dle geometrie indentoru. [31]

4.3 Fourierova transformační infračervená spektrometrie (FTIR)

4.3.1 Princip metody

FTIR je zkratka pro infračervené spektrum Fourierovy transformace, což je preferovaná metoda infračervené spektroskopie. Když infračervené záření prochází vzorkem, určité záření je absorbováno a některé prochází (je přenášeno). Výsledný signál na detektoru je spektrum reprezentující molekulární „otisk palce“ vzorku. Užitečnost infračervené spektroskopie stoupá, poněvadž různé chemické struktury (molekuly) produkují různé spektrální otisky prstů.

Infračervená spektroskopie patří mezi analytické techniky určené k identifikaci organických a anorganických látek. Analyzovaný materiál pohlcuje jisté množství infračerveného záření o různé vlnové délce, jehož množství měří tato technika. Infračervené záření je možné definovat jako elektromagnetické záření v rozmezí vlnových délek 0,78 – 1 000 mm, což spadá do rozsahu vlnočtů $12\,800 - 10\text{ cm}^{-1}$. Celou oblast infračerveného záření je možné rozdělit na blízkou ($13\,000 - 4\,000\text{ cm}^{-1}$), střední ($4\,000 - 200\text{ cm}^{-1}$), která je zároveň nejpoužívanější oblastí a vzdálenou ($200 - 10\text{ cm}^{-1}$). [32]

Princip metody je absorpce infračerveného záření při průchodu materiálem. V materiálu dochází k rotačně vibračním změnám energetických stavů molekul, a to v závislosti na změnách dipólového momentu molekul. Jako analytický výstup této metody je infračervené spektrum, jehož grafické zobrazení ukazuje na závislost energie, která je většinou vyjádřena pomocí transmitance T (propustnost – poměr intenzity záření, které prošlo materiálem) či absorbance A (dekadický logaritmus $1/T$) na vlnové délce. Poněvadž je závislost energie na vlnové délce logaritmická, používá se pro popis osy x vlnočtů, který je možné definovat jako reciprokou hodnotu vlnové délky, tudíž uvedená závislost energie na vlnočtu je lineární funkcí.

Pro identifikaci funkčních skupin (-OH, CH₃, C=O, N-H atd.) jsou absorpční pásy, které mají vrcholy v intervalu $4\,000 - 1\,500\text{ cm}^{-1}$. V oblasti $1\,500 - 400\text{ cm}^{-1}$ se nacházejí oblasti otisk palce. [32]

V FTIR existují čtyři hlavní techniky měření vzorků:

- **transmitance** – metoda používána pro velmi tenké řezy vzorků, [33]
- **zeslabený úplný odraz ATR** (attenuated total reflectance), [34]

- **spekulární reflektance** – technika založená na velikosti změny intenzity záření, které bylo odraženo od lesklé podložky, na které se nachází vzorek. Spekulární reflexe v tomto případě je odražená část záření, nebo-li úhel odrazu je roven úhlu dopadu vzhledem k makroskopické rovině vzorku, [34]
- **difúzní reflektance** – technika, která je používána pro měření práškových vzorků, kdy je infračervené záření aplikováno na vzorek, část záření je absorbováno a část odraženo. [34]

Každá technika má silné a slabé stránky, které motivují k jejich použití pro konkrétní vzorky.

4.3.2 Metoda ATR

Příslušenství ATR pracuje tak, že měří změny, ke kterým dochází v interně odraženém infračerveném paprsku, když paprsek přichází do styku se vzorkem. Infračervený paprsek je nasměrován na opticky hustý krystal s vysokým indexem lomu pod určitým úhlem. Tato vnitřní odrazivost vytváří evanescentní vlnu, která se rozprostírá přes povrch krystalu do vzorku udržovaného v kontaktu s krystalem.

V oblastech infračerveného spektra, kde vzorek absorbuje energii, bude evanescentní vlna zeslabena. Oslabený paprsek se vrací do krystalu, poté opouští opačný konec krystalu a je nasměrován do detektoru v infračerveném spektrometru. Detektor zaznamenává zeslabený infračervený paprsek jako interferogramový signál, který pak může být použit pro generování infračerveného spektra.

ATR je ideální pro silně absorbující nebo tlusté vzorky, které často produkují intenzivní píky při měření přenosem. ATR funguje dobře pro tyto vzorky, protože intenzita evanescentních vln se exponenciálně rozkládá se vzdáleností od povrchu krystalu ATR, což činí techniku obecně necitlivou na tloušťku vzorku.

Jiné pevné látky, které jsou vhodné pro ATR, zahrnují homogenní pevné vzorky, povrchovou vrstvu vícevrstvé pevné látky nebo povlak na pevné látce.

Dokonce i nepravidelně tvarované pevné látky mohou být analyzovány za použití tvrdého materiálu ATR krystalů, jako je diamant. [35]

Ideální pevné látky zahrnují:

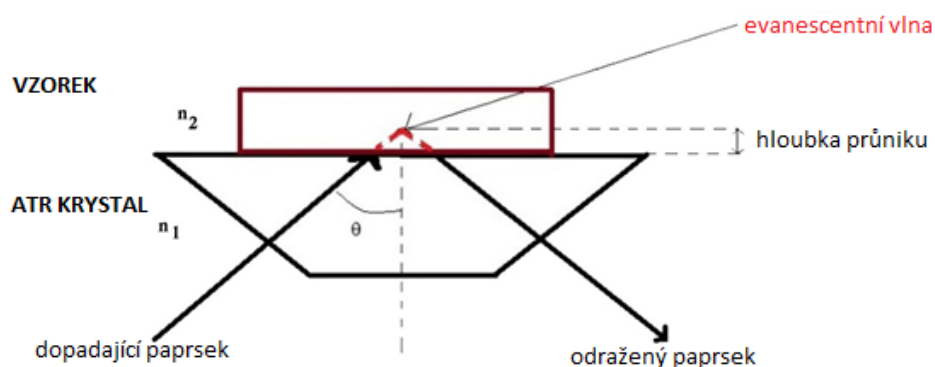
- lamináty,
- barvy,
- kaučuky,
- plasty,
- nátěry,
- přírodní prášky,
- pevné látky, které lze rozemlít na prášek.

Kromě toho je ATR často preferovanou metodou pro kapalnou analýzu, protože jednoduše vyžaduje, aby byla na krystal umístěna kapka kapaliny.

ATR lze použít k analýze:

- volně tekoucích vodných roztoků,
- viskózních kapalin,
- nátěrů,
- biologických materiálů.

Mezi výhody ATR techniky patří jednoduchost přípravy vzorku, rychlé a snadné čištění krystalu, analýza vzorků v jejich přirozených stavech – není třeba zahřívání či lisování do pelet atd. ATR je vynikající metoda pro tlusté nebo silně absorbující vzorky (př. černá pryž). [35]



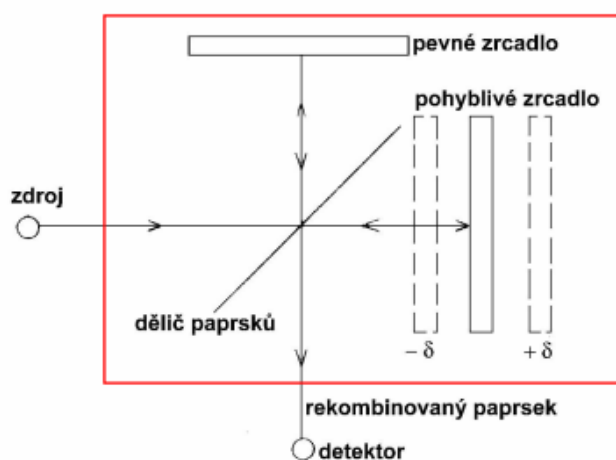
Obr. 13: ATR krystal [36]

4.3.3 Popis zařízení

Fourierův transformační spektrometr (FTS) je Michelsonův interferometr s pohyblivým zrcadlem. Skenováním pohyblivého zrcadla po určité vzdálenosti se vytvoří interferenční obrazec, který dekoduje spektrum zdroje (ve skutečnosti

se ukazuje, že jde o Fourierovu transformaci). Spektrometry s Fourierovou transformací mají multiplexní výhodu oproti disperzním spektrálním detekčním technikám pro signál, ale multiplexní nevýhodu šumu.

Ve své nejjednodušší formě se spektrometr s Fourierovou transformací skládá ze dvou zrcátek umístěných v pravém úhlu vůči sobě a orientovaných kolmo, s rozdělovačem paprsků umístěným na vrcholu pravého úhlu a orientovaným pod úhlem 45° vzhledem ke dvěma zrcadlům. Záření dopadající na rozdělovač paprsků z jednoho ze dvou "portů" je pak rozděleno na dvě části, z nichž každá se šíří jedním ze dvou ramen a odráží se od jednoho ze zrcadel. [37]



Obr. 14: Popis FTS [37]

4.4 Dynamická mechanická analýza (DMA)

DMA je používána pro kvantifikace vztahů mezi deformacemi a deformujícími silami v případech, kdy tyto veličiny podléhají změnám v čase. V reálných situacích jsou téměř vždy tělesa podrobena dynamickému namáhání, a to buď v menší či větší míře. Poněvadž klasický statický popis vztahů mezi deformacemi a silami není možné aplikovat bez závažnějších chyb u tzv. viskoelastických těles, jako jsou např. pryže a plasty. [38]

DMA se stala nezbytnou metodou především pro polymerní a kovové materiály. DMA nachází uplatnění v širším aplikačním spektru při vývoji nových konstrukčních materiálů a díky technickému pokroku v průběhu posledních desetiletích, patří tato metoda mezi jednu z nejcitlivějších, bez které si lze vývoj nových materiálů jen těžko představit. [38]

4.4.1 Princip metody

Princip metody DMA je možné popsat následovně. Vzorek o definovaném rozměru, je vystaven teplotnímu programu, a navíc mechanickému namáhání, a to nejčastěji ve formě vibrací o frekvencích nejčastěji od 10^{-3} do 103 Hz a volitelné amplitudě, která způsobuje deformaci zkoumaného materiálu. Výše popsané namáhání vytváří ve vzorku časově proměnné napětí, které je úzce spjato s molekulární a fázovou strukturou materiálů.

DMA testuje vlastnosti viskoelastických materiálů při nastavené teplotě (většinou od 120 °C do 600 °C). Při tomto nastavení lze stanovovat fázové přeměny jako je např. krystalizace, tání a skelný přechod materiálů. Dále teploty měknutí, elastický, ztrátový, emulzní a suspenzní modul polymerních materiálů, viskozitu tavenin a jejich stabilitu.

Různé nástroje v přístroji DMA umožňují měření vzorků na smyk v sendvičovém uspořádání, torzi, tří bodový ohyb, namáhání v talku nebo tahu apod. Při použití jiné geometrie je možné DMA rozšířit na klasický reometr, díky kterému je možné získat tokové vlastnosti viskózních kapalných materiálů. [38]

4.4.2 Aplikace DMA

Spektrum aplikací, kde je možné použít DMA je skutečně široké, a to jak ve výzkumném sektoru, tak v průmyslu. Data naměřená pomocí metody DMA jsou využívána pro vyhodnocování mechanických vlastností polymerů za různých podmínek. Pomocí DMA se určuje např. elasticita polymerů při definované

deformaci a namáhání při fluktuaci teplot. Dále také zjišťování míry zesíťování polymerů, které ovlivňuje jejich viskozitu a stabilitu, aktivační energii, alfa a beta relaxaci, postupnou změnu rozměru materiálu při zatížení krípem, kinetiku chemických procesů jako např. vytvrzování pryskyřic, síťování a polymerizaci. Dále mechanické ztráty materiálu (tlumení), relaxace řetězců biopolymerů atd. [38]

4.4.3 Popis zařízení

Tento vysoce flexibilní analyzátor nabízí šest různých režimů deformace pro přesnější měření vlastností materiálů. Vzhledem k tomu, že jedno zařízení je schopno zvládnout více dynamických a statických měření pro charakterizaci viskoelasticity, skelného přechodu, teploty měknutí, krystalizace, fázové transformace apod., DMA je ideální jak pro akademické, tak pro průmyslové laboratoře, které pracují s mnoha různými typy materiálů pod přísným rozpočtem a časovým omezením. [39]

Snadnost použití byla zohledněna ve všech aspektech DMA, aby bylo zajištěno, že splní svůj slib flexibility. Výzkumní pracovníci mohou nastavit rameno a analytickou hlavu na více úhlů na základě povahy vzorku a geometrie. Jednoduché nastavení ramena bez nutnosti kalibrace mezi konfiguracemi znamená, že vzorky různých tvarů a velikostí mohou být zpracovávány v rychlém sledu. Rychlé ochlazení na $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$ s minimální spotřebou kapalného dusíku také pomáhá snížit náklady a zvýšit bezpečnost obsluhy. Vysoký teplotní rozsah do $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ dále zvyšuje rozsah použití DMA.

Klíčovým znakem DMA je lineární proměnný diferenciální transformátor (LVDT), který měří změny délky v rozsahu měření $\pm 1\text{ mm}$ se středním rozlišením 2 nm . Toto rozlišení je v blízkosti vzorku, aby se minimalizoval vliv deformace měřicího systému, a zlepšuje přesnost měření času nebo zpoždění mezi silou a posunem, což výrobcům pomáhá přesněji určit, jak se bude určitý materiál chovat ve svém vyrobeném kontextu pro lepší výkon a snížení následných korekcí.

DMA dále zvyšuje svou flexibilitu a nabízí také kritickou schopnost pracovat v kapalinách nebo při specifických úrovních relativní vlhkosti. Vlhkostní komora a cirkulační tepelná lázeň umožňují měření v optimálních podmínkách v každém režimu deformace. [39]

DMA přístroj je také schopen termo-mechanické analýzy (TMA), v jejíž případě je měřena deformace materiálu při konstantním zatížení za změny teploty.



Obr. 15: Přístroj DMA METTLER TOLEDO [39]

4.5 Mikroskopie atomárních sil (AFM – atomic force microscopy)

4.5.1 Popis metody a zařízení

Mezi nejrozšířenější techniky z oblasti mikroskopie s rastrující sondou patří mikroskopie atomárních sil (AFM – atomic force microscopy). AFM je metoda, která je založena na snímání polohy malé sondy udržované zpětnovazební smyčkou v těsné vzdálenosti povrchu vzorku a pohybující se v pravidelném rastru po povrchu. Vzdálenost sondy od povrchu vzorku je zajištěna mechanismem detekce, v tomto případě detekce síly působící hrotem sondy na povrch vzorku. Pro zajištění pohybu sondy nad povrchem vzorku jsou použity piezokeramické aktuátory, které poskytují subnanometrové rozlišení.

Využití deformace pružného držáku hrotu zajišťuje detekci síly mezi hrotem a povrchem vzorku pomocí laserového svazku a kvadrantní fotodiody. Pro co nejcitlivější metodu je důležité, aby tuhost hrotu byla co nejmenší, nejlépe v rozmezí mezi 0,1 a 100 N/m.

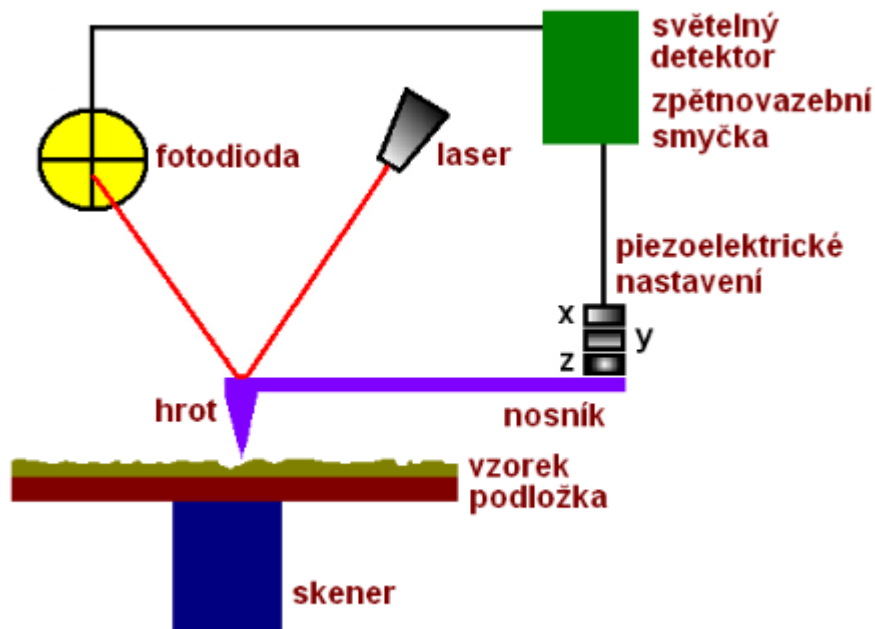
Závislost síly mezi hrotem a povrchem vzorku na jejich vzájemné vzdálenosti poukazuje na přítomnost přitažlivých sil (elektrostatické, van der Waalsovy síly v případě velkých vzdáleností) a odpudivých sil (překryv elektronových obalů – v případě menších vzdáleností).

Existuje několik módů rastrování povrchu vzorku, a to v závislosti na tom, zda-li se jedná o odpudivé nebo přitažlivé části silové závislosti v systému hrot – povrch vzorku:

- výchylka hrotu je nastavena na konstantní hodnotě. Jedná se o kontaktní systém hrot – povrch vzorku aplikovaný v případě odpudivých sil,
- v ose z osciluje hrot na rezonanční frekvenci systému. Posun rezonanční frekvence směrem k nižším hodnotám způsobí přitažlivá síla, která působí na povrch vzorku. Hrot je udržován v takové vzdálenosti, aby posun rezonanční frekvence anebo změna amplitudy byly konstantní. Tento způsob je nazýván jako bezkontaktní režim,
- hrot pohybující se jako v předchozím případě, dostávající se do oblasti odpudivých sil je umístěn v tzv. poklepovém režimu.

Při samotném měření se hrot pohybuje typicky v pravidelném rastru – snaží se změřit lokální výšky povrchu a tím získat přehled o topografii vzorku. Je možné

měřit také složitější experimenty, a to měření lokální mechanické odezvy pomocí závislosti síla – vzdálenost. Tato metoda je vhodná pro změření tvrdosti materiálu nebo adhezi mezi povrchem vzorku a hrotem. V tomto případě lze zmapovat mechanické vlastnosti povrchu vzorku s velmi vysokým rozlišením. [40]



Obr. 16: AFM mikroskop [41]

4.5.2 Využití AFM

AFM má široké využití v následujících aplikacích:

- studium katalytických procesů,
- studium povrchů pevných látek,
- oblast nanotechnologií,
- oblast záznamové techniky,
- biologické systémy. [42]

5. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

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

5.1 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.

5.2 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

5.3 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.

5.4 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.



Obr. 17: Instrumentální měřicí zařízení Micro Combi Tester

5.5 Termo-mechanická analýza (TMA)

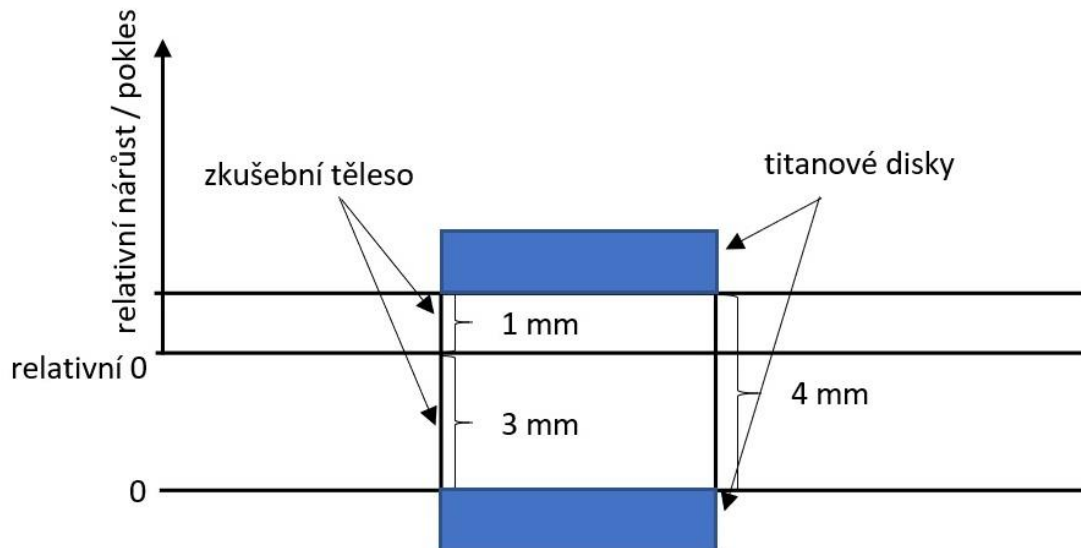
Měření deformace zkušebních těles bylo provedeno na DMA přístroji od firmy METTLER TOLEDO pomocí termomechanické analýzy krípu. Podmínky měření byly následující:

- 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

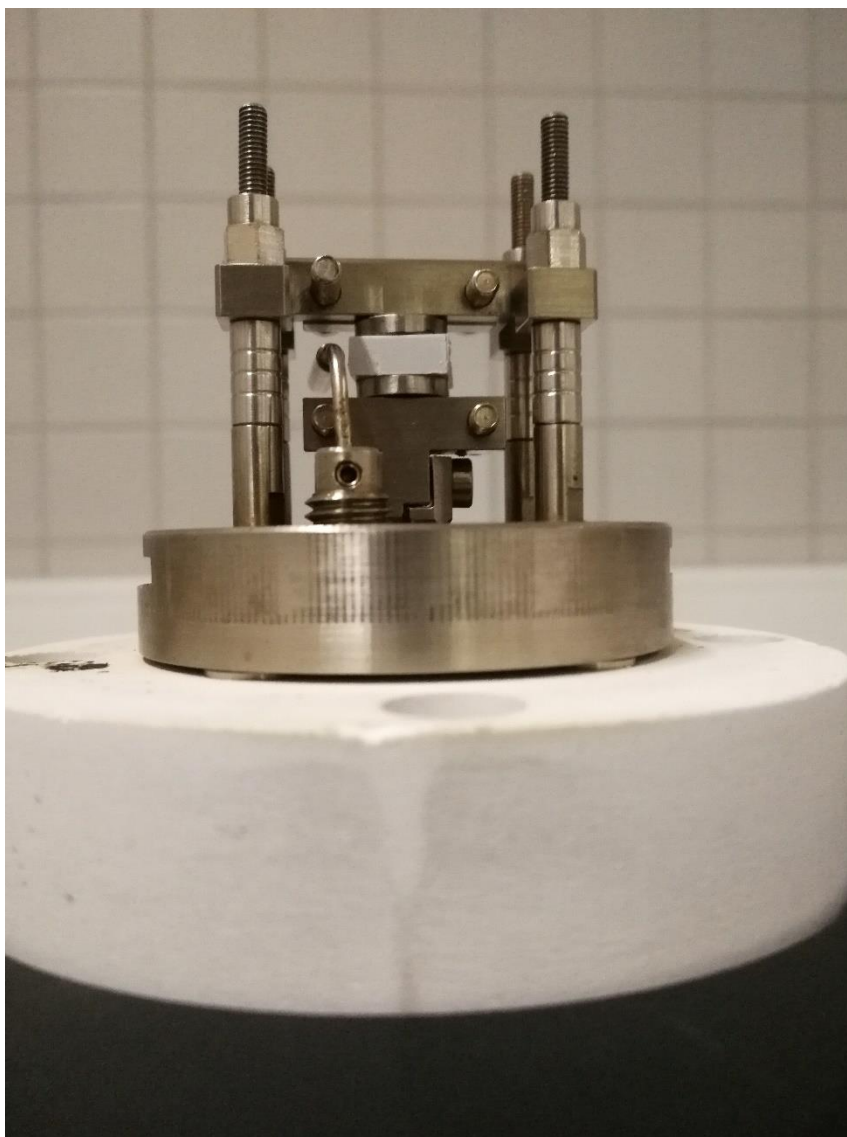
Měření probíhalo na 3 zkušebních tělesech o rozměrech 10×4×10 mm a to u všech koncentrací TAIC a všech radiačních dávek. Výsledky měření byly zpracovány pomocí softwaru Microsoft Excel 2016.

