

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Degradace polymerních elektroizolačních materiálů
tepelným namáháním a působením UV záření**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Michal SVĚCHOTA**

Osobní číslo: **E15B0251P**

Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**

Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**

Název tématu: **Degradace polymerních elektroizolačních materiálů tepelným namáháním a působením UV záření**

Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte rešerši v oblasti degradace elektroizolačních materiálů způsobené tepelným namáháním a UV zářením. Uveďte, kde je třeba zohledňovat tyto faktory degradace a jak lze omezit degradaci způsobenou těmito faktory.
2. Představte experimentální metody používané pro hodnocení těchto typů degradace (metody zrychleného stárnutí).
3. Uveďte souhrn měřicích technik využitelných při hodnocení úrovně degradace elektroizolačních materiálů. Popište možné projevy degradace vybraných materiálů v záznamech z měření pomocí uvedených technik.
4. Proveďte vlastní měření projevů stárnutí (degradace) polymerního elektroizolačního materiálu při uplatnění několika zmíněných měřicích technik.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **K. PIELICHOWSKI a J. NJUGUNA. Thermal degradation of polymeric materials. Shawbury: Rapra Technology, 2005. ISBN 1-85957-498-X.**
2. **Elektronické informační zdroje (SUMMON - vyhledávací nástroj knihovny ZČU, případně přímo Science Direct, IEEE Explore atd.)**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Kadlec**

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2017**


Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na degradaci polymerních elektroizolačních materiálů tepelným namáháním a působením UV záření. Tepelné namáhání a jeho vliv je popsán v teoretické části a namáhání UV zářením je popsáno v teoretické části a zároveň je prakticky provedeno na rozvaděčové skříni. Měřením mechanických vlastností a strukturální analýzou byl odvozen závěr vypovídající o kvalitě měřeného materiálu.

Klíčová slova

Polymery, degradace polymerů, tepelné namáhání, UV záření, vliv UV záření na polymery, kompozitní materiály, míra degradace polymerů, STA, tvrdost povrchu, Charpyho kladivo.

Abstract

This bachelor thesis is focused on the degradation of polymeric electro-insulating materials by thermal stress and UV radiation. While the theoretical part closely describes thermal stress together with the influence of UV radiation, the practical part is devoted to the practical experiments with UV radiation itself using the switch cabinet. With the help of the measurement of mechanical properties and the structural analysis, the final conclusion about the quality of the measured material was reached.

Key words

Polymers, degradation of polymers, thermal stress, UV radiation, effect of UV radiation on polymers, composite materials, degree of degradation of polymers, STA, surface hardness, Charpy's hammer.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2017

Michal Svěchota

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petrovi Kadlecovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Za ochotu vždy pomoci a v neposlední řadě za velmi lidský přístup. Dále bych rád poděkoval Ing. Pavlovi Prošovi, Ph.D. za zajištění a dodání materiálu pro experimentální část. V neposlední řadě bych také rád poděkoval své rodině, která mi podporovala v průběhu celého studia.

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 TEORETICKÁ ČÁST.....	12
1.1 POLYMERY	12
1.1.1 Základní reakce syntézy polymerů	12
1.1.2 Historie polymerů	13
1.1.3 Základní dělení polymerů.....	14
1.2 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY	15
1.3 UV ZÁŘENÍ A JEHO VLIV NA POLYMERY	16
1.3.1 Dělení UV záření.....	16
1.3.2 Vliv UV záření na polymery.....	16
1.3.3 Ochrana polymerů před UV zářením.....	17
1.4 DEFINOVANÉ NAMÁHÁNÍ POLYMERŮ UV ZÁŘENÍM.....	17
1.5 DEFINOVANÉ TEPelnÉ NAMÁHÁNÍ POLYMERŮ	19
1.6 MĚŘÍCÍ METODY PRO KLASIFIKACI DEGRADACE POLYMERŮ.....	22
1.6.1 Termické analýzy	23
1.6.2 Stanovení rázové houževnatosti	24
1.6.3 Tvrdost povrchu	27
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	29
2.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ	29
2.2 NAMÁHÁNÍ VZORKŮ UV ZÁŘENÍM	32
2.3 MĚŘENÍ RÁZOVÉ HOUŽEVNATOSTI METODOU CHARPY	33
2.3.1 Změřené hodnoty.....	35
2.3.2 Příklad výpočtů	36
2.4 MĚŘENÍ TVRDOSTI POVRCHU METODOU SHORE.....	37
2.5 SIMULTÁNNÍ TERMICKÁ ANALÝZA.....	38
ZÁVĚR	39
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	1
PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratek

a	.....	Rázová houževnatost [$\text{kJ}\cdot\text{m}^{-2}$]
b, b_{1-4}	.....	Šířka vzorku [mm]
\bar{b}	.....	Průměrná šířka vzorku [mm]
b_N	.....	Šířka vzorku pod vrubem [mm]
c	.....	Rychlost šíření světla ve vakuu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
E	.....	Energie [J]
h, h_{1-4}	.....	Tloušťka vzorku [mm]
\bar{h}	.....	Průměrná tloušťka vzorku [mm]
m	.....	Počet vzorků [ks]
Me	.....	Medián
r_n	.....	Poloměr kořene vrubu [mm]
t	.....	Teplota [$^{\circ}\text{C}$]
ν	.....	Kmitočet elektromagnetického vlnění [Hz]
λ	.....	Vlnová délka [nm]
UV	.....	Ultrafialové (záření)

Úvod

Polymerní materiály patří mezi nejrozšířenější elektroizolační materiály a mohou být použity pro vytváření izolačních systémů ve většině elektrotechnických oborech. Izolační systémy jsou často klíčovou součástí elektrických zařízení a je velmi důležité zajistit jejich spolehlivost, bezpečnost a životnost.

Práce je rozdělena do dvou částí. První část, tedy teoretická, se dále dělí na několik kapitol. V kapitole „*1.1 Polymery*“ se práce zaměřuje na elementární popis polymerů jakožto materiálu, poté popisuje způsoby vzniku polymerů. Tato kapitola taktéž nechává nahlédnout do základních a nejdůležitějších milníků historie polymerů a v neposlední řadě popisuje jejich základní dělení. V teoretické části je také krátká zmínka o kompozitních materiálech (viz kapitola „*1.2 Kompozitní materiály*“), kde jsou tyto materiály definovány a dále blíže popsány termoplasty vyztužené vlákny. Důvodem bližšího seznámení s tímto konkrétním typem kompozitu je fakt, že tento materiál zkoumám v experimentální části. Z názvu této práce vyplývá skutečnost, že práce se bude taktéž zabývat UV zářením, respektive jeho vlivem na polymerní materiály. Pro tento účel je v práci kapitola „*1.3 UV záření a jeho vliv na polymery*“, která jasně poukazuje na rozdělení UV záření, jeho vliv na polymery a také krátce vypisuje možnosti, kterými lze omezit degradaci polymerů UV zářením. Teoretická část následně v kapitolách „*1.4 Definované namáhání polymerů UV zářením*“ a „*1.5 Definované tepelné namáhání polymerů*“ detailně popisuje tepelné namáhání polymerů a namáhání polymerů UV zářením. Tento popis je odvozen z norem k tomu určeným. Poslední kapitola teoretické části se nazývá „*1.6 Měřicí metody pro klasifikaci degradace polymerů*“ a jak již z jejího názvu zřejmé, popisuje běžné metody, kterými se určuje míra degradace polymerů. V této kapitole jsou tedy zmíněny základní strukturální tepelné analýzy, dále stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy, jenž vyplývá z normy tomu určené a také hodnocení tvrdosti povrchu před a po namáhání měřeného vzorku.

V druhé části práce („2 *Experimentální část*“) je již uveden postup celého experimentu. Ten začíná kapitolou „2.1 *Příprava vzorků*“, která popisuje kompletní postup přípravy vzorků pro celý experiment. V další části, kapitole „2.2 *Namáhání vzorků UV zářením*“ je definován postup a časové intervaly vystavení vzorků UV záření. Zde jsou též zřetelně popsány časové intervaly, v kterých byly vzorky namáhány. V kapitole „2.3 *Měření rázové houževnatosti metodou Charpy*“ je již popsán první ze tří experimentů, který vypovídá o mechanických vlastnostech vzorků v různých stupních degradace. Kapitola „2.4 *Měření tvrdosti povrchu metodou Shore*“ je zaměřena na použitý postup měření tvrdosti povrchu vzorků v různých fázích degradace a jeho vyhodnocení. Závěrečná kapitola „2.5 *Simultánní termická analýza*“ je věnována provedení simultánní termické analýzy, jenž vypovídá o tom, do jaké teploty je zkoušený materiál stabilní (nedegraduje) a také určí, o jak kvalitní kompozitní materiál se jedná.

Závěr práce je již věnován diskuzi výsledků a zhodnocení měřeného materiálu s odkazem na další možná rozšíření či navázání na tuto práci.

1 Teoretická část

1.1 Polymery

Polymery, jakožto specifický typ makromolekulární látky, jsou řetězce tvořené atomy uhlíku, vodíku, kyslíku. Případně i dusíku, chloru a dalších prvků. Tyto řetězce jsou spojeny kovalentními vazbami. [1, 2]

Významné polymery jsou rozděleny do dvou větších podskupin – přírodní a syntetické. Do přírodních polymerů řadíme deriváty celulózy (termoplasty), šelak a kopál (reaktoplasty). Syntetické polymery jsou děleny na polymerizáty a polykondenzáty. Polymerizáty jsou tvořeny skupinou termoplastů, nejvýznamnějšími jsou polystyreny, polyvinylchloridy, polyetyleny, polypropyleny apod. Polykondenzáty zahrnují nejen termoplasty (polyamidy, polyestery, polykarbonáty apod.), ale i reaktoplasty (polyimidy, aminoplasty, fenoplasty apod.). [3]

Ve výše zmíněném dělení však nejsou zahrnuty kaučuky, tedy elastomery. Ty jsou samozřejmě též děleny na přírodní a syntetické. Přírodní kaučuk je zpravidla získáván ze stromu *Hevea brasiliensis*, který se nařízne a vnitřním pnutím stromu z něj vytéká kaučuk nazývaný latex. Syntetické kaučuky jsou vyráběny polymerací či kopolymerací (reakce minimálně dvou různých -merů) a řadíme mezi ně například butylkaučuk, polychloropren, butadien-styrenový či butadien-akrylonitrilový. [1, 4]

1.1.1 Základní reakce syntézy polymerů

Polymerace, polyadice, polykondenzace jsou třemi základními chemickými reakcemi, při kterých vznikají polymery. Na vstupu zmíněných reakcí je obecně monomer, jehož molekuly se v průběhu reakce chemicky vážou a hlavním produktem je polymer. [1]

Polymerací se rozumí proces, při kterém se velmi rychle řetězově spojují molekuly monomeru, a tím vzniká polymer. Při polymeraci nevzniká žádný vedlejší produkt. Polymerace je tvořena třemi základními fázemi – iniciace, propagace a terminace. Pro spuštění polymerace je zásadním rozštěpení dvojně či vícenásobné vazby, čímž nám vznikne radikál – má dva volné elektrony (iniciace). Radikál, respektive jeho volný elektron se váže na další molekulu monomeru a na této molekule se opět vytváří volný elektron (propagace). Když volný elektron na jedné či druhé straně již nemůže navázat spojení s žádnou další molekulou monomeru, řetězec se uzavírá a obnovuje dvojná vazba (terminace). [10]

