



FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ
UNIVERZITY
V PLZNI

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství
Studijní specializace: **Progresivní technologie a materiály**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Možnosti testování polymerních materiálů v korozní komoře VLM

Autor: Petr ROUTNER
Vedoucí práce: Ing. Ondřej CHOCHOLATÝ, Ph.D.
Konzultant práce: Ing. Kateřina NOVÁ, Ph.D.

Akademický rok 2020/2021

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Petr ROUTNER**
Osobní číslo: **S20B0046K**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Progresivní technologie a materiály**
Téma práce: **Možnosti testování polymerních materiálů v korozní komoře VLM**
Zadávací katedra: **Katedra materiálu a strojírenské metalurgie**

Zásady pro vypracování

1. Degradace polymerů
2. Degradací testy polymerních materiálů
3. Rešerše – normy pro testování plastů
4. Stanovení, dle kterých norem lze použít komoru VLM
5. Diskuze výsledků
6. Závěr

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK., *Polyмеры: výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2. přeprac. vyd.* Praha:, Sobotáles, 2000. ISBN 80-85920-72-7.

Allen, N.S., Edge, M., *Fundamentals of Polymer Degradation and Stabilization*, Springer Netherlands, 1993, ISBN 978-1-85166-773-4

VLM, *provozní manuál korozní komory*

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Ondřej Chocholatý, Ph.D.**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Kateřina Nová**
Katedra materiálu a strojírenské metalurgie
Datum zadání bakalářské práce: **6. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2021**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Dr. Ing. Antonín Kříž, IWE
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Tímto chci vyjádřit mé poděkování, které patří Ing. Ondřeji Chocholatému, Ph.D. a Ing. Kateřině Nové, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnovali.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Routner	Jméno Petr	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Chocholatý, Ph.D.	Jméno Ondřej	
PRACOVÍŠTĚ	ZČU - FST – KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Možnosti testování polymerních materiálů v korozní komoře VLM		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2021
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	40	TEXTOVÁ ČÁST	40	GRAFICKÁ ČÁST	
---------------	----	---------------------	----	----------------------	--

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>V této bakalářské práci se pojednává o základním rozdělení polymerů, přehled nejpoužívanějších z nich a vliv vybraných degradačních procesů na polymery. Možnosti testování polymerů dle vybraných norem jsou pak další částí rešeršní práce. Cílem práce bylo najít, porovnat a vybrat vhodné normy pro testování polymerů v klimatické komoře VLM, případně zajistit podmínky pro provedení testu.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Polymery, degradace, testování, klimatická komora</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Routner	Name Petr	
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Chocholatý, Ph.D.	Name Ondřej	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Possibilities of testing polymeric materials in the VLM corrosion chamber		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2021
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	40	TEXT PART	40	GRAPHICAL PART	
----------------	----	------------------	----	-----------------------	--

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	This bachelor thesis deals with the basic division of polymers, with an overview of the most used ones and the influence of selected degradation processes on polymers. The possibilities of testing polymers according to selected standards are another part of these research work. The aim of the work was to find, compare and select suitable standards for testing polymers in the climatic chamber VLM, or to provide conditions for testing.
KEY WORDS	Polymer, degradation, tests, standards, climate chamber

Obsah

1. ÚVOD.....	6
1. ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ POLYMERŮ	6
1.1. PLASTY	6
1.1.1. Termoplasty.....	6
1.1.2. Reaktoplasty	7
1.2. ELASTOMERY	7
1.2.1. Kaučuk	7
2. NEJPOUŽÍVANĚJŠÍ POLYMERY	8
2.1. POLYETHYLEN (PE)	8
2.2. POLYPROPYLEN (PP)	10
2.3. POLYVINYLCHLORID (PVC)	11
3. DEGRADACE	12
3.1. VLIV SVĚTELNÉHO UV ZÁŘENÍ.....	12
3.2. VLIV TEPLoty NA DEGRADACI	13
3.3. VLIV KYSLÍKU NA DEGRADACI.....	14
3.4. VLIV OZONU NA DEGRADACI	14
3.5. VLIV VODY NA DEGRADACI	15
4. TESTOVÁNÍ POLYMERŮ	16
4.1. TESTOVÁNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ POLYMERŮ	16
4.1.1. Tahová zkouška.....	16
4.1.2. Ohybová zkouška	17
4.2. METODY CHEMICKÉHO TESTOVÁNÍ DLE VYBRANÝCH NOREM	18
4.2.1. Metoda umělého stárnutí včetně rozkladu kyselinami	18
4.2.2. Metoda zkoušení vystavení slunečnímu záření	19
4.2.3. Test cyklické koroze	20
4.2.4. Testy v prostředí solné mlhy.....	21
4.2.5. Urychlené stárnutí a zkoušky tepelné odolnosti elastomerů.....	21
4.2.6. Metody vystavení laboratorním zdrojům světla.....	22
5. NÁVRHY TESTOVÁNÍ DLE VYBRANÝCH NOREM	22
5.1. TVAR ZKUŠEBNÍHO VZORKU	23
5.2. SOLNÁ MLHA.....	23
5.2.1. Zkušební komora.....	24

5.3.	UMĚLÉ STÁRNUTÍ + ZKOUŠKA CYKLICKÉ KOROZE	25
5.3.1.	<i>Podmínky pro umělé stárnutí</i>	25
5.3.2.	<i>Podmínky pro cyklické korozní zkoušky</i>	27
5.4.	ZRYCHLENÉ STÁRNUTÍ VLIVEM TEPLoty.....	28
6.	VLM KOMORA CLIMACORR CC 1000 - TL FR	30
6.1.	PARAMETRY TESTOVACÍ KOMORY VLM.....	31
7.	TABULKA TESTOVÁNÍ VYBRANÝCH NOREM V KOMOŘE VLM	35
8.	ZÁVĚR	36
9.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A ZDROJE OBRÁZKŮ	37

1. Úvod

Polymery se rozdělují na organické a anorganické. Vyznačují se velkou základní molekulou, jejichž základní stavební jednotka – mer se mnohonásobně za sebou řetězcově opakuje, proto název polymer, viz obr. 1. Polymery mají také proto vysokou molární hmotnost. Organické polymery jsou kaučuk, polysacharidy (celulóza, škrob), bílkoviny. U syntetických polymerů je dělení trochu obsáhlejší, v krátkosti mezi ně patří polyestery, termoplasty, reaktoplasty, syntetické elastomery atd. Dělí se tedy i dle jejich vlastností (termoplasty, elastomery).

Polymery vznikají polymerizací, polyadící nebo polykondenzací. Velmi rozmanité možnosti aplikací polymerních materiálů tedy vychází z jejich mnohých vlastností. Tyto vlastnosti podléhají ovlivnění různých činitelů, zejména fázovému stavu, chemickému složení a molekulové hmotnosti. Stejně jako jakýkoliv jiný materiál na světě, i polymery podléhají degradaci. Mezi degradační činitele patří teplota, světlo – tedy UV záření, voda, ozon, kyslík a další. V závislosti na délce a intenzitě působení podléhají polymery degradaci, která se projevuje například povrchovými vadami, ztrátou mechanických vlastností apod. Cílem této práce je rešerše vhodných norem pro testování polymerů v klimatické komoře VLM. V úvodní části této práce je uvedeno základní rozdělení polymerů a neznámějších druhů z nich. Dále práce obsahuje popis degradačních faktorů a jejich vliv na polymery. Následuje rešerše norem pro testování, popis komory VLM a závěr s vybranou normou pro testování. [1,2,3].

1. Základní rozdělení polymerů

Polymery můžeme rozdělit na dvě základní skupiny, plasty a elastomery. Obě skupiny se pak dělí ještě na další druhy polymerů dle jejich vlastností.

1.1. Plasty

Polymerní materiál, u kterého namáhání vnějšími silami způsobí deformace z větší části trvalé změny. Za normálních podmínek jsou převážně tvrdé, i křehké. Podle vykazovaných vlastností při zahřívání je dále dělíme na termoplasty a reaktoplasty. [4]

1.1.1. Termoplasty

Termoplast je polymerní materiál vytvořený z lineárních makromolekul s dlouhým řetězcem, který při ohřívání měkne a při ohřátí nad teplotu tání (která se běžně pohybuje okolo 100 až

130 °C) se stává plastickým, kdy je možné je tvarovat dle požadavků. Řetězce u sebe drží mezimolekulární interakce a při zahřívání právě tyto interakce slábnou, čímž se polymer stává měkkým. Po dosažení požadovaného tvaru a ochlazení setrvá termoplast v novém tvaru v tuhém stavu. Chemická struktura se při zahřívání termoplastu nemění a rovněž ani nenastává chemická reakce, teoreticky je možné proces tání a tuhnutí opakovat stále. Běžně používaným termoplastem je například polyethylen, polystyren, polypropylen, polyvinylchlorid a jiné. [4,5]

1.1.2. Reaktoplasty

Reaktoplast jest amorfni polymer a je rovněž tavitelný a tvářitelný materiál, na rozdíl od termoplastů však jen určitou dobu a pouze jednou. U reaktoplastů dochází k chemické změně, zapříčiněné zahříváním, tlakem nebo i katalyzátory, při které se molekuly přetvoří na prostorové sítě a stávají se nadále neroztavitelné. Této reakci, při které se tvoří prostorová síťová struktura, se říká vytvrzování. Po vytvrzení nejde reaktoplast nadále tvarovat, svářet ani tavit, jde tedy o nevratný proces. Reaktoplasty mají tedy vysokou chemickou odolnost, rovněž se vyznačují odolností proti teplu, tuhostí a tvrdostí. Reaktoplast je v podstatě ještě v tepelně či chemicky nezpracovaném stavu pryskyřice, např. epoxidová či polyesterová pryskyřice. [4]