Výpočet deformace zkušebních těles:

$$\frac{\text{deformace zkušebního tělesa } (\mu\text{m})}{\text{tloušťka zkušebního tělesa } (\mu\text{m})} \times 100 = \text{deformace } (\%) \quad (7)$$



Obr. 18: Princip měření TMA



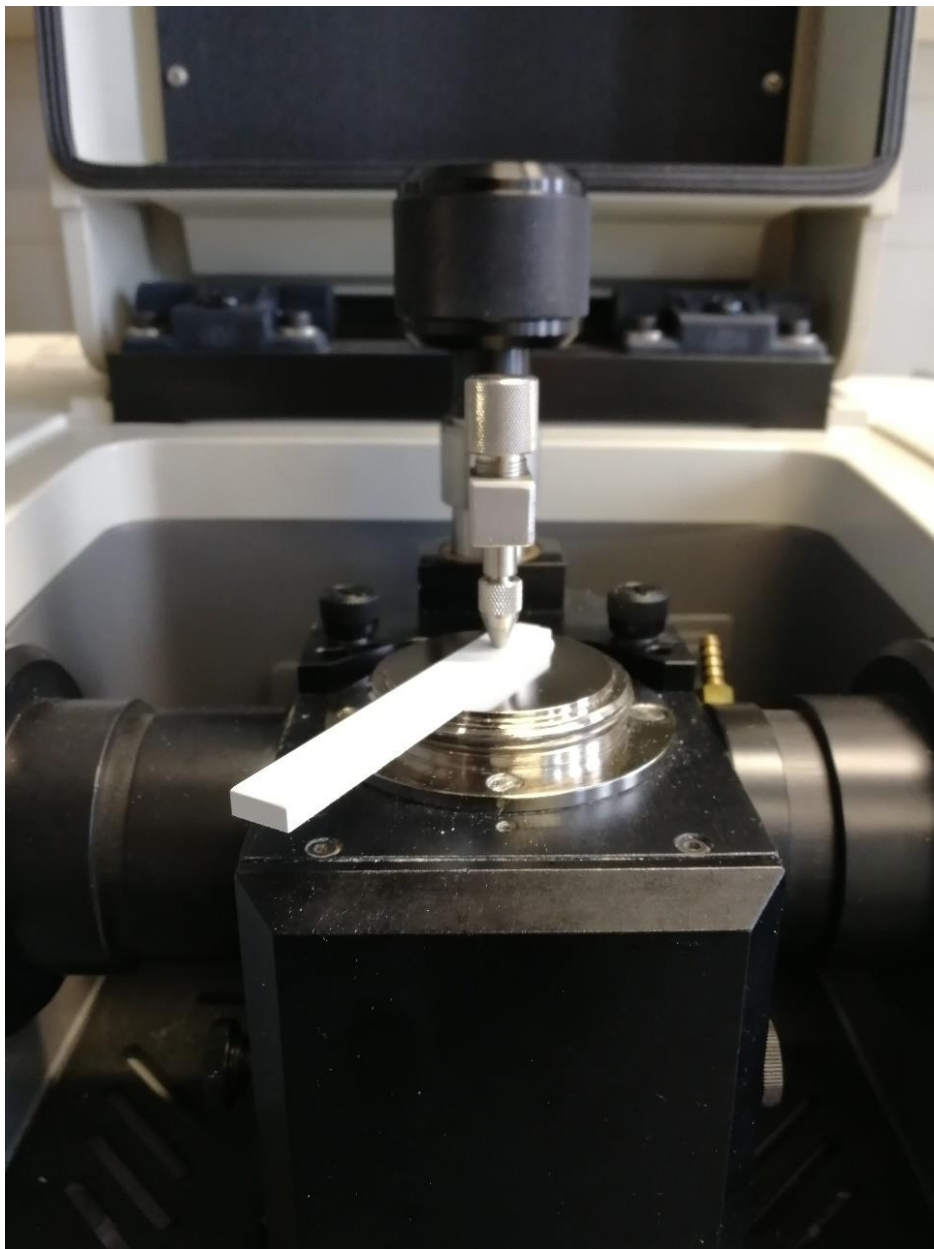
Obr. 19: Uchycení zkušební tělesa

5.6 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.



Obr. 20: Přístroj AVATAR 320



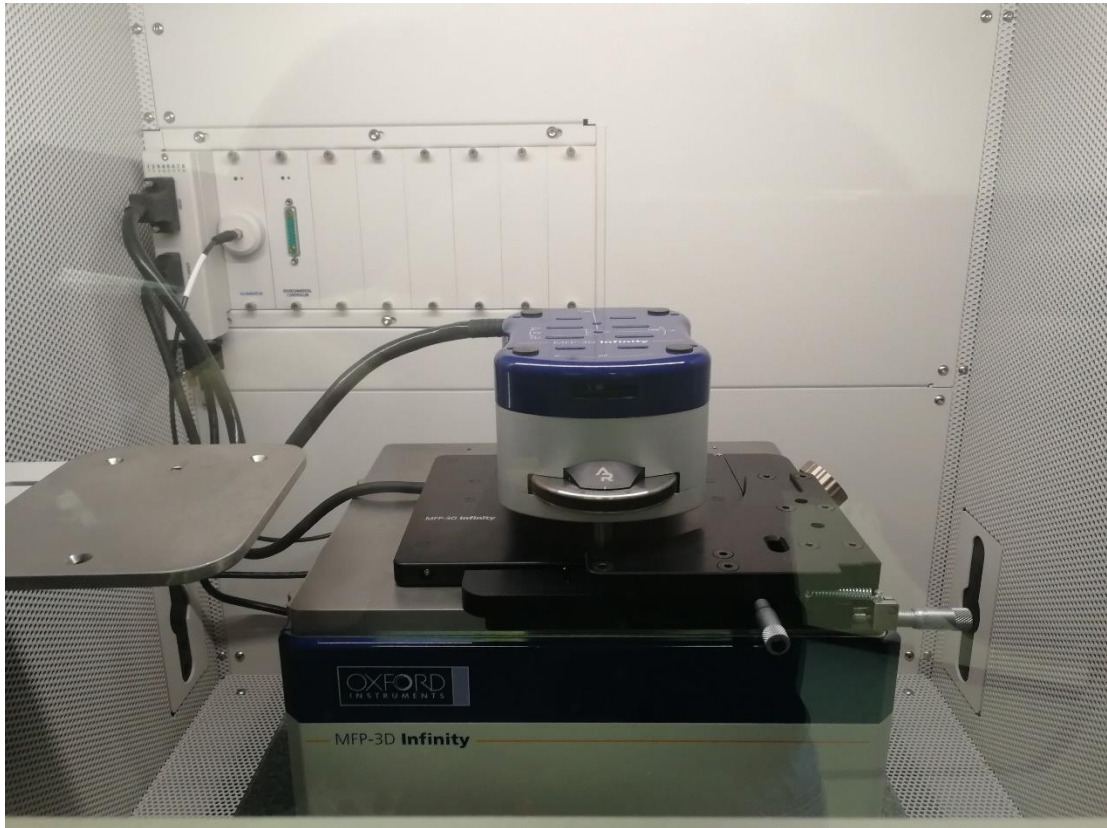
Obr. 21: Uchycení vzorku ATR krystalem

5.7 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 $k = 26 \text{ N/m}$. 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.



Obr. 22: Přístroj MFP-3D Infinity



Obr. 23: Uchycení vzorku v přístroji

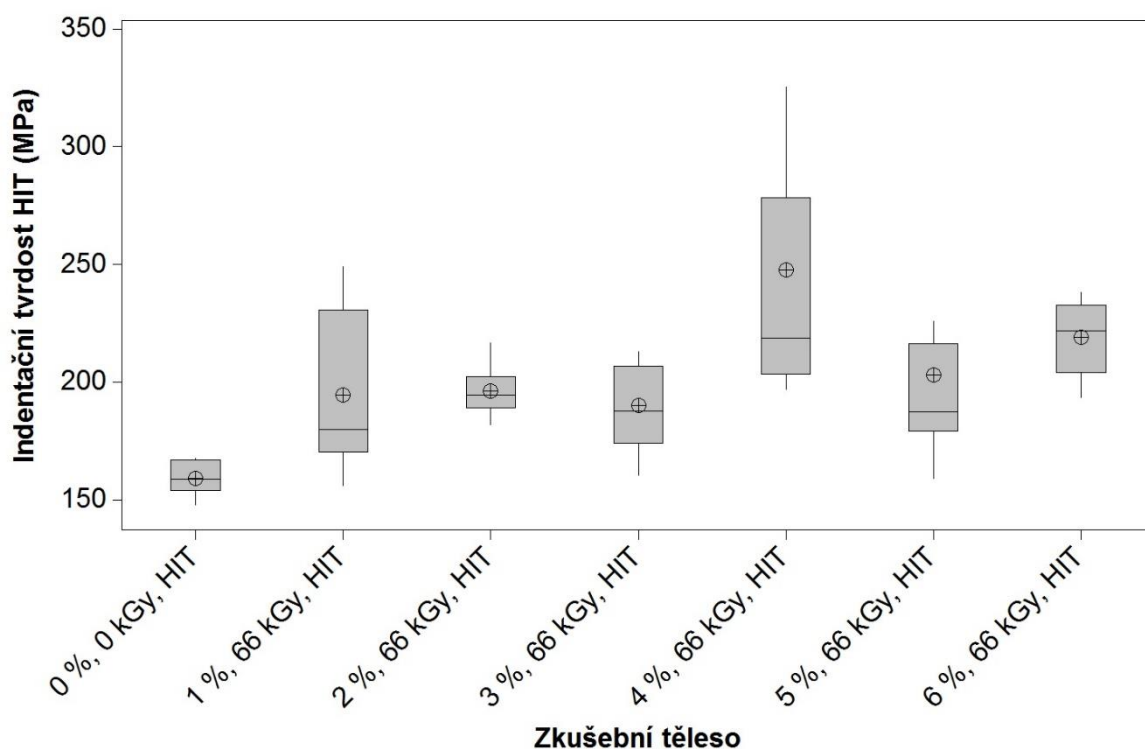
6. VÝSLEDKY

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

6.1 Mikro-mechanické vlastnosti

Výsledky mikro-mechanických vlastností jsou zobrazeny pomocí boxplotů, ve kterých se porovnávají v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávku. Dále jsou vytvořeny porovnávací grafy, které zobrazují aritmetický průměr, interkvartilové rozpětí, medián, směrodatnou odchylku a variační rozpětí. Křivky zobrazené v grafech jsou pouze trendového charakteru.

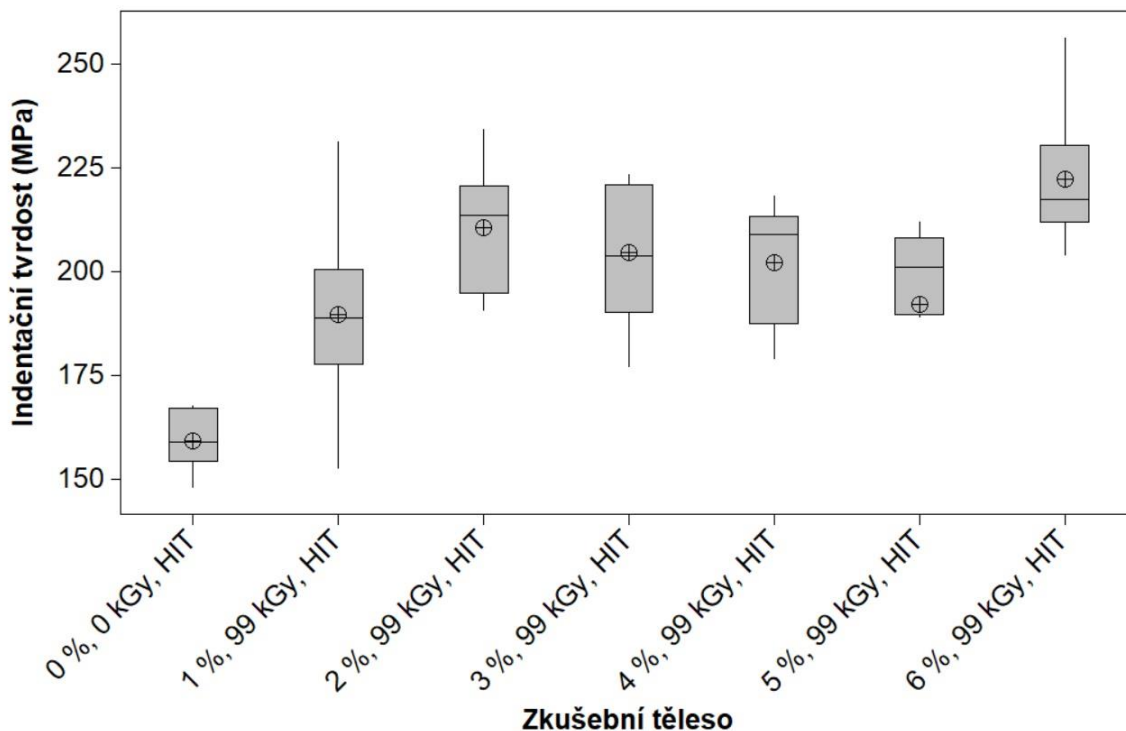
6.1.1 Indentační tvrdost



Obr. 24: Indentační tvrdost PA 6 ozářeného 66 kGy v závislosti na koncentraci TAIC

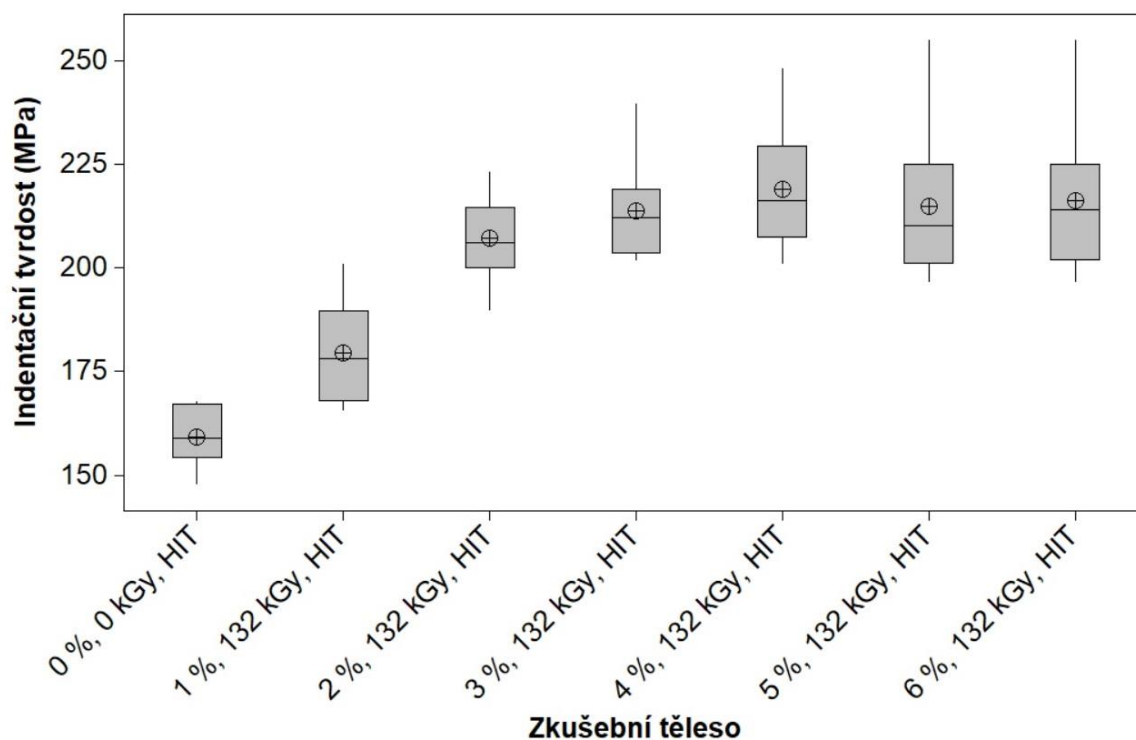
Obr. 24 vypovídá o postupném zvyšování indentační tvrdosti. Z výsledků je patrné, že se zvyšující se koncentrací dochází k postupnému zvyšování indentační tvrdosti. Velké variační rozpětí vykazují zkušební tělesa s 1 a 4 hm. % TAIC. V případě 1 hm. % se hodnoty pohybují od 170,23 MPa do 230,56 MPa a u 4 hm. % TAIC od 203,28 MPa do 273,38 MPa. Celkově u radiační dávky 66 kGy je

možné konstatovat, že v materiálu nedošlo ještě k rovnoměrnému zesíťování a proto dochází k takovému rozptylu hodnot.



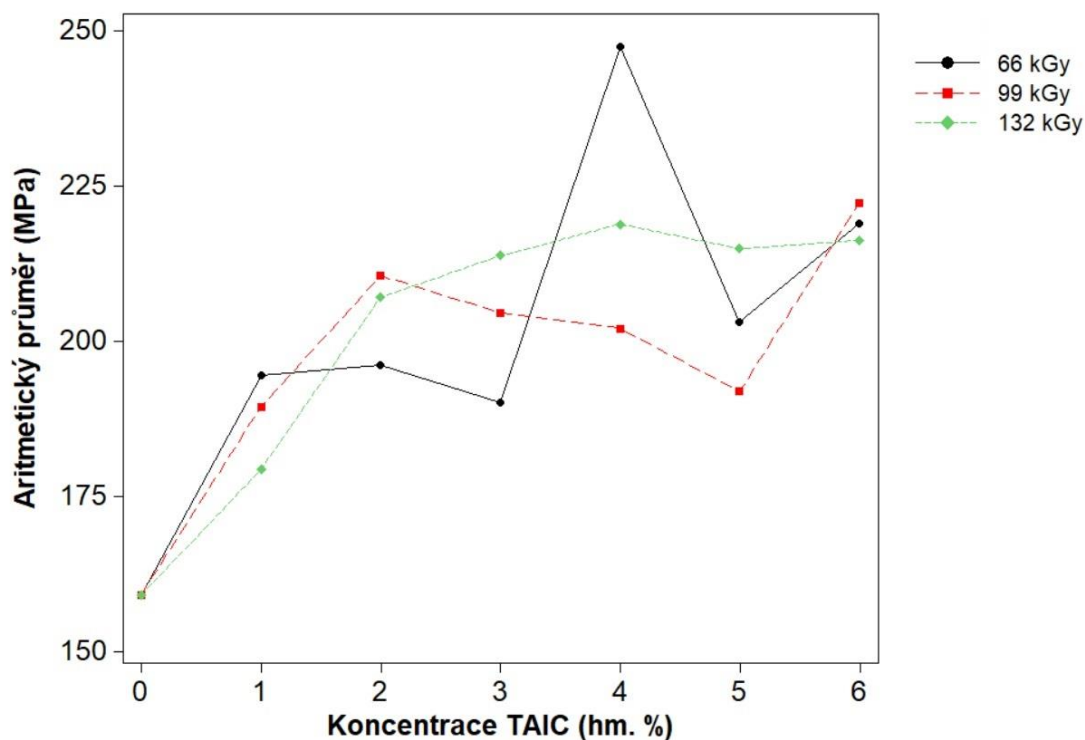
Obr. 25: Indentační tvrdost PA 6 ozářeného 99 kGy v závislosti na koncentraci TAIC

Při použití radiační dávky 99 kGy docházelo k postupnému zvyšování hodnot indentační tvrdosti. Nejmenší variační rozpětí má zkušební těleso s koncentrací TAIC 6 hm. % a to od 211,89 do 230,52 MPa. Naopak největší variační rozpětí má zkušební těleso s koncentrací TAIC 3 hm. % a to od 190,26 do 220,93 MPa.



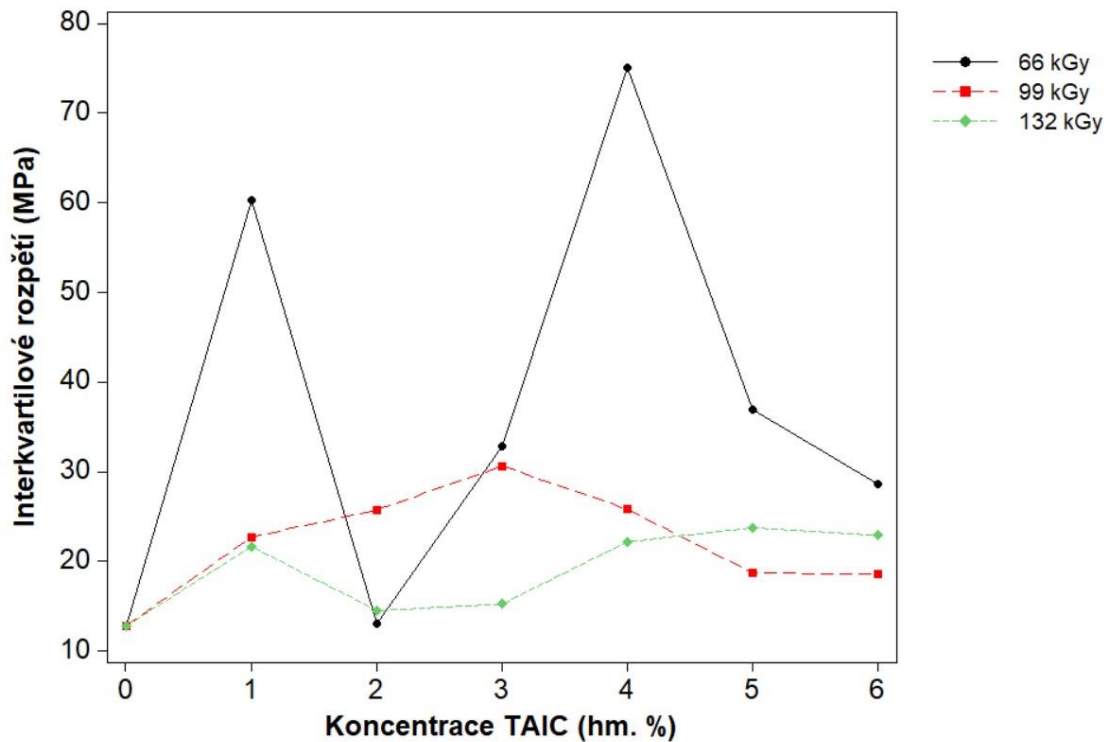
Obr. 26: Indentační tvrdost PA 6 ozářeného 132 kGy v závislosti na koncentraci TAIC

Na Obr. 26 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.



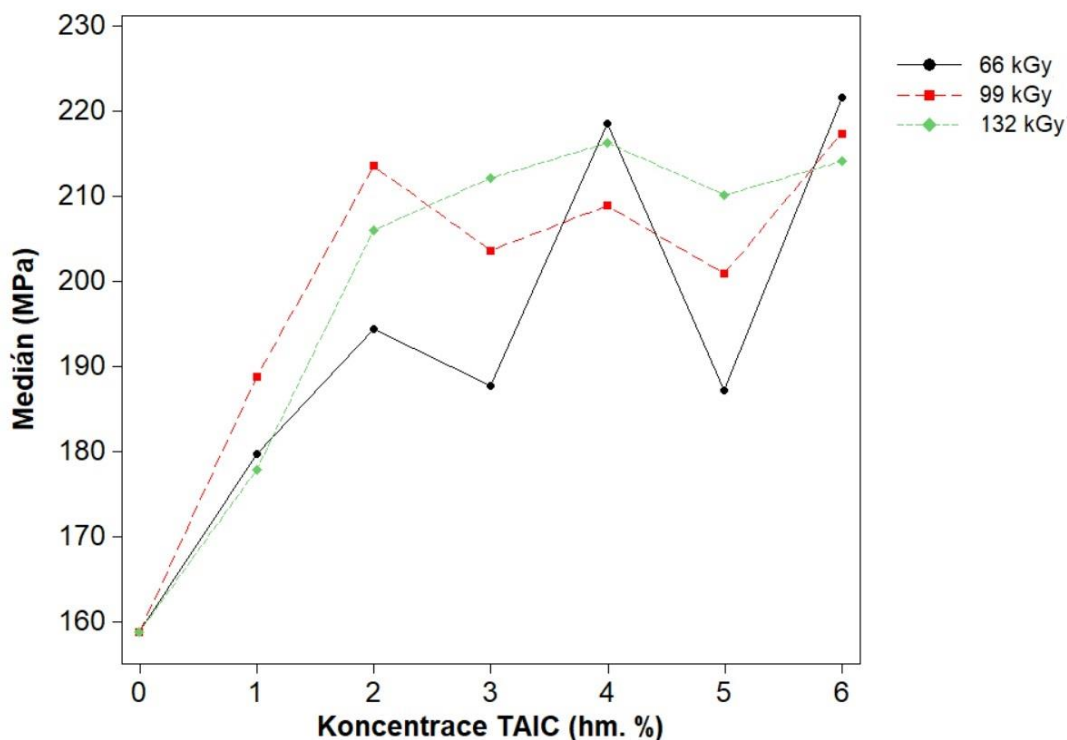
Obr. 27: Aritmetický průměr indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

Z Obr. 27 je patrné, že aritmetický průměr indentační tvrdosti má největší rozptyly při radiační dávce 66 kGy, což je nežádoucí a nejméně spolehlivé, zatímco radiační dávka 132 kGy ukazuje trend s nejmenšími rozptyly. Nejvyšší hodnoty aritmetického průměru bylo v rámci této dávky dosaženo při koncentraci TAIC 4 hm. % a to přibližně 223 MPa. V tomto případě je koncentrace TAIC 4 hm. % dostačující a pro dosažení největší hodnoty indentační tvrdosti není třeba koncentraci zvyšovat.