Polykondenzace je reakce, která nezapřičiní pouze vznik polymeru, ale též vedlejšího produktu (amoniak, metanol, atd.). Při polykondenzaci může docházet k reakci nejen dvou stejných, ale i rozdílných monomerů. Tyto monomery ale musí mít reakční funkční skupiny (minimálně dvě). [11]

Polyadice je často uváděna jako speciální případ polykondenzace. Důvodem je fakt, že je to též stupňovitá polyreakce. I přesto si zaslouží odlišit a to proto, že při této reakci, na rozdíl od polykondenzace, se při reakci nevytvářejí vedlejší produkty. „*Při reakci funkčních skupin zúčastněných monomerů dochází k charakteristickému přesunu atomu vodíku z funkční skupiny jednoho typu na heteroatom funkční skupiny druhého typu. Vzniká tak nový typ chemické vazby* [12].“ Pro upřesnění se heteroatomem rozumí jakýkoliv jiný prvek než uhlík. Z heteroatomů je složen kruh, neboli heterocyklus, který je částí heterocyklické sloučeniny. Z tohoto vysvětlení tedy vyplývá, že cyklické sloučeniny mají aspoň dva různé heteroatomy (vyjma uhlíku) spojené do kruhu. [12, 23]

1.1.2 Historie polymerů

První objev přírodního kaučuku Evropany se datuje již do roku 1493, kdy byl objeven při druhé cestě Kryštofa Kolumba do Jižní Ameriky. Avšak až roku 1791 byl kaučuk prakticky využit. Angličan Samuel Peal si nechal tohoto roku patentovat impregnaci tkanin kaučukovými roztoky. O dvacet let později, roku 1811 již byla postavena první evropská továrna (Viedeň) určena ke zpracování přírodního kaučuku. Roku 1826 významný fyzik Michael Faraday podrobně analyzoval a sestavil sumární chemický vzorec přírodního kaučuku. [1]

Dalším významným datem je též rok 1843, kdy Dr. William Montogemerie objevuje malajsijské domorodce, kteří získávají gutaperču ze stromů a používají ji k výrobě rukojetí nožů a bičů. Roku 1860 byla gutaperča poprvé průmyslově využita k opláštění vodičů. Nejpravděpodobněji tyto dva významné objevy odstartovali novou dobu – dobu polymerní. Od těchto let již objevy v tomto odvětví rapidně přibývali každým desetiletím a dostávali dalších a dalších využití. [1]

V rámci historie polymerů jsou také velmi důležité objevy nylonu a bakelitu. Za vznik nylonu můžeme být vděční firmě Du Pont, která zaměstnávala vědce Wallace Carrothersa. Ten přišel na fakt, že při smíchání kyseliny a diaminu vznikne kapalina, z které se dá vytáhnout vlákno nylonu. To vyniká vysokou pružností a zároveň je považováno za jedno z nejpevnějších. [13]

Roku 1899, kdy Dr. Leo Hendrik Baekeland prodal svůj první velký objev (fotografický papír) firmě Kodak, si splnil sen a vybudoval si svoji laboratoř, ve které se zaměřil na vývoj nehořlavých ploch pro hraní bowlingu. Při tomto bádání vlastně omylem přišel na fakt, že smícháním fenolu a formaldehydu získá první syntetickou pryskyřici – bakelit. [14]

1.1.3 Základní dělení polymerů

Dle teplotního chování a fyzikálně-chemických vlastností lze polymery rozdělit dle následujících skupin:

Elastomery

Elastomery se vyznačují vysokou elasticitou. Tedy při běžené pokojové teplotě je lze částečně ohýbat či deformovat. Avšak po krátkém časovém úseku se plynule vrací do původního stavu. Elastomery jsou významně zastoupeny kaučuky. [2]

Plasty

Plasty jsou materiály složené z organických látek vysoké molekulové hmotnosti, které v určité fázi jejich zpracování mohou být pod tlakem v tekutém stavu a zároveň v konečné fázi zpracování v pevném stavu. Tyto organické látky nazýváme pryskyřice. Do pryskyřic (reaktoplastů) mohou být také přimíchávány ostatní látky – aditiva (plniva, antioxidanty, kompatibilizátory), které ovlivňují jejich vlastnosti. Například anorganická plniva jsou přidávána pro zlepšení fyzikálních vlastností, antioxidanty pro zvýšení ochrany proti korozi apod. [5]

Termoplasty

Termoplasty jsou známy jako látky při běžné teplotě neelastické. Pro jakékoliv zpracování termoplastu je nutné jeho zahřátí většinou nad 200 °C, aby byl dostatečně tekutý a schopný tváření. Pro dosažení nižšího bodu viskozity termoplastů se používají rozpouštědla. Avšak to má velmi neblahý vliv na odolnost proti korozi při napětí. Do termoplastů lze též při výrobě přidávat aditiva pro zlepšení jejich vlastností. [6]

Reaktoplasty

Reaktoplasty jsou na rozdíl od termoplastů teplem tvrditelné, nikoliv tavitelné. Tyto látky jsou distribuovány na rozhraní kapalného a pevného stavu (pryskyřice). Pro vytvoření finálního reaktoplastu se dodá tvrdidlo, se kterým se materiál smísí a po zahřátí změkne. V tomto stavu

je prostor pro tváření reaktoplastu. Po dalším zahřátí se reaktoplast vytvrdí. Po tomto procesu již není možné reaktoplast dále zahřát za účelem jeho tváření. [7]

1.2 Kompozitní materiály

V teoretické části je třeba se také zmínit o kompozitních materiálech. Rozsáhlou a obecně v technické praxi velmi důležitou skupinou jsou vláknové kompozitní materiály s polymerní matricí z termoplastu. Tyto kompozitní materiály nacházejí často uplatnění v elektroizolačních systémech a kompozitní materiál s termoplastickou matricí a s vláknovou výztuží je také předmětem zájmu v experimentální části práce.

Kompozitní materiál neboli kompozit je složen ze dvou či více složek. „Pro kompozitní materiály je charakteristické, že se vyrábějí postupy mechanického mísení nebo spojování jednotlivých složek. Tím se liší například od slitin, které jsou rovněž heterogenní. U slitin však jednotlivé fáze vznikají fázovými přeměnami například při tuhnutí a jsou tedy blízko termodynamické rovnováhy [11].“ Kompozit tedy tvoří vždy aspoň dvě složky – matrice a výztuž. Matrice bývá oproti výztuži spojitá. Ovšem výztuž se vyznačuje významně lepšími mechanickými vlastnostmi. U kompozitu je též třeba zmínit pojem synergismus. To znamená, že spojením matrice a výztuže v kompozit není jejich výslednými mechanickými vlastnostmi pouze sečtení vlastností matrice a výztuže, ale jsou ještě lepší. Například při přerážení kompozitu se lomová trhlina zásadně zpomaluje na rozhraní matrice a výztuže, čímž se jednak odklání směr trhliny a zároveň dochází k silnému tření mezi matricí a výztuží. Tedy díky synergismu jsme schopni získat materiál s opravdu dobrými vlastnostmi. Nejběžnějším příkladem kompozitu může být železobeton – beton (matrice) a železné dráty (výztuž). Železobeton je však kompozit s keramickou matricí. Níže se již budu zabývat kompozity s polymerní matricí. [11]

Termoplasty vyztužené vlákny

Nespornou výhodou termoplastů vyztužených vlákny jsou dva fakty – rapidně se zvýší mechanické vlastnosti a neznáme lepší způsob, jak zvýšit mechanické vlastnosti materiálu. U termoplastů vyztuženými vlákny je běžné využití vláken mezi 15 až 50 hm. %. Při méně než 15% obsahu vláken je vyztužení bez efektu. Avšak při 50% plnění je však zase problém se smáčivostí. Při provedení rozhodnutí použít právě termoplast s vyztuženými vlákny můžeme očekávat houževnatější materiál s vyšší odolností, ve kterém při výrobě nedochází k chemické reakci. Nejpříjemnějším faktem v oblasti finanční strategie je zase skutečnost, že snížíme

náklady za suroviny. Dá se tedy říct, že přechodem z termosetů na vyztužené termoplasty se odstranil dopad negativních vlastností. To však zcela není pravda, s příchodem termoplastů se objevily jeho největší nedostatky, kterými jsou: nízká tvrdost povrchu, nízká odolnost proti vlivu látek na povrchu, krystalická struktura závisující na podmínkách zpracování, špatné nanášení nátěrů na povrch. [20]

1.3 UV záření a jeho vliv na polymery

Optické záření je dle Maxwellova elektromagnetického teorému elektromagnetickým vlněním, které je složeno ze tří složek – ultrafialové (UV), infračervené (IR) a viditelné záření. Světlo, jakožto vlnění, je kmitání, které se periodicky opakuje a je definováno závislostí vlnové délky λ [nm], kmitočtu ν [Hz] a rychlostí šíření světla ve vakuu c [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

1.3.1 Dělení UV záření

UV záření dělíme dle vlnových délek do tří hlavních kategorií dle spektrální oblasti. První z nich je UV-A záření, které má vlnovou délku 315 nm až 380 nm a v záření dopadajícím na Zemi zastupuje asi 99 % celkového UV záření. UV-B má vlnovou délku 280 nm až 315 nm a v celkovém UV záření je obsaženo asi z 1 %. Třetím typem je UV-C záření a to víceméně na Zemi nedopadá vůbec – filtrace ozonovou vrstvou. Na zemském povrchu se s ním můžeme například setkat v lékařství – dezinfekce operačních sálů. [8, 15]

1.3.2 Vliv UV záření na polymery

UV záření patří mezi degradační činitele, které způsobují v běžných klimatických a provozních podmínkách (polymer není vystaven extrémním teplotám a není odstíněn vůči UV záření) nejvýznamnější degradační procesy v polymerech. Toto záření způsobuje fotooxidaci (v oxidační atmosféře), což znamená, že paprsky UV záření narušují vazby atomů v molekule a tím dochází k jejich rozpadu. Fotooxidace postupuje od povrchu materiálu do hloubky, což způsobuje větvení či síťování makromolekul. Tento proces postupně polymer oslabuje. Polymer zkréhne a ztratí pružnost. Poté, při jakémkoliv mechanickém namáhání (např. vítr), může dojít u oslabeného polymeru mnohem snáze k jeho porušení, případně destrukci. [9]

Fotooxidace, jak již z názvu vyplývá, je jedním z typů oxidace. Vlivem oxidace dochází ve výsledku ke štěpení polymeru na monomery (depolymerace), poklesu molekulové

hmotnosti, vzniku funkčních skupin, které předtím polymer neobsahoval. V zásadě se tedy zvyšuje počet atomů kyslíku a snižuje počet atomů vodíku. Samotná oxidace musí být podpořena oxidačním činidlem (voda, kyslík, apod.). Fotooxidace má tedy ty samé vlastnosti a negativní účinky jako oxidace, jen je iniciována UV zářením. [16]

1.3.3 Ochrana polymerů před UV zářením

Z hlediska posílení ochrany polymerů před UV zářením lze zvolit dvě cesty, nejideálnější jejich kombinaci. První cestou je již při průmyslové výrobě polymeru použit jako přísady světelné stabilizátory, někdy též nazývány jako absorbéry ultrafialového záření. Tyto absorbéry jsou schopny absorbovat energii ze světelného záření, přesněji světelné spektrum z intervalu vlnových délek 300 nm až 400 nm, což jsou vlnové délky UV záření. Absorbéry pojmu energii tohoto elektromagnetického vlnění a přemění je na energeticky chudší, pro polymery již neškodné, záření. To znamená, že je přemění na dlouhovlnné záření (např. tepelné záření), které již musí být pod takovou hranicí energie, aby polymeru neškodilo. Samy tyto absorbéry musí být logicky velmi odolné proti UV záření. Mezi absorbéry a polymerem nesmí docházet k chemické reakci. Ta by se v nejlepším případě projevila pouze změnou barvy materiálu. Absorbéry lze dle jejich struktury dělit do čtyř hlavních skupin – deriváty benzotriazolu, deriváty kyseliny salicylové, deriváty bezonfenu a stericky stíněné aminy. [1]