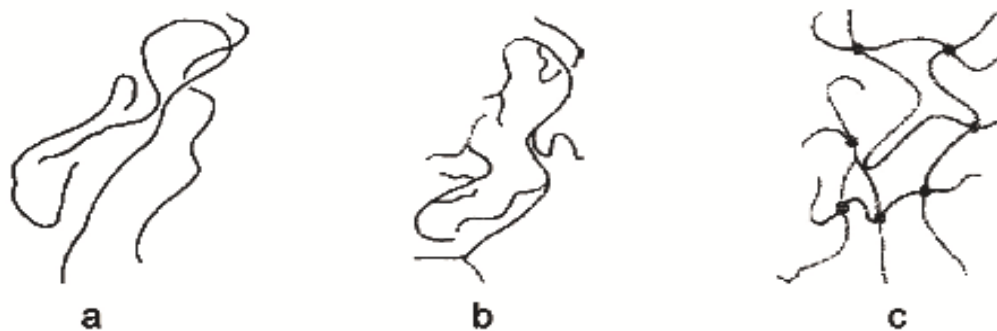
1.2. Elastomery

Elastomery jsou polymery, které se po deformaci dokáží velmi rychle vrátit do původního tvaru. Mají nízkou tuhost, k deformaci tedy stačí i malé síly. Hlavním představitelem elastomeru je kaučuk, který po vulkanizaci (probíhá při teplotách 150 až 200 °C), tj. zesílení sírou stává odolný trvalé deformaci a je vysoce pružný, takovému materiálu se říká pryž. Pryž má chemické vazby, ve kterých makromolekuly tvoří uzly v prostorových sítích. Pryž je amorfni polymer. [4,6]

1.2.1. Kaučuk

Kaučuk je možné získat přírodně i vyrábět synteticky. Vyrábí se polymerací nebo kopolymerací. Mezi nejčastější druhy kaučuku patří butadien-styrenové, polybutadienové, či izoprenové. Základní princip výroby butadien-styrenového kaučuku je emulzní polymerace 70 až 78 % butadienu s 22 až 30 % styrenu. Používá se redoxní iniciační systém, který umožňuje použití nízkých teplot, což má za následek zlepšení fyzikálních vlastností a jednodušší strukturu. Polybutadienové kaučuky se získávají například roztokovou polymerací,

ty pak mají vysoký podíl 1,4-butadienových jednotek ve struktuře. Polybutadienové kaučuky se používají s různými modifikacemi pro výrobu pneumatik. [6]



Schematické znázornění makromolekul lineárního (a), rozvětveného (b), sesíťovaného (c) polymeru

Obrázek 1 Schematické znázornění polymerů [11]

2. Nejpoužívanější polymery

2.1. Polyethylen (PE)

Polyethylen je termoplast, vzniklý polymerací ethenu. Za nízkého tlaku vznikne polymer s lineárním řetězcem IPE-liten, nebo pak za vysokého tlaku vzniká polymer s rozvětveným řetězcem rPE-bralen. Vyrábí se vytlačováním, nebo vstřikováním. Samotný ethylen ($\text{CH}_2=\text{CH}_2$) se vyrábí z ethenu ($\text{CH}_3=\text{CH}_3$), ropy, odpadu při zpracování uhlí a zemního plynu. Ethylen je bezbarvý nasládlý plyn s mírným narkotickým účinkem. Je velmi reaktivní a bod varu se pohybuje kolem $-100\text{ }^\circ\text{C}$. Polyethylen je pak tuhá tenkovrstvá látka, ohebná a plastická a skoro průhledná látka, s voskovitým charakterem na dotek. Za normálních teplot odolává i silným kyselinám.

Polymerace ethylenu vyžaduje účinné katalyzátory. Při této polymeraci se pracuje s vysokými tlaky 50–300 MPa, při teplotě kolem $300\text{ }^\circ\text{C}$, granule polyethylenu jsou na obr.2. Polyethylen rozlišujeme na dva základní druhy: LDPE – polyethylen s nízkou hustotou a HDPE – polyethylen s vysokou hustotou. HDPE má vysoký stupeň krystality, proto má vysokou chemickou odolnost i proti rozpouštědlům. Podmínkou vysokého stupně krystality je linearita a stereoregularita řetězců, čehož se dosahuje při polyinzerci. Při výrobě LDPE se pracuje právě s velmi vysokými tlaky, jak bylo zmíněno výše, konkrétně radikálovou polymerací. Dnes se

využívají dva způsoby výroby LDPE, první je polymerace v trubkových reaktorech, druhý pak polymerace v autoklávech. Napříč tomu se při výrobě HDPE vyrábí třemi způsoby – roztokový, suspenzní a plynná fáze.

Suspenzní je byt' nejstarší postup, dodnes velice hojně užívaný. Podmínky suspenzní fáze jsou teplota v rozmezí 85-110 °C, tlak 2-3 MPa. Roztokový způsob má teplotu v rozmezí 140 až 300 °C, tlak pak 3 až 20 MPa, u plynné fáze je teplota 90 až 100 °C, tlak 1 až 2 MPa. Využívaný proces se dále dělí dle použitého katalytického systému. Používány jsou například katalyzátory Kaminského typu, výsledkem je produkt s unikátními vlastnostmi. Použit lze také katalyzátory založené na CrO₃ s alumosilikátovým nosičem s polyinsertní reakcí. Další možnost je katalyzátor na bázi částečně redukovaného MoO₃ na Al₂O₃ s aktivací sodíkem. Nejběžněji se však používají Zieglerovi katalyzátory, které vzniknou reakcí sloučenin přechodných kovů s organokovovými sloučeninami. U suspenzního principu výroby HDPE jde o srážecí polymeraci ethenu v prostředí uhlovodíkového rozpouštědla při teplotách, ve který je polymer v rozpouštědle nerozpustný. V takovém případě musí být teplota polymerace nižší, než je teplota tání samotného polymeru. Další možností ovlivnit polymerační podmínky je zvolený druh rozpouštědla, u nižších uhlovodíků je možno dosáhnout vyšších tlaků, protože mají nižší bod varu a jsou špatnými rozpouštědly. Suspenzní postupy tedy rozlišujeme dle použitého rozpouštědla a bodu varu. [6,7]

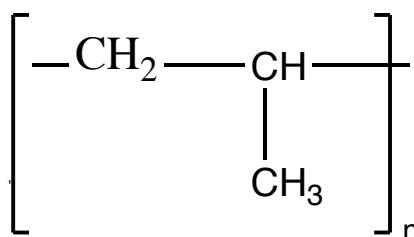


Obrázek 2 Granule Polyethylenu [21]

2.2. Polypropylen (PP)

Polypropylen je termoplastický polymer ze skupiny polyolefinů, jeho chemický vzorec je na obr. 3. Získává se polymerací monomeru propylenu. Má podobné fyzikálně-chemické vlastnosti jako polyethylen. Je křehký při nízkých teplotách, kolem 140 až 150 °C měkne a při 160 až 170 °C se začíná tavit. Stupeň krystalinity je u něj mezi 65 až 75 % a je neprůhledný. Hustota polypropylenu je cca 0,9 g·cm⁻³. Vyniká odolností vůči olejům, organickým rozpouštědlům a alkoholům, dobře se rozpouští v xylenech či tetrahydronaftalenu. Podobně jako polyethylen má i polypropylen prakticky nepolární strukturu, a proto má výborné elektroizolační vlastnosti ve velmi široké škále frekvencí. Od lineárního polyetyleny se liší nižší hustotou, menší odolností vůči mrazu, oxidaci a povětrnosti, ale větší pevností, tvrdostí a odolností proti abrazivnímu opotřebení. Napříc tomu je polypropylen ve srovnání s polyetylenem méně prostupný pro plyny. Má větší odolnost proti chemikáliím než polyethylen, zejména při vyšších teplotách. Polypropylenovou strukturu, která je krystalická, je možné velmi znatelně změnit různými podmínkami při zpracování. Vysokou transparentnost a tenkostěnné výrobky (fólie) je možné vytvořit prudkým ochlazením taveniny. Rychlým ochlazením pak je možné vytvořit sférolity s malým průměrem, kde rozdíl indexu lomu u krystalické a amorfni fáze je velmi malý. Pokud pak sférolitům přibývá průměr, stoupá

sice tuhost, ale na úkor rázové houževnatosti. Pokud je třeba dosáhnout zvýšení houževnatosti, flexibility a transparence, je nutné snížit krystalinitu, příkladem mohou být kopolymery. Velké zastoupení využití polypropylenu je při výrobě textilních vláken. Polypropylenová vlákna jsou velmi pružná a dokáží absorbovat deformační energii bez újmy, jejich mechanické vlastnosti jsou porovnatelné s polyamidovými vlákny. Rovněž odolávají zásaditým a kyselým látkám. Na druhou stranu je horší možnost barvitosti díky jejich nepolární struktuře, zvýšení afinity polypropylenu k barvivům procesem kopolymerace byly prozatím neúspěšné. Polypropylen se zvláknuje z taveniny, takto zvlákněný polymer má schopnost prodloužení až o úctyhodných 400 až 800 %, poté dochází ke stabilizaci (příkladem může být zahřívání na 100 °C). Používá se často pro výrobu provazů a lan pro svou lehkost a schopnost plavat na hladině. [3,6,8]



Obrázek 3 Chemický vzorec polypropylenu [3]

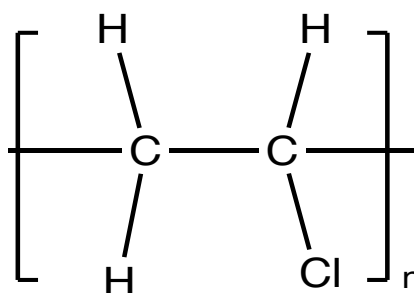
2.3. Polyvinylchlorid (PVC)

Základem pro výrobu PVC je vinylchlorid, chemický vzorec PVC je na obr. 4, což je monomer vinylchlorid (VCM) – těkavý, jemně nasládlý plyn, který vzniká rozkladem 1,2-dichlorethanu, dříve z acetylenu a HCl. PVC není rozpustný ve vodě, olejích ani v koncentrovaných anorganických kyselinách či zásadách. Polymerací VCM do částečně se rozvětvlujících řetězců vytváří bílý prášek nebo granulát. Vinylchlorid polymeruje však snadno za různých podmínek, tzn. radikálovým a aniontovým mechanismem. Rychlost přenosu na monomer je zde mnohonásobně větší oproti rychlosti terminace, polymerační stupeň je proto v podstatě nezávislý na koncentraci iniciátoru. Z tohoto důvodu se stupeň polymerace ovládá polymerační teplotou nebo přidavkem přenašeče. Dnes se používá pro výrobu polyvinylchloridu zejména suspenzní proces. Vlastnosti samotného polymeru se zlepšují dle cílového použití pomocí přimíšení různých přísad, zejména plniva (křída), stabilizátory pro zlepšení tepelné stability a odolnosti proti UV a tepelnému záření, změkčovadla zlepšující manipulaci a maziva. Snadná a tedy levná výroba spolu s výbornými vlastnostmi přispěla ke značnému rozšíření

polyvinylchloridu.

