ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vliv aditiv na mechanické vlastnosti epoxidové pryskyřice

Effect of additives on mechanical properties of epoxy resin

Autor: Ondřej Blecha

Studijní program: Teoretický základ strojního inženýrství

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Krum, Ph.D.

PRAHA 2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Blecha** Jméno: **Ondřej** Osobní číslo: **483227**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv aditiv na mechanické vlastnosti epoxidové pryskyřice

Název bakalářské práce anglicky:

Effect of additives on mechanical properties of epoxy resin

Pokyny pro vypracování:

1) Literární rešerše týkající se problematiky icephobic chování epoxidových pryskyřic.
2) Výběr aditiv, která by mohla potenciálně snížit adhezi ledu k epoxidovým pryskyřicím.
3) Experimentální část - měření adheze ledu, měření vybraných mechanických vlastností epoxidu po aplikaci aditiv.
4) Zpracování výsledků, formulace závěrů.

Seznam doporučené literatury:

[1] Y. Shen, X. Wu, J. Tao et al., Icephobic materials: Fundamentals, performance evaluation, and applications, Prog. Mater. Sci 103 (2019), 509-557, DOI: org/10.1016/j.pmatsci.2019.03.004
[2] X. Wu, S. Zheng, D. A. Bellido-Aguilar et al., Transparent icephobic coatings using bio-based epoxy resin, Mater. Des. 140 (2018), 516-523, DOI: org/10.1016/j.matdes.2017.12.017

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Stanislav Krum, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **04.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: _____

Ing. Stanislav Krum, Ph.D.	prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) práce	podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

4.5.2021
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které uvádím v seznamu použité literatury.

V Praze dne: …….. ……..

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Stanislavu Krumovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, ochotu a vstřícnost.

Dále bych rád poděkoval Ing. Eleně Čižmárové, Ph.D. za naměření tvrdostí vzorků a Ing. Martinu Daňkovi, Ph.D. za naměření drsností vzorků pro experimentální část této práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se věnuje vlivu aditiv na mechanické a icephobic vlastnosti epoxidové pryskyřice v bulkové formě. Teoretická část se zabývá zejména principy ledofobnosti, charakterizuje epoxidovou pryskyřici a dále popisuje vybrané mechanické zkoušky plastů. V experimentální části se klade důraz na ledofobnost, z mechanických vlastností pak na tvrdost a drsnost povrchu. Ledofobnost se zkouší prostřednictvím speciálního trhacího přístroje, tvrdost prostřednictvím normované zkoušky tvrdosti dle Shore D a drsnost pomocí profilometru. V práci jsou srovnávány vzorky čistého epoxidu se vzorky epoxidu s přidaným hydrofobním činidlem. Hodnocena byla adheze ledu k povrchu vzorku a tvrdost vzorku v závislosti na rostoucí koncentraci hydrofobního činidla. Icephobicity bylo dosaženo u dvou vzorků. Zároveň bylo dokázáno, že s rostoucí koncentrací hydrofobního činidla tvrdost povrchu klesá.

Klíčová slova:

epoxid, ledofobnost, tvrdost, adheze ledu, aditiva, mechanické zkoušky

Abstract

This bachelor thesis deals with the effect of additives on mechanical and icephobic properties of epoxy resin in a bulk form. The theoritical part deals mainly with the principles of icephobicity, characterizes the epoxy and describes selected mechanical testing methods of plastics. In the experimental part, emphasis is placed on icephobicity, from mechanical properties on hardness and surface roughness. Icephobicity is tested by a peak force method, hardness by a standardized Shore D hardness test and surface roughness by a profilometer. In this work, samples of pure epoxy are compared with the samples of epoxy with added hydrophobic agent. It is analysed, how both the ice adhesion and the hardness of the sample change with an increasing concentration of the hydrophobic agent. Icephobicity was achieved in two of the samples. Also it has been shown, that the surface hardness decreases with the increasing concentration of the hydrophobic agent.

Key words:

epoxy, icephobicity, hardness, ice adhesion, additives, mechanical testing methods

Seznam symbolů a zkratek

θ	[°]	Kontaktní úhel (úhel smáčení)
γ_{sl}	[N.m^{-1}]	Povrchové napětí na rozhraní pevné a kapalné látky
γ_{lv}	[N.m^{-1}]	Povrchové napětí na rozhraní kapalné a plynné látky
γ_{sv}	[N.m^{-1}]	Povrchové napětí na rozhraní pevné a plynné látky
θ^*	[°]	Zdánlivý kontaktní úhel
H	[°]	Hystereze kontaktního úhlu
θ_A	[°]	Kontaktní úhel postupující
θ_R	[°]	Kontaktní úhel ustupující
SLIPS	-	Slippery liquid-infused porous surfaces
BPA	-	Bisfenol A
T_g	[°C]	Teplota skelného přechodu
F	[N]	Působící síla
v	[mm.min^{-1}]	Zkušební rychlost při ohybové zkoušce
σ_f	[MPa]	Napětí v ohybu
L	[mm]	Vzdálenost podpěr
b	[mm]	Šířka vzorku
h	[mm]	Tloušťka vzorku
σ_{fB}	[MPa]	Napětí v ohybu v momentu lomu
σ_{fM}	[MPa]	Pevnost v ohybu
σ_{fC}	[MPa]	Napětí v ohybu při domluveném průhybu
ε_f	[-]	Deformace ohybem
s	[mm]	Průhyb
s_c	[mm]	Smluvní průhyb
ε_{fB}	[-]	Deformace ohybem v okamžiku lomu
ε_{fM}	[-]	Deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu

E	[MPa]	Modul pružnosti
$HShD$	[-]	Tvrdost dle metody Shore D
E	-	Čistý epoxid
E5	-	Epoxid a 5 hm. % hydrofobního činidla
E10	-	Epoxid a 10 hm. % hydrofobního činidla
E20	-	Epoxid a 20 hm. % hydrofobního činidla
S	[mm^2]	Kontaktní plocha
τ	[kPa]	Smykové napětí
SD	-	Směrodatná odchylka
Ra	[nm]	Střední aritmetická úchylka profilu
Rz	[nm]	Největší výška profilu