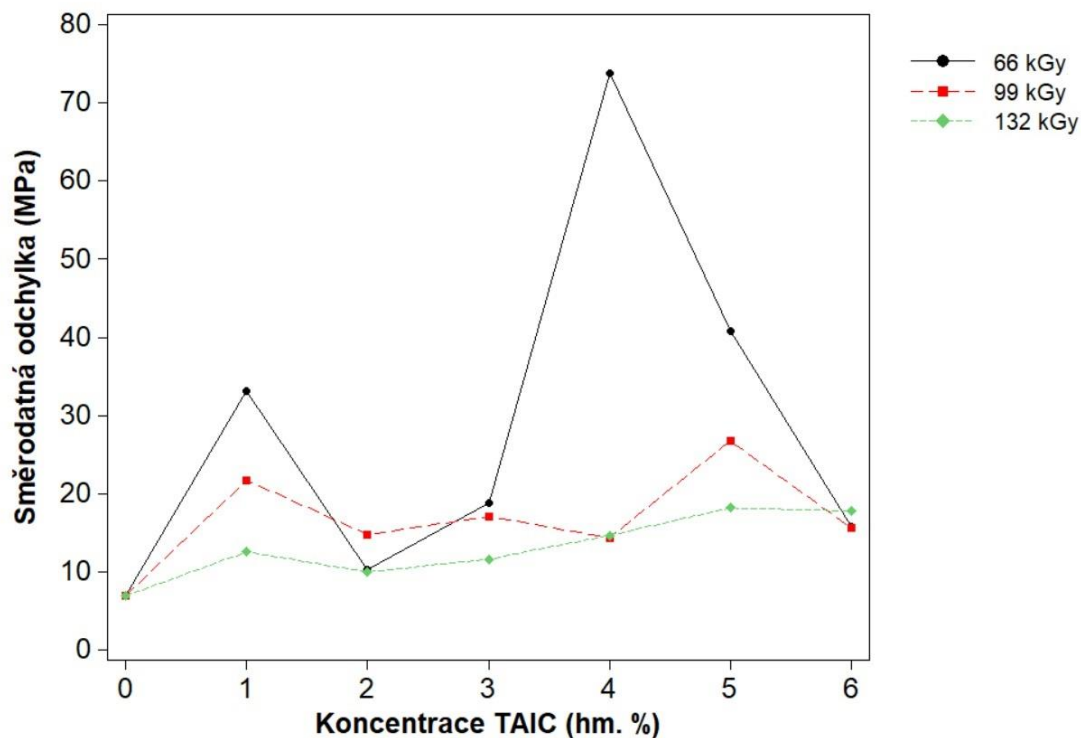
Obr. 28: Interkvartilové rozpětí indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

Interkvartilové rozpětí poukazuje na oblast, kde se nachází 50 % všech naměřených dat. Jak je vidět na Obr. 28., největší rozptyly má opět radiační dávka 66 kGy a nejmenší 132 kGy, což může být v případě radiační dávky 66 kGy nedostatečným zesíťováním PA 6 v celém objemu zkušebního tělesa.



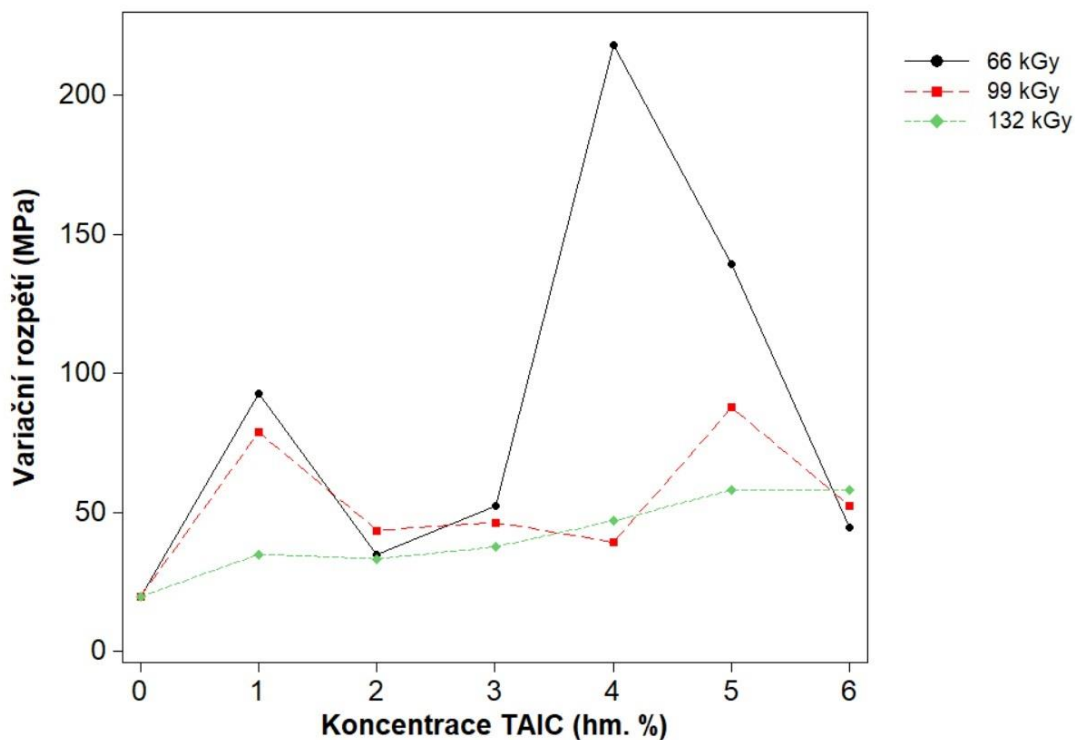
Obr. 29: Medián indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiální dávce

Obr. 29 opět 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 blížící 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. %.



Obr. 30: Směrodatná odchylka indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

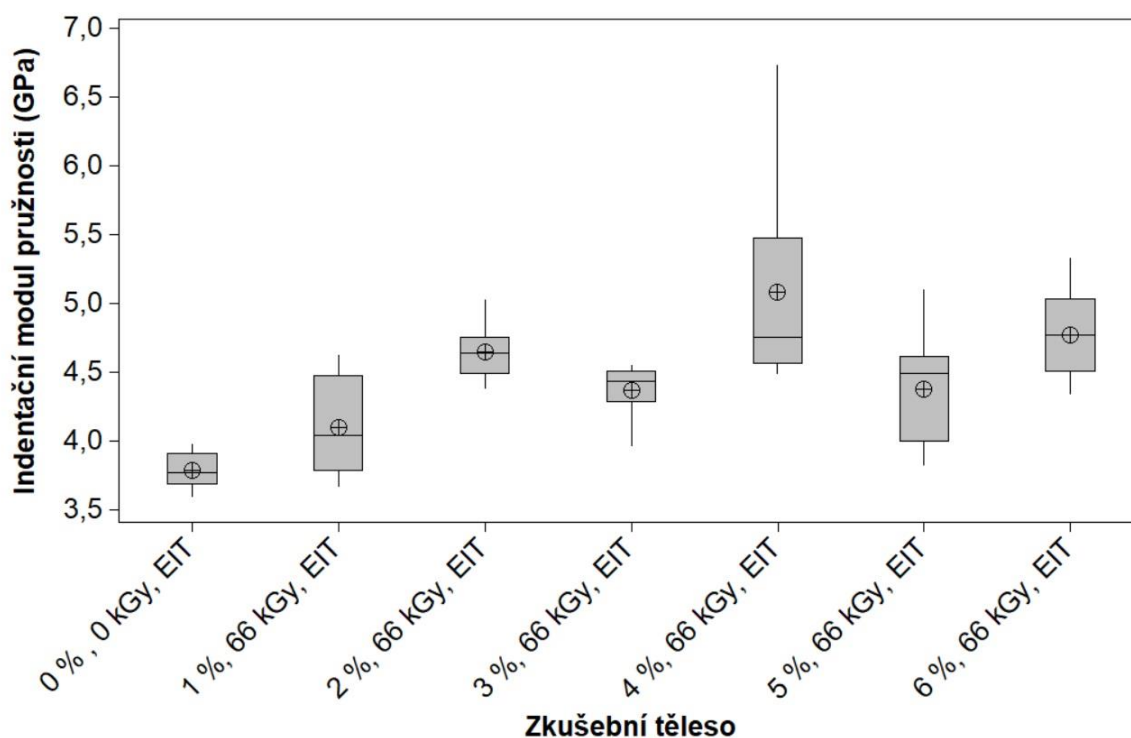
Směrodatná odchylka poukazuje na to, nakolik se naměřené hodnoty liší průměrně od aritmetického průměru. Z Obr. 30 je jasně vidět, že nejmenších směrodatných odchylek bylo dosaženo u radiační dávky 66 kGy, která má také nejmenší rozptyly. Tato radiační dávka, pravděpodobně, zajistila dostatečné zesíťování zkušebních těles, na rozdíl od dávky 66 kGy. Jako dostatečná koncentrace TAIC se jeví opět 4 hm. %.



Obr. 31: Variační rozpětí indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

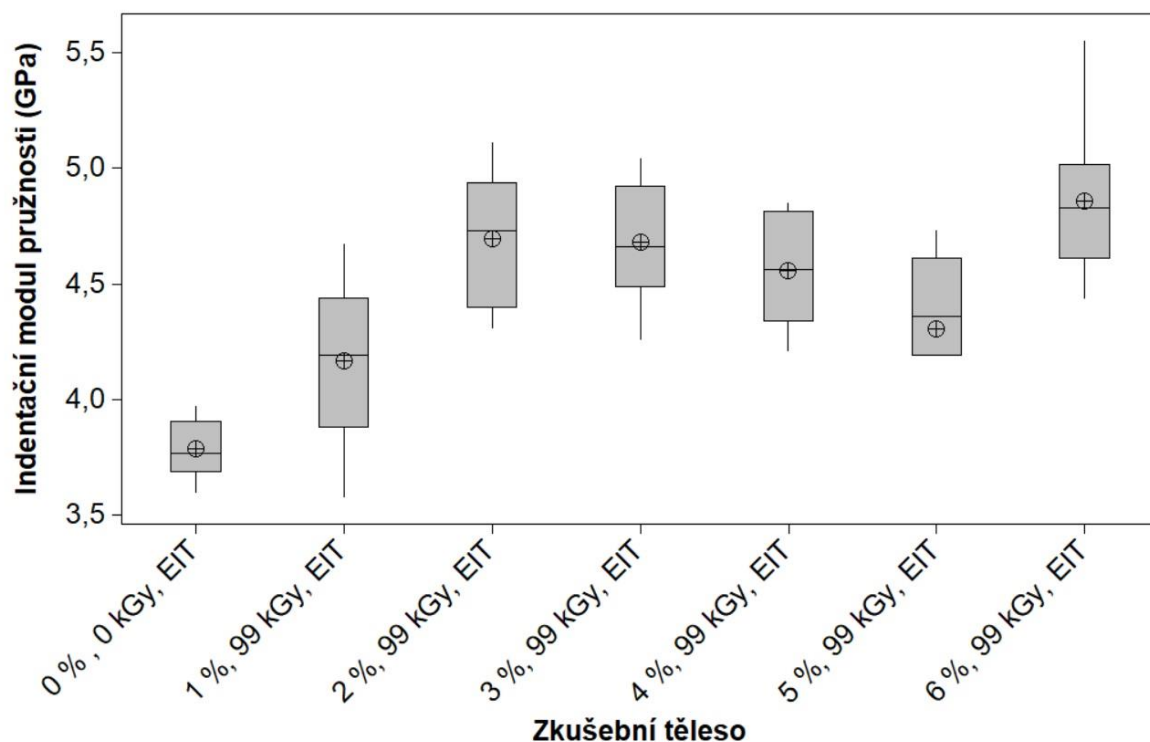
Variační rozpětí vypovídá o oblastech měření, kde se nachází 100 % naměřených dat. Z výsledků na Obr. 31 je patrné, že radiační dávka 132 kGy má nejmenší rozptyly a vzestupný trend. Rozdíly mezi 4, 5 a 6 hm. % TAIC jsou natolik nepatrné, že lze konstatovat, že koncentrace 4 hm. % je plně dostačující při použití radiační dávky 132 kGy.

6.1.2 Indentační modul pružnosti



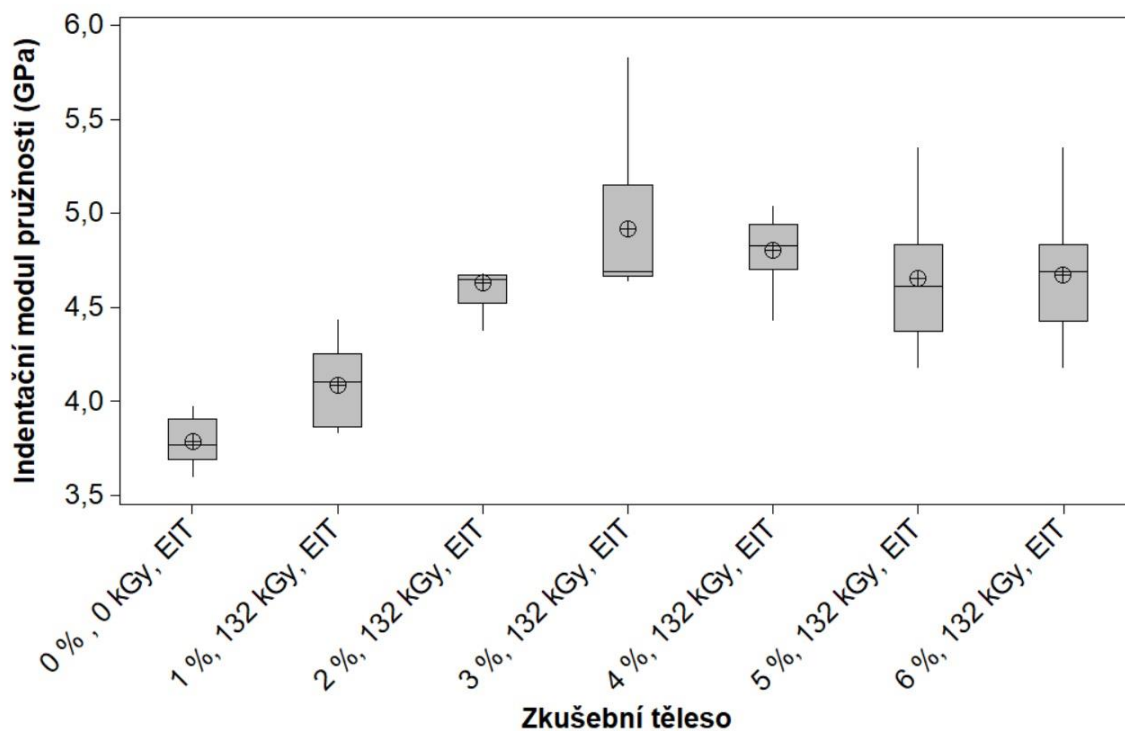
Obr. 32: Indentační modul pružnosti PA 6 ozářeného 66 kGy v závislosti na koncentraci TAIC

V případě ozařování PA 6 radiační dávkou 66 kGy dochází u indentačního modulu pružnosti k velkým rozptylům dat. Radiační dávka 66 kGy se jeví jako nedostatečná pro získání rovnoměrného zesíťování materiálu v celém objemu.



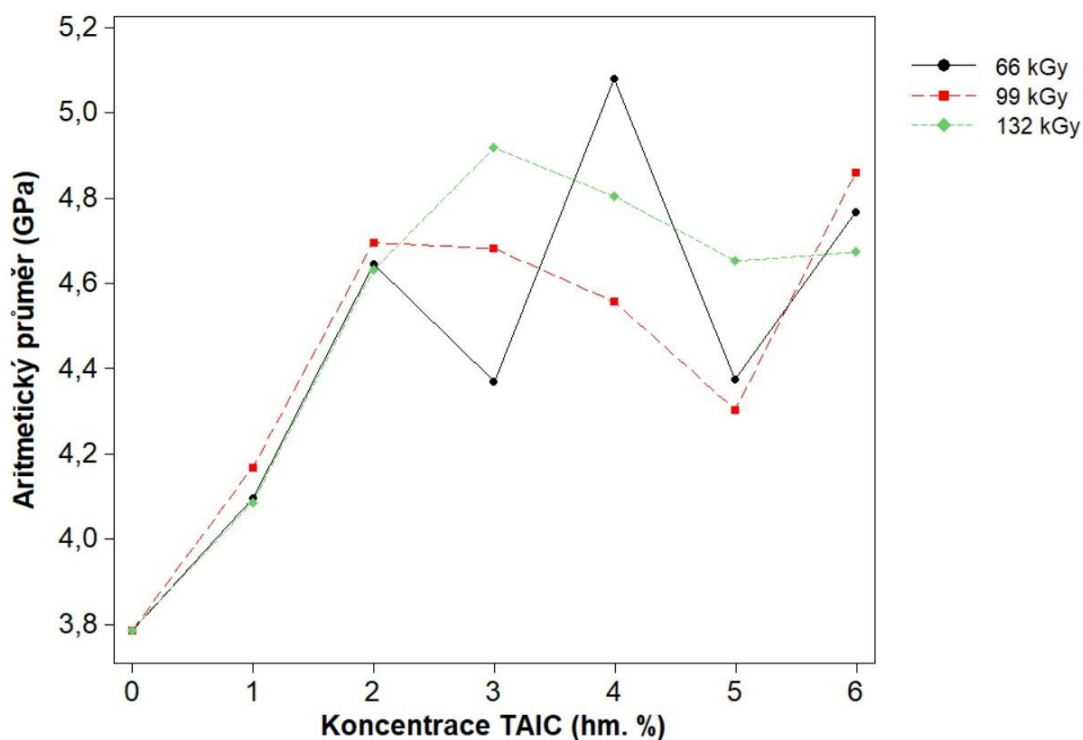
Obr. 33: Indentační modul pružnosti PA 6 ozářeného 99 kGy v závislosti na koncentraci TAIC

Na Obr. 33 lze vidět, že indentační modul pružnosti se pohybuje v rozmezích hodnot od 3,7 do 5 GPa. Nejmenší variační rozpětí má zkušební těleso s koncentrací TAIC 4 hm. %, zatímco k největšímu rozptylu dat dochází u koncentrace 1 hm. % TAIC.



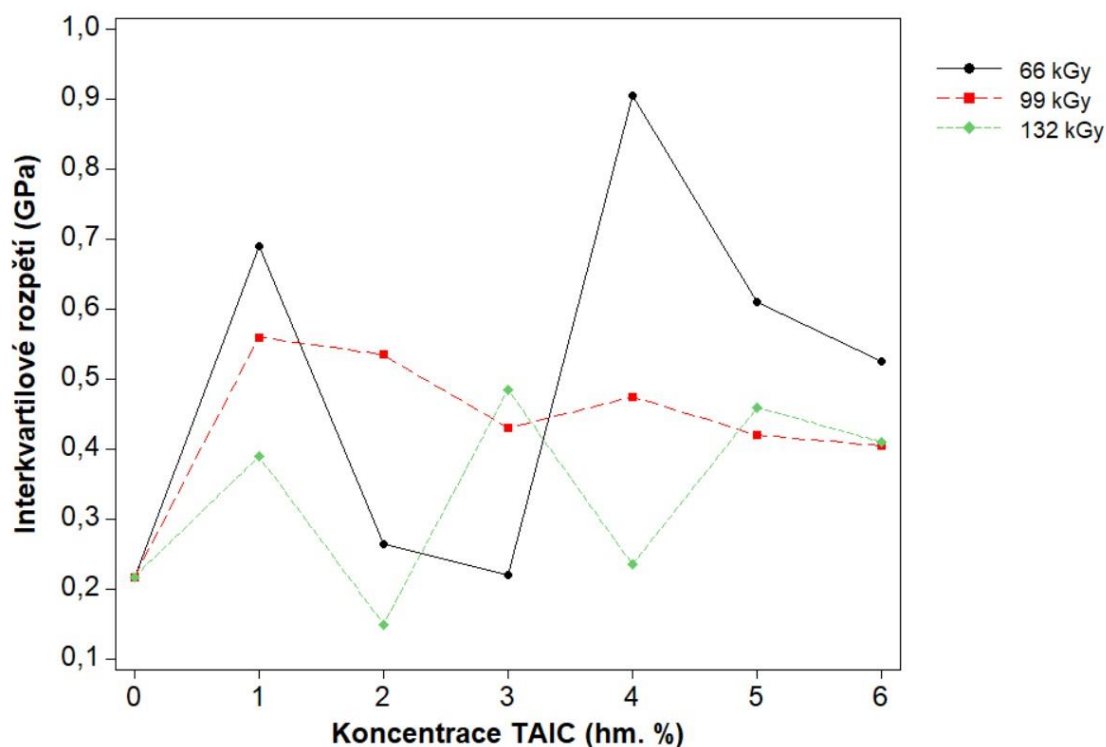
Obr. 34: Indentační modul pružnosti PA 6 ozářeného 132 kGy v závislosti na koncentraci TAIC

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.



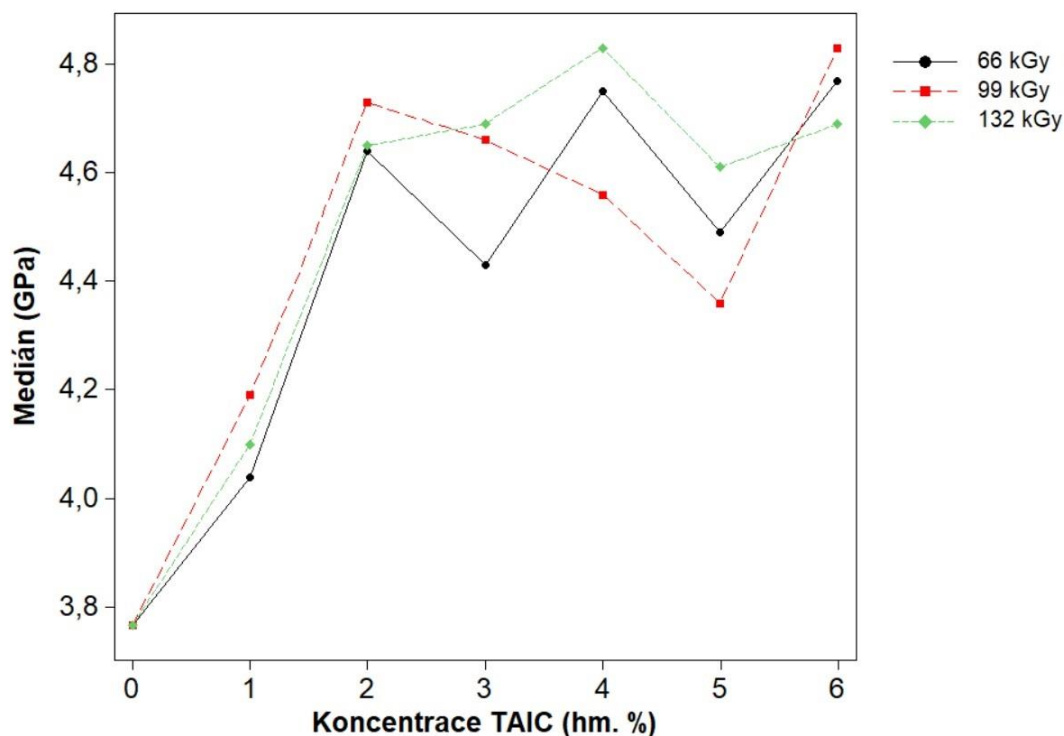
Obr. 35: Aritmetický průměr indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

Aritmetický průměr indentačního modulu pružnosti vypovídá o tom, že radiační dávka 132 kGy má nejlepší rozptyly u všech koncentrací TAIC, tudíž je nejspolehlivější použít tuto dávku pro obdržení předpokládatelných výsledků. Nejvyšší hodnoty bylo dosaženo při radiační dávce 132 kGy u koncentrace TAIC 3 hm. %, kde hodnota sahá k 5 GPa. Opět to vypadá, že PA 6 je nejlépe zesíťován dávkou 132 kGy, což poukazuje na nejvyšší hodnoty indentačního modulu pružnosti.