Problém

u polyvinylchloridu, kterým je třeba se zabývat je stabilizace na světle a působení tepla. Polyvinylchlorid se zpracovává okolo 180 °C, což je teplota blízká se teplotě jeho rozkladu a světelnou stabilizaci je třeba zkoumat z důvodu, že výrobky z PVC jsou běžně vystaveny UV záření obsažené ve slunečním světle. PVC rovněž dobře odolává ohni, neboť je málo hořlavý.[6]



Obrázek 4 Chemický vzorec PVC [22]

3. Degradace

Při dlouhodobém vystavení vnějším vlivům, mohou polymery změnit své vlastnosti, kde dochází k jejich stárnutí, tzv. atmosférické korozi. Změny se projevují např. ztrátou lesku, či pouhou změnou barvy, povrchovými trhlinami a ztrátou průhlednosti, tyto změny mohou být doprovázeny zhoršením mechanických vlastností. Nejzásadnější vlivy ovlivňující polymery jsou především světlo (UV záření), kyslík, ozón, voda, teplota. [9]

3.1. Vliv světelného UV záření

Ultrafialová (UV) složka slunečního záření má na polymery největší vliv. Kombinace UV záření, vlhkosti a jiných ovlivňujících degradačních faktorů způsobuje u náchylných materiálů křehnutí, praskání, změnu barevnosti a jiné další poškození. Obsah ultrafialové složky slunečního záření s vlnovou délkou mezi 295 až 400 nm je pouze zhruba ~7 % celkové energie dopadajícího slunečního záření, největší vliv na degradaci polymerních materiálů má právě ona. Narušuje vazby mezi atomy v řetězci a makromolekula se rozpadá na menší části. Záření o nižší vlnové délce má vyšší energii, proto k rozštěpení stabilnějších a silnějších vazeb jako jsou vazby O-H nebo C-H je potřeba právě záření o nižší vlnové délce, na rozdíl od vazeb C-N, N-H nebo C-C. Pro vyvolání děje mezi polymerem a zářením je však nutné, aby látka záření absorbovala. Jak moc dokáže každý polymer absorbovat určitý rozsah vlnových délek je dáno

základním chemickým složením každého polymeru, dále také na přítomnosti znečišťujících látek a stabilizátorů. Další reakcí je pak fotooxidace. Oxidační reakce začínající na povrchu se dostávají do stále větší hloubky a tím nastávají změny v chemické struktuře polymeru, díky tomu se polymer stává křehčím a méně elastickým. Rovněž mechanické a tepelné zatěžování má za následek vznik trhlin, které vyústí v zničení polymeru. Polymery je možné chránit proti UV záření například sazemí. Ty dokáží ochránit polymer částicami uhlíku a vytvořená vrstva nepropustí UV záření. [9,10]

Velikost změny mechanických vlastností a úbytku hmotnosti se odvíjí od dopadlé sluneční energie, nikoliv však na dobu působení záření. Protože je sluneční záření během roku nerovnoměrně rozdělené, jsou změny v našich zeměpisných šířkách v teplém pololetí, tj. od dubna do září, třikrát tak velké než ve studeném pololetí. V období dubna až září u nás dopadá cca 75 % veškeré sluneční energie, z tohoto důvodu se pro znázornění změn povlaku polymerů využívá energetická stupnice slunečního záření místo časové. Absorbuje-li makromolekula kvantum světelného záření o vlnové délce, např. právě 300nm, vzroste její energie asi o 400 kJ, to postačuje ke štěpení volných vazeb na radikály a vyvolání další řetězové reakce. [6]

3.2. Vliv teploty na degradaci

Účinek zvýšené teploty se může u polymerů projevit dvojnásobným způsobem, v prvním případě polymer měkne, popřípadě se přijatým teplem zvýší kinetická energie makromolekulárního řetězce do takové míry, že překoná přitažlivé síly a polymer se začne projevovat jako kapalina. V druhém případě dochází ke strukturálním změnám polymeru. Některé makromolekulární látky se štěpí na nízkomolekulární produkty, eventuálně až na monomer, aniž se změní jejich chemické složení – depolymerují. Jiné odštěpují nízkomolekulární zplodiny, přičemž dochází ke změně chemického složení – destrukují. Destrukce se může projevit, zejména v závěrečné fázi procesu, vznikem příčných vazeb mezi řetězci – takové polymery síťují. Ve všech případech mluvíme o degradaci polymeru. Mezní teploty dlouhodobé použitelnosti vybraných polymerů: Polyethylen = 75 °C, Polypropylen = 100 °C, Polyvinylchlorid = 60 °C. [6] Teplota má tedy významný vliv na rychlost chemických reakcí včetně oxidace a hydrolýzy, které jsou faktory povětrnosti. Zvýšení teploty o 10 °C způsobuje, že příslušná reakce probíhá asi dvakrát rychleji. Sluneční záření, obsahující asi 50 % IR-záření, zvyšuje povrchovou teplotu, což přispívá k destrukci polymeru. Teplota vystaveného materiálu a teplota okolního vzduchu jsou proto důležitými faktory při degradaci. Účinná teplota vystaveného materiálu závisí na intenzitě

slunečního záření, okolní teplotě, větru, tepelné vodivosti materiálu, absorpci a reflexi záření. Tyto teploty samy nedostačují k termické degradaci, ale zvyšují rychlost oxidačních a sekundárních fotochemických procesů i hydrolýzy. Kolísání teplot, které může být značné i v průběhu dne, vyvolává rozměrové změny, které mohou být příčinou vnitřního pnutí až vzniku trhlinek v materiálu. Střídání teplot může také způsobit změnu krystalinity polymeru, a tak změnit průběh stárnutí a difúze kyslíku a ozonu do polymeru. Při zvýšené teplotě dochází také k migraci změkčovadel, stabilizátoru nebo jiných přísad z polymeru, což může urychlit atmosférické stárnutí. [6]

3.3. Vliv kyslíku na degradaci

Za běžných teplot je struktura většiny polymerů při působení molekulárního kyslíku bez záměrné katalýzy (tzv. autooxidaci) dosti stálá. Pozornost je tedy třeba upřít tvorbě radikálů reagujících s kyslíkem velmi rychle. Takové radikály mohou vzniknout termolýzou, fotolýzou, radiolýzou i mechanickou silou. Autooxidace má pak nejčastěji charakter radikálové řetězové reakce s vyznačenou autoakcelerací. Iniciační stádium, během kterého vznikají z makromolekul radikály díky dodané energii se navazují následné reakce a vznikají hydroperoxydy. Kyslíkové vzdušné oxidaci nejlépe odolávají polymery s nasyceným nerozvětveným řetězcem. Jak se zvyšuje stupeň rozvětvení od polyethylenu přes kopolymer a polypropylen dále, zvyšuje se oxidovatelnost. Za běžných teplot je oxidace velice pomalá, avšak i malý rozsah vyvolá prudký pokles molekulové hmotnosti, se kterou se změní vlastnosti. Například tomu bylo vyzkoumáno, že polyolefiny neoxidují v celé hmotě rovnoměrně, ale dochází k ní pouze v amorfní části, kterou kyslík lépe prostoupí. Náchylnost k oxidaci je ovlivněna i formou, především poměrem k povrchu objemu. Z tohoto důvodu jsou vlákna, fólie a nátěrové filmy výrazně náchylnější než kompaktní polymer v bloku. Oxidaci polyolefinu ovlivňuje zejména světlo a teplo. Urychlení oxidace je připisováno vzniku malého množství karbonylových skupin, které silně absorbují UV-záření. [6]

3.4. Vliv ozonu na degradaci

Ozon se přirozeně vyskytuje v atmosféře, kde se vytváří v horních vrstvách rozkladem kyslíku zářením o vlnových délkách 110 až 220 nm a difúzí se pak dostává do spodních vrstev. Ve vrstvách blízko povrchu se obsah ozonu pohybuje max. do 1 %. Přesto takto malá koncentrace způsobuje degradaci polymerů, především pryží z nenasyceného kaučuku.

Reaguje ihned na povrchu, vytvoří tenkou vrstvu, která používáním praská. Praskliny vznikají v kolmých směrech proti deformační síle. Pokud je makromolekulární řetězec zcela nenasycený, je reakce s ozonem největší. [11]

3.5. Vliv vody na degradaci

Vliv vody je jedním z největších faktorů způsobujících odbourání polymeru. Vymývá veškeré rozpustné katalyzátory včetně produktů odbourávání, které by mohly katalyzovat další ničení. Rovněž ale vymývá antioxidanty a světelné stabilizátory. V případě, že voda vnikne do polymeru, může působit jako změkčovadlo, nabobtnat či zcela zničit některé polymery. Na vodu jsou náchylné polymery, které obsahují hydrolyzovatelné esterové, amidové a nitrilové skupiny v hlavním řetězci, protože dochází k významnému snížení molekulových hmotností a tím klesá pevnost. Voda rovněž přispívá k růstu mikroorganismů, které poškozují polymery. U navlhavých polymerů může způsobovat hydrolýzu (zejména za vysoké teploty, případně v přítomnosti kyselin či zásad). Voda způsobuje změnu rozměrů a většiny fyzikálních vlastností. [6,9]