Obsah

Seznam symbolů a zkratek 7
I Úvod 11
II Teoretická část 12
1 Ledofobnost 12
1.1 Smáčivost 13
1.1.1 Teorie smáčivosti 13
1.1.2 Potlačení adheze vody a ledu 15
1.2 Nukleace ledu 17
1.2.1 Homogenní nukleace ledu 18
1.2.2 Heterogenní nukleace ledu 18
1.2.3 Teplota mrznutí 19
1.2.4 Prodleva doby mrznutí 19
1.2.5 Adheze ledu 20
1.3 Využití v praxi 22
2 Epoxidová pryskyřice 22
2.1 Vlastnosti a využití 23
2.2 Proces výroby 23
2.3 Druhy 24
2.4 Vytvrzování 25
2.5 Aditiva 26
2.6 Epoxidová pryskyřice a ledofobnost 26
3 Mechanické vlastnosti plastů 27
4 Zkoušky mechanických vlastností plastů 28
4.1 Zkouška ohybem 28
4.1.1 Vyhodnocení ohybové zkoušky 30
4.2 Měření tvrdosti (Shore) 32
4.2.1 Průběh zkoušky 33
4.3 Tribologická měření (Tribometr) 35
III Experimentální část 36
5 Zkouška icephobicity 37
5.1 Průběh zkoušky 38
5.2 Výsledky zkoušky 39

6 Zkouška tvrdosti metodou Shore D 41
6.1 Výsledky zkoušky 42
7 Zkouška drsnosti povrchu 44
7.1 Výsledky zkoušky 44
IV Diskuze a závěr 46
Seznam obrázků 48
Seznam tabulek 48
Bibliografie 49

I Úvod

Epoxidová pryskyřice je poměrně levný, všestranně použitelný a lety ověřený materiál. Z těchto důvodů má své uplatnění napříč různými odvětvími a četně se využívá v technické praxi. Z nedávných výzkumů vychází najevo, že právě epoxid v kombinaci s vhodnými hydrofobními činidly má velký potenciál i v oblasti tzv. icephobic materiálů [1].

Tato oblast využití epoxidu však není dodnes plně zmapována. Přidání hydrofobního činidla sice může zlepšit icephobic vlastnosti, zároveň se ale může negativně promítnout do výsledných mechanických vlastností epoxidu. A to dokonce natolik, že praktické využití takto vzniklého materiálu nebude tím pádem možné. Hlavní motivací výzkumu je tedy zhodnotit vliv hydrofobních činidel nejen na snížení adheze ledu, ale také na mechanické vlastnosti.

II Teoretická část

V teoretické části je popsána nejprve stěžejní charakteristika materiálu pro tuto práci – ledofobnost neboli icephobicita. V rámci první kapitoly je vysvětlena smáčivost a její teorie, následují fyzikálně-chemické procesy stojící za tvorbou ledu, vlivy na adhezi k povrchu, popis a využití stávajících ledofobních materiálů, posouzení ledofobnosti. V další kapitole jsou zmíněny základní principy a využití epoxidové pryskyřice, její výroba, druhy, proces vytvrzování, běžná aditiva a epoxidová pryskyřice ve vztahu k ledofobnosti. Na závěr jsou popsány mechanické vlastnosti plastů a některé z metod jejich zkoušení.

1 Ledofobnost

Tvorba ledu stojí za řadou poruch či za významným zhoršením provozních vlastností mnoha venkovních zařízení, konstrukcí a objektů, jako jsou například lodě, letadla, ropné plošiny, solární panely, větrné elektrárny, stožáry vysokého napětí a další. Důsledkem toho jsou ekonomické ztráty a v krajních případech i ztráty na životech. Z tohoto důvodu je výzkum ledofobních materiálů velmi podstatnou záležitostí [2].

Je důležité porozumět fyzikálně-chemickým pochodům mrznutí, aby bylo možné vyvinout materiály, které brání tvorbě ledu. Výdobytkem posledních dekád jsou tzv. metody odmrazování, mezi něž patří ohřev povrchu párou, elektrotepelné vyhřívání nebo mechanické kmitání. Všechny tyto metody patří mezi aktivní rozmrazovací metody a jejich velkou nevýhodou je nutnost nepřetržitého dodávání tepla, elektrické energie nebo rozkmitávání zamrzlých povrchů. To je samozřejmě energeticky i logisticky náročné, proto by bylo dobré se těchto metod do budoucna vyvarovat [2].

Vhodnější alternativou jsou tedy pasivní metody, které se snaží tvorbu ledu potlačit už v zárodku nebo led alespoň odpuzovat, snížit jeho adhezi

k materiálu. Pro možnost komplexního pochopení této problematiky je důležité porozumět teorii zmíněné v následujících podkapitolách [2].

1.1 Smáčivost

1.1.1 Teorie smáčivosti

Smáčivost vyjadřuje schopnost kapaliny přilnout k povrchu pevné látky. Jedná se o důsledek rovnosti tří fází – fáze pevné, kapalné a plynné. Kapka se na povrchu pevné látky nerozprostře úplně. Úhel, který tečna povrchu kapky svírá v bodě styku s povrchem pevné látky, se nazývá kontaktní úhel θ (úhel smáčení) (Obr. 1). Kontaktní úhel závisí na povrchové energii (přesněji na povrchových napětích) [2,3].

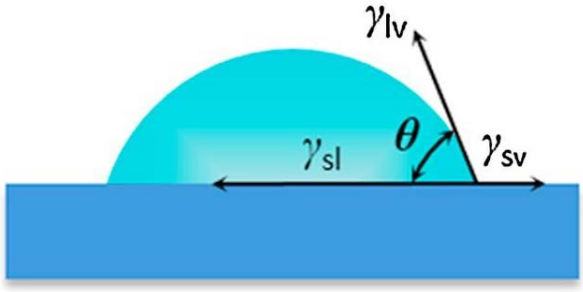
Kontaktní úhel je popsán Youngovou rovnicí [2]:

$$\gamma_{sl} + \gamma_{lv}\cos(\theta) = \gamma_{sv} \tag{1}$$

kde γ_{sl} je povrchové napětí na rozhraní pevné a kapalné látky

γ_{lv} je povrchové napětí na rozhraní kapalné a plynné látky

γ_{sv} je povrchové napětí na rozhraní pevné a plynné látky

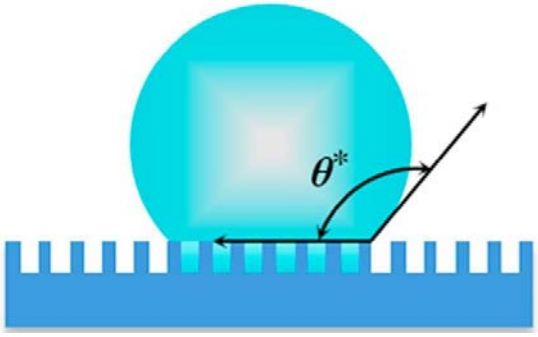


Obr. 1: Kontaktní úhel popsán Youngovou rovnicí (pro hladký povrch) [2]

Výpočet dle Youngovy rovnice je však vhodný pouze pro teoretický výpočet. Počítá totiž s ideálním hladkým povrchem. Reálně je ale povrch pevné látky často drsný a nerovný, což vede k odchylce skutečného a vypočteného kontaktního úhlu dle této rovnice. Pro zahrnutí vlivu

drsnosti povrchu je nutné si definovat Wenzelův model drsnosti a s ním spjatý zdánlivý kontaktní úhel θ^* [2].