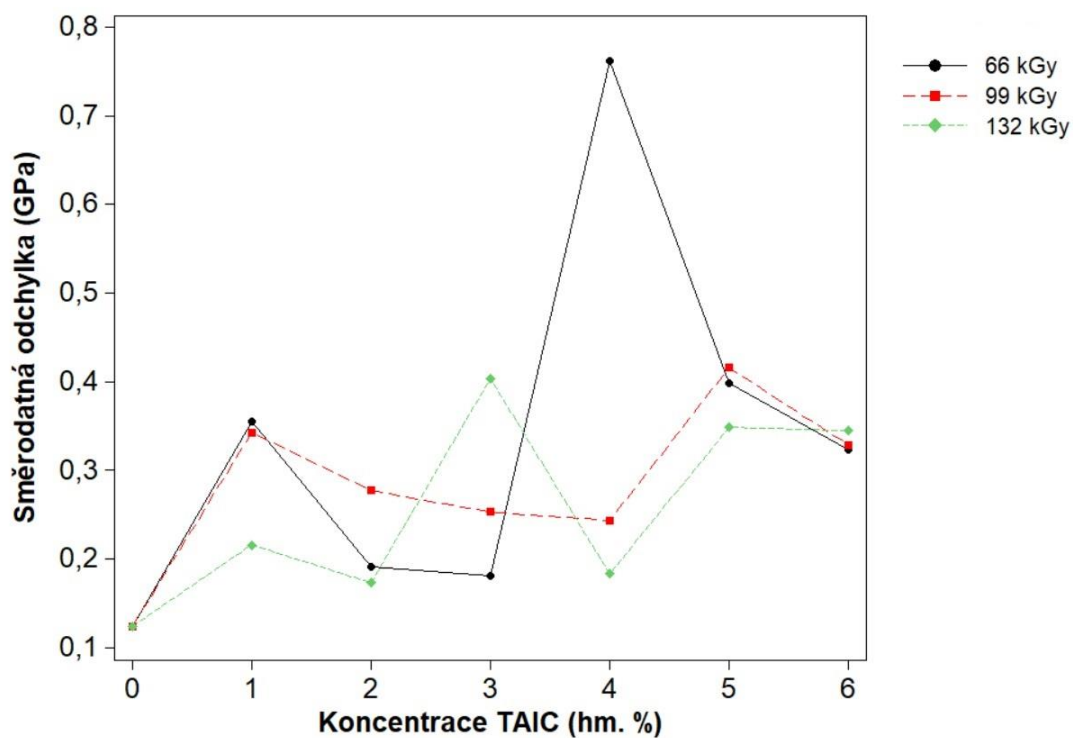
Obr. 36: Interkvartilové rozpětí indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

Interkvartilové rozpětí poukazuje na oblast, kde se nachází 50 % všech naměřených dat. Radiační dávka 99 kGy poukazuje na klesající trend, což není žádoucí, avšak má nejmenší rozptyly. Radiační dávka 66 kGy má opět značné rozptyly a po 4 hm. % TAIC i klesající trend.



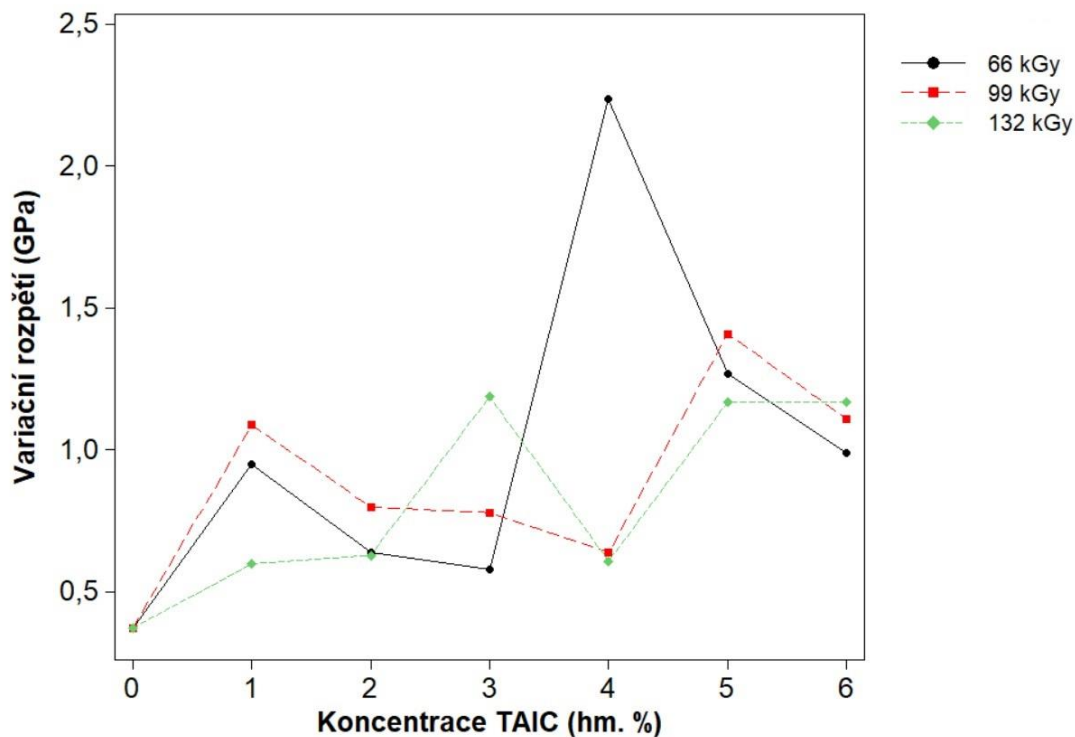
Obr. 37: Medián indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

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.



Obr. 38: Směrodatná odchylka indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

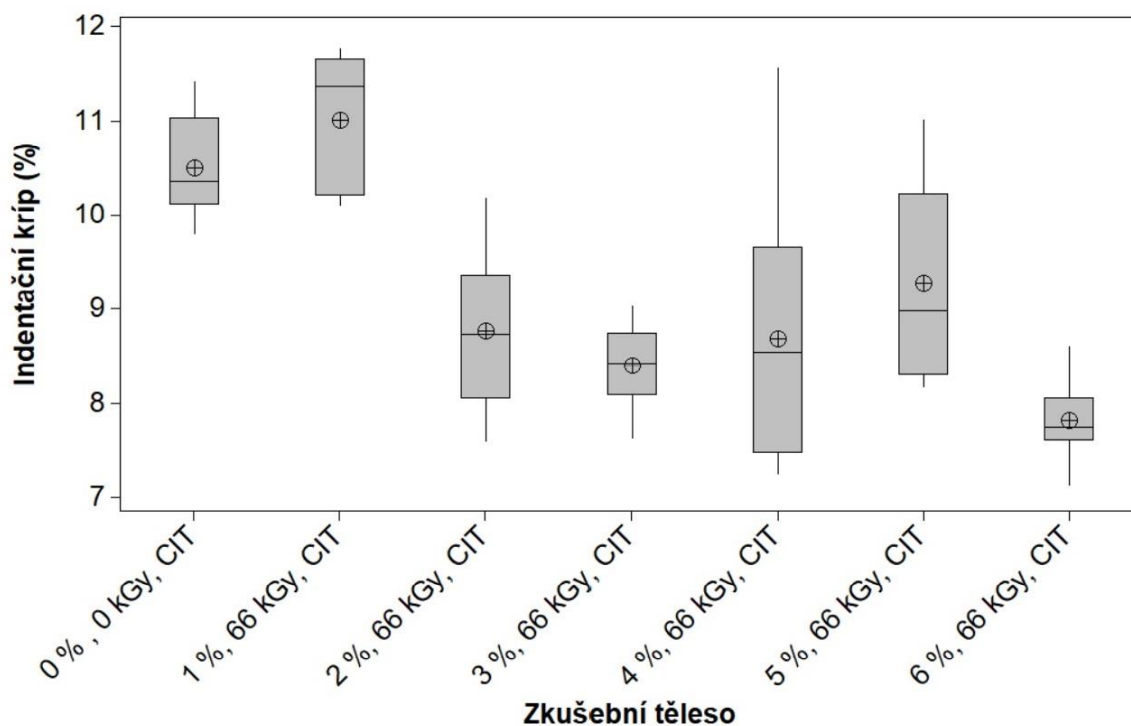
Nejmenší směrodatné odchylky indentačního modulu pružnosti bylo dosaženo při radiační dávce 132 kGy při koncentraci TAIC 4 hm. %, což opět poukazuje na fakt, že se takto ozářený PA 6 jeví jako nejlépe zesíťovaný.



Obr. 39: Variační rozpětí indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiční dávce

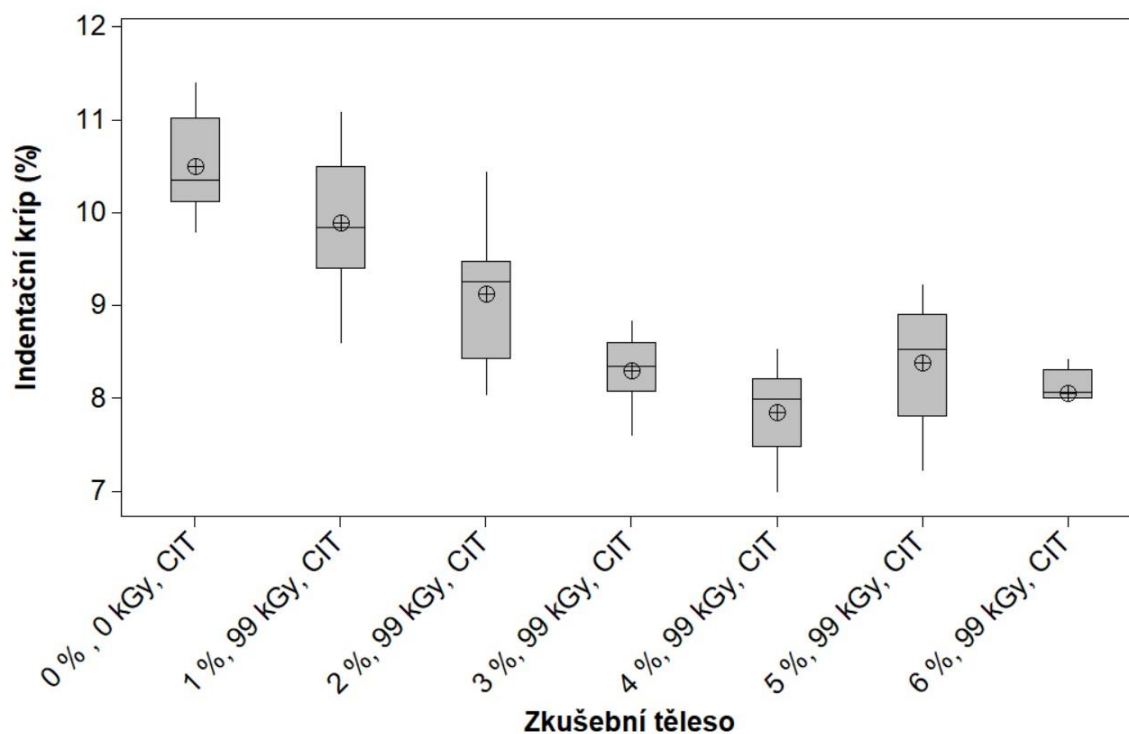
Nejmenšího variačního rozpětí bylo dosaženo u PA 6 ozářeného 132 kGy po přidavku 4 hm. % TAIC, zatímco největšího u stejné koncentrace TAIC a dávky 66 kGy. Proto se dá předpokládat, že dávka 132 kGy je vhodnější pro dosažení lepších výsledků indentačního modulu pružnosti u PA 6.

6.1.3 Indentační kríp



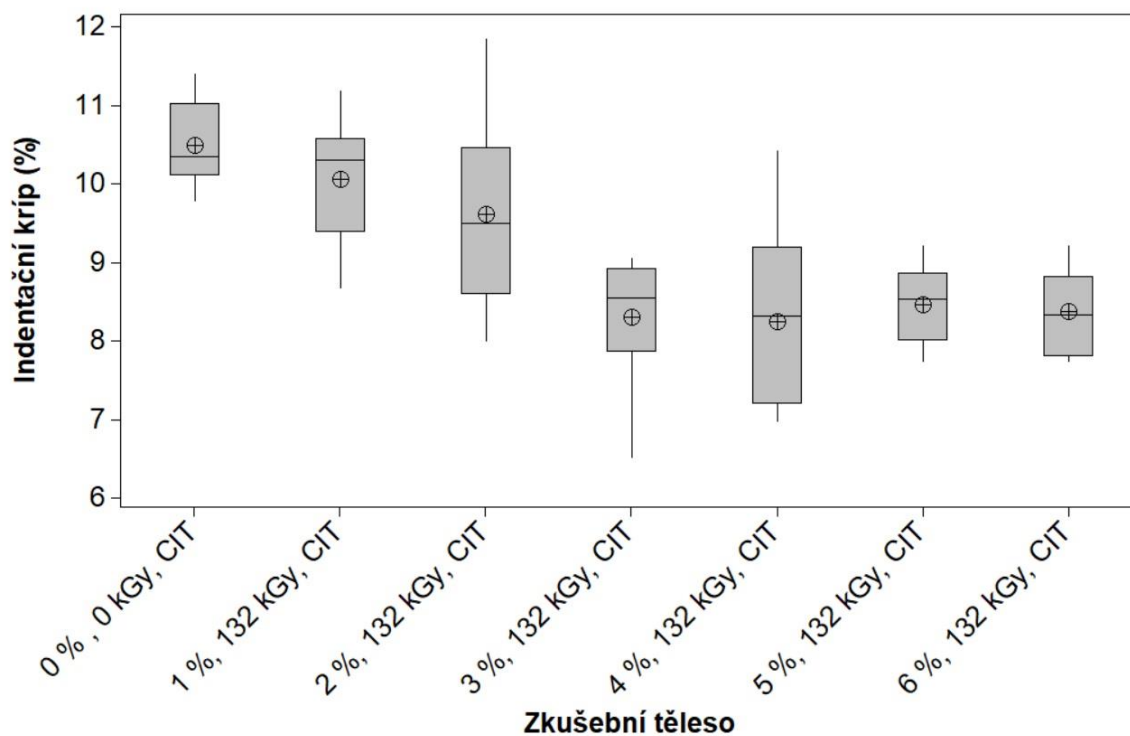
Obr. 40: Indentační kríp PA 6 ozářeného 66 kGy v závislosti na koncentraci TAIC

K dosažení nejnižší hodnoty indentačního krípu v případě radiační dávky 66 kGy je zapotřebí koncentrace 6 hm. % TAIC. V tomto případě se indentační kríp pohybuje v rozmezí od 7,5 do 8 %.



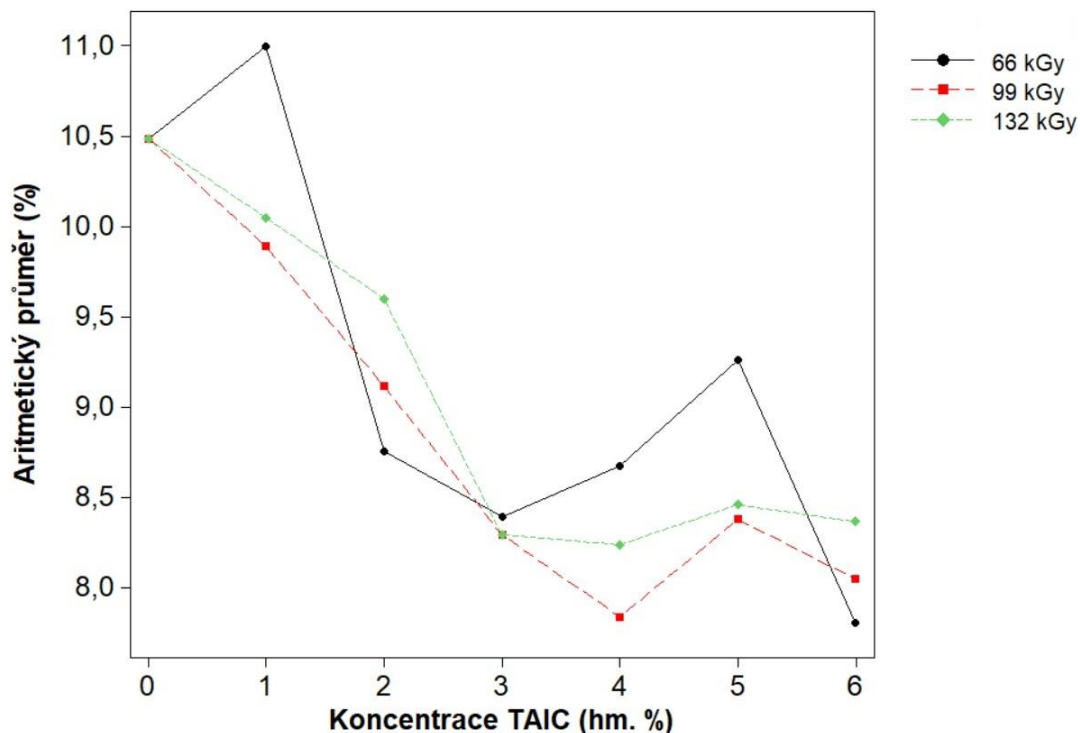
Obr. 41: Indentační kríp PA 6 ozářeného 99 kGy v závislosti na koncentraci

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.



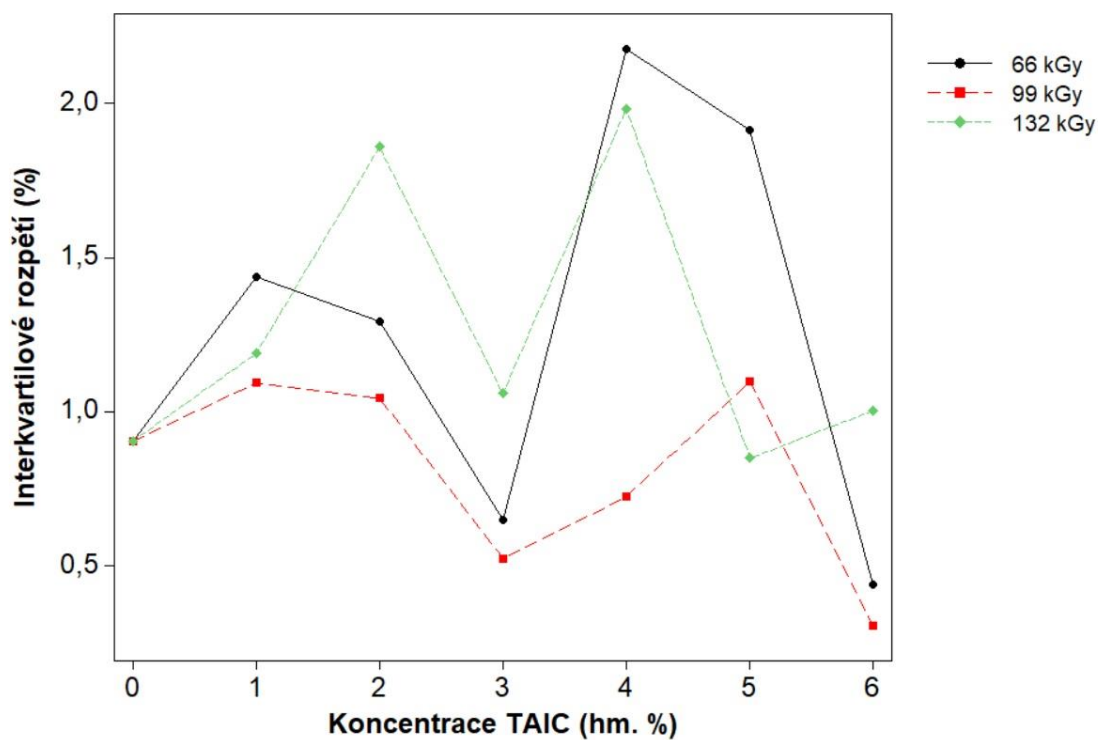
Obr. 42: Indentační kríp PA 6 ozářeného 132 kGy v závislosti na koncentraci

U radiační dávky 132 kGy dochází k postupnému snižování indentačního krípu, avšak v porovnání např. s radiační dávkou 99 kGy hodnoty této mikro-mechanické vlastnosti narůstají. V materiálu pravděpodobně došlo k degradaci, která způsobila nepatrné zvýšení hodnot indentačního krípu.



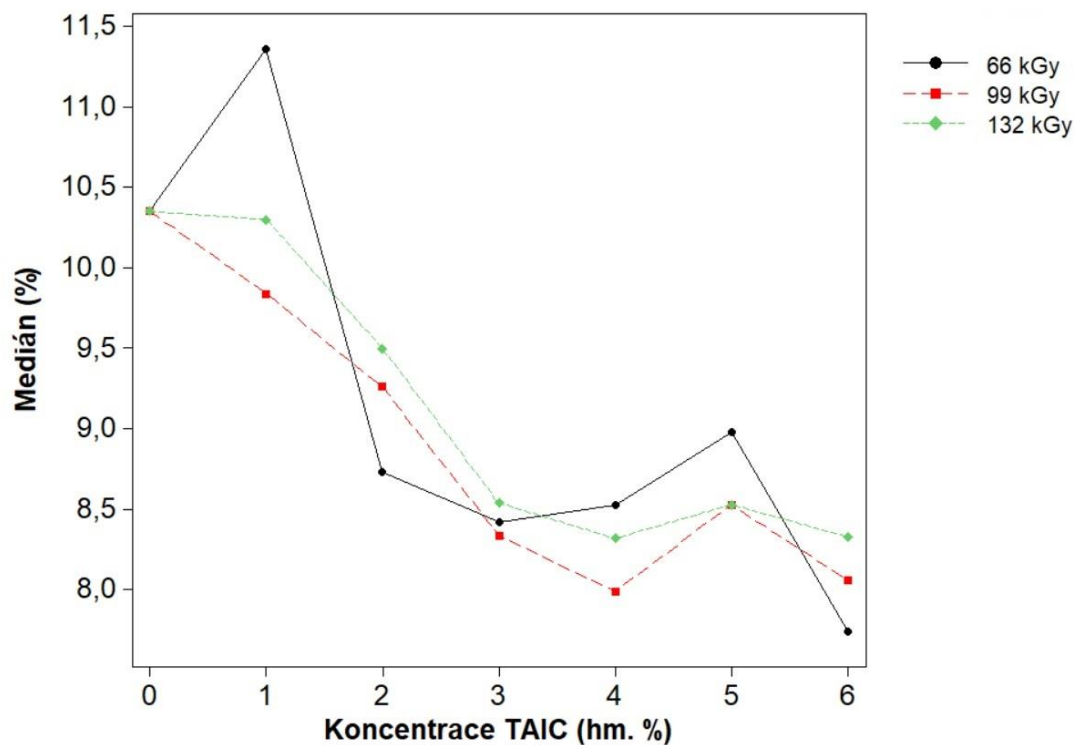
Obr. 43: Aritmetický průměr indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

U indentačního krípu je žádoucí dosáhnout co nejnižších hodnot, což nám zajistí, že testovaný materiál nám pod zatížením tzv. „nepoteče“ neboli poteče co nejméně. Z výsledků na Obr. 43 je jasně vidno, že nejmenšího indentačního krípu s hodnotou necelých 8 % bylo dosaženo u PA 6 ozářeného 99 kGy s koncentrací TAIC 4 hm. %. V porovnání s neozářeným PA 6, kde indentační kríp činil 10,5 % je rozdíl znatelný.