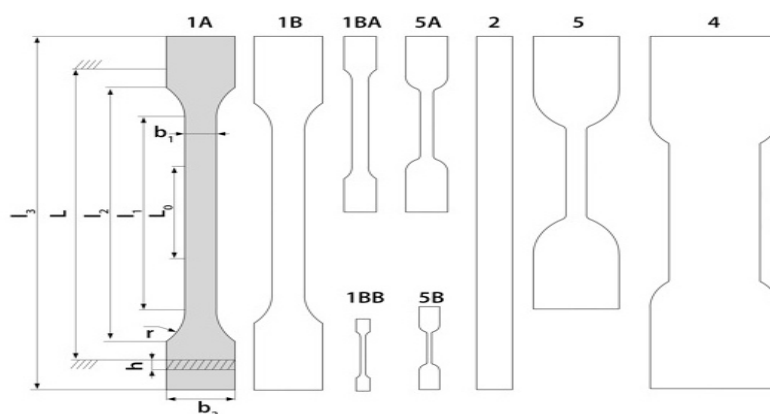
4. Testování polymerů

4.1. Testování mechanických vlastností polymerů

Testování mechanických vlastností polymerů po provedených degračních zkouškách jsou vhodné pro komplexní zjištění vlastností daných materiálů. Popis základních typů zkoušek tahové a tlakové je uveden níže. Zkoušek pevnosti materiálu je několik druhů v tahu / tlaku, ohyb / krut a stříh. Pružnost pak pomocí modulu a meze pružnosti a elastické napjatosti. Pokud materiál zachová změněný tvar vyvolaný účinkem vnějších sil trvale, hovoříme o plasticitě. Houževnatost pak schopnost odolání vlivům vnějších sil bez porušení. [2]

4.1.1. Tahová zkouška

Průběh zkoušky se řídí normou ČSN EN ISO 527-1 až 2. Pomocí této zkoušky se zjišťují krátkodobé mechanické vlastnosti polymerních materiálů. Během zkoušky je těleso natahováno ve směru podélné osy při konstantním posuvu čelistí jdoucích proti sobě do doby, než se testovaný vzorek přetrhne. Nenávratná deformace, přetrhnutí, se zaznamená pomocí deformační křivky. Při této zkoušce je hlavní parametr modul pružnosti v tahu, jež je pak materiálovou konstantou. Zaznamenává se tedy závislost síly, která působí na obou koncích vzorku od sebe. Tvary zkušebních těles jsou zpravidla definované příslušnou normou pro konkrétní materiál, viz. Obr 6. [2,12]



Obrázek 5 Tvar testovacích běžně užívaných vzorků [12]

Z výsledků měření poté můžeme vypočítat smluvní napětí, poměrné prodloužení, resp. jmenovité poměrné prodloužení za pomoci rovnic:

$$(1) \varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0} \cdot 100 [\%] \quad (2) \sigma = \frac{F}{S_0} [MPa] \quad (3) \varepsilon_t = \frac{L_t}{L} \cdot 100 [\%]$$

L_t = upínací vzdálenost na konci měření [mm]

F = velikost působící síly [N]

ΔL_0 = délka zkušební vzorku na začátku měření [mm]

L_0 = délka na konci [mm]

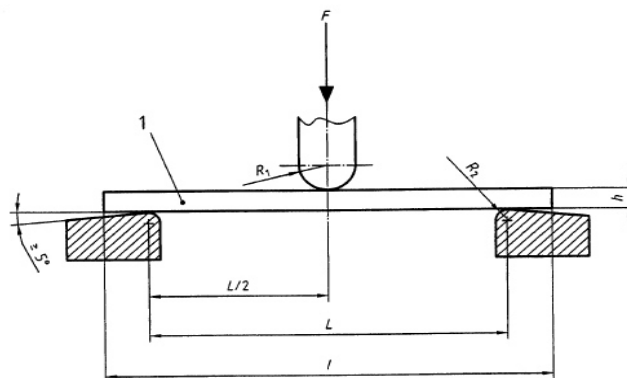
L = vzdálenost upnutí mezi čelistmi [mm]

S_0 = průřez na počátku [mm²]

Polymery mají při běžné teplotě okolí okolo 23 °C mez pevnosti mezi 15 až 100 MPa, elastomery pak mají pevnost okolo 7 až 30 MPa. [12]

4.1.2. Ohybová zkouška

Norma ČSN EN ISO 178 uvádí metodu pro stanovení ohybových vlastností plastů při definovaných podmínkách. Použití pro stanovení chování těles při namáhání ohybem a stanovení pevnosti v ohybu, modulu pružnosti a další vlastnosti. Podstata zkoušky tkví v zatěžování zkušební tělesa volně podepřeného dvěma podpěrami přitlačným trnem ve středu jejich délky, viz obr 6, tzv. tříbodový ohyb. Zkušební vzorek je namáhán na ohyb do doby zlomu na vnějším povrchu nebo dokud se nedosáhne maximální hodnoty 5 %, záleží na tom, která z možností nastane dříve. Vždy je nutné zkoušet nejméně 5 kusů těles. [13]



Legenda

1 zkušební těleso

h tloušťka zkušební tělesa

F použitá síla

l délka zkušební tělesa

R_1 poloměr zatěžovacího trnu

L rozpětí mezi podpěrami

R_2 poloměr podpěr

Obrázek 6 Poloha zkušební tělesa na začátku zkoušky ohybem [13]

4.2. Metody chemického testování dle vybraných norem

4.2.1. Metoda umělého stárnutí včetně rozkladu kyselinami

Dle normy ČSN EN ISO 29664:2017, jsou dvě metody testování vzorků. V principu jde o kombinaci UV záření, tepla, vlhkosti, namáčení a okyselení prostředí. Obě metody jsou založeny na fyzikálně-chemické degradaci a podmínek vyskytujících se v těžce znečištěném prostředí. První z metod testování se provádí aplikováním velmi kyselého prostředí jednou za den, druhá možnost je vystavení slabě kyselému prostředí tvořené při dešťové fázi testu. Pozice vzorku není rozhodující. Testovací komora společně s vybavením uvnitř musí být z materiálu odolným kyselému prostředí a UV záření.

Uměle vytvořené kyselé prostředí o kyselosti pH 1,5 při 25 ± 2 °C, přidáním 10,6 g H₂SO₄, 3,18 g HNO₃ a 1,8 g HCl do 10 litrů demineralizované nebo destilované vody, z toho vznikne poměr 1,0:0,3:0,17. Cyklus testu je patrný z obr. 7. Použití UV lampy je možné dle ISO 4892-3 typ 1A. Ozáření $0,76 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1}$ při 340 nm nebo $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ od 290 až 400 nm propustnosti. Testovací komora nemá přesně stanovený tvar, ale musí být z inertních materiálů a podléhat normám ISO 4892 1 až 3 dle použitého zdroje. Zařízení pro zajištění relativní vlhkosti vzduchu musí být schopno zajistit, aby kyselost prostředí komory byla mezi (5 až 70) %. Zařízení pro vodní mlhu musí být z korozivzdorného materiálu a současně nesmí kontaminovat vodu ani kyselé prostředí. V případě použití recyklace vody, měl by být cirkulovaný objem nejméně 50 litrů a zároveň by voda měla být pravidelně měněná po 168 h, nebo po dosažení pH = 4,5. Testovací vzorek by měl mít nejméně 30 cm². Testovací cyklus spočívá v nanesení kyselé mlhy na povrch plastu a nanáší se 5 dní v týdnu, následující 2 dny bez aplikace mlhy. [14]

Testovací podmínky pro 24h cyklus, pH 1,5

Krok		Trvání	UV lampa, parametry záření
1	Nástřik	< 5 min	
2a	První sušení	9 h	$T = 35\text{ °C}$ $U = 75\% \text{ RH}$ $E = 45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ or $E_{\lambda} = 0,76 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{nm}^{-1}$
2b	Pokračování prvního sušení	5 h	$T = 60\text{ °C}$ $U = 40\% \text{ RH}$ $E = 45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ or $E_{\lambda} = 0,76 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{nm}^{-1}$
3	Simulace deště	4 h	Stálý oplach vzorku demineralizovanou vodou Teplota vzduchu v komoře 35°C
4	Druhé sušení	6 h	$T = 60\text{ °C}$ $U = 40\% \text{ RH}$ $E = 45 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ or $E_{\lambda} = 0,76 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\text{nm}^{-1}$
<p>T Teplota v komoře</p> <p>BST black standard temperature, as defined in ISO 4892-1</p> <p>U Relativní vlhkost prostředí</p> <p>E UV záření v mezích až 400nm</p> <p>E_{λ} UV záření 340nm</p>			

Obrázek 7 Cyklus [14]

4.2.2. Metoda zkoušení vystavení slunečnímu záření

Dle normy ČSN EN ISO 877-1:2011 může být vzorek vytaven přímému slunečnímu záření nebo sklem filtrovanému slunečnímu záření. Je doporučeno současné vystavení jiného materiálu se známým chováním v simulovaných podmínkách pro porovnání. Testovaný vzorek musí být umístěn a zachycen nebo podepřen v prostředí, které je z inertních materiálů vůči testovacímu vzorku, aby nedošlo k ovlivnění výsledků. Nerezové hliníkové slitiny, nerezová ocel nebo keramické materiály se jeví jako vhodné. [15]

4.2.3. Test cyklické koroze

Tato norma ČSN EN ISO 11997-1:2018 se zabývá korozními zkouškami v umělých atmosférách, přesněji zkouškou v solné mlze. Podstata zkoušky spočívá v cyklickém vystavení zkušební vzorku v režimech solná mlha, sušení a vlhkost. Kritéria hodnocení jsou pak stanovena podle individuálních potřeb.

Roztok pro zkoušku solnou mlhou má stanovenou čistotu vody minimálně druhého stupně dle normy ČSN ISO 3696 pro získání požadované koncentrace. Soli musí mít obsah těžkých kovů menší než 0,005 % (hmotnostní zlomek), tj. měď (Cu), nikl (Ni) a olovo (Pb). Obsah jodidu sodného nesmí přesáhnout 0,1 % (hmotnostní zlomek) a ani více než 0,5 % (hmotnostní zlomek) všech jiných příměsí dohromady v přepočtu na suchou sůl. Možným komplikacím změny pH v důsledku změny množství oxidu uhličitého v roztoku lze zabránit např. ohřátím roztoku před přivedením do přístroje nad 35 °C, nebo připravením roztoku z čerstvě převařené deionizované vody.