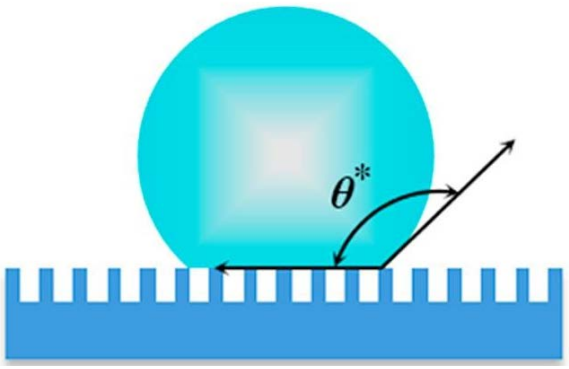
Wenzelův model drsnosti (Obr. 2) říká, že kapalina zcela vyplňuje nerovnosti povrchu [2].



Obr. 2: Wenzelův model drsnosti [2]

Vlivem zvyšující se drsnosti u hydrofilních povrchů ($\theta < 90°$) se zdánlivý kontaktní úhel postupně snižuje, což vede k vyšší hydrofilnosti. Naopak, vlivem zvyšující se drsnosti u hydrofobní povrchů ($\theta > 90°$) se zvyšuje i zdánlivý kontaktní úhel, což vede k vyšší hydrofobnosti. Z toho plyne, že vhodným postupem k dosažení nesmáčivosti a většího zdánlivého kontaktního úhlu je vytvoření zvrásněných a drsných povrchů na mikroskopické úrovni [2].

Ne všechny přírodní jevy jdou tímto modelem popsat. Existuje proto ještě další, vylepšený model, model Cassieho-Baxtera (Obr. 3). Tento model říká, že nerovnosti povrchu jsou vyplněny vzduchovými kapsami [2].



Obr. 3: Model Cassieho-Baxtera [2]

Důsledkem je, že čím více vzduchových kapes je drženo vlivem nerovnosti povrchu na rozmezí kapaliny a pevné látky, tím k většímu růstu zdánlivého kontaktního úhlu dochází a tím více je povrch hydrofobní [2].

Z hlediska ledofobnosti se předpokládá, že by ledofobní materiály měly disponovat drsností na mikroskopické úrovni a odpovídat tak modelu Cassieho-Baxtera [2].

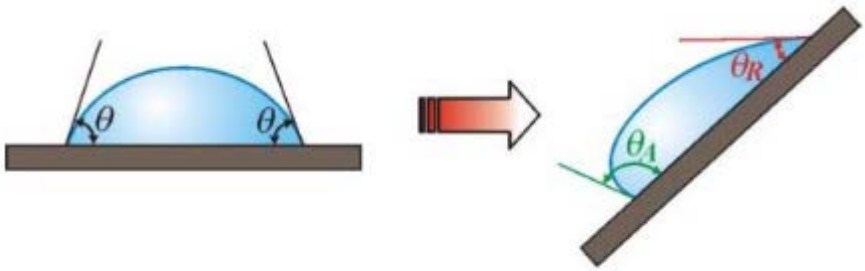
Ideálním kandidátem pro ledofobní povrchy jsou tzv. superhydrofobní povrchy. Tyto povrchy prokazují následující vlastnosti: kontaktní úhel mají větší než 150°, hystereze kontaktního úhlu je menší než 10° [2].

Hystereze kontaktního úhlu (Obr. 4) obecně záleží na drsnosti povrchu, na čistotě povrchu a na různorodosti povrchu. Hysterezi kontaktního úhlu lze získat dle vztahu [4]:

$$H = \theta_A - \theta_R \tag{2}$$

kde θ_A je kontaktní úhel postupující

θ_R je kontaktní úhel ustupující



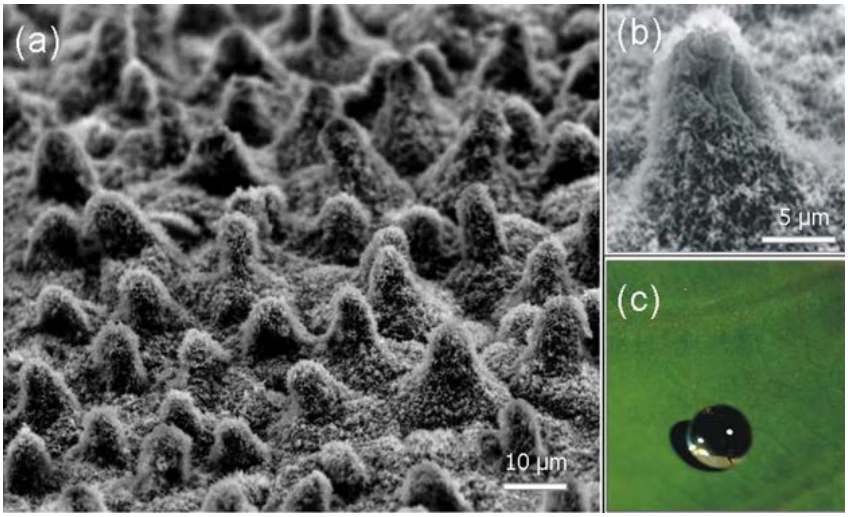
Obr. 4: Hystereze kontaktního úhlu [4]

1.1.2 Potlačení adheze vody a ledu

Skrze experimenty a výzkum superhydrofobních povrchů jak přírodních, tak uměle vytvořených, bylo potvrzeno, že klíčem k superhydrofobnosti je geometrická struktura, která ovlivňuje drsnost povrchu na mikroskopické úrovni a chemické složení, které rozhoduje o volné povrchové energii. Ledofobní materiál by měl v první řadě skvěle odpuzovat vodu. Proto je

důležité se zaměřit na možnou přípravu nanostruktur povrchu a to z hlediska velikosti i tvaru [2].