Druhou cestou ochrany polymerů před UV zářením je vnější aplikace UV stabilizátoru. Tím jsou myšleny takové stabilizátory, které může uživatel na materiál nanést sám. Nejčastější použití lze nalézt aplikaci na plastové povrchy vystavené významnému působení slunečního záření (např. vnější plastové díly automobilů nebo u stavebních konstrukcí). Na trhu je dostupné nepřeberné množství přípravku, které by měly degradaci polymerů UV zářením zamezit. Samozřejmě jsou poté také bezbarvé laky na veškeré povrchy – od dřeva, přes plasty až po plech. [24, 25]

1.4 Definované namáhání polymerů UV zářením

Při průzkumu dostupných zdrojů lze najít různé postupy, jak vhodně namáhat polymery UV zářením. Dle mého mínění je však nejlepším způsobem zaměřit se na vhodnou normu, které se držet a v případě nevhodnosti normy (důvodem může být např. nedostupné vybavení udávané normou) se jí inspirovat a alespoň se držet základních pravidel, které nám okolnosti dovolí. Pro namáhání polymerů UV zářením se jako nejvhodnější norma jeví ČSN 77 0344 „Standartní postup zkoušení nekovových materiálů UV zářením a kondenzací vody (typ s fluorescenčním

UV zářením a kondenzací).“ Tato norma velmi konkrétně popisuje celý postup namáhání, zkušební postup, základní ustanovení a pracovní postupy pro práci s fluorescenčními UV zdroji a kondenzačními přístroji. Vyjma způsoby přípravy vzorků, zde se odkazuje na příslušené zkušební normy pro jednotlivé materiály. Též blíže nespecifikuje ozařovací podmínky pro konkrétní materiály. Tedy postup uvedený v této normě simuluje působení slunečního záření a vody ve formě rosy nebo deště. [18]

Podstata zkoušky

Z podstaty zkoušky vyplývá možnost oddělit část kondenzace a použít jen část UV záření. Pro měření v experimentální části se omezují pouze na vliv UV záření, tedy proces kondenzace v následujících částech vynechám. Toto oddělení je možné z důvodu cyklického vystavování vzorků pouze UV zářením a následně pouze kondenzací. Jako zdroj UV záření norma určuje soustavu zářivek s UV složkou. [18]

Zkušební přístroje

Osvitová komora má být vybavena osmi zářivkami osazenými na patici G13. Této normě odpovídá UV – B zářivka s vrcholem emise 313 nm. Tato zářivka je dlouhá 1220 mm, její jmenovitý příkon je 40 W při průchodu 430 mA a je na ni přiloženo napětí 102 V. Zářivka může být použita i jiná, avšak jen pokud její elektrické vlastnosti a též spektrální špičková složka na závislosti intenzity záření odpovídají výše určené zářivce.

Celé toto zařízení musí být umístěno v místnosti, která je vybaveno minimálně třemi teploměry osazenými na vhodných místech pro kontrolu kolísání teploty. Samotná osvitová komora musí být co nejdále od zdrojů tepla, minimálně 300 mm od zdi a od kteréhokoliv zařízení, které by jakkoliv mohlo ovlivnit její funkci. V neposlední řadě by místnost měla být vybavena ventilátory, případně jinými přístroji, které by pomáhali v místnosti udržovat konstantní vlhkost. [18]

Vzorky pro namáhání

Vzorky před měřením nesmí být vystaveny žádnému osvětlení, ideálně je tedy přechovávat v tmavých místnostech bez přístupu UV složky záření. Při namáhání je doporučeno u vzorků provádět kontroly degradace v odlišných časových intervalech a zapisovat je. [18]

Postup zkoušky

Namáhané vzorky se upevní v osvitové komoře tak, aby zkoumaný povrch vzorku byl vystaven kolmo k zářivkám. Při neúplném obsazení stojanů pro uložení vzorků je nutné prázdné místo vyplnit deskami, aby byly zajištěny zkušební podmínky. Pro provádění experimentu je povoleno dodržovat různé zkušební podmínky, které ale musí být udržovány v limitovaných mezích. To znamená, že teplota při UV ozáření se může zvolit mezi 50 až 70 °C. Avšak zvolená teplota musí být udržována konstantní. Při nedodržení této podmínky norma udává, že dochází k abnormální reakce, neboť rychlost degradace způsobená UV zářením je přímo úměrná teplotě při UV záření. Při osvětlení vzorků trvajícím déle než 450 hodin je zapotřebí přemístit zářivky a to postupem jasně specifikovaným: levá a pravá prostřední zářivka se otočí a osadí se na kraje osvitové komory. Všechny další zářivky se posunou o jednu pozici, aby střed osvitové komory nezůstal bez UV zdroje. [18]

Vyjádření výsledků

Porovnání výsledků namáhání v laboratoři a namáhání přírodními vlivy je velmi obtížné. Už jen důsledkem toho, že ozonová vrstva nám vždy zachytí intenzitu UV záření jinak. Norma též uvádí, že výsledky se mohou každý rok od roku lišit. Při laboratorním namáhání je veličina rychlosti důslednější než při přírodních vlivech. Z tohoto důvodu nelze převést určitý počet hodin osvětlení v osvitové komoře na reálný časový údaj pro namáhání přírodními vlivy. Pro aspoň přibližný převod tohoto časového údaje se uvádí postup s použitím korelační řady SPEARMAN. Avšak pro staticky co nejpřesnější přepočítání časového údaje je optimální udělat 15 různých variací namáhání v laboratoři a ten samý počet namáhání přírodními vlivy. [18]

1.5 Definované tepelné namáhání polymerů

Pro proces tepelného stárnutí elektroizolačních materiálů existuje opět velmi kvalitně a obsáhle zpracovaná norma označená ČSN EN 60216-1 ed. 2 „Elektroizolační materiály – Vlastnosti tepelné odolnosti. Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocení výsledků zkoušky“. Díky velkému objemu dat v této normě se zaměřím jen na ty nejpodstatnější a nejpraktičtější. Avšak při podrobnějším studiu této normy se čtenář dozví, že norma je pojata opravdu široce, je zde detailně popsán způsob pracovního postupu, experimentálního postupu, popis destruktivní, odolnostní i nedestruktivní zkoušky. Způsob vyhodnocování jak zkušebních, tak výstupních dat

z měření. Je zde i zmínka o pecích určených k tepelnému stárnutí a v neposlední řadě opět podrobný popis vnějších podmínek prostředí pro měření. [19]

Pracovní postup

Obecně se pracovní postup tepelného namáhání a vyhodnocení výsledků skládá ze 7 základních kroků. V prvním kroku se připraví vzorky pro měření a následně se vystaví tepelnému stárnutí v peci určené ke stárnutí materiálů. Rychlost tepelného stárnutí je samozřejmě závislá na teplotě, při které materiál stárne. Zvyšování teploty může probíhat kontinuálně nebo cyklicky pro určitý počet časových intervalů, při kterém se vzorky vrací na teplotu okolí. Za třetí se vzorky podrobí výzkumu pro určení stupně degradace, což tedy znamená podrobení se určité spektrální analýze, mechanickému testování, testování elektroizolačních vlastností apod. Tyto testy dělíme na destruktivní a nedestruktivní. Dalším krokem je opět uložení vzorků do pece a vystavení tepelnému stárnutí. Nyní až do doby nalezení finálního bodu degradace či dosažené změny materiálu vlivem tepelného stárnutí, kterou laborant očekával. Dalším krokem je vhodné zvolení zápisu výsledků experimentu v závislosti na použité metodě (kontinuální či cyklická změna teploty). Logicky dalším krokem je vyhodnocení těchto dat a grafické znázornění průběhu stárnutí, které se vloží do přílohy protokolu, odborné práce apod. Poslední fází je zobrazení dat ve zkráceném tvaru (střední hodnoty, průměry apod.) v těle protokolu. [19]

Experimentální postup

Při přípravě vzorku k tepelnému stárnutí je nutné vyhledat vhodnou normu pro daný materiál, ve které mohou být upřesňující informace k přípravě a počtu vzorků. Samotný výběr vzorků musí být zcela náhodný ze zkoumaného souboru. Samozřejmě záleží na tloušťce vzorku, která může při případném namáhání odehrát velmi zásadní roli při degradaci. Pokud je dle specifikace tloušťka přímo vyžadována, je nutné ji při každé diagnostice též zaznamenávat. Dále je nutné dbát na to, aby všechno vzorky byly tvořeny stejným způsobem. To tedy znamená, že všechny vzorky musí být např. lisovány, stříhány, obráběny stejným způsobem. Rozdílný způsob přípravy vzorků pro stejné měření může vykazovat zásadní diference. Výsledný počet vzorků musí být navýšen o vhodný počet vzorků z důvodu případných komplikací či nepředvídatelných situací. Počet celkových vzorků závisí na způsobu vyhodnocování degradace materiálu. Při nedestruktivní analýze materiálu stačí na každý časový interval expozice 5 vzorků, v případě zkoušky odolnosti norma vyžaduje minimálně 11 vzorků a doporučuje lichý počet, který může být značným zjednodušením při vyhodnocování změřených

dat a následném grafickém znázornění. Počet vzorků pro destruktivní vzorec norma udává pomocí vzorce:

$$N = n_a \cdot n_a \cdot n_b \cdot n_c + n_d \quad (2)$$

kde je n_a počet vzorků ve skupině pro daný časový interval působení tepelného

namáhání,

n_b počet intervalů expozice při stejné teplotě,

n_c počet teplotních úrovní,

n_d počet vzorků ve zkušební skupině pro zjištění počátečních hodnot měření (bez namáhání).

Pro určení počátečních hodnot měření norma jasně určuje, že skupina vzorků, ze kterých tyto hodnoty vycházejí, musí být minimálně dva dny exponovány při počáteční teplotě měření. U vzorků s významnější tloušťkou i dva dny nemusí být dostatečná doba.

Velmi důležitým faktorem tepelného namáhání je takzvaný TI (temperature index – teplotní index). Je to teplota, která vyplývá ze závislosti tepelné odolnosti po dobu 20 000 hodin (může být zvolen i jiný časový interval, pokud je má opodstatnění). Pro určení této závislosti je nutné provést měření minimálně na třech, ideálně na 4 úrovních teplot. Rozsah teplot musí být zvolena tak, aby byla prokázána linearita tepelné odolnosti.

Jak jsem již uvedl v prvním odstavci této kapitoly „Proces stárnutí – ČSN EN 60216-1 ed. 2“, norma popisuje obecný postup stárnutí pro tři typy zkoušek – nedestruktivní, odolnostní a destruktivní. Při **nedestruktivní zkoušce** se musí na konci každého cyklu stárnutí skupina vzorků vyjmout z pece a nechat ochladit na pokojovou teplotu (není-li zkušební proces navržen jinak). Každý vzorek ze skupiny se změří a celá skupina se vrátí do pece, která je nastavena na takovou totožnou teplotu. Takto proběhnou a změří se všechny cykly až do doby, kdy střední měřená hodnota nedosáhne minimálně koncového bodu a minimálně jedno měření nebude přesahovat daný koncový bod. Při **zkoušení odolnosti** je postup totožný s postupem nedestruktivní zkoušky až do bodu, kdy se vzorky provedení zkoušky vrací do pece. Po této zkoušce se do pece na nový expoziční cyklus vrací pouze ty vzorky, které v tomto zkoušení

nebyly zničeny. Tento cyklus se opakuje minimálně do výsledného mediánu chybných vzorků z celkového počtu, kde medián se vypočítá jako:

$$Me = \frac{m + 1}{2} \quad (3)$$

$$Me = \frac{m}{2} + 1 \quad (4)$$

kde je m počet vzorků,

vzorec (3) je pro lichý počet vzorků,

vzorec (4) je pro sudý počet vzorků.