Před umístěním do zásobníku komory se roztok přefiltruje pro odstranění veškerých pevných částic. Velikost zkušebního zařízení (komory) by měla být větší než 0,4m³ pro zajištění vhodného proudění mlhy. Rovněž je potřeba zajistit, aby solná mlha dopadala přirozeně shora na zkušební vzorky a kondenzovaná pára nedopadala přímo na zkušební vzorky vhodnou konstrukcí komory. Zkušební vzorky je nutné použít dva a umístění zvolit tak, aby nebyly ve stejné výšce a v rohu komory.

Přívod sušícího vzduchu v rozmezí relativní vlhkosti 20 až 30 % pro cyklus A a D a 50 ± 20 % pro cykly B a C (cykly jsou uvedeny v příslušné normě ČSN EN ISO 11997-1:2018) musí být zbaven všech olejovitých nečistot, rovněž tak pevných nečistot projitím přes filtr. Po sušící fázi nesmí být na zkušebních vzorcích viditelné známky vlhkosti. Pro sušení nesmí být použito topných článků, které jsou součástí stěn komory. U většiny cyklů je koncentrace soli 50 ± 5 g/l a všechny čtyři cykly mají pH v rozmezí 6,5 až 7,2. Hodnota pH solného roztoku se přizpůsobí teplotě rozprášeného roztoku ve zkušební komoře tak, aby odpovídal teplotě 25 ± 2 °C. Kontrola pH se provede potenciometrickým měřením. Doba trvání cyklu A zkoušky se opakuje pro dovršení 30 cyklů (240 h), pokud není dohodnuto jinak. [16]

4.2.4. Testy v prostředí solné mlhy

Testování v prostředí solné mlhy dle normy ČSN EN ISO 9227:2017, ve které je specifikováno zařízení, použité chemikálie a prostředí třech typů solné mlhy.

1. Neutrální solná mlha (NSS)
2. Okyselená solná mlha (AASS)
3. Okyselená solná mlha s chloridem měďnatým (CASS)

Napříč tomu, v této normě nenalezneme specifikaci zkušební vzorku, jeho rozměry, interpretaci výsledků ani dobu expozice.

Zkoušky NSS v solné mlze se používají především pro odhalení nespojitostí čili pórů nebo jiných defektů a mají širokou škálu použití. Při použití této metody se v řízeném prostředí rozprašuje 5 % roztok chloridu sodného.

Zkoušky okyselenou solnou mlhou AASS a okyselenou solnou mlhou s chloridem měďnatým CASS lze dobře použít pro organické povlaky. Při použití metody AASS se v řízeném prostředí rozprašuje 5 % roztok chloridu sodného okyselený přidáním ledové kyseliny octové, v případě použití metody CASS se rovněž použije přidání ledové kyseliny octové. Prostředí a parametry komory se shodují s testem cyklické koroze, viz kapitola 4.2.3. [17]

4.2.5. Urychlené stárnutí a zkoušky tepelné odolnosti elastomerů

Zkoušky urychleného stárnutí a tepelné odolnosti dle normy ČSN ISO 188:2017 jsou určeny k odhadu poměrné odolnosti vůči poklesu fyzikálních vlastností v průběhu času. Při zkoušce tepelné odolnosti je pryž vystavena stejné teplotě, jaké bude při vystavení při provozu. V mezinárodní normě jsou popsány dva druhy zkoušek, první je nízká rychlost proudění vzduchu a druhá při nucené ventilaci s vysokou rychlostí proudění vzduchu. Podstata zkoušky při stárnutí v horkém vzduchu je, že vzorek je vystaven teplotě vyšší, než jaké bude odolávat v provozu, z důvodu zkrácení doby přirozeného stárnutí. Zkouška tepelné odolnosti spočívá ve vystavení vzorků stejné teplotě, jako bude v provozu. Zkušební zařízení musí mít takové rozměry, aby celkový objem těles nepřesáhl 10 % celkového objemu testovací komory. Vzdálenost mezi vzorky musí být minimálně 10 mm a současně nesmí být vzorky blíže než 50 mm od stěn. Teplota musí být udržena na stejné výši a teploměr umístěn co nejbližší vzorkům, pro zaznamenání skutečné teploty. Komora nesmí být z mědi a jejích slitin. Komora musí být vybavena zařízením umožňující úplnou výměnu vzduchu nejméně 3x a nejvíce 10x

za hodinu. Přiváděný vzduch musí být předeheřán na zkušební teplotu ještě před vstupem do komory. U sušárny s laminárním prouděním je rychlost průtoku vzduchu 0,5 až 1,5 m/s. [18]

4.2.6. Metody vystavení laboratorním zdrojům světla

Metody obsažené v normě ČSN EN ISO 4892 v části 3 specifikují podmínky vystavení těles UV záření ve zkušební komoře. Zkušební tělesa jsou za řízených podmínek vystavena UV záření, teplotě a vlhkosti. Doporučuje se, aby byl materiál o známých vlastnostech rovněž vystaven společně se vzorky pro porovnání. Fluorescenční UV lampy jsou lampy, u kterých je minimálně 80 % světelného vyzařovaného výkonu v oblasti UV, tedy pod 400 nm. Stáří zkušebních lamp přímo ovlivňuje testování. Pokud není vyžadán automatizovaný systém kontroly ozáření, je nutné se držet instrukcí výrobce pro dosažení požadovaného ozáření.

UVA – 340 (typ 1A) – tyto lampy mají vyzařovaný výkon pod 300 nm menší než 1 % z celkového světelného výkonu. Vyzařovací maximum mají při 343 nm. Vhodné pro simulaci globálního slunečního záření od (300 až 340) nm.

UVA – 351 (typ B) – tyto lampy mají vyzařovaný výkon pod 310 nm menší než 1 % z celkového světelného výkonu. Jejich vyzařovací maximum je při 353 nm a jsou běžné pro napodobení ultrafialové části denního světla procházející okenním sklem.

UVB – 313 (typ 2) – tyto lampy mají vyzařovaný výkon pod 300 nm větší než 10 % z celkového světelného výkonu a vyzařovací maximum při 313 nm. Tyto lampy mohou být použity pouze po dohodě zkoušejících a dohoda musí být uvedena ve zkušebním protokolu. [19]

5. Návrhy testování dle vybraných norem

Protože neexistuje konkrétní norma pro testovací komoru, která by specifikovala podmínky pro degradační test polymerního materiálu v solné mlze a UV záření, bylo třeba vybrat vhodné normy aplikovatelné na základě parametrů testovací VLM komory s dodatečně vloženým zdrojem UV světla tak, aby zároveň neovlivňoval proces degradace vzorků.

5.1. Tvar zkušební vzorku

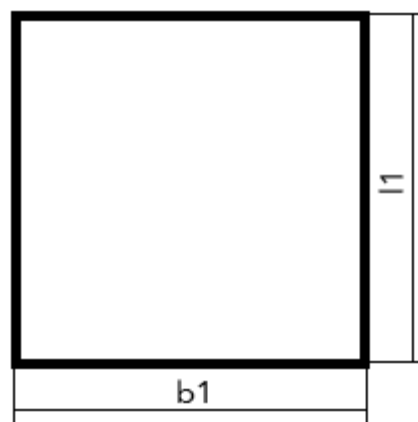
Norma ČSN EN ISO 20753 definuje několik typů zkušebních vzorků, z nichž se deska jeví jako nejvhodnější. Rozměry zkušební vzorku na obr. 8 tvaru desky (typ D) jsou v normě specifikovány následovně:

$$l_1 = 60 \pm 2 \text{ mm}$$

$$b_1 = 60 \pm 2 \text{ mm}$$

$$h_1 = 1,0 \pm 0,1 \text{ mm pro typ D1 a } 2,0 \pm 0,1 \text{ mm pro typ D2}$$

Referenční vzorek má vhodné rozměry 50 mm x 100 mm x 1 mm, použít nejméně 4 ks.



Obrázek 8 Testovací vzorek

5.2. Solná mlha

Solná mlha se rozděluje do tří typů dle normy ČSN EN ISO 9227:

- zkouška neutrální solnou mlhou (NSS), při které se v řízeném prostředí rozprašuje roztok 5 % chloridu sodného
- zkouška okyselenou solnou mlhou (AASS), při které se v řízeném prostředí rozprašuje roztok 5 % chloridu sodného okyselený přidáním ledové kyseliny octové
- zkouška okyselenou solnou mlhou s chloridem měďnatým (CASS), při které se v řízeném prostředí rozprašuje roztok 5 % chloridu sodného s přidáním chloridu měďnatého a ledové kyseliny octové

Použití typu solné mlhy pak je na dohodě s ohledem na testovaný vzorek a jeho budoucím výskytu v reálném prostředí.

5.2.1. Zkušební komora

Testovací komora musí mít objem alespoň 0,4 m³, aby bylo možné zajistit podmínky pro test s ohledem na vhodné rozmístění dostatečného počtu vzorků. Roztok nesmí stříkat na vzorky přímo, musí být zajištěno rozptýlení v komoře a přirozený dopad mlhy shora. Horní část komory musí být konstruována takovým způsobem, aby zkoušený roztok zachycený na stěně neztékal přímo na vzorky. Velikost a tvar komory musí být zajištěn tak, aby výsledná rychlost hromadění (viz. tab. 1) roztoku v komoře byla ve stanoveném rozmezí. Průměrná rychlost shromažďování roztoku ve sběrném zařízení je třeba měřit nejméně 24 h nepřetržitého rozprašování, doporučeno je denní kontrolování (v závislosti na délce testování).

Tabulka 1: Přehled podmínek			
Parametr zkušební metody	Neutrální solná mlha (NSS)	Okyselená solná mlha (AASS)	Okyselená solná mlha s chloridem měďnatým (CASS)
teplota	35 °C ± 2 °C		50 °C ± 2 °C
průměrná rychlost shromažďování mlhy z vodorovné sběrné plochy 80cm ²	1,5 ml/h ± 0,5 ml/h		
obsah chloridu sodného (v nashromážděném roztoku)	50 g/l ± 5 g/l		
pH (nashromážděného roztoku)	6,5 až 7,2	3,1 až 3,3	
Uvedené tolerance ± jsou vyjádřením provozní fluktuace, definované jako kladné či záporné odchylky hodnoty, na kterou je snímač nastaven za rovnovážných podmínek. Rozhodně to neznamená, že se hodnota mohla takto odlišovat.			