Inspirací pro vhodné nesmáčivé nanostruktury mohou být přírodní objekty jako například lotosový list (Obr. 5). Hlavním důvodem superhydrofobnosti lotosového listu jsou nahodile rozprostřené papily (o velikosti v řádech jednotek mikrometrů), způsobující velké množství vzduchových kapes při kontaktu s vodou. Struktura rovněž vykazuje nízkou adhezi vody. Lotosový list se chová dle modelu Cassieho-Baxtera [2].



Obr. 5: Lotosový list [5]

Adheze ledu k povrchu je důsledkem elektrostatických sil a polárnosti povrchu. Polární skupiny povrchu či volné elektrony v kovech se váží na silně polární vodík a kyslík. Z tohoto důvodu vykazují kovy vlivem přítomnosti volných elektronů vážících se na vodík vysokou adhezi k ledu. Naopak některé z polymerů vykazují adhezi k ledu poměrně nízkou. To je dáno relativní permitivitou povrchu. Pro ideálně hladký povrch platí, že nižší adhezi bude vykazovat materiál s nižší permitivitou.

Způsob, kterým lze ledofobnosti mimo jiné dosáhnout, je prostřednictvím superhydrofobních povrchů. Za nízkých teplot však dochází k problémům. Klesne-li teplota okolí pod bod mrazu, přesycené kapky vody začnou kondenzovat i na povrchu nanostrukturovaného superhydrofobního povlaku. Tato skutečnost brání tvorbě vzduchových kapes a může vést

ke smáčivosti. Nízká teplota může rovněž vést k nárůstu volné povrchové energie. Z toho lze vyvodit, že superhydrofobní materiál se skvělou nesmáčivostí za pokojové teploty nemusí být vždy superhydrofobní za nižších teplot, zejména pak za teplot pod bodem mrazu. Důvodem je změna tlaku vzduchových kapes a změna volné povrchové energie [2]. Nevýhodou při aplikaci superhydrofobních povrchů je dále nízká otěruvzdornost kvůli jemné a často křehké morfologii povrchu.

Dalším způsobem dosažení ledofobnosti je napuštění nanoporézních struktur povrchu pevné látky lubrikantem, který uvnitř drží vlivem kapilárních sil. Tento lubrikant vytváří hladkou tekutou povrchovou vrstvu. Takovýmto povrchům se říká SLIPS (slippery liquid-infused porous surfaces). SLIPS mají navzdory skvělým výsledkům v laboratoři prozatím jen malé uplatnění v praxi. Důvodem je, že napuštěný lubrikant může snadno vlivem gravitace či kapilárních sil odtéci. Dalším důvodem je, že vzhledem k velké pórovitosti struktury (která je nutná pro udržení lubrikantu) vykazují tyto povrchy špatné mechanické vlastnosti. Zároveň lubrikant není odolný delšímu vystavování ultrafialovému záření. Z těchto důvodů nejsou SLIPS pro náročné venkovní podmínky prozatím připraveny a využití je tak značně omezené [2,6].

Z těchto informací vyplývá, že vhodnější cestou, jak ledofobnosti dosáhnout, je skrze nepolární materiál s nízkou permitivitou. Výhodou takového materiálu je zachování ledofobnosti i po mechanickém poškození, protože není třeba nijak strukturovat povrch.

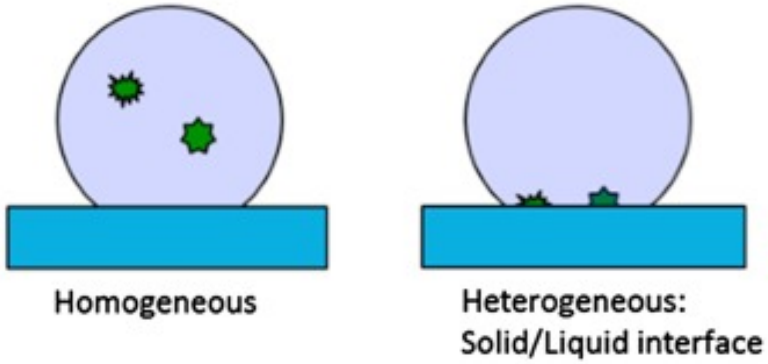
1.2 Nukleace ledu

Ledofobní materiál by měl vykazovat schopnost brzdit proces mrznutí. Mrznutí je řízeno nukleací a růstem ledu. Ledofobní materiál by tedy měl brzdit nukleaci buď z hlediska teploty (za nepřetržitého chlazení) nebo z hlediska času (za konstantní teploty) [2,6].

1.2.1 Homogenní nukleace ledu

Během mrznutí se voda přeměňuje v led, což je způsobeno změnou fází. Tento proces je doprovázen úbytkem Gibbsovy volné energie systému. Homogenní nukleace ledu (Obr. 6, vlevo) nastane v okamžiku, kdy na stejném místě vznikne dostatečný počet vodíkových vazeb s takovou životností, aby mohlo vzniknout kompaktní jádro. Jádro mění tvar a velikost, dokud nedosáhne stádia umožňující rychlý růst, následně vyvolá krystalizaci v celé soustavě [2].

Tři zásadní děje molekulové dynamiky nukleace ledu jsou: přechlazení, fluktuace struktury a fluktuace energie, přičemž nejvíce času z celého procesu mrznutí zabírá právě první děj – přechlazení (a to až 95 %). Řízením těchto dějů lze regulovat nukleaci ledu a tudíž i potlačit jeho vznik. Jinými slovy, zásadní je nedovolit jádru dosáhnout potřebné velikosti a zabránit tak jeho nekontrolované expanzi [2].