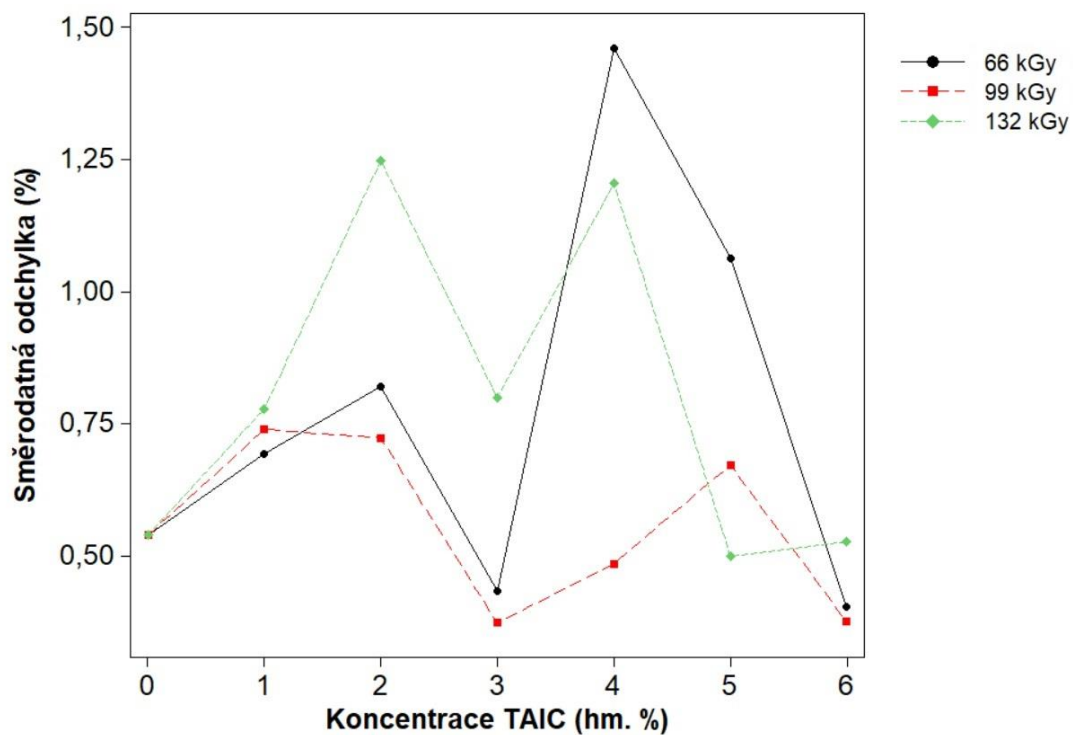
Obr. 44: Interkvartilové rozpětí indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

Interkvartilové rozpětí indentačního krípu ukazuje na velké rozptyly u radiačních dávek 66 a 132 kGy. U radiační dávky 99 kGy dochází k menším rozptylům a k dosažení nejnižších hodnot.



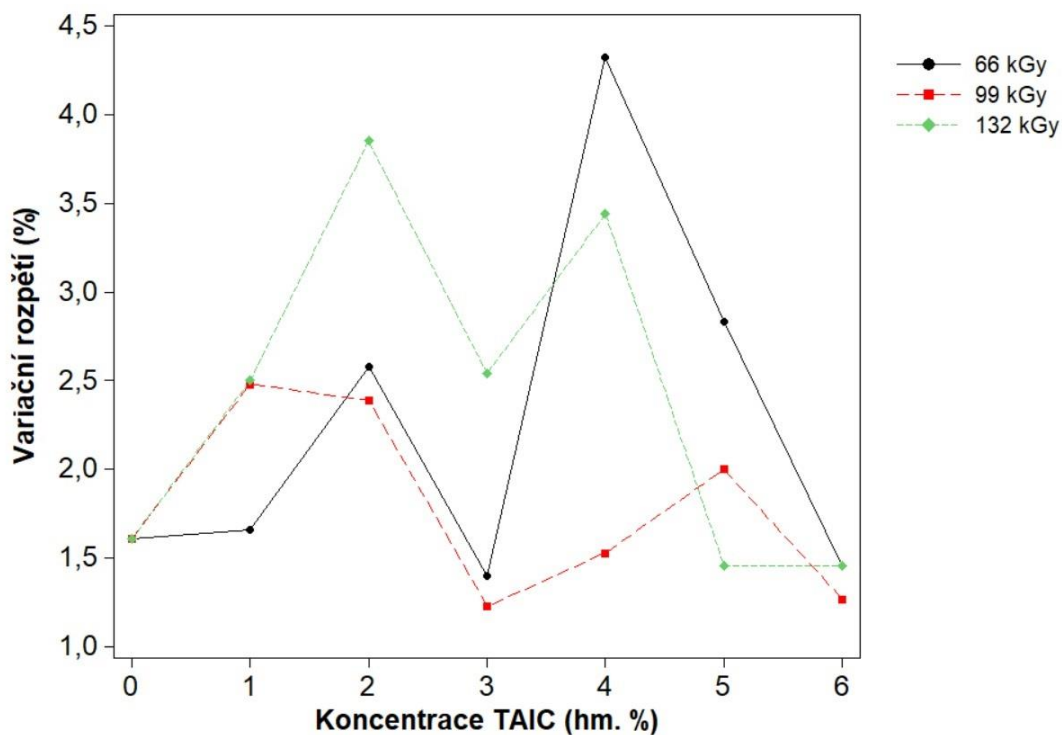
Obr. 45: Medián indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

Na Obr. 45 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 %, což koresponduje s Obr. 44, který vyobrazuje aritmetický průměr indentačního krípu.



Obr. 46: Směrodatná odchylka indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

Směrodatná odchylka ukazuje, že při koncentraci TAIC 3 a 4 hm. % při ozáření 99 kGy dochází k nejspolehlivějšímu měření, což odpovídá i výše zmíněným výsledkům.

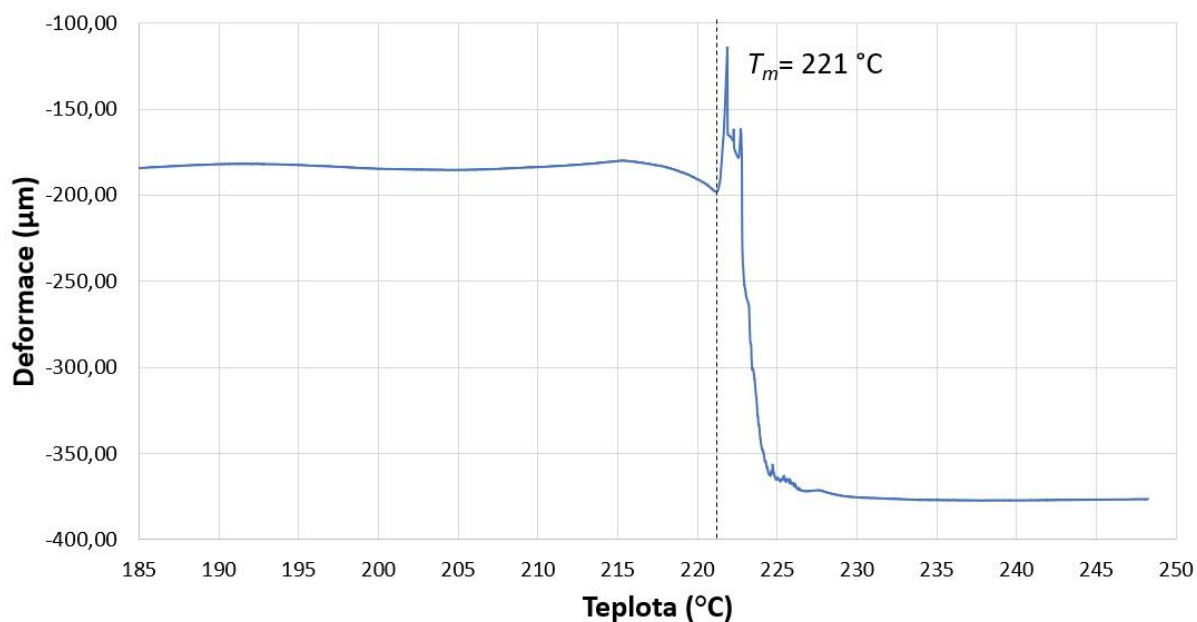


Obr. 47: Variační rozpětí indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce

Na základě výsledku aritmetického průměru a mediánu indentačního krípu lze říci, že variační rozpětí u koncentrace 4 hm. % TAIC a radiační dávce 99 kGy je při své hodnotě přibližně 1,5 % dostatečně malé, aby odpovídalo nejvhodnější koncentraci a radiační dávce, např. při porovnání variačního rozpětí také při 4 hm. % TAIC pro radiační dávku 66 kGy, kde se variační rozpětí blíží k 4,5 %.

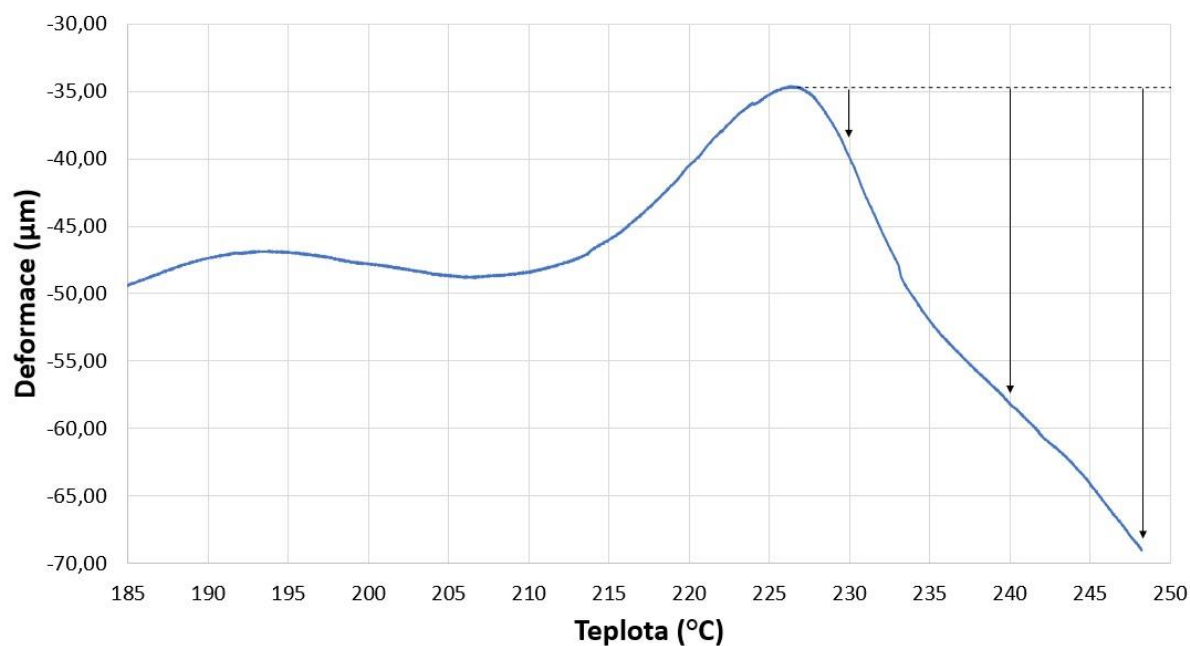
6.2 Termo-mechanická analýza (TMA)

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. Podrobné výsledky deformací všech zkušebních těles jsou shrnuty v tabulkách 1 – 3. 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.



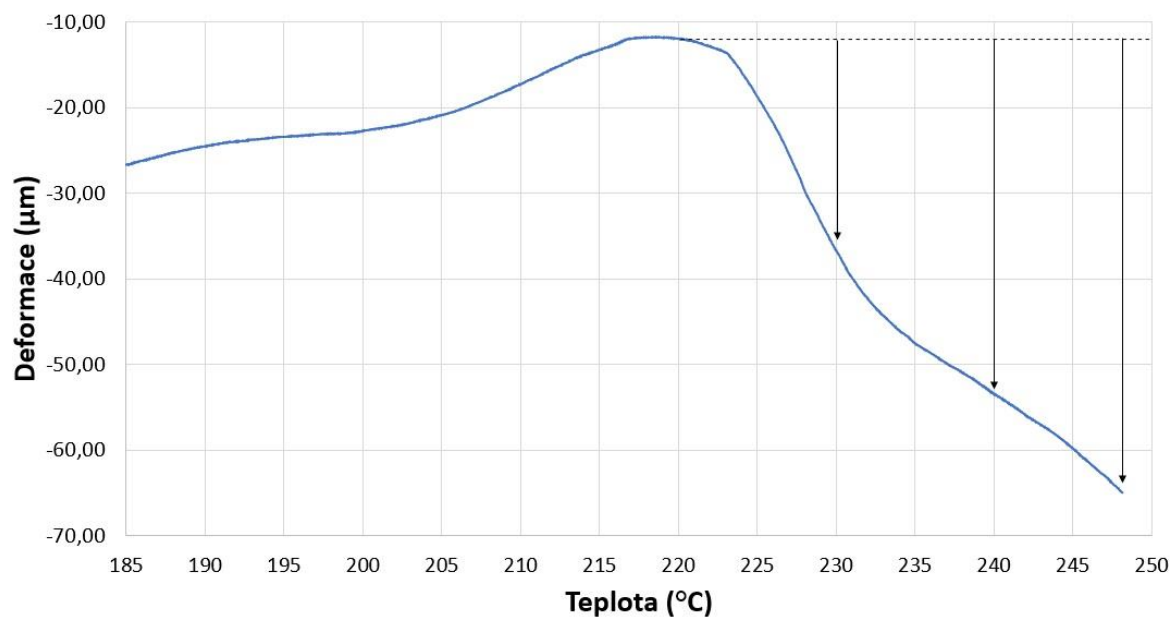
Obr. 48: Vliv teploty na deformaci u neozářeného zkušebního tělesa

Obr. 48 ukazuje na deformaci čistého PA 6. Jak je vidno, tak teplota tání tohoto polymeru je 221 °C.



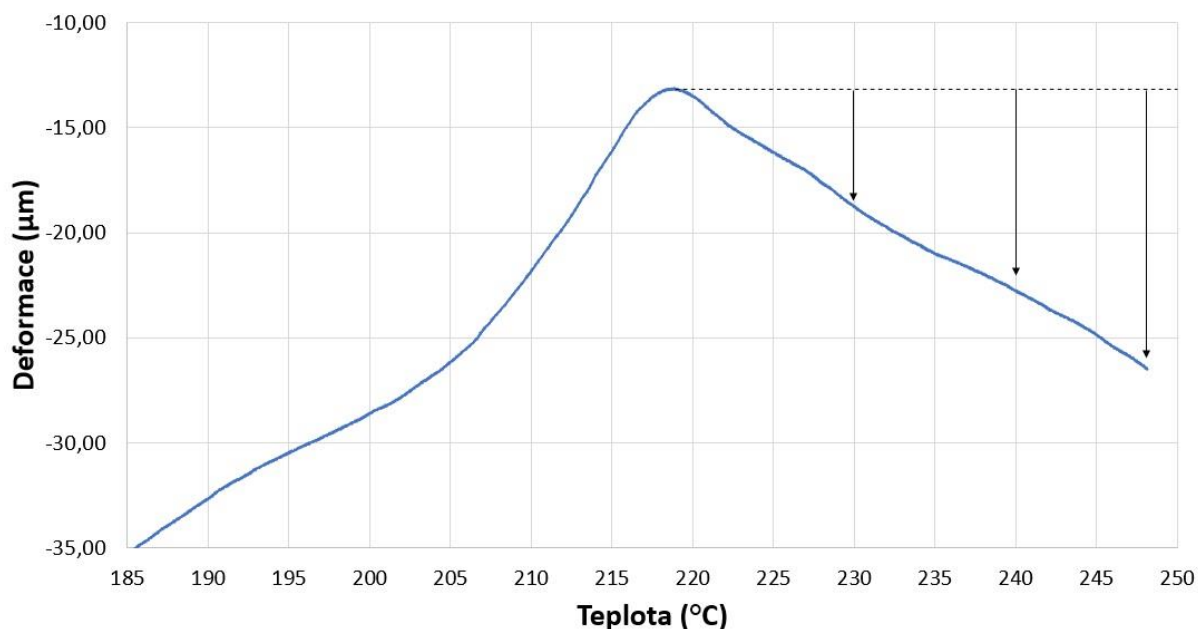
Obr. 49: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 1 hm. % koncentrací TAIC

Na Obr. 49 lze vypožorovat, 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 %.



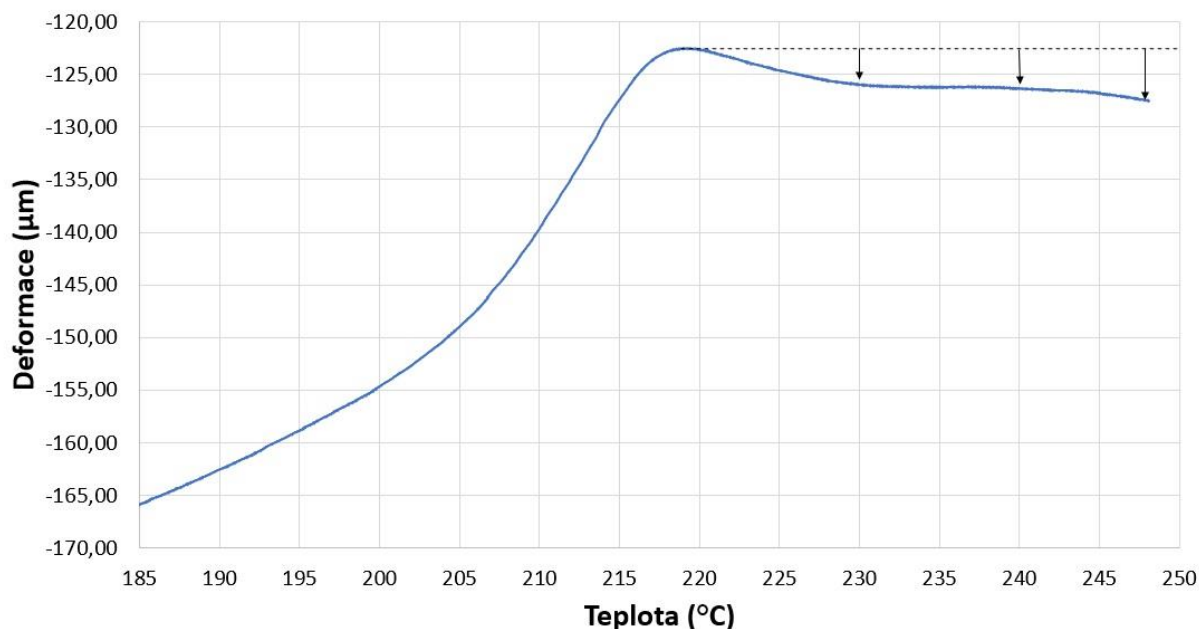
Obr. 50: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 1 hm. % koncentrací TAIC

Obr. 50 ukazuje na podobný trend jako u zkušebního tělesa s 1 hm. % koncentrací TAIC ozářeného 66 kGy. Deformace při 230 °C činí -0,64 %, při 240 °C -1,04 % a při 248 °C je deformace -1,32 %.



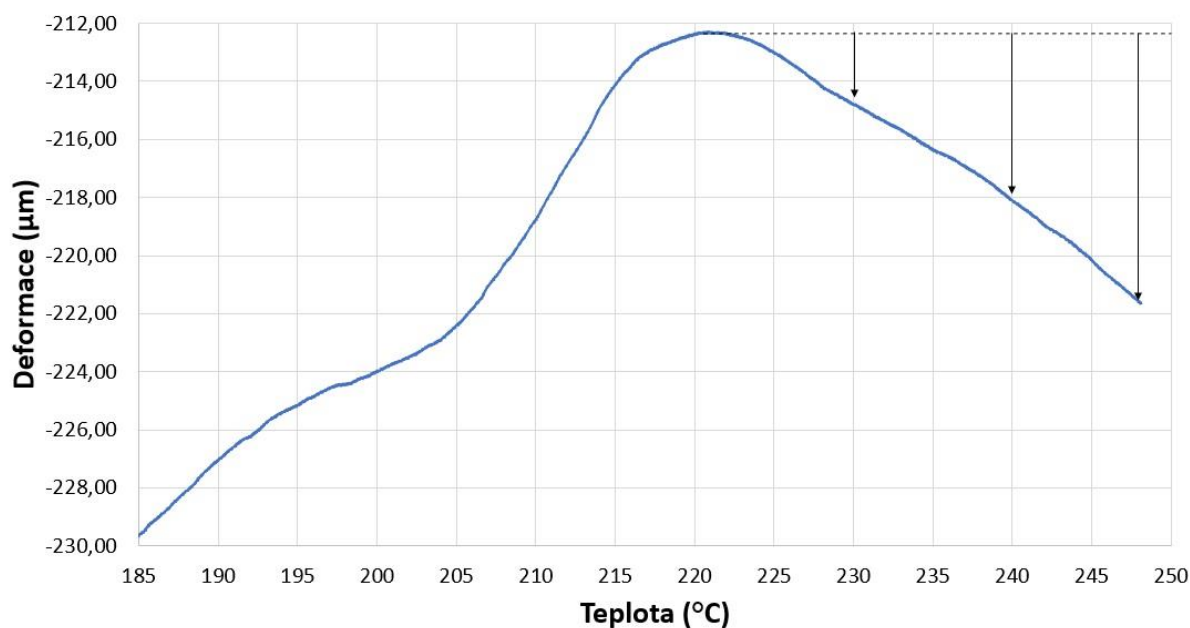
Obr. 51: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 1 hm. % koncentrací TAIC

Na Obr. 51 je zobrazena deformace zkušebního tělesa s 1 hm. % koncentrací TAIC ozářeného nejvyšší radiací dávkou 132 kGy. Z výsledků je patrné, že dochází k nejmenším deformacím zkušebního tělesa z těles s touto koncentrací a to k deformaci -0,14 % při 230 °C, -0,24 % při 240 °C a -0,33 % při 248 °C. Z mechanického chování materiálu lze konstatovat, že při této radiční dávce došlo k lepšímu zesíťování v porovnání s předešlým zkušebním tělesem.



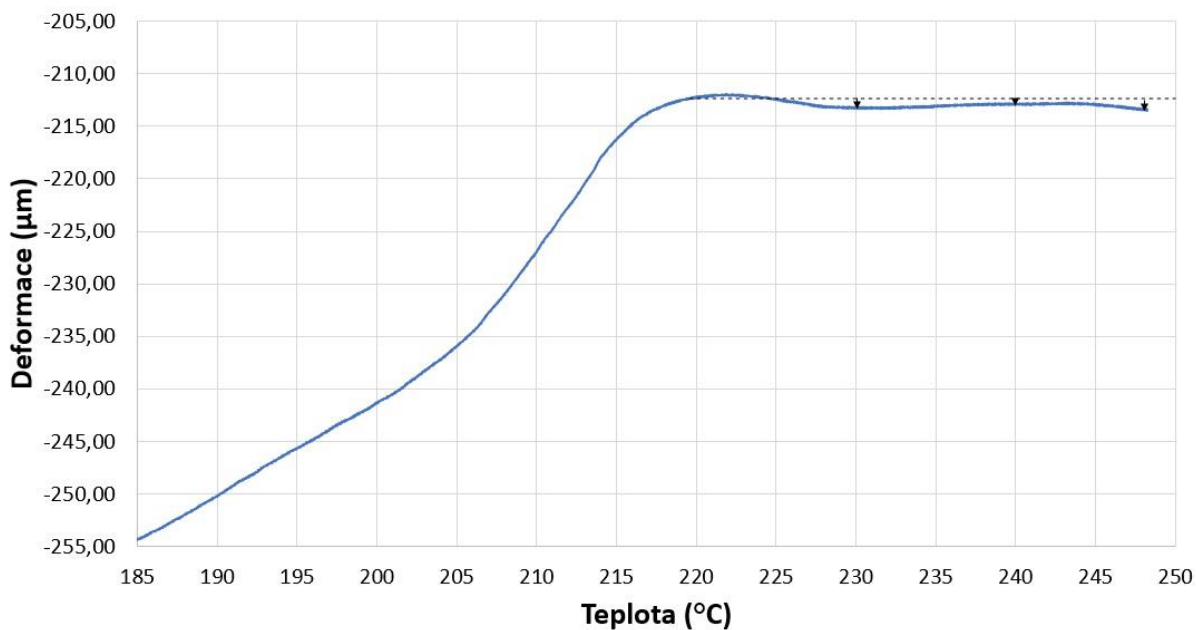
Obr. 52: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 2 hm. % koncentrací TAIC

Zkušební těleso s 2 hm. % TAIC ozářeného 66 kGy vykazuje zlepšení mechanického chování za zvýšených teplot. Deformace při 230 °C je -0,09 %, při 240 °C -0,1 % a při 248 °C -0,12 %.