Teplota ve zkušební komoře se musí měřit minimálně 100 mm od stěn komory a zdrojů sálavého tepla. Vzduch přiváděný do trysek musí být přefiltrován a nesmí obsahovat stopy oleje ani jiných nečistot. Stlačený vzduch musí mít tlak rozprachu obvykle odpovídající přetlaku 70 až 170 kPa. Obvykle se používá tlak 98 ± 10 kPa, ale může být i jiný dle typu použité trysky a možnostech komory. Vzduch se musí před vstupem do komory zvlhčit, aby se zabránilo odpařování vody z rozprašených kapiček. Důležité je také zajistit ohřev vzduchu, aby při jeho vstupu do komory nebyla ovlivněna teplota v komoře.

Pokud byla komora použita pro zkoušku AASS, CASS nebo jiný účel, musí být před testem NSS důkladně vyčištěna. Vzorky se umístí tak, aby nebyly ve směru proudění mlhy

z rozprašovací trysky. Je velmi důležité dbát na umístění vzorku, to musí být lícovou stranou co nejvíce v úhlu 20 °. Doba trvání zkoušky se řídí buď stanovením specifikací na zkoušený materiál nebo dohodou zúčastněných stran. Doporučené doby expozice jsou 2 h, 6 h, 24 h, 48 h, 96 h, 168 h, 240 h, 480 h, 720 h a 1008 h. Otevírání komory a přerušení testu je třeba omezit na minimum. [17]

5.3. Umělé stárnutí + zkouška cyklické koroze

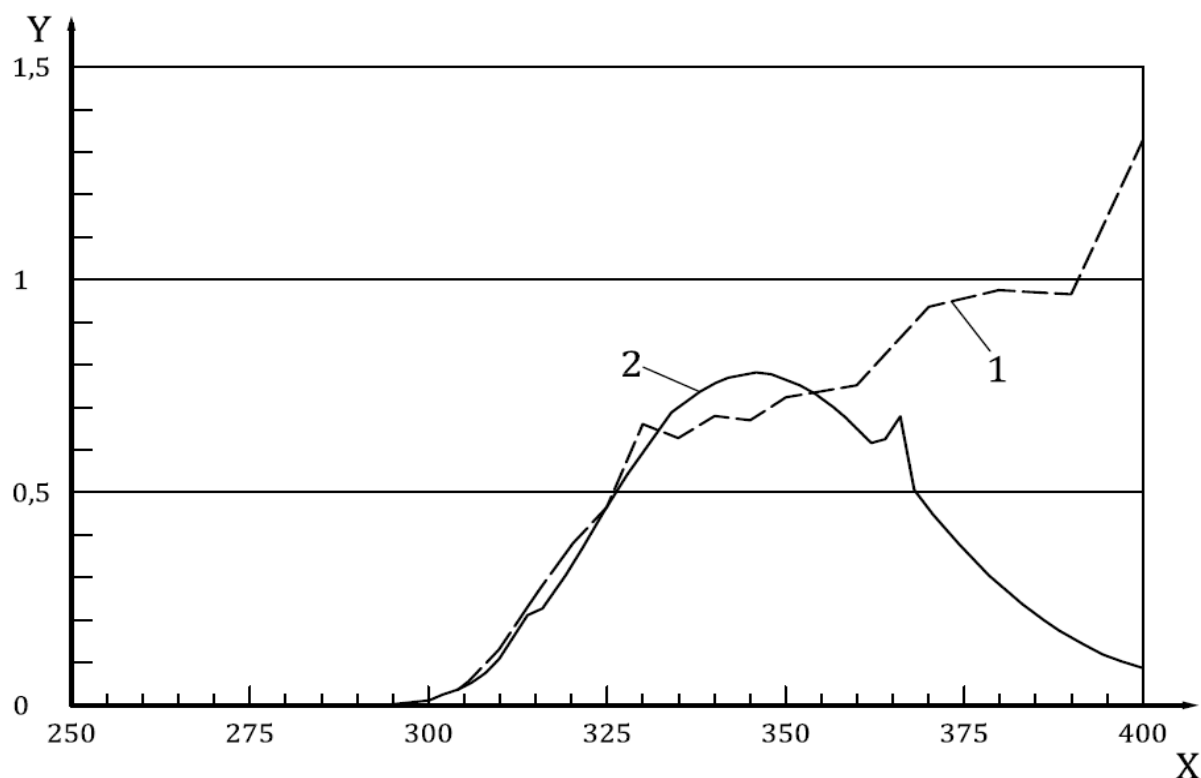
Norma ČSN EN ISO 11997 – 2 pojednává o stanovení odolnosti proti solné mlze, sušení, vlhkost a UV záření nátěrových hmot nanesených na leštěné oceli v cyklických podmínkách zkoušení. Zkušební vzorky z leštěné oceli dle ISO 1514, o rozměrech nejméně 150 x 70 x 0,3 mm. Na vzorek se nanese zkoušený materiál předepsanou metodou. Stanovení se provede třikrát, při každé zkoušce se exponuje nejméně jeden kontrolní vzorek o podobném složení o známé životnosti. Délka expozice v komoře pro umělé stárnutí je 168 h, poté se přemístí do komory pro cyklickou korozní zkoušku a exponují se 168 h. Pokud není popsáno jinak, cykly se opakují do celkového trvání zkoušky 1008 h. [26]

5.3.1. Podmínky pro umělé stárnutí

Komora pro umělé stárnutí odpovídající požadavkům dle ČSN EN ISO 16474-3, současně v souladu s ČSN EN ISO 16474-1. Požadavek na ozáření dle normy je xenonová lampa (ISO 16474-2) nebo fluorescenční UV lampa (ISO 16474-3). Do zařízení musí být možné umístit vzorky a snímací zařízení na místech, kde dojde k rovnoměrnému ozáření zdrojem světla. Velmi důležité je dbát na spektrální intenzitu záření. Ideální případ je záření velmi blízké slunečnímu svitu, především v oblasti krátkovlnného UV záření. Přímé záření xenonové lampy a některých fluorescenčních lamp obsahuje nezanedbatelný podíl krátkovlnného UV záření, které se však ve slunečním záření nevyskytuje a je nutné ho vhodným výběrem filtrů eliminovat. Fluorescenční zdroj záření se více hodí pro napodobení UV části světla, xenonové lampy s vhodným filtrem dobře kopírují průměrné sluneční záření v UV oblasti a viditelného světla. Zařízení pro expozici musí umožnit dosažení intenzity v kterémkoliv místě oblasti použité pro expozici vzorků nejméně 70 % maximální intenzity záření naměřené v této oblasti. Laboratorní zdroje světla viz kapitola 4.2.6. Pokud není uvedeno jinak, musí se k napodobení UV části denního světla použít fluorescenční UV lampy typu 1A (UVA -340) viz obr 9, nebo odpovídající kombinace fluorescenčních UV lamp. Teploty jsou uvedeny v tab. 2, platí že

s vyšší teplotou roste rychlost procesů. Po dohodě lze zvolit i jiné teploty, to musí být zapsáno v protokolu. [27]

Tabulka 2: Metoda A - umělé stárnutí					
Cyklus č.	Doba expozice	Typ lampy	Intenzita záření	Teplota černého panelu	Relativní vlhkost vzduchu
				°C	%
1	4 h sucho	UVA-340	$0,83 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ při 340 nm	60 ± 3	není regulována
	4 h kondenzace		UV vypnuto	50 ± 3	
2	5 h sucho	UVA-340	$0,83 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ při 340 nm	50 ± 3	
	1 h postřik vodou		UV vypnuto	25 ± 3	
Metoda B: denní světlo procházející okenním sklem					
3	24 h sucho (bez vlhkosti)	UVA-351	$0,76 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$ při 340 nm	50 ± 3	není regulována



Obrázek 9 Spektrální složení záření typické lampy typu 1A (UVA-340) v porovnání s denním světlem

Legenda: 1 = Denní světlo 2 = spektrální složení záření typické lampy typu 1A (UVA-340)

X = vlnová délka λ (nm) Y = spektrální intenzita záření E_{λ} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$) [27]

5.3.2. Podmínky pro cyklické korozní zkoušky

Komora pro test cyklické korozní zkoušky odpovídající požadavkům dle ISO 11997-1, tedy komora musí být vzdorná korozi způsobenou testovaným vzorkem a horní stěnou provedenou tak, aby se zabránilo odkapávání zkondenzované vlhkosti na zkušební vzorky. Velikost a tvar komory musí být vhodné pro odpovídající rychlost 1 až 2 ml/h hromadění roztoku při 25 ± 2 °C a pH 6,5 až 7,2. Cyklus zkoušky je popsán v tab. 3.

Zdroj UV záření UVA-340 je po úpravách možné použít z komor QUV. Společnost Q-Lab taková zařízení prodává a dodává i náhradní součástky a příslušenství. Vybírat lze z variant standardní nebo s životností 8000 h při vyzářovacím výkonu $1,55 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}$. Pro test je vhodný výkon $0,89 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}$. [23]

Tabulka 3: Parametry zkoušky pro cyklus B				
Fáze	Doba h	Teplota °C	Podmínky	Poznámky
1	24	35±2	Solná mlha	-
2	8	40±2	RH 100%	Kondenzace vody na zkušebních vzorcích
3	16	23±2	RH (50±20)%	-
4	8	40±2	RH 100%	kondenzace vody na zkušebních vzorcích
5	16	23±2	RH (50±20)%	-
6	8	40±2	RH 100%	kondenzace vody na zkušebních vzorcích
7	16	23±2	RH (50±20)%	-
8	8	40±2	RH 100%	kondenzace vody na zkušebních vzorcích
9	16	23±2	RH (50±20)%	-
10	48	23±2	RH (50±20)%	-
11	Zpět na bod 1.		Celková doba trvání cyklu od fáze 1 po fázi 10 je 7 dní	
Nastavené odchylky a hodnoty zaznamenat. Nastavená hodnota je cílová pro snímač použitý ke kontrole. Provozní odchylky kontrolovat na kalibrovaném snímači. Při provozní kontrole nesmí odchylka přesáhnout uvedenou hodnotu.				