Samozřejmě s tímto cyklem se dá pokračovat až do destrukce všech vzorků. Ideální počet cyklů je 10, minimálně je třeba však 7 cyklů. Při **destruktivní zkoušce** se všechny vzorky vloží do pece na stárnutí a zvolí se vhodná posloupnost vyjmutí jednotlivých skupin vzorků (počet vzorků n_a , viz vzorec (2)). Při vyjmutí vzorků z pece se vzorky opět nechají vychladnout na teplotu okolí a následně se na nich provede destruktivní zkouška. Opět je nutné řádně zaznamenat změřená data i s určením, který vzorek patřil do kterého časového intervalu. [19]

Vyhodnocení dat

Norma velmi podrobně určuje vyhodnocení dat, případně odkazuje na další normy, které toto vyhodnocení ještě blíže specifikují. Zabývá se tedy přesněji numerickou analýzou zkušebních dat, charakteristikou tepelné odolnosti. Definiuje, jak určit dobu dosažení koncového bodu, střední hodnoty a výběrové rozptyly. Poukazuje na to, jak provést statistické testy a určuje požadavky na změřená data a také určuje, co musí obsahovat protokol o měření. [19]

1.6 Měřicí metody pro klasifikaci degradace polymerů

Pro hodnocení míry degradace polymerů je možné využívat řadu měřících metod lišících vyhodnocovanou fyzikální veličinou nebo technickým parametrem, komplexností, časovou a finanční náročností atd. Míra degradace se v technické praxi vyhodnocuje často především na základě mechanických vlastností. Mechanické vlastnosti lze určovat složitými metodami, ale existuje i řada relativně jednoduchých a časově nenáročných zkoušek, mezi které patří např. i provedené stanovení rázové houževnatosti nebo měření tvrdosti povrchu. Dále je určitě třeba

zmínit termické analýzy, které velmi podrobně zkoumají, jak se daný materiál chová při různém tepelném zatížení. Degradací procesy lze hodnotit i pomocí spektroskopických metod (např. FTIR, dielektrická spektroskopie), které však v této práci nebyly použity. V této kapitole se budu zabývat pouze metodami, které jsem použil v experimentální části.

1.6.1 Termické analýzy

V posledních letech bylo vyvinuto, případně inovováno hned několik metod termických analýz ke zjištění vztahu mezi tepelnými vlastnostmi a strukturou řetězců polymerů. V podstatě jde o to, že se polymery vystaví různě zvolenému tepelnému namáhání po určitou dobu a z výsledků se zjišťuje poměr času, teploty a míry degradace polymerů. Při kombinaci několika níže zmíněných tepelných strukturálních analýz můžeme dosáhnout vyššího porozumění tepelného rozkladu. Například simultánní termická analýza (STA) je v této práci použita za kombinace termogravimetrie a diferenční skenovací kalorimetrie. [29]

Termogravimetrie

Termogravimetrie (TG) je termická analýza založená na sledování změny hmotnosti vzorku v průběhu tepelného namáhání. Zkoumá, jak se vzorek chová v závislosti na čase nebo na teplotě, respektive jak dochází k jeho hmotnostním změnám. Z této metody je odvozena derivační termogravimetrie (DTG), která udává rychlost změny hmotnosti v závislosti na teplotě. [30]

Diferenční skenovací kalorimetrie

Diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) se mimo oboru farmacie velmi často také využívá právě při materiálovém výzkumu pro technickou praxi. Mezi její největší přednosti patří hlavně potřeba velmi malého vzorku pro analýzu (3 – 10 mg). Princip analýzy spočívá v udržování stejné teploty zkoumaného vzorku a referenčního materiálu. DSC tedy měří rozdíl teplot nebo energii dodávanou pro udržení stejných teplot zkoumaného a referenčního vzorku (jako referenční vzorek se nejčastěji používá prázdná pánvička). Přístroj pro DSC je nabízen ve dvou variantách – DSC s kompenzací příkonu nebo DSC s tepelným tokem. DSC s kompenzací příkonu měří energii, kterou vynaloží pro udržení stejných teplot obou vzorků a DSC s tepelným tokem měří diferenci teplot mezi vzorkem a referenčním vzorkem. [31]

1.6.2 Stanovení rázové houževnatosti

Pro měření rázové houževnatosti v experimentální části jsem postupoval dle normy ČSN EN ISO 179-1 „Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy“. Tato norma přesně specifikuje celý proces měření – od přípravy vzorků, přes zapisování výsledků až k samotnému vyhodnocení.

Výše zmíněná norma jasně určuje proces měření za definovaných podmínek pro různá zkušební tělesa různého materiálu (plasty) s vrubem i bez. Postup měření je určen pro tuhé termoplasty (včetně plněných a vyztužených materiálu), tuhé reaktoplasty, kompozitní materiály plněné vlákny z reaktoplastů a termoplastů (vlákna v různých i ve stejném směru) a pro termotropní polymery. [17]

Podstata zkoušky

Při přeražení zkoumaného vzorku je třeba uložit vzorek vodorovně na podpěry, uvolnit rázové kyvadlo a to nechat vzorek přerazit. Při umístění vzorku je třeba dbát na pozici vzorku. Pro co nejpřesnější měření je nutné, aby kyvadlo přerazilo vzorek přesně v jeho středu delší strany. Pro případ vzorku s vrubem je nutné, aby kyvadlo dopadlo na opačnou stranu, než je vrub. [17]

Zkušební tělesa

Pro měření lze použít materiály pro tváření, které jsou buď lisovány, vstřikovány nebo mechanicky obráběny z desek lisovaných nebo vstřikovaných. Dále lze použít jako zkušební tělesa desky, které jsou vyrobeny a připraveny mechanickým obráběním. Jako zkušební těleso lze též použít materiály vyztužené dlouhými vlákny, opět připravené mechanickým obráběním.

Před provedením rázové zkoušky je třeba důkladně zkontrolovat, zda není materiál nějak poškozen (vrypy, nerovnosti, jakékoliv nesouměrnosti). Zda není zkušební vzorek prohnutý či zkroucený. Zdali je symetricky obroben. Všechny tyto nedostatky by měly být objeveny vizuální kontrolou. Na některé tyto nedostatky lze přijít i měřením – špatný rozměr vzorku apod. Tudíž všechny změřitelné faktory poukazující na nevhodnost vzorku by též měly být změřeny. Všechny vzorky, které nesplnily kteroukoliv část kontroly, by měly být vyřazeny, případně předány k opětovnému obrobení, které by nedostatky odstranilo.

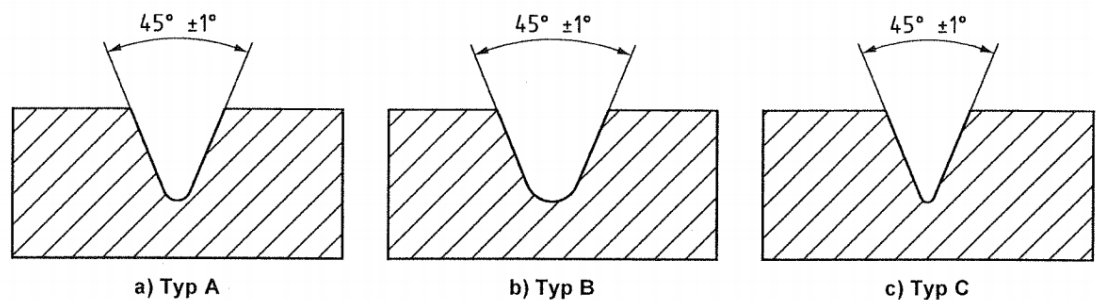
Norma samozřejmě též myslí na rozměry vrubování, které u tvrdých materiálu usnadňuje jeho přeražení. Dle normy jsou specifikovány tři tvary vrubu (typ A, B, C) odlišné pouze poloměrem kořene vrubu:

$$\text{Typ A: } r_n = 0,25\text{mm} \pm 0,05\text{mm}$$

$$\text{Typ B: } r_n = 1\text{mm} \pm 0,05\text{mm}$$

$$\text{Typ C: } r_n = 0,1\text{mm} \pm 0,05\text{mm}$$

Všechny tři výše zmíněné vruby (též k nahlédnutí viz Obr. 1) musí dodržet stejný úhel otevření vrubu, který je $\alpha = 45^\circ \pm 1^\circ$. Výroba vrubů je taktéž normou specifikována a udává dvě možnosti – tvářením a obráběním. Dále podotýká, že zkoušky rázové houževnatosti s jedním vzorkem, který má vrub tvářený a druhým, který má vrub obráběný, nejsou porovnatelné.



Obr. 1: Vruby dle normy [17]

Pro určení vhodného rozměru zkušební tělesa je v normě detailně uvedeno několik možností, kde je každá možnost vhodná pro jiný typ vzorku (materiály pro tvářením, materiály v podobě desek, materiály vyztužené vlákny). Pro přesnost doporučuji nahlédnout do již výše zmíněné normy, konkrétně části normy „6.3 Tvar a rozměry“.

Norma též uvádí přesný počet zkušebních vzorků. Dle normy je důležité pro každé měření použít 10ks vzorků. Pokud je brán v potaz směr zkoušení jak normálový, tak rovnoběžný, je potřeba v každém směru přerazit 10 vzorků. Vzorky by měly být před měřením vystaveny teplotě $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ po dobu 16 hodin při 50% vlhkosti vzduchu. [17]

Proces experimentu

Celý postup provádění experimentu je normou rozdělen na 7 částí, kde každá část má své opodstatnění a neměla by být tedy vynechána. Zaprvé, měřicí místnost by měla odpovídat podmínkám, kterým byly vystaveny vzorky po dobu 16 hodin před měřením. Místnost by tedy při provádění pokusu měla mít optimalizovanou teplotu na $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ při 50% vlhkosti vzduchu. Dále se zkontrolují všechny vzorky k měření, tedy jejich rozměry s přesností na 0,02 mm. Jedná se o šířku a tloušťku vzorku, v případě vzorku s vrubem se změří i šířka pod vrubem se stejnou přesností a připraví se šířka podpěr měřicího přístroje dle normy. V dalších dvou krocích se pečlivě zkontroluje stav měřicího zařízení z pohledu absorbované energie do vzorku (maximálně 80 % energie rázového kyvadla) a stanoví se ztráty třením. V pátém kroku se již kyvadlo zajistí v předepsané výšce a zkontroluje se uložení samotného vzorku. V předposledním kroku se uvolní rázové kyvadlo, které tímto svojí energií přerazí vzorek a zapíše se hodnota energie odečtená ze stupnice měřicího přístroje. Osmý, tedy poslední krok experimentu již jen popisuje 4 možná přeražení vzorku – úplné přeražení, kloubové přeražení, částečné přeražení a nepřeraženo. [17]

Výpočet a vyjádření výsledků

Pro určení záměru celého měření norma jasně definuje dva vzorce, z kterých lze určit rázovou houževnatost Charpy, a to sice pro zkušební vzorky s vrubem (vzorec 5) i bez vrubu (vzorec 6):