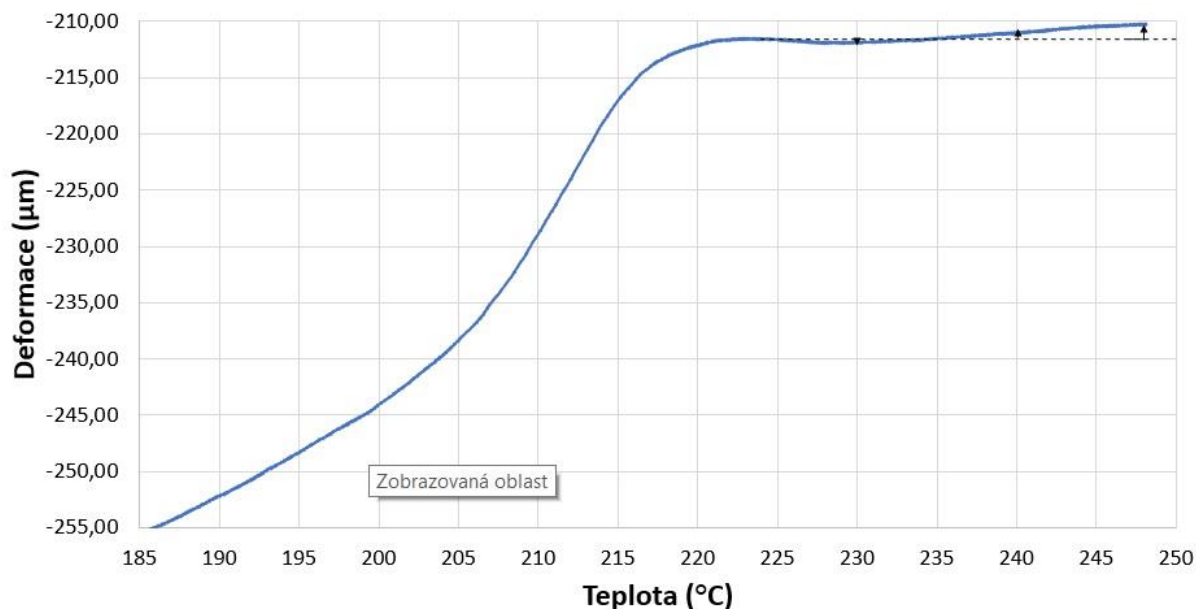
Obr. 53: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 2 hm. % koncentrací TAIC

U zkušebního tělesa o stejné koncentraci TAIC ozářeného 99 kGy dochází k podobné deformaci jako u dávky 66 kGy a to -0,06 % u 230 °C, -0,15 % u 240 °C a při 248 °C -0,23 %. K nepatrně větší deformaci v porovnání se zkušebním tělesem ozářeným 66 kGy mohlo dojít díky nedostatečnému zesíťování v celém objemu materiálu.



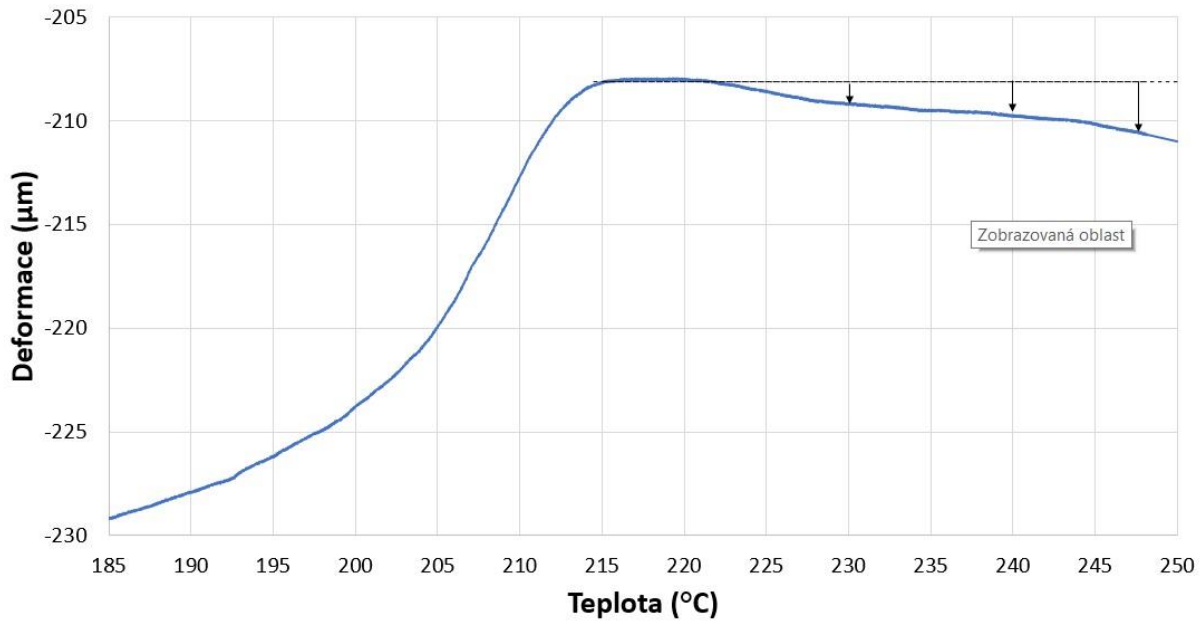
Obr. 54: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 2 hm. % koncentrací TAIC

Radiační dávka 132 kGy vykazovala nejmenší deformaci ze série zkušebních vzorků s 2 hm. % koncentrací TAIC a to -0,02 % při 230 °C, -0,01 % při 240 °C a při 240 °C -0,03 %. Opět je to možné přikládat dostatečnému zesíťování PA 6.



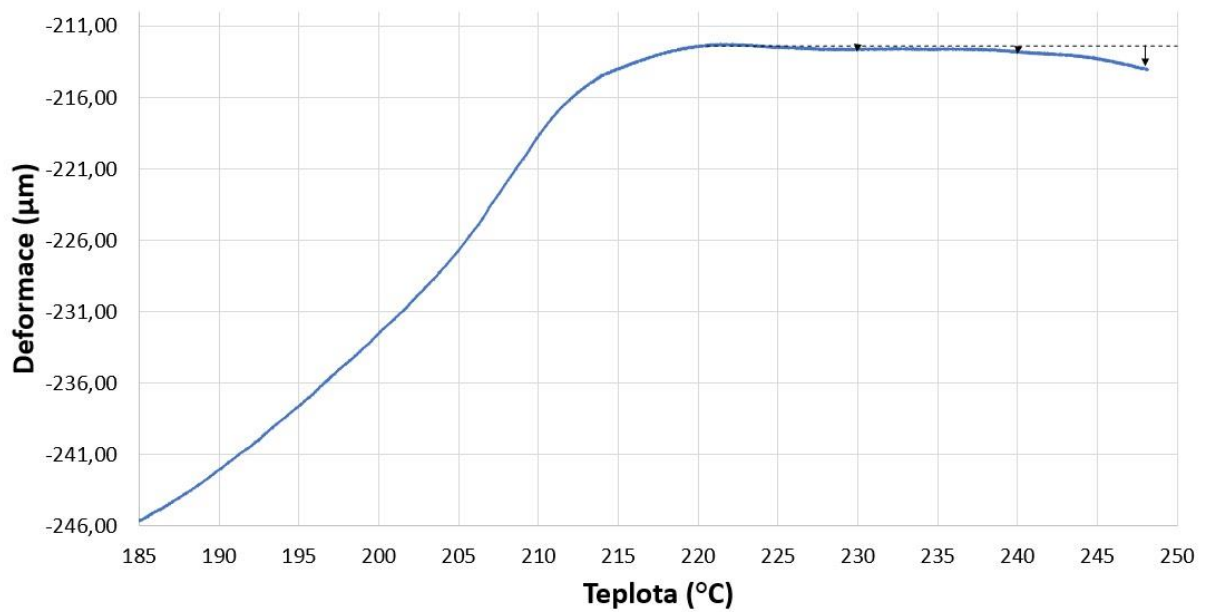
Obr. 55: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 3 hm. % koncentrací TAIC

Při vyšší koncentraci TAIC a to 3 hm. % bylo pro PA 6 ozářeného 66 kGy zjištěno, že od teploty 230 °C dochází až do 248 °C k dominanci děje teplotní roztažnosti, která se projevuje nárůstem křivky. Deformace při teplotě 230 °C a 240 °C činila 0 % a při 248 °C došlo k teplotní roztažnosti 0,03 %. Zde přichází v úvahu to, že zvýšením koncentrace TAIC dochází k lepšímu nasíťování vzorků, což indikuje vzrůstající křivka.



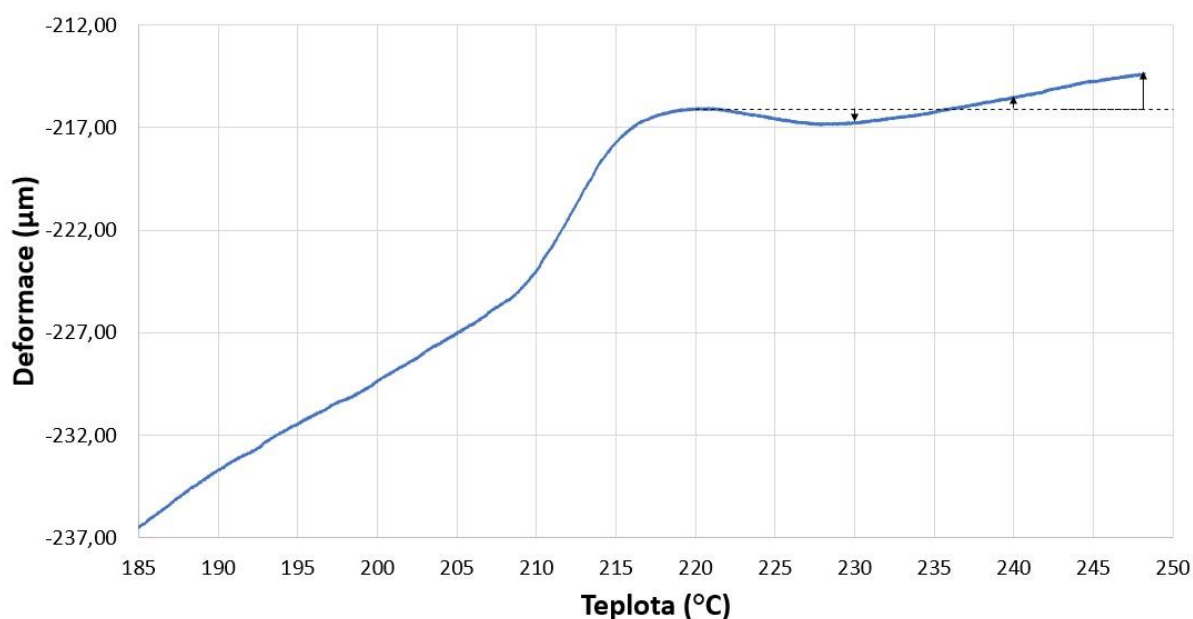
Obr. 56: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 3 hm. % koncentrací TAIC

Deformace PA 6 s koncentrací TAIC 3 hm. % je opět nepatrná a to -0,02 % při 230 °C, -0,05 % při 240 °C a při 248 °C -0,06 %.



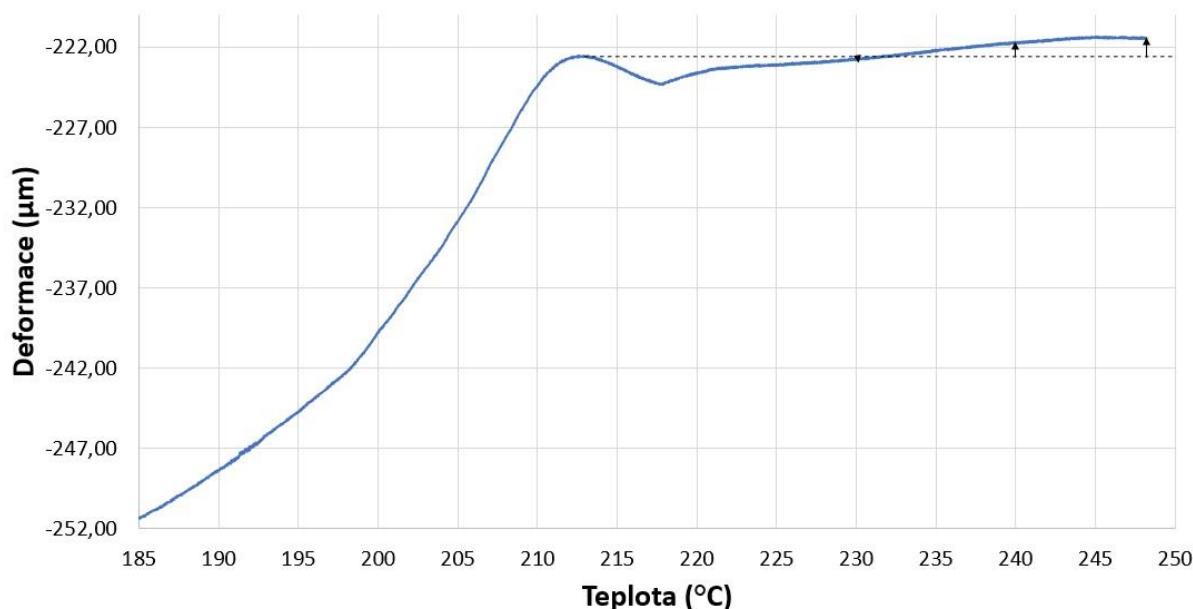
Obr. 57: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 3 hm. % koncentrací TAIC

Při radiační dávce 132 kGy dochází k velmi malé deformaci zkušebních těles a to 0 % při 230 °C, -0,01 % při 240 °C a při 248 °C -0,04 %. U takto modifikovaného materiálu lze říci, že je již dostatečně nasítován.



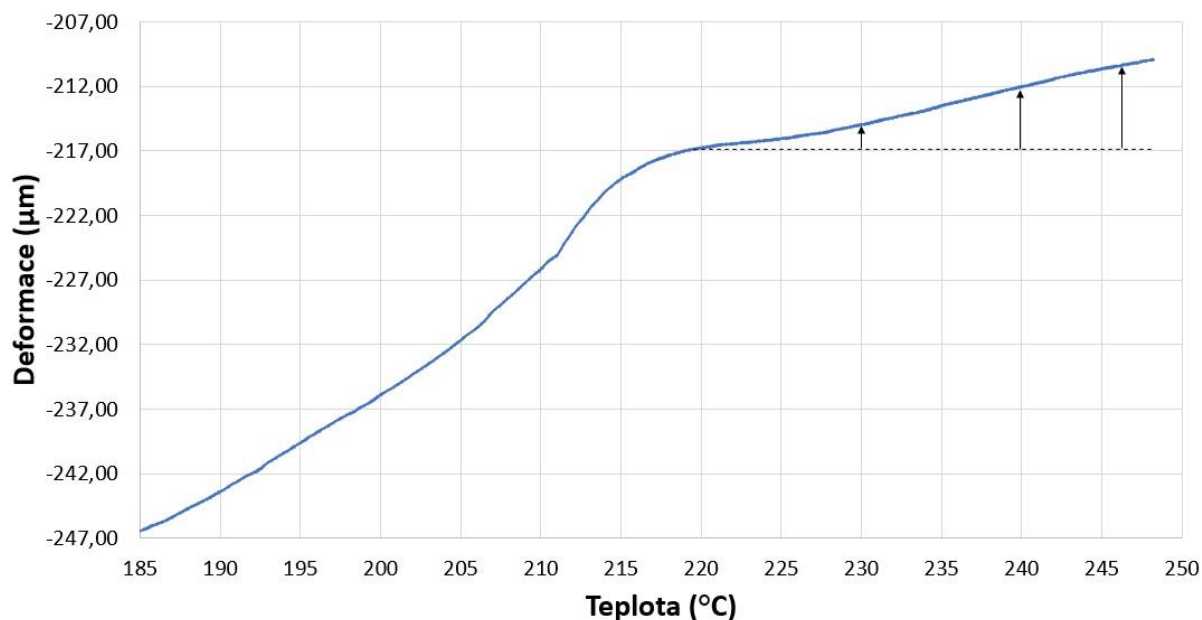
Obr. 58: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 4 hm. % koncentrací TAIC

U PA 6 ozářeného 66 kGy s koncentrací TAIC 4 hm. % dochází od 222 °C k nárůstu deformace a to -0,02 % při 230 °C, po této teplotě dochází k dominanci teplotní roztažnosti, která se projevuje nárůstem křivky. Deformace v teplotě 240 °C je 0,01 % a při 248 °C docházelo k teplotní roztažnosti 0,04 %.



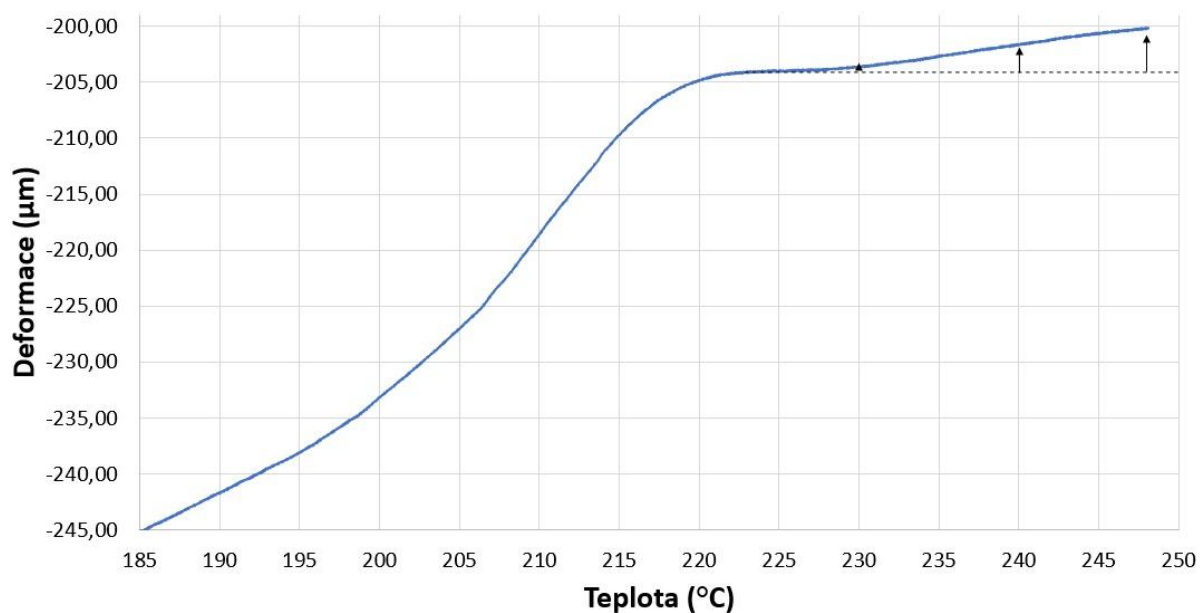
Obr. 59: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 4 hm. % koncentrací TAIC

Na Obr. 59 je patrný zlom při teplotě 218 °C, který je pravděpodobně způsoben špatným uchycením zkušebního tělesa mezi titanovými disky. Při vyšších teplotách je již možné zpozorovat, že dominuje teplotní roztažnost zkušebního tělesa, kde při 230 °C je 0 %, při 240 °C 0,02 % a při 248 °C 0,03 %.



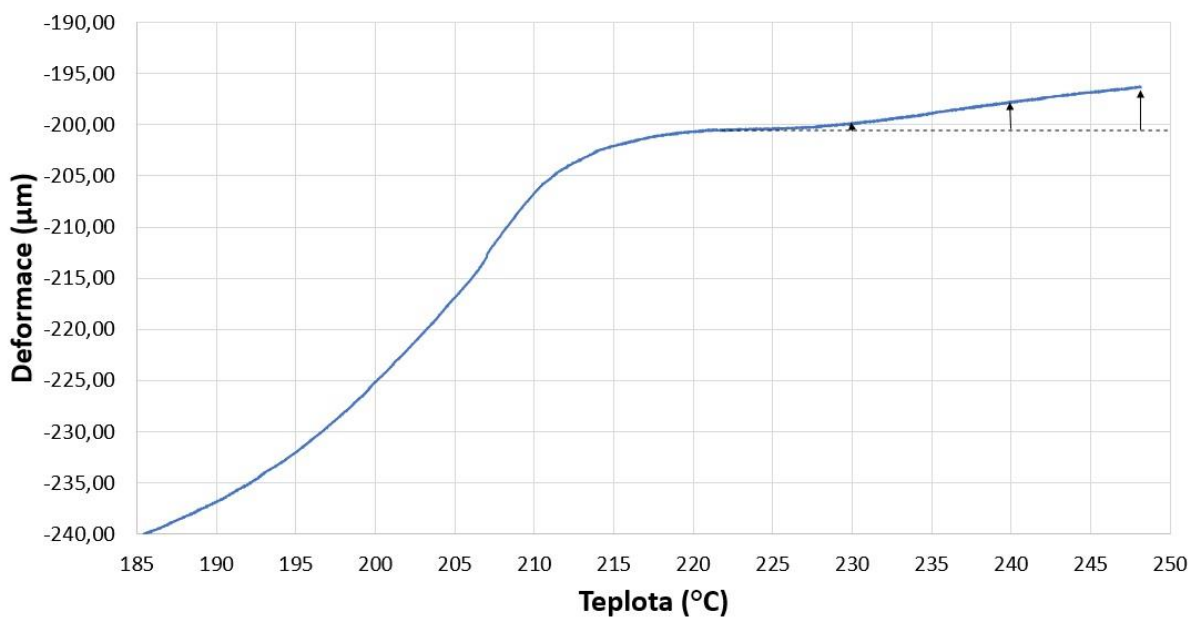
Obr. 60: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 4 hm. % koncentrací TAIC

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.



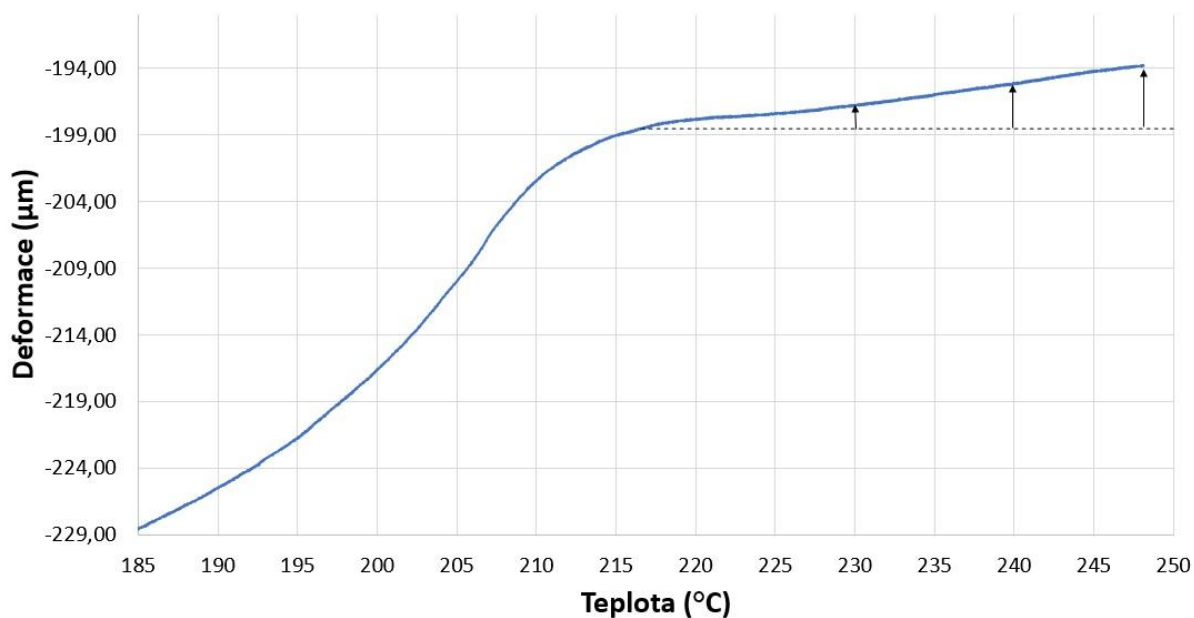
Obr. 61: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 5 hm. % koncentrací TAIC

Podobný trend jako u PA 6 ozářeného 132 kGy s koncentrací TAIC 4 hm. % ukazuje i PA 6 s 5 hm. % TAIC ozářeného 66 kGy. V tomto případě dochází také k teplotní roztažnosti a to 0 % při 230 °C, 0,06 % při 240 °C a při 248 °C 0,1 %. Deformace se zde neprojevila žádná.