5.4. Zrychlené stárnutí vlivem teploty

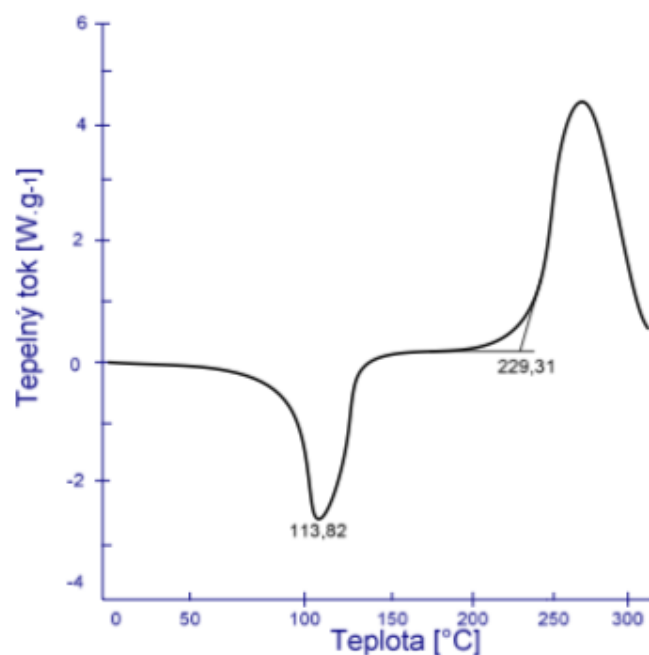
Norma ISO 2578 stanovuje postup pro měření tepelné stability pomocí Arrheniova zákona. Obecně je doba testování 20 000 h, v závislosti na dohodě může být zvolena kratší nebo delší doba.

$$t_1 = t_2 \cdot e^{\frac{E_a \cdot (T_2 - T_1)}{R \cdot T_1 \cdot T_2}}$$

kde t_1 [s⁻¹] je doba zrychleného stárnutí, t_2 [s⁻¹] je doba plánované životnosti, E_a [kJ·mol⁻¹] je aktivační energie, $R=8,314$ J·K⁻¹·mol⁻¹ je univerzální plynová konstanta, T_1 [K] je teplota při zrychleném stárnutí, T_2 [K] je provozní teplota prostředí.

Aplikací tohoto vztahu předpokládáme, že krátkodobá simulace tepelného stárnutí při vyšší teplotě, má stejný vliv na degradaci jako dlouhodobé působení při nižší teplotě. Pro vyšší přesnost výsledků testu by se neměla výrazně lišit teplota při zrychleném stárnutí od provozní teploty, dle norem je doporučený rozdíl 25 °C. V praxi se volí teplotní rozdíl vyšší pro rychlejší získání výsledků. Nejvyšší použitelná teplota je omezena chemickou stabilitou materiálu (to je rozmezí teplot, kdy nedochází ke změnám v materiálu a oblast končí teplotou tavení). Termodynamické změny lze zjistit pomocí diferenční skenovací kalorimetrie (DSC), z té poté lze určit teplotu zrychleného stárnutí.

Pokud by se nastavila teplota zrychleného stárnutí příliš vysoká, mohlo by dojít k heterogennímu stárnutí. V takovém případě může dojít k odpařování přísad, především změkčovadel. S vysokou teplotou může nastat také difúzně omezená oxidace. To znamená, že spotřeba kyslíku v materiálu je větší než množství, které se k materiálu dostává v místech testování. Tento jev byl zjištěn u řady polymerů při teplotě vyšší než 80 °C. Volba teploty zrychleného stárnutí musí být nižší než teplota tání, než se začne zobrazovat prudký pokles křivky viz obr 10. [24,25]



Obrázek 10 Výstupní křivka z DSC charakterizující závislost teplotního toku na teplotě materiálu [24]

6. VLM Komora ClimaCORR CC 1000 - TL FR

Zkušební komora VLM viz obr. 11 pro cyklické korozní zkoušky dle různých mezinárodně stanovených norem používaných především v automobilovém průmyslu. Díky komoře je možné otestovat výrobky kovové, či polymerní v urychlených podmínkách simulovaných dle potřeb, pro stanovení vlastností, životností a kontrolu kvality materiálů s předpokládaným vystavením určitým podmínkám v praxi. Jednou z nejrozšířenějších zkoušek je zkouška korozní odolnosti v solné mlze (NSS – dle ISO 9227), ve které jsou testované vzorky vystaveny mlze 5 hm.% neutrálního chloridu sodného při teplotě 35 °C. Možnost je vytvořit mlhu z roztoku chloridu sodného okyseleného kyselinou octovou, nebo též okyselenou solnou mlhu s přídavkem chloridu měďnatého (CASS). Zkouška v solné mlze a rovněž její další variace jsou vystaveny kritice pro nereálně simulované podmínky vedoucí k nepřesným výsledkům. Z tohoto důvodu se více uplatňují tzv. cyklické korozní zkoušky, při kterých se střídají různé fáze solné mlhy, sušení, vlhčení a dále je také možné přidat fáze s rychlými změnami teplot od desítek stupňů mrazu po teploty přes 80 °C a rovněž je také možnost vystavit testovací vzorek UV záření. Takové zkoušky mnohem lépe odpovídají reálným podmínkám, ve kterých se testovaný materiál bude vyskytovat a poskytují tak lepší předpověď chování materiálu. Parametry. Klimatické komory ClimaCORR viz tab. 4 a 5. [5,20]

6.1. Parametry testovací komory VLM

Tabulka 4 Klimatická komora ClimaCORR 1000	
Objem	ca. 1000 L
Rozměry vnitřní testovacího prostoru	1400x800x790/1060 mm
Vnější rozměry komory	2160x960x1237 mm
Příkon	400 V, 50 / 60 Hz, 5700W, 16A
Použité materiály	Nerezová ocel s povlakem ECTFE (Halar), přídatné boční stěny ze speciálního Polyethylenu s otvory pro nosné tyče
Výhřev	Ploché Micantové topná tělesa pod dnem a za stěnami pro rychlé a komplexní vytápění
Čidla	Korozivzdorné a velmi citlivé teplotní senzory nad podlahou, ve stěnách a stropě komory
	Přenosný snímač teploty v prostoru vzorků
	Senzor vlhkosti
Chlazení	Oplach stěn pro rychlé ochlazení komory a rychlé přizpůsobení podmínkám
Regulace vlhkosti	Regulace od pokojové až do 95% vlhkosti

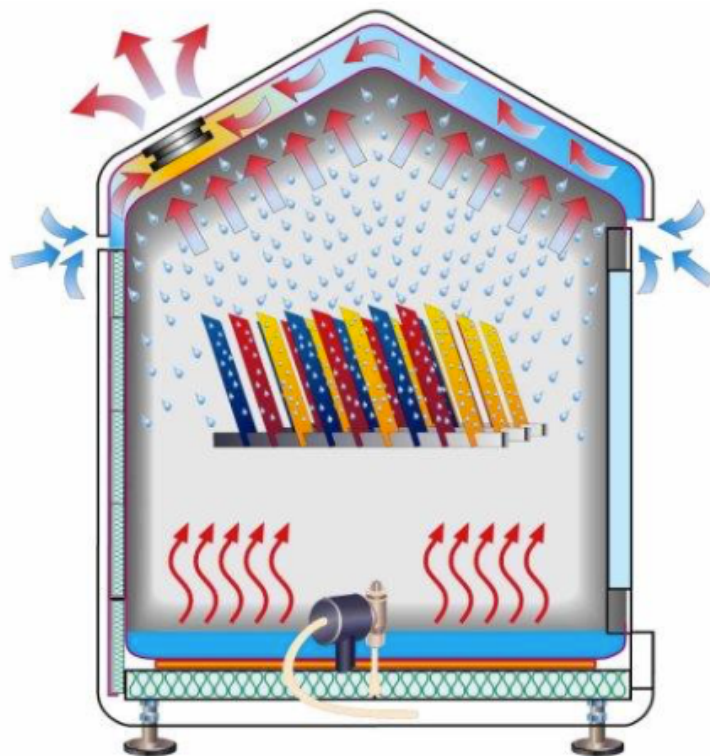
[20]



Obrázek 11 Testovací VLM komora [20]

Tabulka 5: Další specifikace	
Čistota demineralizované vody	< 20 $\mu\text{S} / \text{cm}$
Vodovodní přípojka	Vždy přes Ion-měníčový zásobník 3/4"
Stlačený vzduch	6-8 bar (velikost trysky 5)
Odpadní voda, výpust	Připojení spirální hadice 32 mm
Zásobník na testovací roztok	210 litrů
Doporučené příslušenství	Výrobník demineralizované vody, filtr stlačeného vzduchu, pumpa pro míchání roztoku, držáky vzorků

Další možnou zkouškou je zkouška stále kontrolované – udržované vlhkosti. U teplot pod 50 °C se teplota dosahuje vstříkáváním stlačeného vlhkého vzduchu vstříkovací tryskou, u teplot nad 50 °C se teplot dosahuje parním generátorem pomocí přesného množství páry vstříkovačem. Vlhkost prostředí může být až 98 % při 35 °C. Pro testy s vlhkostí pod 50 % je vyžadován přídatný chladicí modul. Rovněž mohou být simulovány podmínky vysoké vlhkosti s kontrolovanou kondenzací vody viz obr 12, kdy je teplota stabilně udržována s výchylnou 0,5 °C a kontrolovanými otáčkami větráku při sušící fázi. [20]



Obrázek 12 Patentovaný řízený vodní kondenzační systém komory VLM [20]

Schválené testy dle norem, které komora zvládne:

Cyklické klimatické testy:

- DIN EN ISO 11997-1: 2006 cyklus B (dříve VDA 621-415)
- VW PV 1210 (je vyžadován klimatický modul)
- Nissan CCT I.
- Renault ECC1 (klimatický modul povinné)
- IEC-60068-2-52 KB

Testy v solné mlze:

- DIN EN ISO 9227
- DIN 50942, DIN 53167
- ASTM B 117-73, ASTM B 287-74 -ASTM B 368-68
- ISO 7253 ISO 3678
- BS 1224, BS 2011, BS3900 F4
- BS 3900 F12
- BS 5466 část I, BS 5466 část 2 + 3 -NFX 41002,
- AS 21331 oddíl 3.1
- ISIS 1841190
- JIS Z 2371

Kondenzační zkouška:

- ISO 6270-2
- BS 3900F2, BS 3900 F15 -ASTM D2242

7. Tabulka testování vybraných norem v komoře VLM

V tab 6 je vidět souhrn vybraných norem pro testování polymerů v klimatické komoře VLM a zda je jejich použití vhodné.