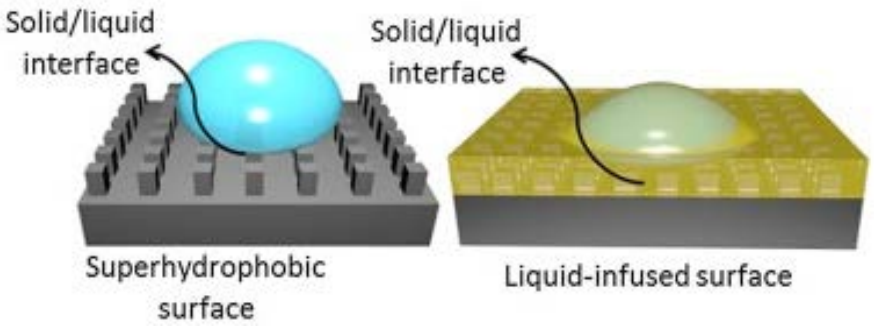


Obr. 6: Homogenní a heterogenní nukleace ledu [2]

1.2.2 Heterogenní nukleace ledu

V reálném světě je homogenní nukleace výjimečná. Povrch pevné látky je totiž schopen snížit energetickou mez pro nukleaci ledu a běžně tak proto nastává heterogenní nukleace (Obr. 6, vpravo). Zároveň ale, pokud je drsnost pevného povrchu nižší než kritická velikost jádra a povrchová energie je moc nízká, nukleace ledu může být zpožděna. A to dokonce tak, že výsledná heterogenní nukleace může být srovnatelná s homogenní. Kritická velikost jádra však nebyla do dnes experimentálně ověřena. Proto

vývoj většiny dnešních ledofobních materiálů vychází buď z principu superhydrofobních povrchů napodobujících lotosový list nebo z principu SLIPS (Obr. 7) [2].



Obr. 7: Superhydrofobní povrch (vlevo), SLIPS (vpravo) [2]

1.2.3 Teplota mrznutí

Nižší teplota mrznutí znamená menší pravděpodobnost tvorby ledu či více času k odstranění vodních kapek předtím, než se z nich stihne utvořit led. Za teplotu mrznutí se pokládá taková teplota, při které začíná proces mrznutí probíhat. Lze ji měřit pomocí exotermického signálu přímo během procesu použitím speciálního měřícího zařízení s laserovým detekčním systémem. Na počátku mrznutí zaznamená laserový detektor náhlý nárůst teploty, způsobený uvolněním latentního tepla při přeměně z vody na led. Právě tento výkyv je možné použít k určení teploty mrznutí [2].

Velikost kapky vody a rychlost chlazení mají velký vliv na výslednou měřenou teplotu mrznutí. Od určitého poloměru kapky vody (cca 0,14 mm) dochází k rapidnímu růstu teploty mrznutí. Vliv na měření můžou mít i další parametry, jako je například míra znečištění vody [2].

1.2.4 Prodleva doby mrznutí

Doba mrznutí vyjadřuje čas, který potřebuje kapka vody pro zmrznutí na povrchu pevné látky za konstantní teploty. Prodleva doby mrznutí je úzce spjata s přenosem tepla na rozhraní pevné látky a kapaliny. Proto je výhodné následovat model smáčivosti Cassieho-Baxtera, aby byl kontakt

povrchu pevné látky a kapaliny co nejmenší a aby docházelo ke vzniku vzduchových kapes, které fungují jako tepelný izolant. [2].

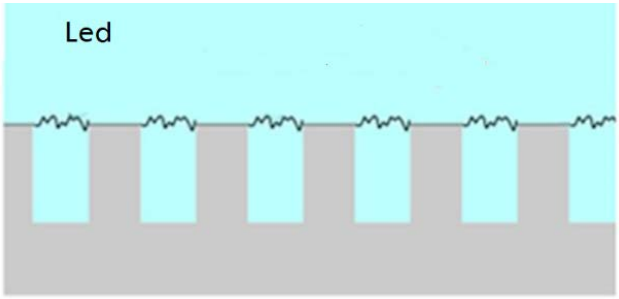
Skvělého výsledku v této oblasti dosahuje mikro-nanostrukturovaný superhydrofobní povrch inspirovaný motýlími křídly, kde kapka vody potřebuje delší dobu k přechlazení pro počátek fáze tvorby ledu v porovnání s hladkými povrchy či s nanostrukturovanými povrchy. Problémem zůstávají zkondenzované kapky vody a to i pro mikro-nanostrukturované superhydrofobní povrchy. Důvodem je příliš malá velikost kapek, vlivem čehož se nemusí udržet v modelu smáčivosti Cassieho-Baxtera. Z hlediska prevence tvorby ledu z kondenzované vlhkosti jsou tedy efektivnější povrchy napuštěné lubrikantem [2].

1.2.5 Adheze ledu

Velikost přilnavosti ledu k povrchu je další důležitý parametr z hlediska ledofobních materiálů. Udává, jak snadno lze utvořený led z povrchu odstranit. Je zřejmé, že v mnoha oblastech je proces mrznutí nevyhnutelný. Pokud však povrch vykazuje nízkou adhezi k ledu, ve spojení s aktivními odmrazovacími metodami může dojít alespoň k ušetření energie při procesech odmrazování. Pro pohybující se objekty, jako jsou například lopatky větrných elektráren či křídla letadel, by dokonce mohla být působící síla dostatečná k odstranění ledu, pokud přilnavost nebude moc velká. Obecně by velikost přilnavosti ledu u ledofobních materiálů neměla dosahovat hodnot vyšších než 0,1 MPa [2].

Přilnavost ledu k povrchu může být testována střihem či tahem, v současné době však neexistuje normovaná zkouška. Nízké přilnavosti ledu k povrchu dosahují již zmíněné mikro-nanostrukturované superhydrofobní povrchy. Důvodem jsou vzduchové kapsy, ve kterých se po zmrznutí koncentruje napětí. Tyto kapsy zároveň snižují kontaktní plochu povrchu pevné látky a ledu. Je potvrzeno, že síla potřebná k odstranění ledu z povrchu je závislá právě na velikosti vzduchových kapes a rovněž na velikosti ustupujícího kontaktního úhlu. Může ale nastat situace, kdy vlivem proudění

podchlazeného vzduchu stav Cassieho-Baxtera přestane platit (Obr. 8). V ten moment je mikro-nanostrukturovaný povrch naopak nevýhodou. Led vyplní dutiny, mechanicky se v nich ukotví a síla nutná k odstranění je tím pádem větší než u hladkých povrchů. Z toho důvodu se z hlediska přilnavosti jeví příhodnější lubrikované povrchy, které jsou hladké. Přilnavost ledu na těchto površích je až desetkrát nižší než u mikro-nanostrukturovaných povrchů [2].



Obr. 8: Porušení stavu Cassieho-Baxtera; upraveno z [2]

Vzhledem k vizi využití ledofobních materiálu v praktickém světě je zásadní jejich odolnost proti mechanickému poškození a schopnost odolávat vlivům prostředí. Mezi tato poškození patří například poškrábání, abraze, tryskání vodou a podobně. Ledofobní povrchy vystavené vnějšímu prostředí musí čelit vlivům UV záření, písku, vodě a dalším [2,6].