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b} \cdot 10^3 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (5)$$

$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \cdot 10^3 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-1}] \quad (6)$$

kde E_c je energie potřebná pro přeražení vzorku,

h tloušťka vzorku,

b šířka vzorku,

b_N šířka vzorku pod vrubem. [17]

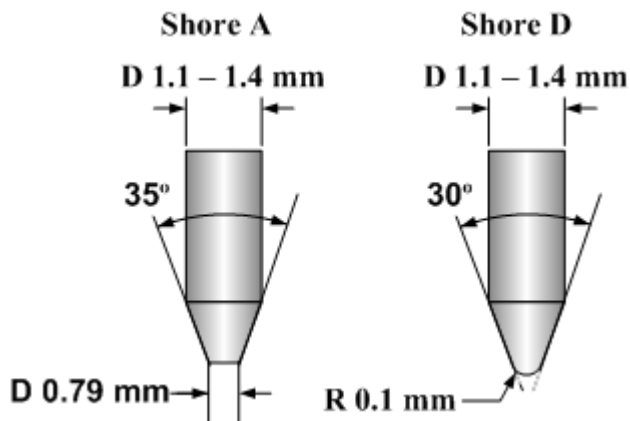
1.6.3 Tvrdost povrchu

Tvrdost povrchu, jakožto určující veličina, nebývá zdaleka pravidelně udávaným parametrem od výrobce polymerního materiálu. I přesto ji někteří výrobci udávají a může být klíčovým parametrem při výběru polymeru do různých aplikací. Tato veličina je nejčastěji udávána bezrozměrně, výjimečně se můžeme setkat s vyjádřením v MPa (při určení tvrdosti poměrem tlakové síly na plochu). Bezrozměrná hodnota však nebývá zcela nevyhovující, neboť lze zařadit na stupnici tvrdosti, která je udávána výrobcem tvrdoměru. [22]

Měření tvrdosti lze provádět několika způsoby. U měkkých polymerů, případně kaučuků se lze nejčastěji setkat s metodou Shore. U tvrdších plastů je běžnější metoda dle Rockwella či Brinella. Obecně měření tvrdosti se považuje za nedestruktivní, protože poškození vzorku je opravdu minimální. [22]

Měření tvrdosti dle Shoreho

Metoda Shore je založena na principu vtlačování hrotu tvrdoměru do materiálu. Nejčastěji používané hroty (viz Obr. 2) jsou typu A (měkký vzorek) a typu D (tvrdý vzorek). Výsledek měření se vyjadřuje jako nepřímá úměra hloubky vtlačení hrotu vůči hodnotě tvrdosti. Z čehož tedy vyplývá, že tvrdost se touto metodou určuje na základě hloubky vniku hrotu tvrdoměru do vzorku. [22]



Obr. 2: Hroty tvrdoměru typu A a typu D [26]

Měření tvrdosti dle Rockwella

Princip této metody (bližší popis v ČSN 42 0373) je velmi podobný metodě Shore. Též se jedná o vtlačování hrotu tvrdoměru do materiálu. Avšak Rockwell využívá dva stupně zatížení, což vede ke zvýšení přesnosti oproti metodě Shore. První stupeň zatížení je tzv. předběžné zatížení a druhým krokem je zatížení celkové. Předběžné zatížení slouží k potlačení vlivů zkreslujících měření (minimalizace nepřesnosti povrchu). [27]

Měření tvrdosti dle Brinella

Způsob této metody oproti předchozím je velmi odlišný. Při tomto měření se vtlačuje do vzorku velmi tvrdá kovová kulička. Tímto vtlačením se přímo úměrně vydané síle do vzorku vytlačí důlek. Samotná tvrdost je poté určena z plochy důlku a vydané síly pomocí normovaných tabulek. [28]

2 Experimentální část

Tato část práce je již orientována na samotné měření, respektive degradování polymerního elektroizolačního materiálu působením UV záření, které taktéž zahrnuje přípravku vzorků. Následné měření degradovaného materiálu, porovnání stavu před a po a shrnutí výsledků.

2.1 Příprava vzorků

Pro co nejobektivnější průběh experimentu jsem pro experimentální část zvolil běžně dostupnou novou rozvaděčovou skříň, která je vyrobena z termoplastu a je vyztužena skelnými vlákny. Výrobce na svých internetových stránkách udává stupeň krytí IP 20 a také uvádí, že rozvaděčová skříň je vyrobena z materiálu SB krasten, což je tedy modifikovaný polystyren (termoplast). [32]

Tento materiál v provedení rozvaděčové skříně jsem se rozhodl zkoumat proto, že se jedná o běžnou elektrotechnickou aplikaci (viz Obr. 3 a 4). Po výrazném zkřehnutí materiálu vlivem degradace by mohlo dojít k poškození dané skříně a umožnění snadnému přístupu k živým částem širokému okolí.

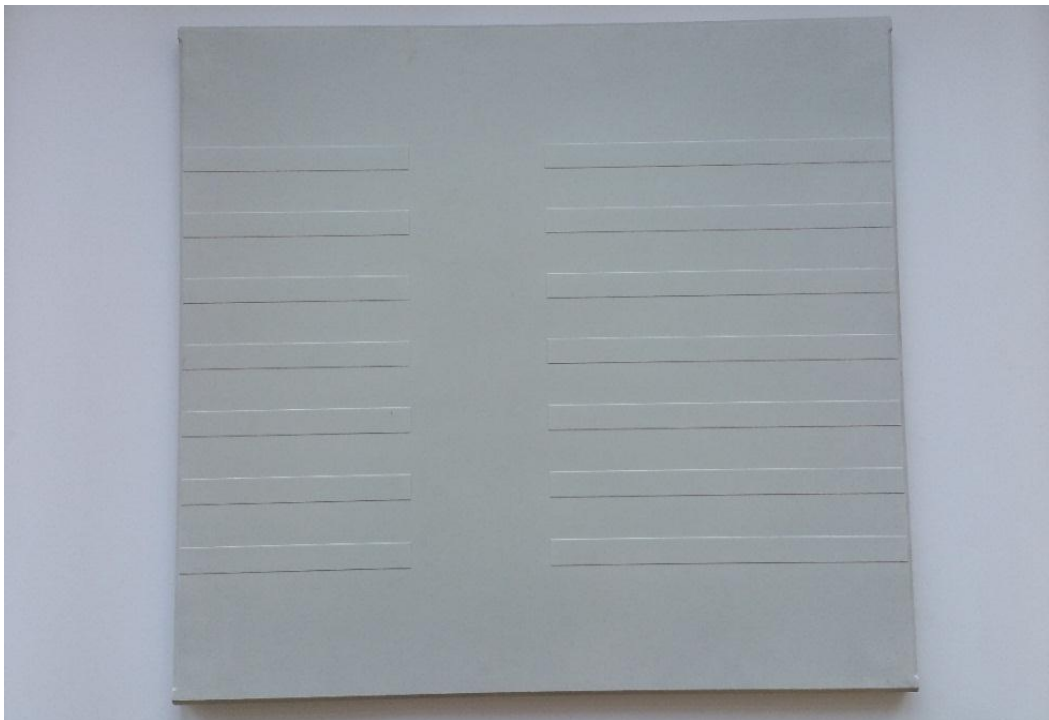


Obr. 3: Rozvaděčové skříně v různém stádiu degradace v okolí FEL ZČU

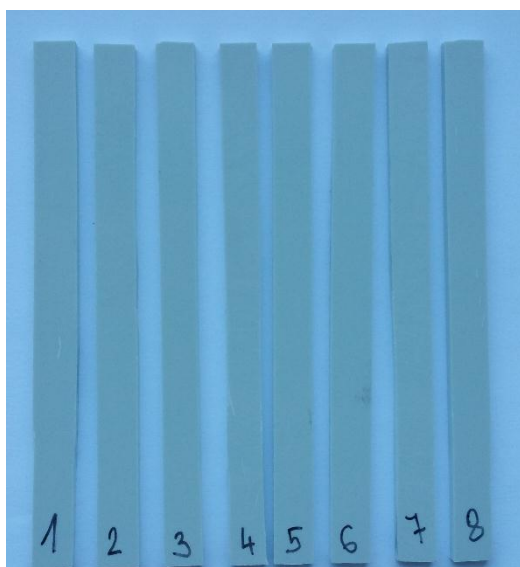


Obr. 4: Rozvaděčová skříně – Plzeň, Františkánská ulice

Vzorky pro měření jsem vyřezal pomocí stolní pily z předního panelu rozvaděčové skříně (viz Obr. 5) o šířce 10 mm a délce 120 mm (viz Obr. 6). Tloušťka vzorku byla již dána tloušťkou samotné rozvaděčové skříně, tedy 3,5 mm. Pro měření jsem si celkem připravil 60 ks vzorků a dalších 6 ks vzorků jako náhradních.



Obr. 5: Přední panel rozvaděčové skříně



Obr. 6: Připravená část vzorků pro namáhání

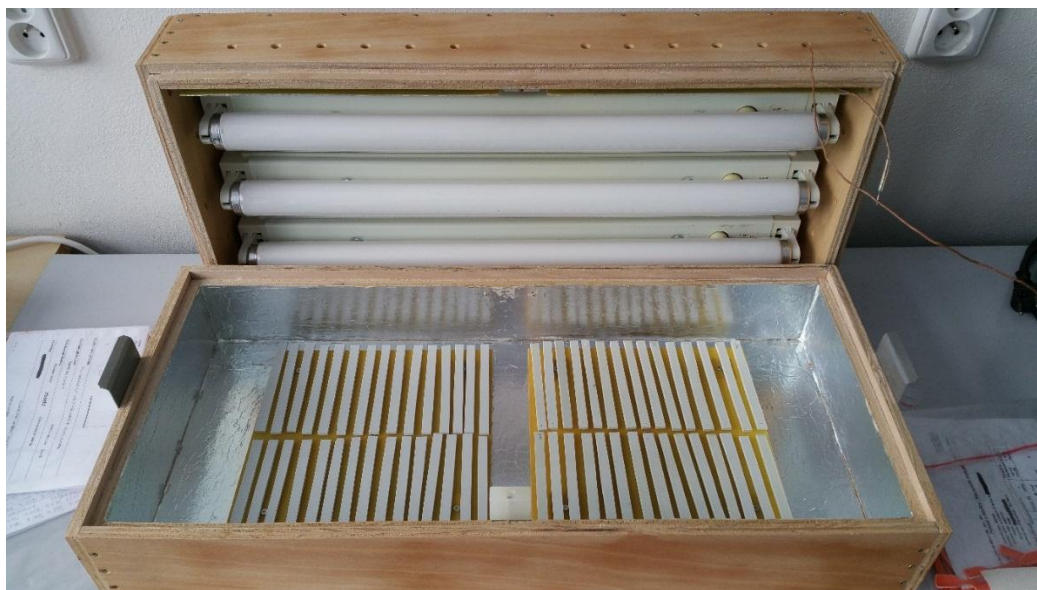
Po přípravě všech zkušebních vzorků jsem dále na polovinu vzorků (tedy 30 ks) nanesl běžně dostupný bezbarvý lak s UV stabilizátorem pro ochranu materiálu před UV zářením (viz Obr. 7). Pro tento účel jsem použil lak s komerčním označením „ColorWorks Bezbarvý lak syntetický lesklý 400 ml“.