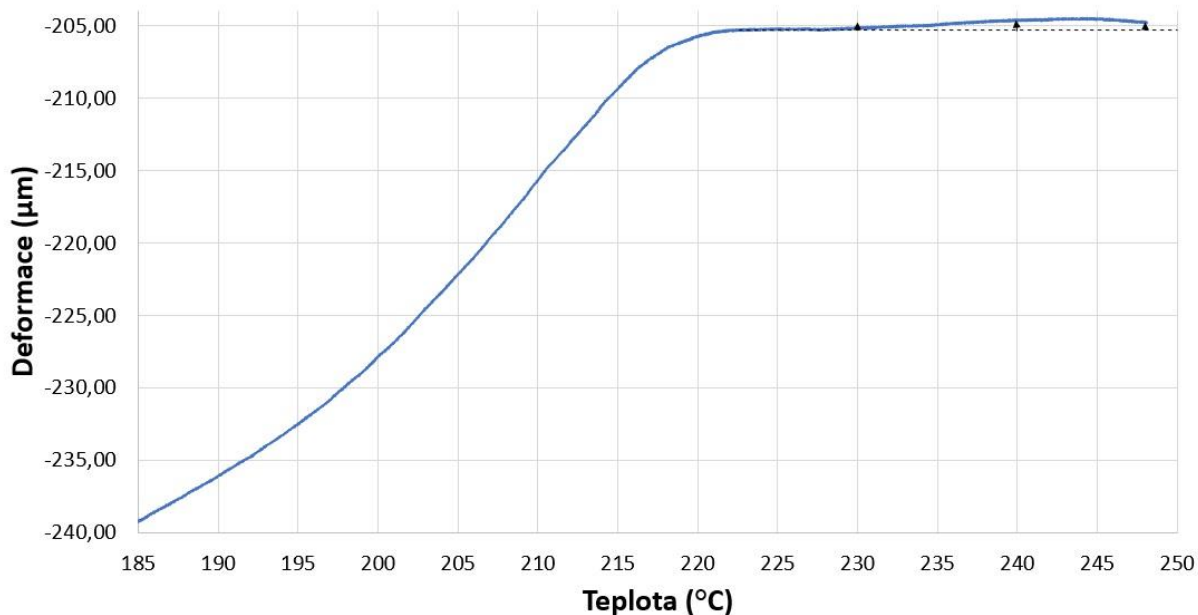
Obr. 62: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 5 hm. % koncentrací TAIC

K většímu nárůstu teplotní roztažnosti dochází, oproti zkušebnímu tělesu o stejné koncentraci TAIC, ozářeného 66 kGy, v případě ozáření 99 kGy. Teplotní roztažnost zde činí 0,02 % při 230 °C, při 240 °C 0,07 % a při 248 °C 0,11 %.



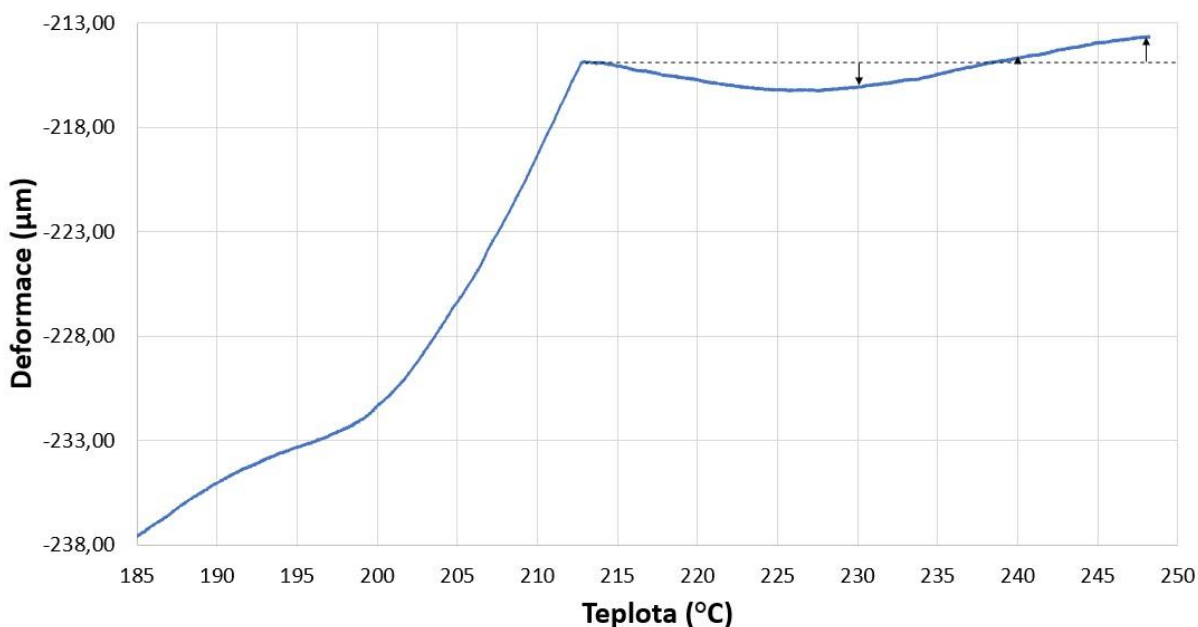
Obr. 63: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 5 hm. % koncentrací TAIC

Dávka 132 kGy způsobila v PA 6 s koncentrací TAIC 5 hm. % největší teplotní roztažnost a to 0,04 % při 230 °C, při 240 °C 0,08 % a 0,12 % při 248 °C.



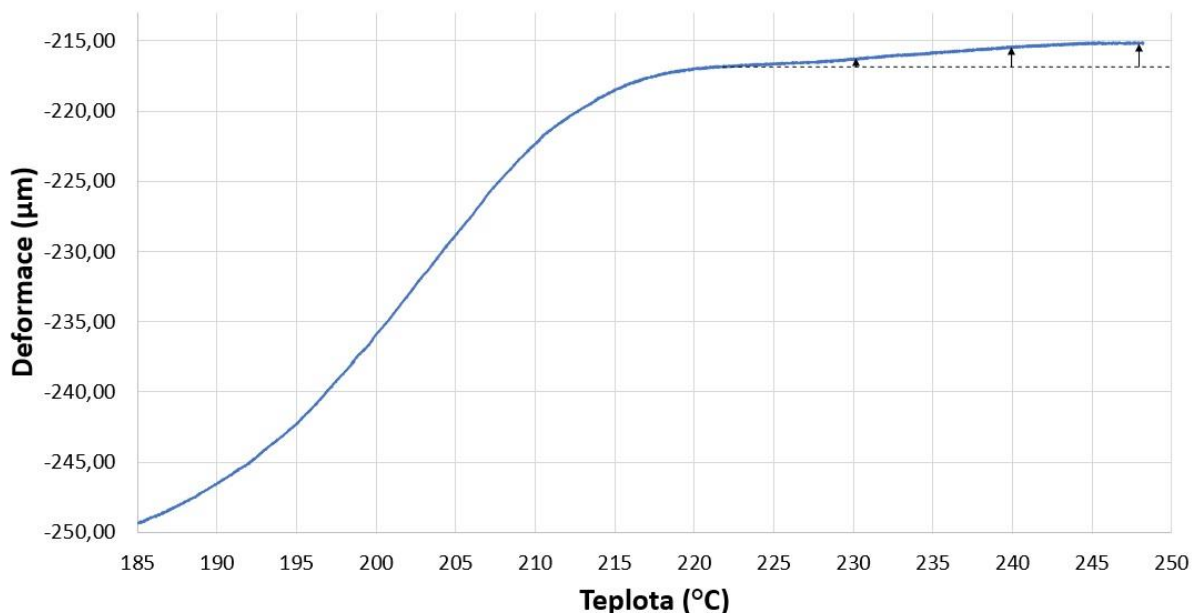
Obr. 64: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 6 hm. % koncentrací TAIC

U PA 6 ozářeného 66 kGy s 6 hm. % dochází k největší rovnováze teplotní roztažnosti a toku nezesíťované části. Teplotní roztažnost při 230 °C zde činí 0 %, při 240 °C 0,02 % a při 248 °C pouhých 0,01 %. Deformace zde není patrná žádná.



Obr. 65: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 6 hm. % koncentrací TAIC

Zkušební těleso s 6 hm. % TAIC ozářené 99 kGy vykazuje od 213 °C deformaci, která trvá až do 227 °C, od této teploty dochází k teplotní roztažnosti, avšak při teplotě 230 °C stále dominuje deformace, která činí -0,03 %, při teplotě 240 °C je deformace již nulová a nastává teplotní roztažnost s hodnotou 0,01 %. Při teplotě 248 °C činí teplotní roztažnost 0,03 %.

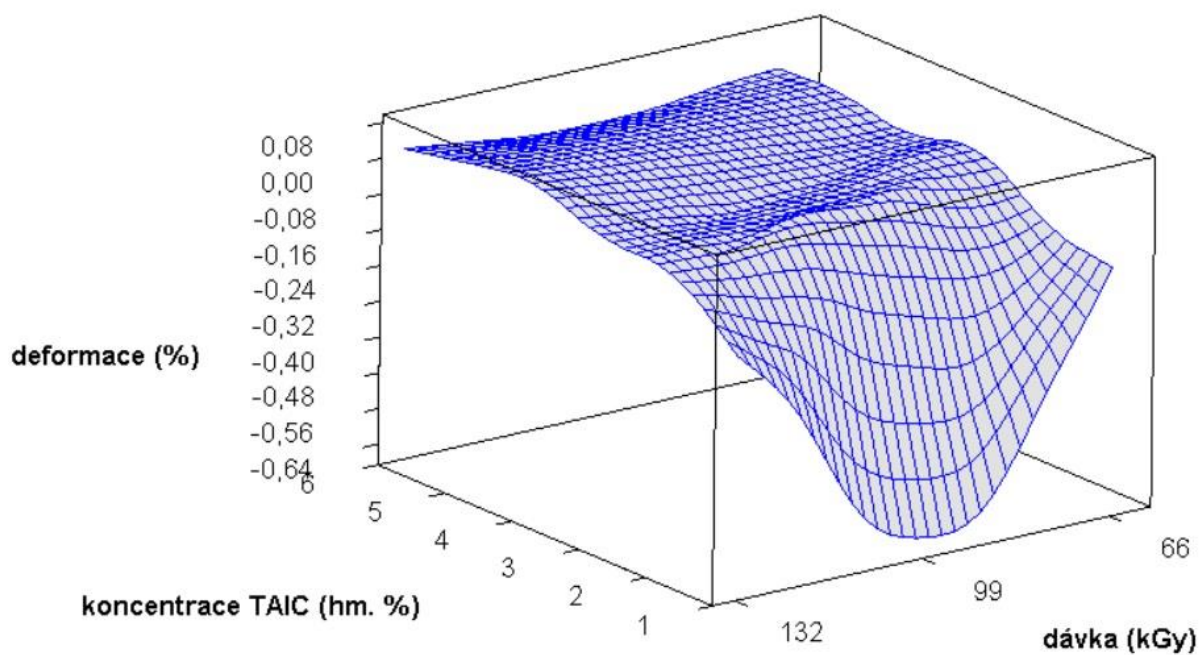


Obr. 66: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 6 hm. % koncentrací TAIC

PA 6 s koncentrací TAIC 6 hm. % ozářený nejvyšší radiací dávkou 132 kGy vykazuje pouze teplotní roztažnost a to 0,01 % při 230 °C, při 240 °C 0,04 % a 0,04 % při 248 °C.

Tabulka 1 Výsledky deformace zkušebních těles při 230 °C

deformace [vlastní deformace(-) + teplotní roztažnost (+)] (%)	deformace (μm)	dávka (kGy)	koncentrace TAIC (hm. %)
-0,13	-5,33	66	1
-0,64	-25,46	99	1
-0,14	-5,75	132	1
-0,09	-3,44	66	2
-0,06	-2,45	99	2
-0,02	-0,92	132	2
0,00	0,00	66	3
-0,02	-0,88	99	3
0,00	0,00	132	3
-0,02	-0,67	66	4
0,00	0,00	99	4
0,05	1,96	132	4
0,00	0,00	66	5
0,02	0,70	99	5
0,04	1,70	132	5
0,00	0,00	66	6
-0,03	-1,21	99	6
0,01	0,54	132	6

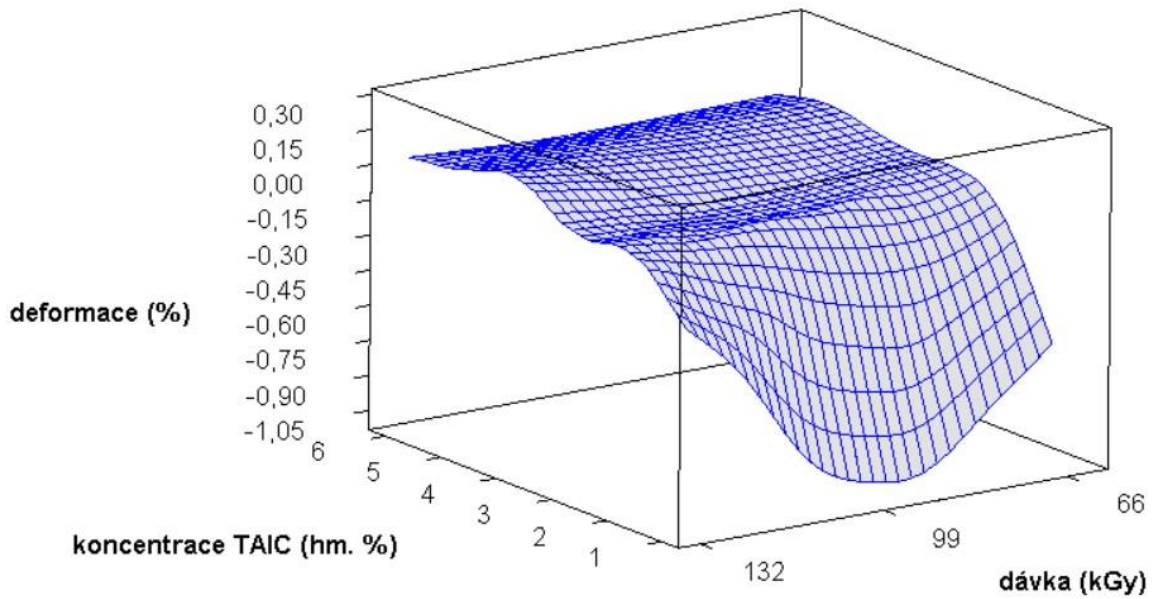


Obr. 67: Vliv dávky záření a koncentrace TAIC na deformaci zkušebního tělesa při 230 °C

V tabulce 1 a na Obr. 67 jsou shrnuty výsledky deformace a teplotní roztažnosti při teplotě 230 °C v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce.

Tabulka 2 Výsledky deformace zkušebních těles při 240 °C

deformace [vlastní deformace(-) + teplotní roztažnost (+)] (%)	deformace (μm)	dávka (kGy)	koncentrace TAIC (hm. %)
-0,59	-23,74	66	1
-1,04	-41,65	99	1
-0,24	-9,75	132	1
-0,10	-3,82	66	2
-0,15	-5,81	99	2
-0,01	-0,52	132	2
0,00	0,00	66	3
-0,05	-1,88	99	3
-0,01	-0,42	132	3
0,01	0,59	66	4
0,02	0,86	99	4
0,12	4,85	132	4
0,06	2,43	66	5
0,07	2,71	99	5
0,08	3,37	132	5
0,02	0,68	66	6
0,01	0,25	99	6
0,04	1,40	132	6

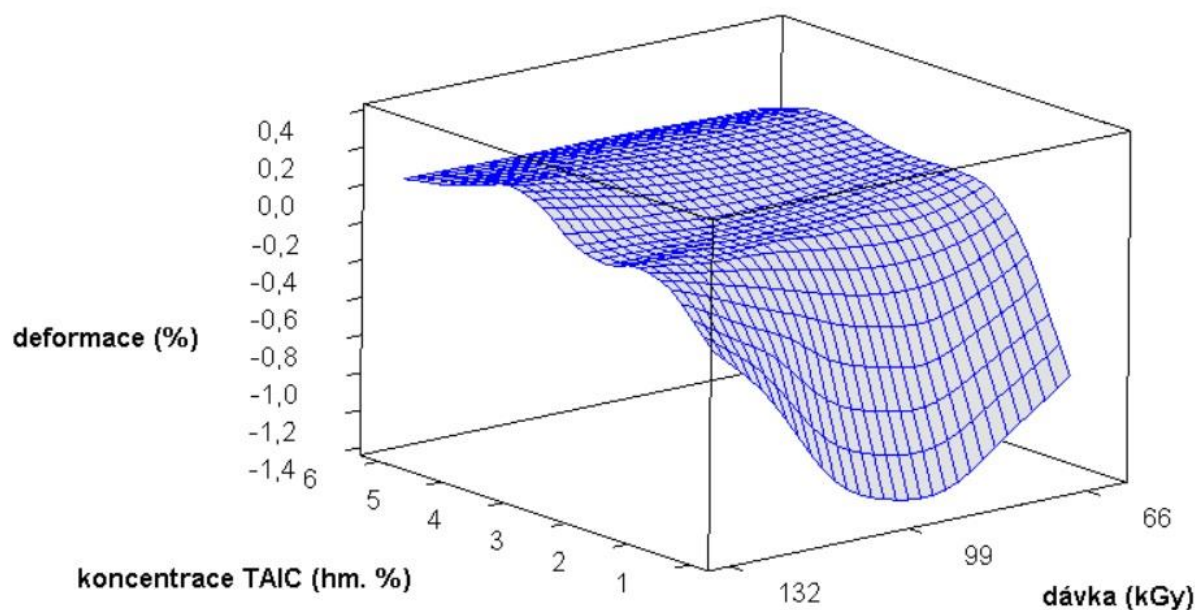


Obr. 68: Vliv dávky záření a koncentrace TAIC na deformaci zkušebního tělesa při 240 °C

V tabulce 2 a na Obr. 68 jsou shrnuty výsledky deformace a teplotní roztažnosti při teplotě 240 °C v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce.

Tabulka 3 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

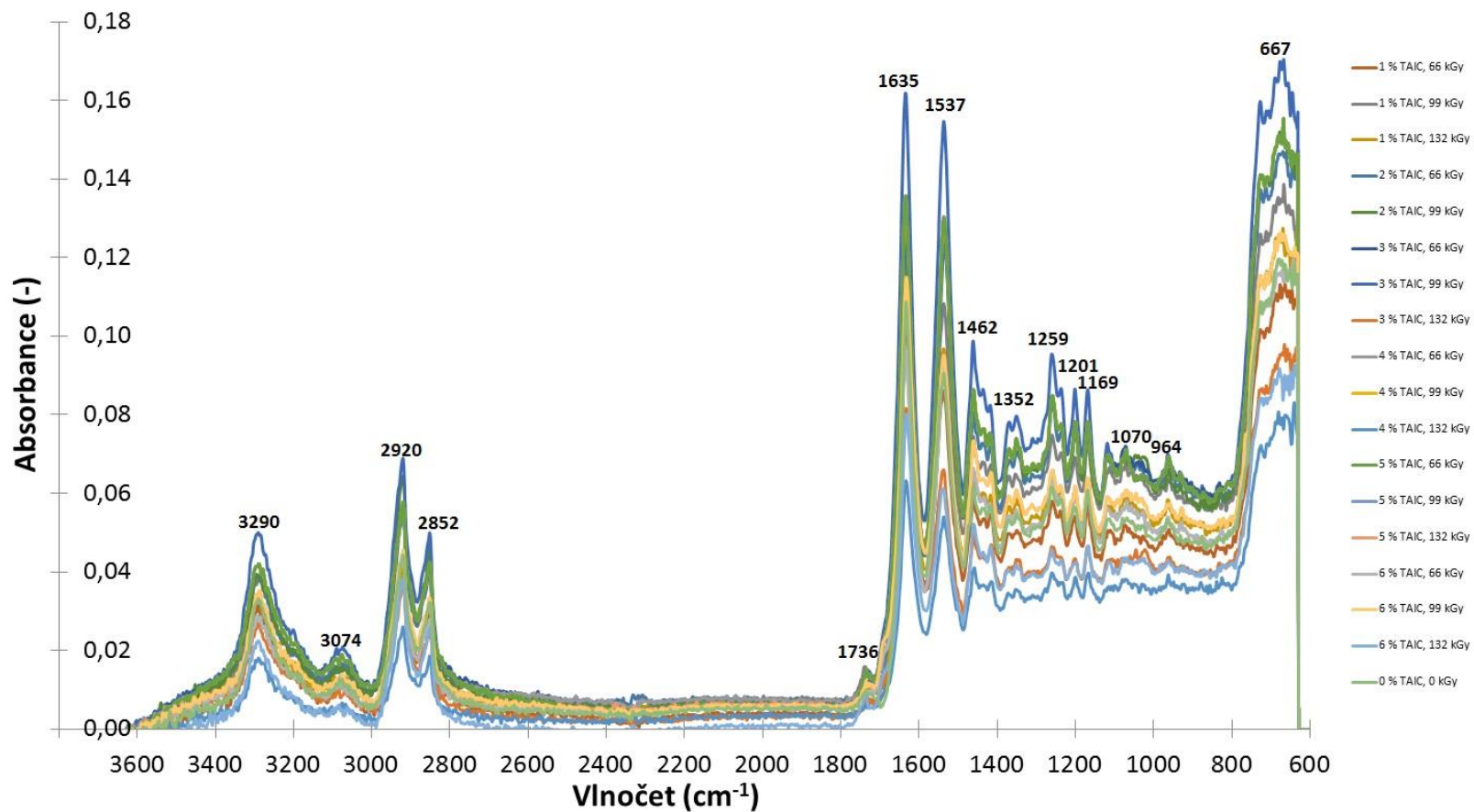


Obr. 69: Vliv dávky záření a koncentrace TAIC na deformaci zkušebního tělesa při 248 °C

V tabulce 3 a na Obr. 69 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 .

6.3 Fourierova transformační infračervená spektrometrie (FTIR)



Obr. 70: FTIR spektrum všech zkušebních těles

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

Pomocí infračervené spektroskopie byla stanovena přítomnost jednotlivých chemických skupin. Obr. 71 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 pásů 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.