Běžnými zkouškami mechanických vlastností povlaků se zkoumá především tvrdost, moduly pružnosti, odolnost proti poškrábání tužkou, adheze v příčném řezu, adheze při odtržení. Tyto zkoušky však nejsou prozatím pro ledofobní materiály moc rozšířené a proto neexistuje mnoho dat. Zkoušky nejsou normované a z toho důvodu se těžko porovnávají jejich výsledky napříč jednotlivými výzkumy [2].

Objevené nanostrukturované superhydrofobní materiály jsou schopny odolávat mrazu, hůře však odolávají kondenzované vodě nebo proudění podchlazeného vzduchu. Lubrikantem napuštěné povrchy mají sice lepší vlastnosti z hlediska prodlevy doby mrznutí a z hlediska přilnavosti ledu, nicméně hůře odolávají vlivům prostředí vzhledem k snadnému poškození

lubrikované vrstvy. Klíčem k navržení aplikovatelného ledofobního povlaku je najít povlak schopný odolávat mechanickým poškozením a vlivům prostředí [2].

1.3 Využití v praxi

Prozatím aplikace ledofobních materiálů není velká, vše je spíše ve fázi prototypů. Velkou výzvou zůstává vývoj ledofobního povlaku, který by byl schopen dobře odolávat mechanickým vlivům [2].

Větrné elektrárny, které jsou provozovány v chladných oblastech nebo ve vysokých nadmořských výškách, jsou vystavovány mrznutí a ledu. Pokud není led z lopatek odstraněn včas, může dojít k problémům v podobě výpočetních chyb, může docházet ke ztrátě elektrické energie, k nadprodukci, k mechanickému nebo elektrickému selhání. Obdobným příkladem jsou dráty elektrického vedení. Tomu všemu by v budoucnu mohly zabránit právě ledofobní povlaky [2,6].

Další výzvou ledofobních povlaků je průhlednost. Průhlednost povlaků je zásadní například u solárních panelů, u oken, u čelních skel automobilů. Již zmiňované mikro-nanostrukturované superhydrofobní povlaky z důvodu drsnosti povrchu, který rozptyluje světlo, průhledné nejsou [2].

Nároky na ledofobní materiály se různí dle prostředí, ve kterém by měly být využívány. Pro oblasti s mírnými pracovními podmínkami (bez vlivů UV záření, bez drsných mechanických vlivů) jsou již některé vyvinuté ledofobní povlaky aplikovatelné. Nicméně pro náročné provozní prostředí je potřeba více výzkumu, více prototypů. Je nutné lépe porozumět, jak moc může mechanické poškození ovlivnit ledofobnost povlaku v praxi [2].

2 Epoxidová pryskyřice

Epoxidová pryskyřice patří mezi polymery, konkrétně mezi reaktoplasty. Polymery jsou makromolekulární látky přírodního či syntetického původu. Pro reaktoplasty platí, že změna z plastického stavu do tuhého je nevratná,

tedy trvalá. Jedná se o důsledek chemické reakce, při které dochází k strukturní přeměně – k přechodu z lineárního do síťovaného stavu. Touto reakcí může být zahřátí či přidání vytvrzovacího prostředku [7].

Pojmem epoxidové pryskyřice jsou nazývány pryskyřičné látky, v jejichž řetězci je obsažena více než jedna epoxidová (oxiranová, ethylenoxidová) skupina [7].

2.1 Vlastnosti a využití

Charakteristické vlastnosti epoxidových pryskyřic jsou: velká přilnavost k většině ostatních materiálů, zanedbatelné smrštění při vytvrzování, chemická odolnost, elektrická izolace a dobrá zpracovatelnost. Výborně odolávají zásadám a zředěným roztokům jak anorganických, tak organických kyselin. Epoxidové pryskyřice jsou nejčastěji bezbarvé. Mohou mít konzistenci přes kapaliny až po tvrdé, křehké materiály [7,8].

Pro tyto pozitivní vlastnosti mají širokou škálu využití – jsou využívány například jako: lepidla, nátěrové, zalévací, lisovací hmoty, pojiva kompozitních materiálů (např. laminát) [7].

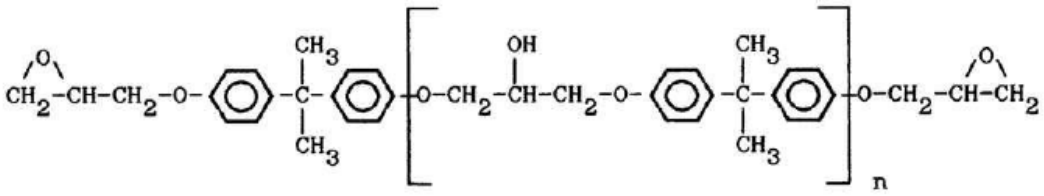
2.2 Proces výroby

Epoxidové pryskyřice patří mezi syntetické materiály. Nejčastěji se vyrábí z epichlorhydrinu a bisfenolu A. Idealizovaná makromolekula takto vzniklého epoxidu je znázorněna na (Obr. 9). Molekulová hmotnost výsledné pryskyřice závisí na poměru bisfenolu A k epichlorhydrinu při výrobě. Teoreticky, pokud by byl poměr 1:1, vznikla by jediná makromolekula. Za poměru 1:2 by vznikla nejmenší jednotka epoxidové pryskyřice. V reálném světě je však nutno použít větší množství epichlorhydrinu. Obecně platí, že čím méně molů epichlorhydrinu na mol bisfenolu A, tím vyšší výsledná molekulová hmotnost [7,9].

Epichlorhydrin se běžně získává z fosilních zdrojů, konkrétně z ropy. Bisfenol A (BPA) je zase znám pro své negativní vlivy na lidské zdraví. Bylo

dokázáno, že používání bisfenolu A může vést ke vzniku rakoviny prsu, prostaty, může přispívat k diabetu II. typu a dalším chorobám metabolismu (např. k obezitě) [10,11].

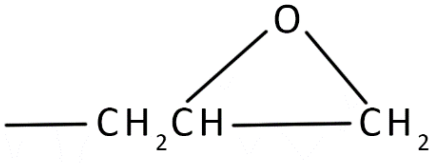
Nejenom z těchto důvodů je dnes snaha o pokrok v syntéze epoxidových pryskyřic. Alternativou epoxidů na bázi ropy mohou být takzvané bio epoxidy, získávané z přírodních zdrojů (např. z cukru, rostlinného oleje či dřeva). Jedná se o rozložitelné a z pohledu udržitelnosti výhodné látky s velkým potenciálem [1].