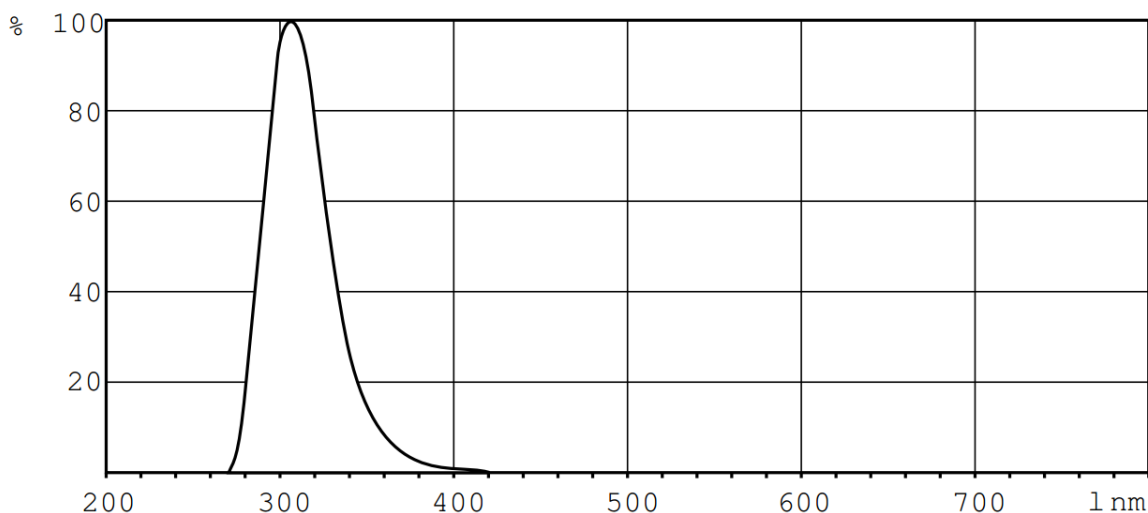
Obr. 7: Nanášení UV stabilizátoru na vzorky

2.2 Namáhání vzorků UV zářením

Pro namáhání připravených vzorků UV zářením jsem využil UV komoru (viz Obr. 8), která obsahuje tři UV zářivky. Všechny UV zářivky jsou stejné a jsou označeny názvem „UVB Boardband TL 20W/12 RS SLV/25“ a jejich výrobcem je firma Philips. Tyto zářivky vyzařují světlo o vlnové délce od 290 nm do 315 nm (viz Obr. 9), což tedy odpovídá UV-B záření. Zářivky jsou dlouhé 604 mm a jejich výkon je 19 W. [33]



Obr. 8: UV komora s připravenými vzorky



Obr. 9: Světelné spektrum zářivky [33]

Všech 60 vzorků bylo rozděleno do dvou skupin po 30 ks (lakované a bez úpravy). Obě tyto skupiny byly dále rozděleny do dalších pěti podskupin po 6 ks. Následné namáhání UV zářením proběhlo v následujících intervalech:

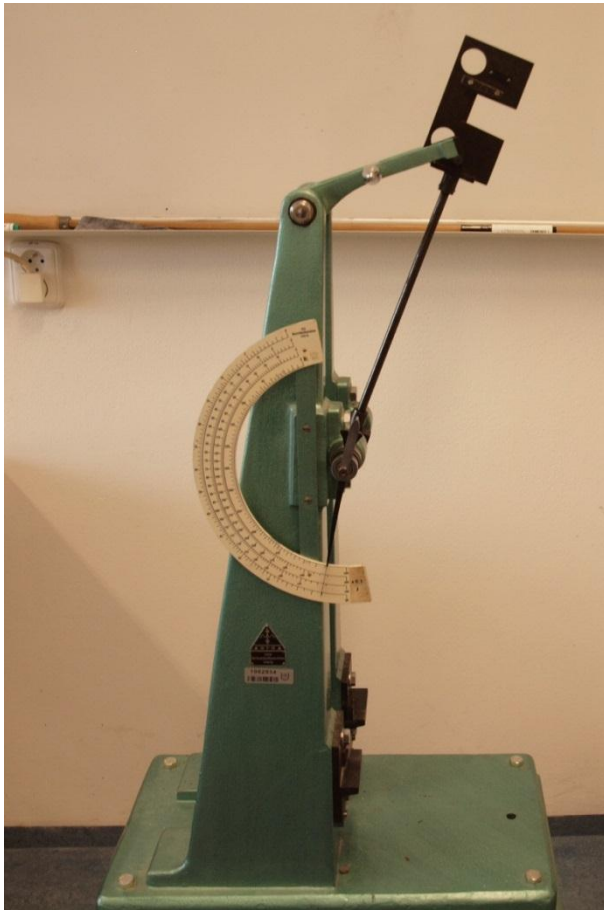
Tab. 1: Časové intervaly namáhání UV zářením

	Skupina vzorků	Doba expozice [h]
Vzorky neošetřené UV stabilizátorem (a)	1a	0
	2a	50
	3a	100
	4a	150
	5a	200
Vzorky ošetřené UV stabilizátorem (b)	1b	0
	2b	50
	3b	100
	4b	150
	5b	200

Každá skupina vzorků, jež byla vyjmuta po uplynutí výše definovaného času namáhání z UV komory, byla řádně označena a uložena na temném místě, aby nebyla nijak ovlivněna dalším UV zářením z okolního prostředí.

2.3 Měření rázové houževnatosti metodou Charpy

Pro měření mechanických vlastností degradovaného vzorku jsem zvolil měření rázové houževnatosti metodou Charpy. Důvodem zvolení této metody byla v první řadě dostupnost Charpyho kladiva (viz Obr. 10). Druhým podstatným faktem bylo to, že rozvaděčové skříně jsou běžně dostupné široké veřejnosti na každém kroku (tedy jejich elektroizolační polymerní kryt). To znamená, že každý může takzvaně zkusit, co daná skříň „vydrží“. Dalším podstatným důvodem je skutečnost, že elektroizolační kryt rozvaděče musí vydržet nárazový vítr, případně náraz letícího předmětu unášeného větrem. Měření rázové houževnatosti nám tedy jasně ukáže, jak postupem času (různou mírou degradace) daný materiál ztrácí, případně si ponechává své uspokojivé rázové mechanické vlastnosti.



Obr. 10: Charpyho kladivo

Měření rázové houževnatosti jsem provedl na všech 60 zkušebních vzorcích následujícím postupem. Nejprve jsem přeměřil rozměr každého vzorku, tedy jeho šířku a tloušťku ve 4 různých místech a zapsal je do záznamového archu. Poté jsem na podpěry Charpyho kladiva uložil vzorek tak, aby náraz Charpyho kladiva směřoval přesně na střed vzorku. Kladivo jsem ukotvil do zářezky tak, aby přerazilo vzorek až v ten moment, kdy jej uvolním. Ručičku stupnice na Charpyho kladiva jsem dal do pozice 0 J a uvolnil kladivo, které následně přerazilo vzorek (viz Obr. 11). Ze stupnice jsem odečetl energii, která byla kladivem vynaložena k přeražení vzorku, a hodnotu energie jsem zapsal do záznamového archu. Z přeraženého vzorku již bylo jasně patrné, že mnou zvolený materiál je termoplast se skelnými vlákny uloženými v náhodném směru. Dále je nutné podotknout, že jsem použil kladivo, které svojí energií při uvolnění ze zářezky vyvine energii 15 J.



Obr. 11: Vzorek přeražený Charpyho kladivem

2.3.1 Změřené hodnoty

Následující tabulka (Tab. 2) obsahuje pouze průměrná data pro každou podskupinu vzorků, průměrnou šířku podskupiny vzorků, průměrnou tloušťku podskupiny vzorků, průměrnou energii k přeražení podskupiny vzorků a průměrnou rázovou houževnatost podskupiny vzorků. Kompletní změřená data jsou k nahlédnutí viz Příloha A, B, C a D.

Tab. 2: Změřené hodnoty – rázová houževnatost metodou Charpy (zkrácená verze)

	Čas expozice [h]	\bar{h} [mm]	\bar{b} [mm]	E [J]	\bar{a} [kJ·m ⁻²]
Vzorky neošetřené UV stabilizátorem	0	3,472	9,172	1,750	55,243
	50	3,416	9,235	2,217	70,643
	100	3,405	9,181	2,292	73,474
	150	3,412	9,117	2,075	66,631
	200	3,409	9,142	2,083	66,715
Vzorky ošetřené UV stabilizátorem	0	3,369	9,070	1,750	55,759
	50	3,396	9,396	1,733	52,627
	100	3,486	9,264	1,967	60,432
	150	3,427	9,275	1,558	57,053
	200	3,381	9,179	2,125	68,547

2.3.2 Příklady výpočtů

Níže uvedené příklady výpočtů se vztahují ke kompletní tabulce změřených hodnot (viz Příloha A, B, C a D).

Průměrná tloušťka vzorku

$$\bar{h} = \frac{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}{4} = \frac{3,514 + 3,513 + 3,510 + 3,508}{4} = 3,511 \text{ mm} \quad (7)$$

Průměrná šířka vzorku

$$\bar{b} = \frac{b_1 + b_2 + b_3 + b_4}{4} = \frac{9,298 + 9,256 + 9,234 + 9,230}{4} = 9,255 \text{ mm} \quad (8)$$

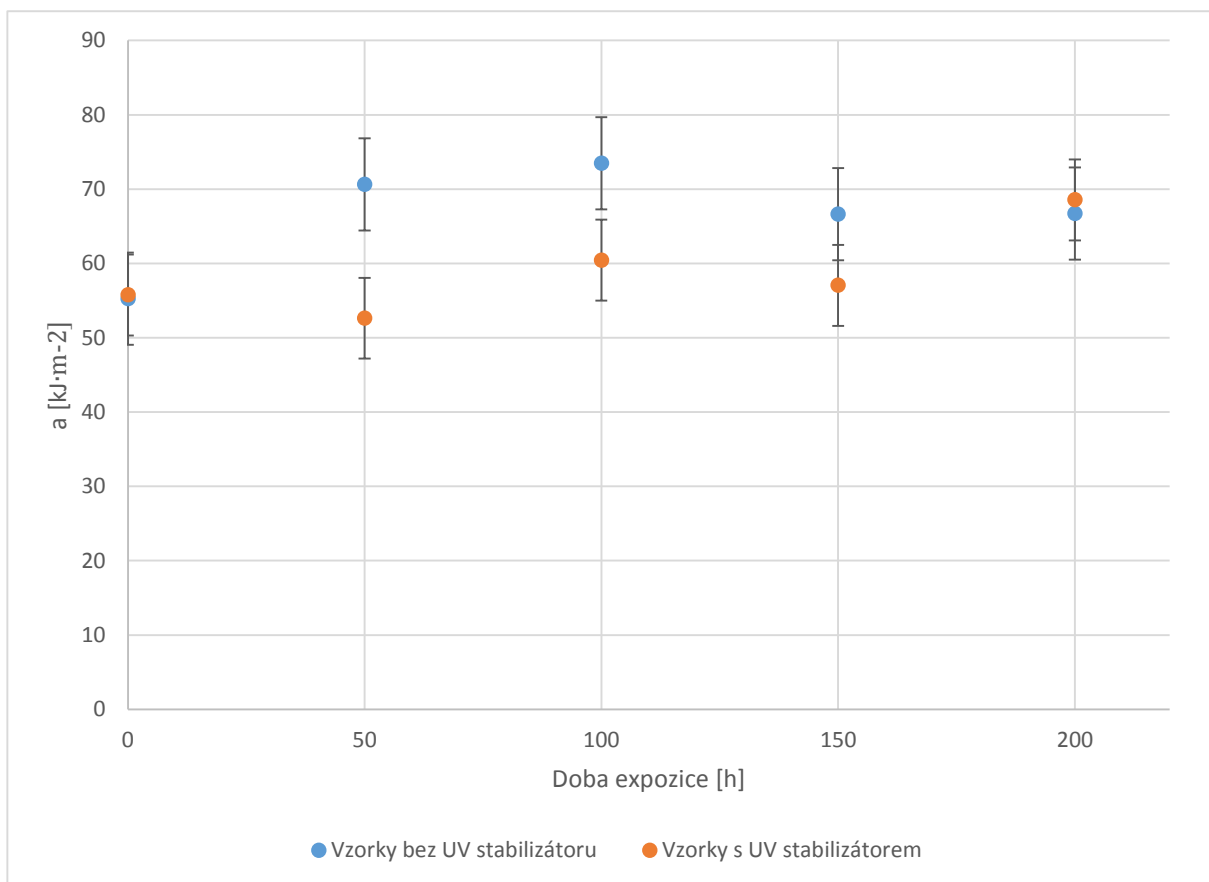
Rázová houževnatost

$$a = \frac{E}{\bar{h} \cdot \bar{b}} \cdot 10^3 = \frac{1,5}{9,255 \cdot 3,511} \cdot 10^3 = 46,161 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \quad (9)$$