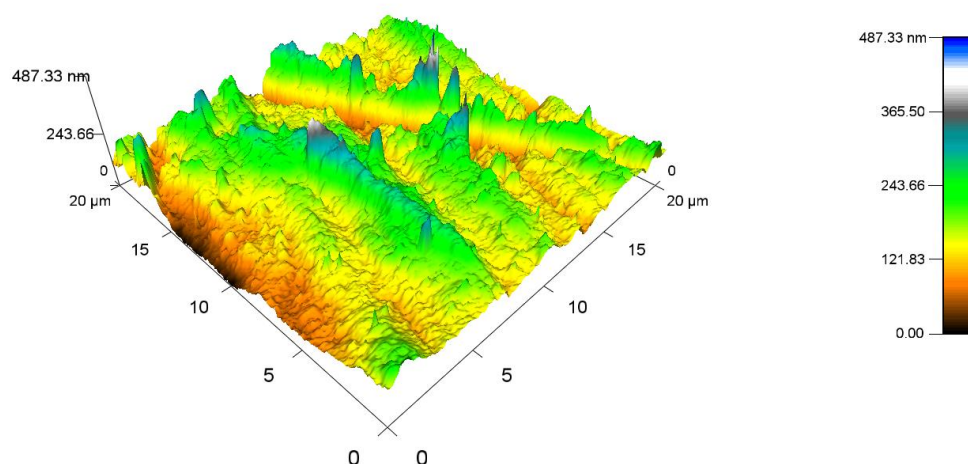
Tabulka 4 zobrazuje hodnoty absorpance při vlnočtu 1736 cm^{-1} , který je typický pro karbonylové skupiny ukazující na degradaci PA 6. Zeleně vyznačená absorpance je nejnižší a to s hodnotou $0,00613$, což koresponduje s výsledky mikro-mechanických vlastností, kde PA 6 ozářený 132 kGy s 4 hm. \% TAIC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

Tabulka 4 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

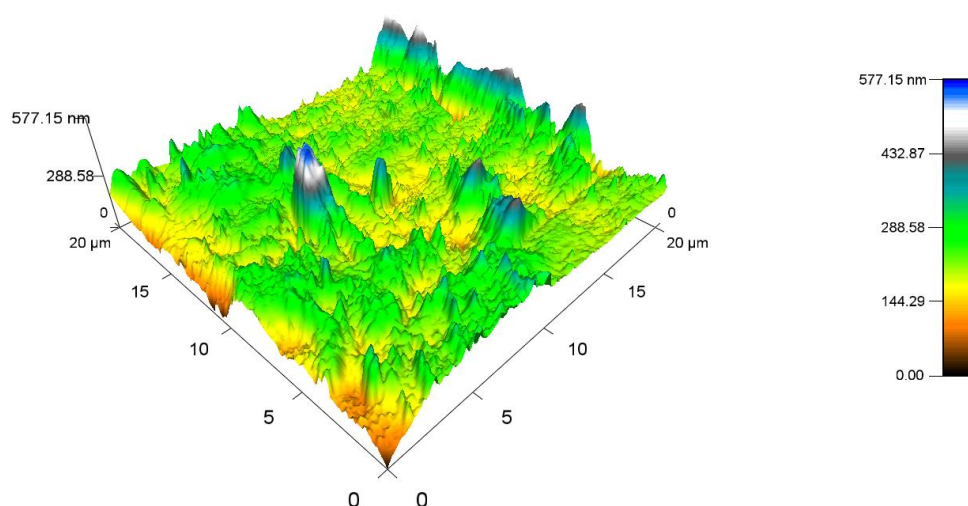
6.4 Mikroskopie atomárních sil (AFM)

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.



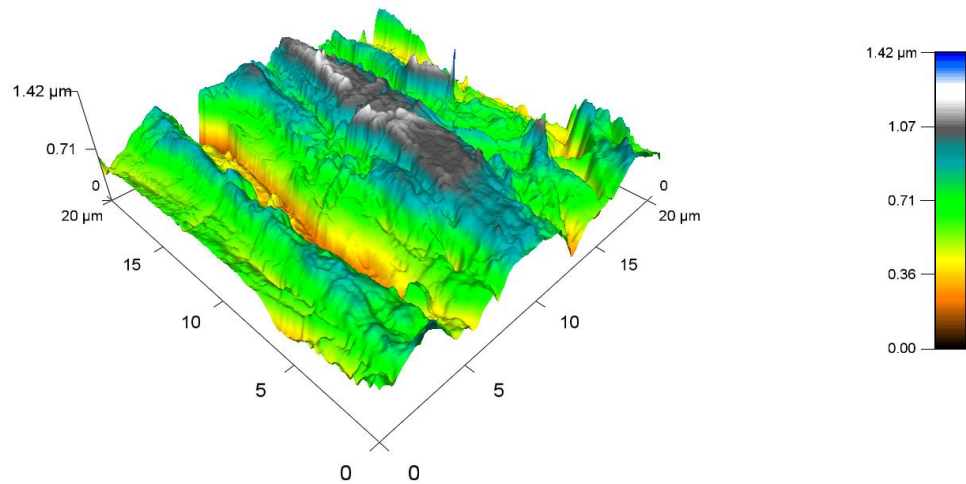
Obr. 71: Topografie povrchu neozařeného zkušebního tělesa

Na Obr. 71 je zobrazena topografie povrchu neozařeného PA 6. Nejvyšší vrchol zde má 487,33 nm, nejnižší se blíží k 0 nm.



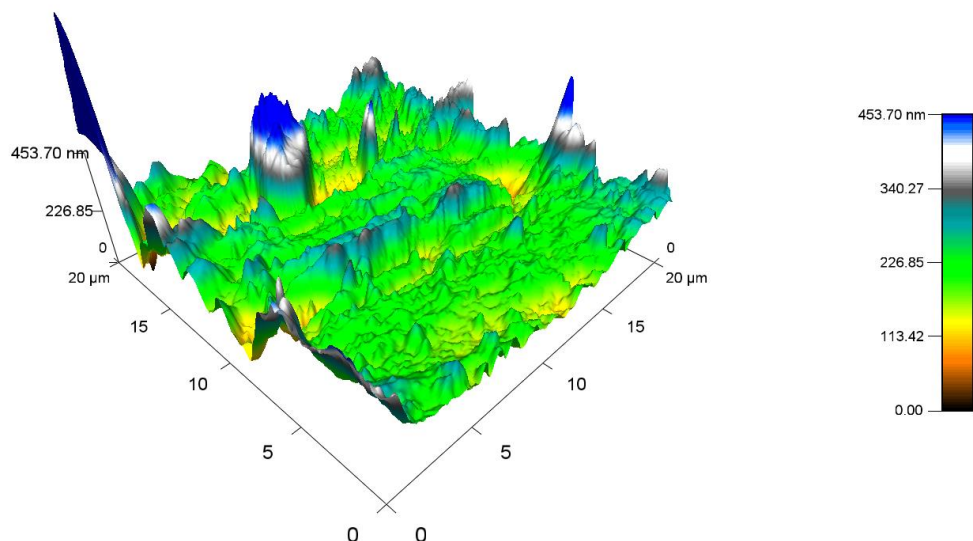
Obr. 72: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 1 hm. % TAIC

Topografie povrchu zkušebního tělesa s koncentrací TAIC 1 hm. % ozářeného 132 kGy vykazuje nejvyšší vrchol 577,15 nm, což se příliš neliší od PA 6, který nebyl ozářen.



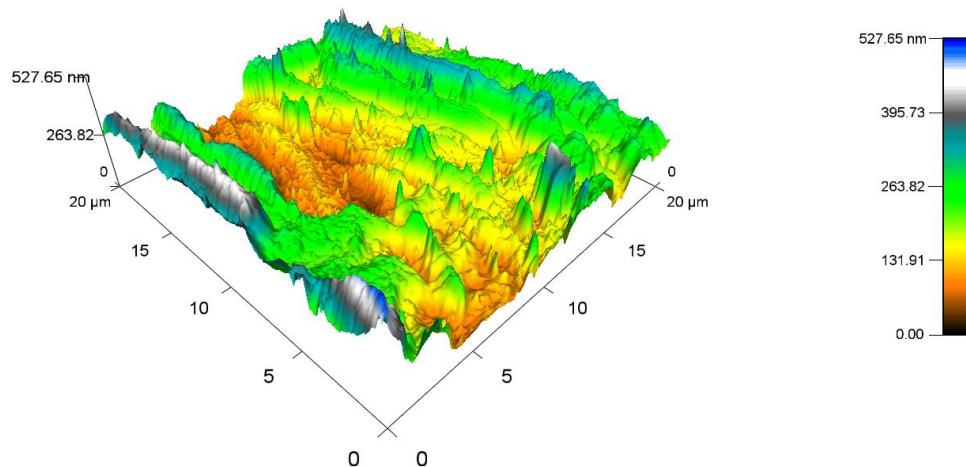
Obr. 73: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 2 hm. % TAIC

U zkušebního tělesa s 2 hm. % TAIC, ozářeného dávkou 132 kGy má nejvyšší vrchol 1,42 μm.



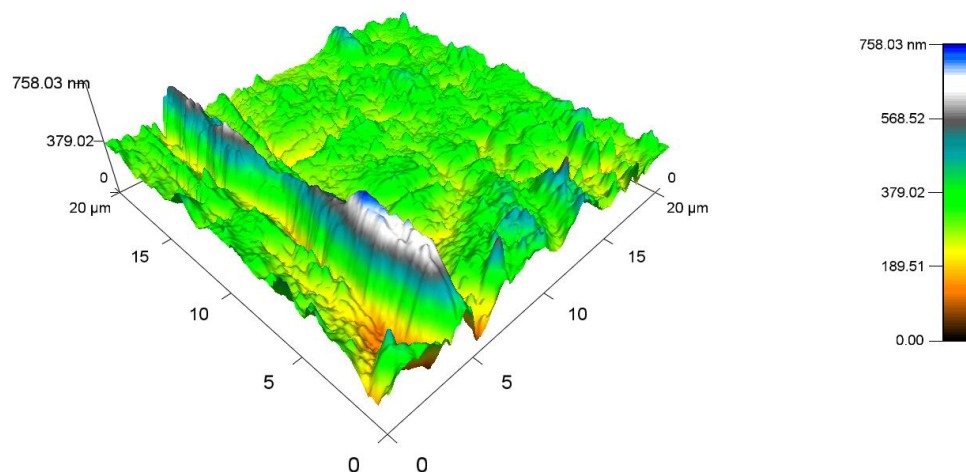
Obr. 74: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 3 hm. % TAIC

Zkušební těleso s 3 hm. % TAIC má nejvyšší vrchol 453,7 nm, což je obdobné jako u neozářeného PA 6.



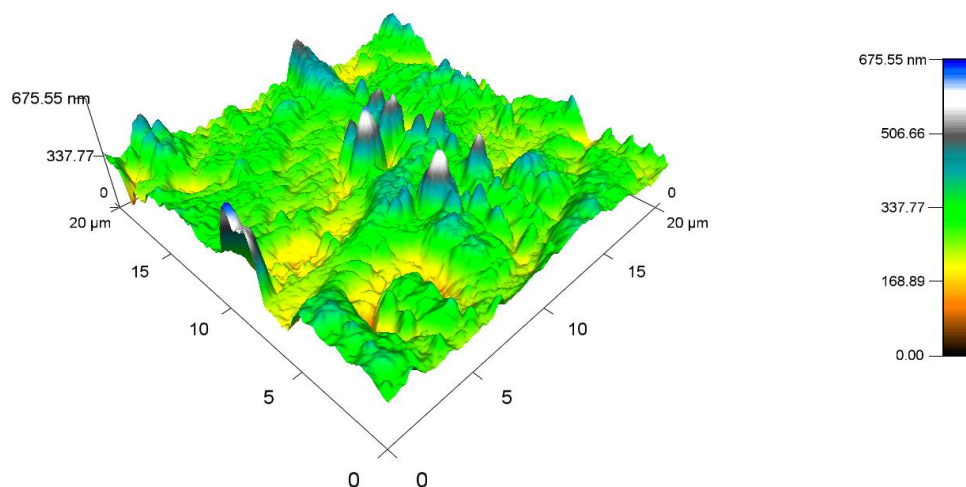
Obr. 75: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 4 hm. % TAIC

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



Obr. 76: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 5 hm. % TAIC

Zkušební těleso s 5 hm. % TAIC vykazuje nejvyšší vrchol 758,03 nm.



Obr. 77: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 6 hm. % TAIC

PA 6 s 6 hm. % TAIC, ozářený stejnou radiační dávkou jako všechny předešle zmíněná zkušební tělesa, má nejvyšší vrchol 675,55 nm.

7. DISKUZE VÝSLEDKŮ

Pro obdržení nejvyšší hodnoty indentační tvrdosti, a to 218 MPa, je zapotřebí ozářit PA 6 s 4 hm. % TAIC dávkou 132 kGy. 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. %.

Radiační dávka 132 kGy se jeví jako nejvhodnější pro dosažení nejvyššího indentačního modulu pružnosti PA 6 a to až 4,8 GPa při koncentraci 4 hm. % TAIC. 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.

Při radiační dávce 99 kGy u PA 6 s koncentrací TAIC 4 hm. % dochází k nejnižší hodnotě indentačního krípu a to přibližně 8 %, což je v porovnání s neozářeným PA 6 o 2,5 % nižší hodnota.

Pomocí TMA bylo zjištěno, že nejvíce zesíťované zkušební těleso byl PA 6 ozářený 132 kGy s koncentrací TAIC 4 hm. %, kde 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 u tohoto materiálu vůbec nedošlo. Při těchto hodnotách teplotní roztažnosti je velmi pravděpodobné, že materiál je již natolik dostatečně zesíťovaný a tudíž není třeba zvyšovat koncentraci TAIC, ani radiační dávky.

Hodnoty absorbance, při vlnočtu 1736 cm^{-1} , který je typický pro karbonylové skupiny ukazující na degradaci PA 6, jsou zobrazeny v tabulce 4. Nejnižší absorbance 0,00613 a tudíž nejnižší degradace byla nalezena u PA 6 ozářeného 132 kGy s 4 hm. %, což koresponduje s výše popsány výsledky. Absorbance 0,01552 patří zkušebnímu tělesu ozářenému 99 kGy s 1 hm. % TAIC. Toto zkušební těleso vykazovalo největší degradaci.

Topografie povrchu byla zmapována pro lepší představu o možném ovlivnění povrchu PA 6 ionizačním zářením. Ze získaných výsledků lze konstatovat, že dané dávky záření nemají vliv na topografii povrchu u PA 6, což je pozitivní jev, poněvadž změna topografie povrchu by mohla ovlivnit výsledné vlastnosti materiálu u aplikací, pro které by tento materiál byl určen, a to buď pozitivním směrem nebo naopak negativním.

Poněvadž síťovací činidlo je v případě polyamidů nezbytné, a to z důvodu, že při jeho absenci u procesu síťování dochází pouze k degradaci materiálu, je důležité zvolit správnou koncentraci tohoto činidla. Také je důležité určit správnou dávku radiačního záření, poněvadž díky správné volbě procesních podmínek je možné dosáhnout vyšších úspor nákladů, tudíž větších zisků.

V případě, kdy je po PA 6 požadován nejnižší indentační kríp, je nejvhodnější použít PA 6 s 4 hm. % TAIC a ozářit jej dávkou 99 kGy. Pokud jde o dosažení největšího zesíťování, nejmenší degradace materiálu a získání nejvyšší indentační tvrdosti či indentačního modulu pružnosti, je potřeba dávku zvýšit o 33 kGy, tudíž použít 132 kGy na PA 6 plněn z 4 hm. % TAIC. Z výše diskutovaných výsledků jsou právě tyto koncentrace a radiační dávky nejspolehlivější.

8. 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.

9. 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] YANG, Yi; Xi, Chen; Lu, NINGUYN a Gao, FURONG, *Injection Molding Process Control, Monitoring and Optimization*. München (Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG), 2016. 978-1-56990-592-0. [cit. 2019-08-24]
- [12] *mmspektrum.com* [online]. ©2019. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/polymery-amorfni-a-semikrystalicke-z-hlediska-vstrikovani.html>
- [13] 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]
- [14] *Struktura polymerů a vliv na její vlastnosti* [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/03.html> [cit. 2019-08-24]

- [15] 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]
- [16] *polymerinnovationblog.com* [online]. Dostupné z: <https://polymerinnovationblog.com/wp-content/uploads/2018/01/linear-branched-and-crosslinked-polymers.jpg> [cit. 2019-08-21]
- [17] THRONE, James L. *Understanding thermoforming*. 2nd ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2008. ISBN 978-1-56990-428-2. [cit. 2019-08-24].
- [18] *polymerdatabase.com*: polymer properties database [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://polymerdatabase.com/polymer%20classes/Polyamide%20type.html>
- [19] *perfectpolymers.com*: Nylon PA 6 [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://www.perfectpolymers.com/nylon-pa-6.html>
- [20] *resinex.cz*: Polymerové typy. [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <http://www.resinex.cz/polymerove-typy/pa.html>
- [21] 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>
- [22] 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>
- [23] 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>
- [24] *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/>

[25] *large.stanford.edu*: Radiation sterilization [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <http://large.stanford.edu/courses/2018/ph241/goronzy2/>

[26] 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]

[27] *pakelectronbeam.com* [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <http://www.pakelectronbeam.com/applications.html>

[28] MARK, J.E., *Physical Properties of Polymers Handbook*. SPRINGER SCIENCE+BUSINESS MEDIA, LLC, 2007. ISBN 0-387-69002-6. [cit. 2019-08-24].

[29] *lookchem.com*: Triallyl isocyanurate [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <http://www.lookchem.com/Triallyl-isocyanurate/>

[30] *Technická univerzita Liberec*: Technologie II. [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm

[31] OVSÍK, Martin. Výzkum možností nových metod měření tvrdosti polymerů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 179 s. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí dizertační práce Maňas, David. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/25609>

[32] *old.vscht.cz*: Infračervená spektroskopie [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/lms/Zverze/Infrared.htm>

[33] *technologiaartis.avu.cz* [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://technologiaartis.avu.cz/4iden-moz.html>

[34] *is.muni.cz*: Infračervená spektroskopie [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/podzim2013/C3804/Infracervena_Spektroskopie_VSC_HT.pdf?lang=en

[35] *thermofisher.com*: FTIR sample techniques [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/cz/en/home/industrial/spectroscopy->

elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-sample-handling-techniques/ftir-sample-handling-techniques-attenuated-total-reflection-atr.html

[36] *intechopen.com* [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/emerging-pollutants-in-the-environment-current-and-further-implications/the-relevance-of-atr-ftir-spectroscopy-in-semiconductor-photocatalysis>

[37] *vscht.cz* [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://www.vscht.cz/files/uzel/0005766/Infra%C4%8Derven%C3%A1+spektrometrie.pdf?redirected>

[38] *viskoelasticita.cz*: Dynamická mechanická analýza [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://www.viskoelasticita.cz/inpage/dma/>

[39] *solidsonline.com* [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <http://www.solidsonline.com/articles/1147-Many-Measurements--One-Analyzer--METTLER-TOLEDO-s-DMA-1>

[40] *nanometrologie.cz* [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: http://www.nanometrologie.cz/cz/techs_afm.php

[41] *docplayer.cz*: Mikroskopie [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/15282900-Uvod-mikroskopie-opticka-elektronova-skenujici-sondou-mikroskopie-je-metod-ktorej-dovoluje-sledovat-male-objekty-a-detaile-jejich-povrchu.html>

[42] *fyzika.fce.vutbr.cz*: AFM mikroskop [online]. [cit. 2019-08-24]. Dostupné z: http://fyzika.fce.vutbr.cz/file/kusak/AFM_mikroskopie.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Výrobky z plastu [12].....</i>	<i>8</i>
<i>Obr. 2: Lineární, větvené a zesíťované polymery [16]</i>	<i>9</i>
<i>Obr. 3: Struktura amorfních a semikrystalických polymerů v závislosti na teplotě [14]</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 4: Výrobky z polyamidů [19]</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 5: Strukturní vzorec PA 6.....</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 6: Porovnání vysoce energetických záření [25]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 7: Zdroj elektronového záření – elektronový urychlovač [27].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 8: Princip ozařování urychlenými elektrony.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 9: Strukturní vzorec síťovacího urychlovače TAIC</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 10: Vstřikovací cyklus [30]</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 11: Průběh vnitřního tlaku v dutině formy během procesu vstřikování.....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 12: Indentační křivka</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 13: ATR krystal [36]</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 14: Popis FTS [37].....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 15: Přístroj DMA METTLER TOLEDO [39]</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 16: AFM mikroskop [41]</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 17: Instrumentální měřicí zařízení Micro Combi Tester</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 18: Princip měření TMA</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 19: Uchycení zkušebního tělesa</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 20: Přístroj AVATAR 320</i>	<i>44</i>
<i>Obr. 21: Uchycení vzorku ATR krystalem.....</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 22: Přístroj MFP-3D Infinity.....</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 23: Uchycení vzorku v přístroji.....</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 24: Indentační tvrdost PA 6 ozářeného 66 kGy v závislosti na koncentraci TAIC.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 25: Indentační tvrdost PA 6 ozářeného 99 kGy v závislosti na koncentraci TAIC.....</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 26: Indentační tvrdost PA 6 ozářeného 132 kGy v závislosti na koncentraci TAIC.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 27: Aritmetický průměr indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 28: Interkvartilové rozpětí indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce.....</i>	<i>52</i>

<i>Obr. 29: Medián indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce.....</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 30: Směrodatná odchylka indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 31: Variační rozpětí indentační tvrdosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce.....</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 32: Indentační modul pružnosti PA 6 ozářeného 66 kGy v závislosti na koncentraci TAIC</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 33: Indentační modul pružnosti PA 6 ozářeného 99 kGy v závislosti na koncentraci TAIC</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 34: Indentační modul pružnosti PA 6 ozářeného 132 kGy v závislosti na koncentraci TAIC</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 35: Aritmetický průměr indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 36: Interkvartilové rozpětí indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 37: Medián indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 38: Směrodatná odchylka indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 39: Variační rozpětí indentačního modulu pružnosti v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 40: Indentační kríp PA 6 ozářeného 66 kGy v závislosti na koncentraci TAIC.....</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 41: Indentační kríp PA 6 ozářeného 99 kGy v závislosti na koncentraci ..</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 42: Indentační kríp PA 6 ozářeného 132 kGy v závislosti na koncentraci</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 43: Aritmetický průměr indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 44: Interkvartilové rozpětí indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 45: Medián indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 46: Směrodatná odchylka indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 47: Variační rozpětí indentačního krípu v závislosti na koncentraci TAIC a radiační dávce.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 48: Vliv teploty na deformaci u neozářeného zkušební tělesa</i>	<i>72</i>

<i>Obr. 49: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 1 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 50: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 1 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 51: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 1 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 52: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 2 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 53: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 2 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 54: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 2 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 55: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 3 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 56: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 3 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>78</i>
<i>Obr. 57: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 3 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>79</i>
<i>Obr. 58: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 4 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 59: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 4 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>80</i>
<i>Obr. 60: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 4 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>81</i>
<i>Obr. 61: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 5 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>82</i>
<i>Obr. 62: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 5 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 63: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 5 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>83</i>
<i>Obr. 64: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 66 kGy s 6 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 65: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 99 kGy s 6 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>84</i>
<i>Obr. 66: Vliv teploty na deformaci u zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy s 6 hm. % koncentrací TAIC</i>	<i>85</i>

<i>Obr. 67: Vliv dávky záření a koncentrace TAIC na deformaci zkušebního tělesa při 230 °C.....</i>	<i>87</i>
<i>Obr. 68: Vliv dávky záření a koncentrace TAIC na deformaci zkušebního tělesa při 240 °C.....</i>	<i>89</i>
<i>Obr. 69: Vliv dávky záření a koncentrace TAIC na deformaci zkušebního tělesa při 248 °C.....</i>	<i>91</i>
<i>Obr. 70: FTIR spektrum všech zkušebních těles.....</i>	<i>92</i>
<i>Obr. 71: Topografie povrchu neozářeného zkušebního tělesa.....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 72: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 1 hm. % TAIC.....</i>	<i>95</i>
<i>Obr. 73: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 2 hm. % TAIC.....</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 74: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 3 hm. % TAIC.....</i>	<i>96</i>
<i>Obr. 75: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 4 hm. % TAIC.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 76: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 5 hm. % TAIC.....</i>	<i>97</i>
<i>Obr. 77: Topografie povrchu zkušebního tělesa ozářeného 132 kGy obsahujícího 6 hm. % TAIC.....</i>	<i>98</i>

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Výsledky deformace zkušebních těles při 230 °C.....	86
Tabulka 2 Výsledky deformace zkušebních těles při 240 °C.....	88
Tabulka 3 Výsledky deformace zkušebních těles při 248 °C.....	90
Tabulka 4 Hodnota absorpance při vlnočtu 1736 cm ⁻¹	94

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 ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
<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; OVSIK, 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. OVSIK, 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; BEDNAŘÍK, 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/matecconf/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/matecconf/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 BEDNARČÍK. 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 ŠENKERŮ, 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 ŠENKERŤÍK 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 vstřikované měkčené PVC podlahoviny na válcované měkčené PVC potišťené 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

Vliv beta záření na mikro-tvrдость polymerů

The Influence of Beta Radiation on Micro-Hardness of Polymers

Disertační práce

Vydala Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně,

nám. T. G. Masaryka 5555, 760 01 Zlín.

Publikace neprošla jazykovou ani redakční úpravou.

Rok vydání 2019