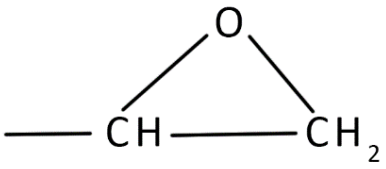
Obr. 9: Makromolekula epoxidu v idealizované podobě [7]

2.3 Druhy

Epoxidové pryskyřice lze rozdělit na dvě hlavní skupiny – na pryskyřice glycidilové (dianové) obsahující glycidilové skupiny (Obr. 10), připravované reakcí epichlorhydrinu a vhodných surovin a na pryskyřice obsahující epoxidové skupiny (Obr. 11), připravované epoxidací nenasycených sloučenin. Do pryskyřic obsahujících epoxidové skupiny patří: pryskyřice na bázi jiných fenolů (např. bisfenol F, novolaky na bázi fenolu či kresolu), pryskyřice připravované epoxidací dvojných vazeb (např. kyselinou peroxyoctovou), glycidylestery nebo glycidylaminy [9].



Obr. 10: Glycidilová skupina; upraveno z [9]



Obr. 11: Epoxidová skupina; upraveno z [9]

2.4 Vytvrzování

Pojmem vytvrzování se rozumí proces, kdy dochází vlivem chemického zpracování ke změně nízkomolekulárních rozpustných a tavitelných monomerů a oligomerů epoxidu na netavitelné a nerozpustné polymery s převážně trojrozměrnou strukturou [12].

Důležitým bodem vytvrzování je tzv. bod gelace, kdy v systému vzniká první nekonečná, trojrozměrná struktura. Pod bodem gelace má epoxidová pryskyřice podobu viskózní kapaliny, nad bodem gelace má pryskyřice jak rozpustné, tak nerozpustné části. V momentu úplného vytvrzení jsou v systému pouze nerozpustné části – gel [13].

Dalším milníkem je tzv. teplota skelného přechodu (T_g), která tvoří rozhraní mezi tuhým (sklovitým) a kaučukovitým stavem. Jedná se o jednu z nejvýznamnějších charakteristik polymeru. Do teploty skelného přechodu je polymer křehký a tvrdý, po dosažení teploty T_g dochází ke skokové změně vlastností – polymer získává kaučukovitou pružnost [13].

K úplnému vytvrzení dochází právě až nad teplotou skelného přechodu a epoxidové pryskyřice tak získávají nové, výhodné vlastnosti, jako jsou například mechanická a tepelná odolnost či elasticita [12].

Vlastní vytvrzování lze provést polyadicí sloučenin s aktivním vodíkovým atomem na epoxidové skupiny, polykondenzací přítomných hydroxylových skupin nebo polymerací epoxidových skupin. První zmíněná možnost je v praxi nejvýznamnější. Typickými tvrdidly jsou polyaminy, polythioly a anhydridy polykarboxylových kyselin [7,9].

Vytvrzování probíhá v řádech hodin, úplného vytvrzení dosahuje epoxid v řádech dní. Proces lze zkrátit zvýšením teploty [7].

2.5 Aditiva

Aditiva jsou přídavné látky, které zlepšují výsledné vlastnosti materiálu. Mezi aditiva patří například: tvrdidla, plniva, nanočástice či hydrofobní činidla.

Nevýhodou běžných dianových epoxidových pryskyřic po vytvrzení klasickými tvrdidly je především velké vnitřní pnutí, které v krajním případě může vést až k porušení struktury výrobku. To může být ještě umocněno, jsou-li aplikace ve vnějším prostředí, kde musí odolávat například nízkým teplotám, jejich výkyvům a dalším vnějším vlivům. Tyto nedostatky lze odstranit tzv. plastifikací [14].

Plastifikace je proces, který cílí na zlepšení pružnosti, ohebnosti, snižuje vnitřní pnutí za nízkých teplot atd. Plastifikací sice lze dosáhnout těchto zlepšených stavů, ale také může naopak dojít ke ztrátě některých jiných typických vlastností epoxidových pryskyřic, jako jsou například výborná přilnavost, tvarová stálost či tepelná odolnost. Plastifikace se dělí na vnější a vnitřní [14].

Při vnější plastifikaci nedochází během vytvrzování k zakomponování aditiv do struktury, nýbrž aditiva oddálí řetězce vytvrzených makromolekul od sebe a tím způsobí jejich zvýšenou pohyblivost. Při vnitřní plastifikaci dochází během vytvrzování přímo k zakomponování aditiv do struktury. Aditiva vnější plastifikace jsou nazývány plastifikátory, aditiva vnitřní plastifikace pak flexibilizátory [14].

2.6 Epoxidová pryskyřice a ledofobnost

Epoxidová pryskyřice jako taková je sice polární, nicméně může být modifikována hydrofobními činidly [1]. Touto modifikací lze získat povlak, který nejenom že odpuzuje led, ale vykazuje i dobré mechanické vlastnosti. Vzhledem ke skutečnosti, že povlak se dá vždy poškrábat, cílem

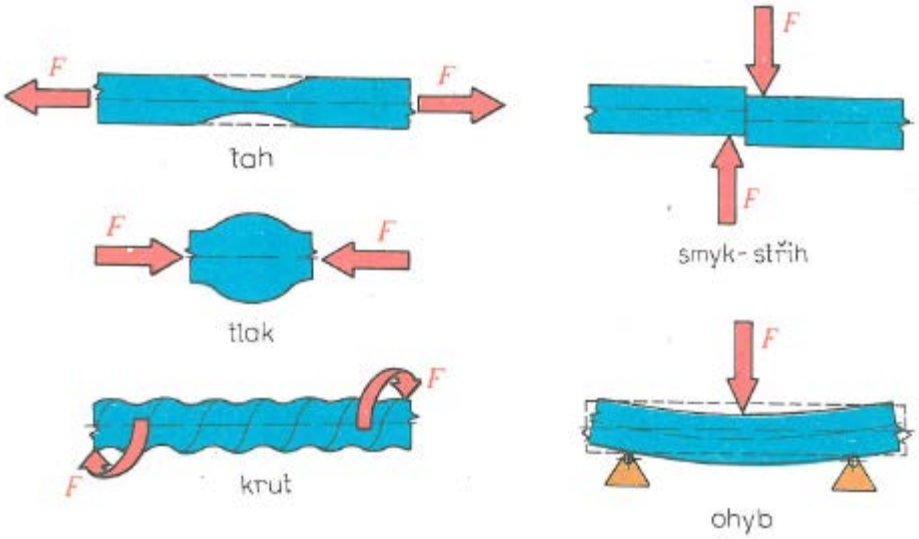
této práce bude zkoušet objemový epoxidový materiál s různými obsahy hydrofobních činidel. Následně dojde ke srovnání a zhodnocení výsledků a k výzkumu výsledných mechanických vlastností s důrazem na tvrdost.