Průměrná rázová houževnatost

$$\begin{aligned} \bar{a} &= \frac{a_{vzorek1} + a_{vzorek2} + \dots + a_{vzorek6}}{6} = \frac{46,161 + 69,776 + \dots + 64,461}{6} = \\ &= 55,24 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned} \quad (10)$$

Pro trend rázové houževnatosti i s její směrodatnou odchylkou jsem použil zobrazení v grafu (viz Obr. 12), ve kterém je jasně patrný vliv doby expozice na rázovou houževnatost materiálu.



Obr. 12: Zobrazení rázové houževnatosti se směrodatnou odchylkou

2.4 Měření tvrdosti povrchu metodou Shore

Druhým měření, tedy měřením tvrdosti povrchu dle Shoreho, jsem zjišťoval, zdali se změní, respektive sníží hodnota tvrdosti povrchu degradovaného materiálu. Pro tuto metodu měření jsem použil měřicí přístroj „Shore Scale D durometr“ (viz Obr. 13). Jak již z názvu vyplývá, použil jsem hrot tvrdoměru typu „D“ a měření jsem prováděl dle norem ISO 868 a ASTM D2240. Měřil jsem vždy jeden vzorek z podskupiny 6 ks vzorků, které byly vystaveny UV záření po definovaný čas. Na každém měřeném vzorku jsem provedl 15 měření na 15 různých místech vzorku. Výše zmíněný měřicí přístroj udává hodnotu tvrdosti na stupnici od 0 do 100 dílků. Tvrdost povrchu jsem zkoumal pouze u vzorků bez naneseného UV stabilizátoru. Ze změřených hodnot (viz Příloha E) je více než patrné, že nedošlo ke změně tvrdosti povrchu. Proto tedy zde pouze udávám celkovou průměrnou hodnotu tvrdosti povrchu 84,24 dílků.



Obr. 13: Měřicí přístroj „Shore Scale D durometr“ pro měření tvrdosti povrchu

2.5 Simultánní termická analýza

Závěrečným experimentem byla simultánní termická analýza (termogravimetrie a diferenční skenovací kalorimetrie prováděná jedním přístrojem TA SDT Q600). Tuto analýzu jsem třikrát opakoval na nedegradovaných vzorcích. Výsledkem tohoto experimentu je skutečnost, že při zahřátí vzorku nad 800 °C je hmotnostní zbytek (reziduum) v intervalu od 52 do 56 hmotnostních procent. Při takto vysoké teplotě jsou již všechny polymerní látky degradovány a z toho tedy lze vyvodit závěr, že výše zmíněný hmotnostní zbytek je již jen hmotnost skleněných vláken (výztuže). Z toho vyplývá, že materiál je vysoce plněný, tedy že polymer je velmi dobře vyztužen. Tento experiment dále odhalil skutečnost, že do 230 °C nedochází k hmotnostní změně. Proto lze tento materiál použít pro výrobu rozvaděčových skříní určených i pro využití v prostředích, kde mohou být dosahovány relativně vysoké teploty.

Závěr

V první části práce (teoretická část) jsem se zabýval polymery, tedy jejich definicí, vznikem, nahlédl jsem do jejich historie a provedl jsem základní dělení polymerů. V další části jsem se již zaměřil na téma kompozitních materiálů, respektive jsem provedl krátký úvod do problematiky kompozitů. V následující části jsem se zaměřil na UV záření, uvedl jsem tři typy UV záření, přiblížil jsem možné hrozby při expozici UV záření na polymery a také jsem se zaměřil na ochranu polymerů před UV zářením. V dalších dvou krocích jsem se obrátil na ČSN, z kterých jsem čerpal pro popis namáhání polymerů UV zářením a tepelného namáhání polymerů. V závěru teoretické části jsem již provedl přiblížení a ukázkou několika měřících metod určujících míru degradace polymerů. Blíže jsem se zabýval stanovením rázové houževnatosti metodou Charpy, pro jejíž popis jsem se inspiroval ČSN. Dále jsem se zmínil o termických analýzách a jako poslední jsem uvedl základní tři metody měření tvrdosti povrchu polymerů.

V experimentální části jsem se již prakticky zaměřil na degradaci běžné rozvaděčové skříně vyrobené z termoplastu vyztuženého skleněnými vlákny. Vzorky z rozvaděčové skříně jsem namáhal po různě dlouhou dobu (0, 50, 100, 150 a 200 hodin). Před tímto namáháním jsem taktéž polovinu vzorků ošetřil běžně dostupným UV stabilizátorem pro ověření jeho funkce. Po tomto namáhání jsem provedl měření tvrdosti metodou Shore na vzorcích neošetřených UV stabilizátorem a na všech vzorcích jsem aplikoval měření rázové houževnatosti metodou Charpy. Posledním krokem byla simultánní termická analýza.

Výsledky každého měření byly velmi překvapivé. Při měření tvrdosti povrchu jsem nezaznamenal žádný vliv UV záření na materiál. Tvrdost materiálu byla tedy beze změny, avšak v porovnání s ostatními srovnatelnými materiály (polystyren, polypropylen, polyethylentereftalát, polykarbonát) se mnou měřený materiál ukazuje jako velmi tvrdý, žádný z výše uvedených materiálů nemá dle zdroje [34] vyšší tvrdost. Při měření rázové houževnatosti byla patrná změna trendu rázové houževnatosti mezi vzorky ošetřenými a neošetřenými UV stabilizátorem. Rozdílné hodnoty mezi ošetřenými a neošetřenými vzorky, které byly namáhané 50, 100 a 150 hodin, nebyly tak vysoké a při namáhání po dobu 200 hodin již tyto rozdíly byly opět smazány. Celkový výsledek měření rázové houževnatosti je překvapující v tom, že rázová houževnatost byla nižší před UV ozářením než po UV ozářením, očekával jsem přesně opačný trend. Nutné je také zmínit, že rozdíl počátečních a konečných hodnot není vůbec velký.

Důvodem neočekávaných výsledků je fakt, že vzorek měl na zvolenou diagnostickou metodu pravděpodobně příliš vysokou hodnotu tloušťky a UV záření proniklo jen do povrchových vrstev kompozitního materiálu. V závěrečném měření simultánní termickou analýzou jsem získal několik důležitých faktů. U materiálu nedošlo přibližně do 230 °C k hmotnostnímu úbytku a 52 až 56 hmotnostních procent materiálu tvořila výztuž (skleněná vlákna). Výše uvedené experimenty tedy dokazují, že jde o kompozitní materiál s vysokou úrovní plnění. Dále má velmi dobré hodnoty tvrdosti povrchu, které taktéž zaručují jeho odolnost. Po provedení výše popsaného UV ozáření nemění materiál tvarovaný do desky rozvaděčové skříně své mechanické vlastnosti.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [2] WIENER, Jakub. Polymery [online]. [cit. 5. 2. 2017]. Dostupné z: <http://www.kch.tul.cz/sites/default/files/texty/ft/prednasky-prezencni-studium/polymery.pdf>
- [3] KUČEROVÁ, Eva. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [4] DOLEŽEL, Břetislav. *Odolnost plastů a pryží*. Vyd. 1. Vydavatelství SNTL, 1986.
- [5] BEATY, H. Wayne. *Electrical engineering materials reference guide*. New York: McGraw-Hill, c1990. ISBN 0070041962.
- [6] EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [7] PECINA, Pavel a Josef PECINA. *Materiály a technologie – plasty*. Brno: Masarykova univerzita, 2006. ISBN 80-210-4100-5.
- [8] KOUDELKA, Ctirad. *Světlo a osvětlování*. (přednáška) Ostrava: VŠB-TU. Září 2005.
- [9] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Svitavy: SOU Svitavy. Elektronická učebnice, 2014. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [10] Polymerace. In: *Katedra strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci* [online]. [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c1/polymerace.pdf
- [11] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-7080-568-4.
- [12] PROKOPOVÁ, Irena. *Makromolekulární chemie*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2007. ISBN 978-80-7080-662-3.
- [13] HRBKOVÁ, Lenka. *Plasty* [online]. 2008 [cit. 2017-04-24]. Dostupné z: <https://www.jihlava.cz/plasty/d-490914>
- [14] NUTSCH, Wolfgang. *Průručka pro truhláře*. 2., přeprac. vyd. Praha: Europa-Sobotáles, 2006. ISBN 80-86706-14-1.
- [15] *Radiobiologie* [online]. [cit. 2017-04-25]. Dostupné z: <http://fbmi.sirdik.org/9-kapitola/92/921.html>

- [16] VIMMROVÁ, Alena. *Degradace polymerů: Interakce materiálů a vnějšího prostředí* [online]. [cit. 2017-04-27]. Dostupné z: http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IMP/IMP_3b.pdf
- [17] ČSN EN ISO 179-1. *Plasty – Stanovení rázové houževnatosti metodou Charpy – Část 1: Neinstrumentovaná rázová zkouška*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [18] ČSN 77 0344. *Standartní postup zkoušení nekovových materiálů UV zářením a kondenzací vody. Typ s fluorescenčním zářením a kondenzací*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [19] ČSN EN 60216-1 ed. 2. *Elektroizolační materiály – Vlastnosti tepelné odolnosti – Část 1: Proces stárnutí a vyhodnocování výsledků zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [20] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [21] MENTLÍK, Václav. *Diagnostika elektrických zařízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-232-9.
- [22] MARTINEK, Michal. *Měření tvrdosti polymerů*. Zlín, 2010. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce David Mañas
- [23] KOZMÍK, Václav. *Heterocyklické sloučeniny* [online]. [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: https://uoch.vscht.cz/files/uzel/0006592/Heterocyklicke_slouceniny.pdf?redirected
- [24] CHEMIATEC s.r.o. *Péče o plastová skla světel* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.procisteni.cz/content/14-pece-o-plastova-skla-svetel>
- [25] Kroulík, Karel. *Stavební konstrukce* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: www.soupardubice.cz/index.php/dokumenty/category/4-tesari?...stavebni-konstrukce
- [26] [cit. 2017-05-10]. Dostupný z: www.substech.com/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?cache=cache&media=durometer.png
- [27] MATULA, Radek. *Měření tvrdosti polymerů*. Zlín, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce David Mañas.
- [28] *Měření tvrdosti* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.kalirna.cz/cz/sluzby/item/36-mereni-tvrdosti.html>
- [29] PIELICHOWSKI, Krzysztof. a James. NJUGUNA. *Thermal degradation of polymeric materials*. Shawbury: Rapra Technology, 2005. ISBN 1-85957-498-x.
- [30] KLOUŽKOVÁ, A., J. KLOUŽEK, W. PABST a P. ZEMENOVÁ. *Termická analýza: Zřízení laboratoře pro praktickou výuku termické analýzy se zaměřením na anorganické*