Tabulka 6: Přehled vhodných norem		
Norma	Princip testu	Proveditelnost v komoře VLM
ČSN EN ISO 29664	umělé stárnutí + rozklad kyselinami	ANO – podmíněná, nutné přidat zdroj UV
ČSN EN ISO 877	sluneční záření	NE
ČSN EN ISO 11997-1	cyklická koroze	ANO – podmíněná, dodržet postup mezi cykly
ČSN EN ISO 9227	solná mlha	ANO
ČSN EN ISO 188	teplotní odolnost elastomerů	ANO
ČSN EN ISO 4892	UV záření	ANO – podmíněná, nutné přidat zdroj UV
ČSN EN ISO 11997-2 + 16474	stárnutí UV zářením +cyklická koroze	ANO – podmíněná, nutné přidat zdroj UV
ISO 2578	urychlené stárnutí teplem	Ano – podmíněná, max. + 80 °C

8. Závěr

Degradace polymerů korozi v různých prostředích je přirozený jev. Koroze polymerů je ale stále podstatně menší problém než například u kovových materiálů, proto jsou polymery často používány jako např. ochranné obaly. Náplní práce bylo vypracování rešerše vhodných norem pro realizaci adekvátních zkoušek polymerů v prostředí VLM komory. Toto velmi sofistikované zařízení je schopno simulovat korozní podmínky v různém prostředí, kde se polymery mohou nacházet a být vystaveny vlivům UV záření, vysokých a nízkých teplot, či jejich střídání, nebo například náročnému koroznímu prostředí v solné mlze.

Pro takové testy je v souladu s možnostmi VLM komory ClimaCORR CC 1000-TL FR vhodné použití zkoušek pro simulaci různých podmínek.

Další možností, která by za částečně omezených podmínek byla vhodná pro VLM komoru je stárnutí a tepelná odolnost polymerů, které upravuje norma ČSN ISO 188:2017. Omezení spočívá v době změny použitých krajních teplot komory, například ohřátí komory z -20 °C na $+35\text{ °C}$ zabere 30 minut. Změna teploty tedy není výrazně skoková, ale postupná, byť relativně rychlá. V případě testů umělého stárnutí, v rámci kterých je použito i UV záření, jež upravuje norma ČSN EN ISO 29664:2017, je nutností instalace zdroje UV záření přímo do komory. Komora nenabízí zdroj takového světla ani v příslušenství a je nutná instalace dodatečného zdroje, jež upravuje norma ISO 4892-3 typ 1A.

Cíl práce, který spočíval ve vypracování rešerše vhodných norem týkajících se možnosti testování korozní odolnosti polymerů v prostředí VLM komory vhodných pro praktické aplikace byl splněn a nabízí se hned několik možností efektivního využití VLM komory při testování zkušebních vzorků zhotovených z vybraných polymerů. V bakalářské práci je tabulka pro porovnání norem v práci zmíněných, ze které je patrné, zda je možné v komoře VLM testovat polymer dle dané normy, případně jaké jsou nutné úpravy.

9. Seznam použité literatury a zdroje obrázků

- [1] HRNČÍŘ, Jan. *Analýza vlastností plastových dílů při umělém a přirozeném stárnutí* [online]. Liberec, 2018 [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/152180/Jan_Hrncir_DP_2018.pdf. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci.
- [2] ŠANDOVIÁ, Zdenka. *Testování materiálových vlastností polymerů vhodných pro potravinářský průmysl* [online]. Zlín, 2013 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/23898/šandová_2013_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně.
- [3] DAREBNÝ, Tomáš. *DEGRADAČNÍ TESTY POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ VYSTAVENÝCH KLIMATICKÝM PODMÍNKÁM* [online]. Brno, 2014 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=88453. Bakalářská práce. VUT Brno.
- [4] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 2016 [cit. 2018-12-10]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/Impresum.html>
- [5] TechnoPark. *TechnoPark - Kralupy n. Vltavou* [online]. [cit. 2018-12-10]. Dostupné z: <https://www.technopark-kralupy.cz/korozni-zkousky>
- [6] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití. 2., přeprac. vyd.* Praha: Sobotáles, 2000. 537 s. ISBN 8085920727
- [7] Polyethylen. In: *Wikipedie* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyethylen>
- [8] Polypropylen. In: *Wikipedie* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polypropylen>
- [9] Stárnutí polymerů. *Publi.cz* [online]. [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/16.html>
- [10] PROŠEK, Tomáš. *Klimatické zkoušky a zkoušky odolnosti povětrnostním vlivům.* Technopark-Kralupy [online]. 29.1.2021 [cit. 2021-5-22]. Dostupné z: <https://www.technopark-kralupy.cz/klimaticke-zkousky?jazyk=cs#>
- [11] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití.* Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006 [cit. 2018-12-07]. ISBN 80-708-0617-6.

- [12] Mechanické vlastnosti polymerů – statické namáhání. In: *Publi.cz* [online]. 2016 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/180/09.html>
- [13] ČSN EN ISO 178:2011 (640607), Plasty - Stanovení ohybových vlastností. Praha: Středisko technické normalizace 2011
- [14] ČSN EN ISO 29664:2017 (640775), Plasty – umělé stárnutí včetně rozkladu kyselinami. Praha: Středisko technické normalizace 2017
- [15] ČSN EN ISO 877-1:2011 (640771), Plasty – metody vystavení přímému působení povětrnosti, povětrnosti s použitím denního světla filtrovaného přes sklo a zesíleného denního světla s použitím Fresnelových zrcadel. Praha: Středisko technické normalizace, 2011
- [16] ČSN EN ISO 11997-1:2018 (673120), Nátěrové hmoty - Stanovení odolnosti při cyklických korozních zkouškách - Část 1: Solná mlha/sucho/vlhkost. Praha: Středisko technické normalizace 2018
- [17] ČSN EN ISO 9227:2017 (038132), Korozní zkoušky v umělých atmosférách - Zkoušky solnou mlhou. Praha: Středisko technické normalizace 2017
- [18] ČSN ISO 188:2017 (621522), Pryž, vulkanizovaný nebo termoplastický elastomer – urychlené stárnutí a zkoušky teplené odolnosti. Praha: Středisko technické normalizace, 2017
- [19] ČSN EN ISO 4892-3 (640152) A Plasty - Metody vystavení laboratorním zdrojům světla. Část 3, Fluorescenční UV lampy = Plastics - Methods of exposure to laboratory light sources. Part 3, Fluorescent UV lamps. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. Dostupné také z: <http://csnonline.agentura-cas.cz/>
- [20] VLM Labtec. *VLM ClimacORR CC 1000 – TL FR DataSheet* [online]. [cit. 2021-5-24]. Dostupné z: <http://www.vlm-labtec.com/Support/Search-Documents-33610,1-en.html>
- [21] Granule. In: *JBerger.ch* [online]. Švýcarsko: 2018 [cit. 2018-12-07]. Dostupné z: <https://www.jberger.ch/Fuellmaterialien/Granulat/Granulat-3-5-mm-10-kg-Karton::194.html>
- [22] Vzorec PVC. In: Wikipedie [online]. [cit. 2018-12-07] Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polyvinylchlorid>
- [23] *UV LAMPS AND OPTICAL FILTERS. Q-LAB* [online]. 2021 [cit. 2021-5-27]. Dostupné z: <https://www.q-lab.com/products/lamps-optical-filters/lamps-and-optical-filters>
- [24] HAHN, Pavel. *Analýza mechanických vlastností kabelového pláště v průběhu jeho provozního života* [online]. Plzeň, 2014 [cit. 2021-5-28]. Dostupné z:

https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/12358/1/Hahn_Pavel_DP.pdf. Diplomová práce. ZČU v Plzni.

[25] ČSN EN ISO 2578. *Plasty - Stanovení mezních hodnot čas-teplota po dlouhotrvajícím působení tepla*. Praha: Český normalizační institut. 1999

[26] ČSN EN ISO 11997. *Nátěrové hmoty - Stanovení odolnosti při cyklických korozních zkouškách - Část 2: Solná mlha/sucho/vlhkost/UV záření*. 01.05.2014. 2014. Praha: Český normalizační institut.

[27] ČSN EN ISO 16474-3. *Nátěrové hmoty - Metody vystavení laboratorním zdrojům světla - Část 3: Fluorescenční UV lampy*. Praha: Český normalizační institut.

Seznam použitých symbolů a zkratk

PP – Polypropylen

PE – Polyethylen

PVC – Polyvinylchlorid

MPa – megapascal

°C – teplota ve stupních Celsia

LDPE – Polyethylen s nízkou hustotou

HDPE – Polyethylen s vysokou hustotou

CrO₃ – Oxid chromový

MoO₃ – Oxid molybdenový

Al₂O₃ – Oxid hlinitý

g·cm⁻³ - Gram na centimetr krychlový

VCM – vinylchlorid

HCl – Kyselina chlorovodíková

UV – ultrafialové záření

Nm – nanometr

kJ – kilojoule

IR – infračervené záření

m/s – metr za sekundu

m³ – metr krychlový

h – čas hodina

l – objem litr

W – Watt

Hz – Hertz

V – Volt

H₂SO₄ - Kyselina sírová

HNO₃ - Kyselina dusičná

CASS – Zkouška okyselenou solnou mlhou s chloridem měďnatým

NSS – zkouška neutrální solnou mlhou

kJ·mol⁻¹ – kilojoule na mol

W·m²·nm - spektrální intenzita záření

RH – relativní vlhkost