- nekovové materiály* [online]. VŠCHT Praha, 2012 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://tresen.vscht.cz/sil/sites/default/files/Termick%C3%A1%20anal%C3%BDza.pdf>
- [31] SEILEROVÁ, Lenka, Hana BRUSOVÁ, Bohumil KRATOCHVÍL a Lukáš KREJČÍK. *VYUŽITÍ METOD TERMICKÉ ANALÝZY VE VÝZKUMU A VÝVOJI LÉČIV*. *Chemické listy* [online]. 2012, , 891 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2012_10_890-895.pdf
- [32] *Plzeňské dílo* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <http://www.plzenske-dilo.cz/nase-vyrobky/>
- [33] *PHILIPS* [online]. 2017 [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: http://download.p4c.philips.com/lfb/8/80520fb4-7009-473a-9869-a60b0046e30c/80520fb4-7009-473a-9869-a60b0046e30c_pss_en_aa_001.pdf
- [34] Fabriger, Daniel. *Měření tvrdosti polymerů*. Zlín, 2008. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce David Maňas

Přílohy

Příloha A: Změřená data metodou Charpy (nelakované vzorky), část 1

Doba ozáření [hod]	vzorek	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]	b_4 [mm]
0	1	3,514	3,513	3,510	3,508	9,298	9,256	9,234	9,230
	2	3,500	3,506	3,513	3,509	8,930	8,991	9,011	9,030
	3	3,546	3,551	3,549	3,552	9,503	9,473	9,463	9,420
	4	3,364	3,354	3,341	3,329	9,365	9,203	9,066	9,020
	5	3,468	3,471	3,470	3,466	9,173	9,172	9,164	9,175
	6	3,454	3,450	3,449	3,451	8,949	8,974	9,008	9,031
50	7	3,421	3,419	3,420	3,419	8,949	8,997	9,038	9,076
	8	3,368	3,363	3,358	3,354	9,958	10,01	10,017	10,06
	9	3,428	3,423	3,415	3,412	9,546	9,501	9,475	9,447
	10	3,489	3,486	3,481	3,485	9,041	9,072	9,078	9,079
	11	3,299	3,308	3,309	3,314	9,483	9,567	9,630	9,715
	12	3,495	3,503	3,504	3,506	8,330	8,280	8,165	8,120
100	13	3,405	3,410	3,415	3,420	9,067	8,948	8,901	8,853
	14	3,387	3,380	3,376	3,374	9,341	9,364	9,390	9,401
	15	3,361	3,353	3,350	3,348	9,293	8,216	9,141	9,091
	16	3,391	3,391	3,383	3,378	9,621	9,622	9,604	9,593
	17	3,345	3,345	3,341	3,345	9,033	8,896	8,852	8,583
	18	3,553	3,554	3,552	3,551	9,393	9,391	9,381	9,369
150	19	3,396	3,399	3,395	3,393	9,461	9,339	9,300	9,270
	20	3,372	3,371	3,373	3,372	8,573	8,507	8,443	8,410
	21	3,402	3,404	3,400	3,400	9,805	9,735	9,679	9,645
	22	3,522	3,528	3,529	3,525	9,444	9,445	9,443	9,440
	23	3,418	3,419	3,414	3,408	8,529	8,537	8,628	8,661
	24	3,349	3,363	3,370	3,372	9,082	9,113	9,148	9,181
200	25	3,377	3,372	3,366	3,359	8,973	9,032	9,153	9,256
	26	3,320	3,328	3,331	3,334	9,428	9,475	9,471	9,320
	27	3,521	3,518	3,518	3,516	9,215	9,192	9,150	9,123
	28	3,507	3,512	3,515	3,513	8,855	8,877	8,905	8,931
	29	3,357	3,363	3,369	3,365	8,898	8,699	8,551	8,542
	30	3,373	3,364	3,359	3,350	9,317	9,498	9,711	9,824

Příloha B: Změřená data metodou Charpy (nelakované vzorky), část 2

Doba záření [hod]	vzorek	E [J]	\bar{h} [mm]	\bar{b} [mm]	a [kJ·m ⁻²]	\bar{a} [kJ·m ⁻²]
0	1	1,50	3,511	9,255	46,161	55,24
	2	2,20	3,507	8,991	69,776	
	3	1,30	3,550	9,465	38,696	
	4	2,00	3,347	9,164	65,210	
	5	1,50	3,469	9,171	47,152	
	6	2,00	3,451	8,991	64,462	
50	7	1,90	3,420	9,015	61,630	70,64
	8	1,80	3,361	10,01	53,498	
	9	2,15	3,420	9,492	66,238	
	10	2,85	3,485	9,068	90,183	
	11	2,30	3,308	9,599	72,446	
	12	2,30	3,502	8,224	79,862	
100	13	1,70	3,413	8,942	55,710	73,47
	14	3,00	3,379	9,374	94,706	
	15	2,60	3,353	8,935	86,783	
	16	2,10	3,386	9,610	64,542	
	17	2,25	3,344	8,841	76,105	
	18	2,10	3,553	9,384	62,997	
150	19	2,00	3,396	9,343	63,042	66,63
	20	1,80	3,372	8,483	62,925	
	21	2,65	3,402	9,716	80,184	
	22	1,90	3,526	9,443	57,064	
	23	2,00	3,415	8,589	68,193	
	24	2,10	3,364	9,131	68,377	
200	25	2,20	3,369	9,104	71,743	66,71
	26	2,30	3,328	9,424	73,333	
	27	2,65	3,518	9,170	82,139	
	28	2,20	3,512	8,892	70,453	
	29	1,50	3,364	8,673	51,423	
	30	1,65	3,362	9,588	51,197	

Příloha C: Změřená data: Rázová houževnatost metodou Charpy (lakované vzorky), část 1

Doba ozáření [hod]	vzorek	h_1 [mm]	h_2 [mm]	h_3 [mm]	h_4 [mm]	b_1 [mm]	b_2 [mm]	b_3 [mm]	b_4 [mm]
0	31	3,420	3,429	3,435	3,442	8,568	8,552	8,483	8,460
	32	3,381	3,386	3,395	3,400	9,340	9,311	9,252	9,194
	33	3,460	3,451	3,446	3,436	9,632	9,274	9,109	9,163
	34	3,206	3,199	3,210	3,211	8,667	8,712	8,691	8,727
	35	3,238	3,233	3,219	3,217	8,954	8,816	8,804	8,789
	36	3,524	3,512	3,503	3,504	9,726	9,795	9,780	9,880
50	37	3,291	3,291	3,286	3,285	9,045	8,955	8,907	8,843
	38	3,524	3,521	3,523	3,525	9,273	9,311	9,343	9,375
	39	3,367	3,378	3,377	3,388	9,384	9,420	9,442	9,456
	40	3,318	3,308	3,307	3,307	9,970	10,03	10,02	10,03
	41	3,517	3,513	3,501	3,504	9,375	9,355	9,279	9,339
	42	3,381	3,373	3,362	3,353	9,270	9,308	9,352	9,427
100	43	3,525	3,526	3,544	3,526	8,094	8,038	7,923	7,709
	44	3,338	3,340	3,335	3,334	9,273	9,379	9,465	9,492
	45	3,532	3,523	3,519	3,516	9,657	9,679	9,695	9,700
	46	3,521	3,552	3,532	3,539	8,919	8,944	8,982	9,000
	47	3,436	3,439	3,443	3,457	9,945	9,839	9,715	9,433
	48	3,541	3,545	3,546	3,548	9,754	9,838	9,927	9,941
150	49	3,546	3,550	3,553	3,552	8,935	8,920	8,873	8,822
	50	3,169	3,175	3,189	3,185	8,562	8,490	8,439	8,438
	51	3,450	3,445	3,489	3,450	9,084	9,160	9,187	9,283
	52	3,556	3,552	3,551	3,546	9,407	9,360	9,356	9,326
	53	3,535	3,534	3,534	3,533	9,020	9,040	9,063	9,052
	54	3,307	3,292	3,267	3,276	10,68	10,70	10,70	10,69
200	55	3,327	3,329	3,322	3,320	9,109	9,101	9,014	8,956
	56	3,167	3,169	3,161	3,158	8,848	8,858	8,990	8,979
	57	3,504	3,498	3,492	3,490	9,113	9,116	9,063	8,815
	58	3,510	3,511	3,497	3,491	8,456	8,410	8,413	8,433
	59	3,540	3,546	3,533	3,532	10,25	10,20	10,09	10,05
	60	3,260	3,259	3,260	3,256	9,314	9,528	9,570	9,623

Příloha D: Změřená data: Rázová houževnatost metodou Charpy (lakované vzorky), část 2

Doba záření [hod]	vzorek	E [J]	\bar{h} [mm]	\bar{b} [mm]	a [kJ·m ⁻²]	\bar{a} [kJ·m ⁻²]
0	1	1,90	3,432	8,516	65,02	55,76
	2	1,70	3,391	9,274	54,064	
	3	1,90	3,448	9,295	59,283	
	4	1,50	3,207	8,699	53,775	
	5	1,75	3,227	8,841	61,346	
	6	1,75	3,511	9,795	50,889	
50	7	1,35	3,288	8,938	45,936	52,63
	8	1,90	3,523	9,326	57,828	
	9	2,00	3,378	9,426	62,825	
	10	2,00	3,310	10,01	60,355	
	11	1,20	3,509	9,337	36,63	
	12	1,95	3,367	9,339	62,008	
100	13	1,20	3,530	7,941	42,806	60,43
	14	2,00	3,337	9,402	63,75	
	15	1,55	3,523	9,683	45,445	
	16	2,00	3,536	8,961	63,118	
	17	2,65	3,444	9,733	79,062	
	18	2,40	3,545	9,865	68,627	
150	19	1,90	3,550	8,888	60,216	57,05
	20	1,30	3,180	8,482	48,203	
	21	1,50	3,459	9,179	47,253	
	22	1,70	3,551	9,362	51,131	
	23	1,95	3,534	9,044	61,013	
	24	1,00	3,286	10,69	28,459	
200	25	3,10	3,325	9,045	103,09	68,55
	26	1,50	3,164	8,919	53,160	
	27	1,40	3,496	9,027	44,363	
	28	2,00	3,502	8,428	67,758	
	29	2,35	3,538	10,15	65,456	
	30	2,40	3,259	9,509	77,453	

Příloha E: Změřená data – Tvrдост povrchu metodou Shore (nelakované vzorky)

Měření	Tvrдост povrchu [dítky]				
	ozáření: 0h	ozáření: 50h	ozáření: 100h	ozáření: 150h	ozáření: 200h
1	85	83	84	85	85
2	87	84	85	83	86
3	85	82	85	82	82
4	86	83	85	82	85
5	81	85	85	84	84
6	83	84	86	83	86
7	83	84	84	86	87
8	84	86	85	83	84
9	86	87	84	84	85
10	83	86	82	84	85
11	84	84	84	86	84
12	83	82	83	87	83
13	85	84	84	84	83
14	82	83	86	85	84
15	84	84	85	83	85
Průměr	84,067	84,067	84,467	84,067	84,533
Celkový průměr					84,24