Ve studii [1], která je odrazovým můstkem pro tuto práci, jsou shrnuty následující závěry: přidání hydrofobních činidel a silanů do epoxidu má podpůrný vliv na hydrofobnost a snižuje adhezi ledu, zároveň dochází k opoždění nukleace. Hodnota smykového napětí nutného k odstranění ledu z povrchu je pro jeden ze vzorků 50 kPa při -20 °C, přičemž obecně vzato by ledofobní materiál neměl překročit hodnotu 100 kPa při -20 °C [1].

3 Mechanické vlastnosti plastů

Mechanické vlastnosti plastů jsou různorodé. Silně závisí na teplotě a rychlosti deformace. Na mechanické vlastnosti v praxi má vliv tvar výrobku a stav materiálu po zpracování – orientace makromolekul, vnitřní pnutí, krystalizace a stupeň vytvrzení [15].

Mechanické vlastnosti vyjadřují odezvu materiálu na namáhání vnějšími silami. Základními typy namáhaní jsou: tah, tlak, krut, smyk a ohyb (Obr. 12). Tato namáhání málokdy působí samostatně, většinou dochází ke kombinaci více typů namáhání. Vlastnosti, které materiál musí mít, aby těmto namáháním odolával, jsou zejména pevnost, pružnost, tvrdost, tvárnost a houževnatost [16].



Obr. 12: Základní typy namáhání [16]

Pro vhodný návrh materiálu výrobku je nezbytná znalost mechanických vlastností materiálů, kterou lze získat například prostřednictvím zkoušek.

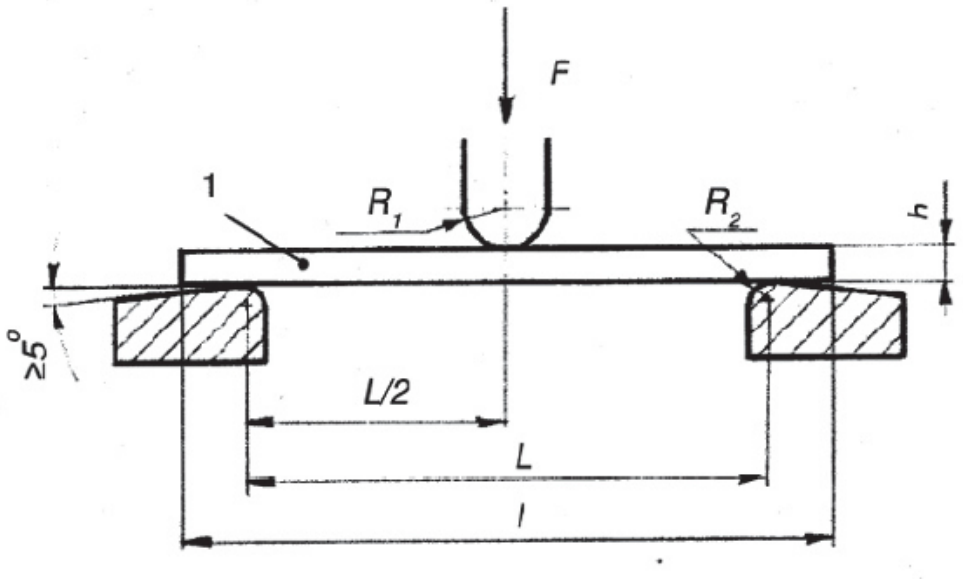
4 Zkoušky mechanických vlastností plastů

Zkoušky mechanických vlastností se většinou provádějí na vzorcích zhotovených ze stejného materiálu, ze kterého je i výsledná součást. Mechanické zkoušky lze dělit na zkoušky statické a zkoušky dynamické. Mechanické zkoušky statické jsou takové, kdy se materiál zatěžuje postupně bez rázu. Dynamické zkoušky jsou zkoušky rázové, kdy se použije velké množství energie najednou [16].

4.1 Zkouška ohybem

Díly jsou v praxi často namáhány ohybem, proto je dobré znát jejich ohybové charakteristiky. Cílem zkoušky je určit pevnost v ohybu, modul pružnosti v ohybu a další odvozené ohybové vlastnosti materiálu. Jedná se o krátkodobou zkoušku, není proto vhodná pro určování konstrukčních parametrů. Výsledek zkoušky slouží především k porovnávání materiálů či jako kontrola kvality. Zkouška ohybem je normalizovaná dle ČSN EN ISO 178 [17].

Průběh zkoušky je následující: zkušební těleso podepřené dvěma podpěrami je uprostřed jejich vzdálenosti (v místě $L/2$ [mm]) zatěžováno silou F [N] a to konstantní rychlostí. Jedná se tedy o tříbodový ohyb. Zatěžování probíhá, dokud se těleso nezlomí, nebo do doby, kdy deformace dosáhne 5 %. Záleží, co nastane dříve. Cílem zkoušky je získat závislost působící síly F na výsledném průhybu s [mm], který se měří uprostřed mezi podpěrami, v místě působení síly. Zkouška je kombinace namáhání tlakem a tahem současně. Princip zkoušky je znázorněn na Obr. 13 [17,18].



Obr. 13: Ohybová zkouška (výchozí bod) [17]

Zkouška ohybem je vhodná pro izotropní i pro anizotropní materiály. Směr namáhaní zkušebních těles však musí odpovídat směru namáhání výrobku v praxi. Vhodné rozměry zkušebních těles a vzdálenosti podpěr se odvíjejí od druhu zkoušeného materiálu. Například pro termoplasty a termoplasty vyztužené krátkými vlákny budou vhodné rozměry jiné, než pro plasty vyztužené rohožemi, tkaninami nebo smíšenými výztužemi. Rozměry a vzdálenosti podpěr jsou specifikovány pro různé materiálové třídy normou, stejně tak i hodnoty zkušebních rychlostí v [mm.min^{-1}] [17].

Z důvodu statistického vyhodnocení je třeba podrobit zkoušce pět a více vzorků. Výsledek zkoušky se nebere jako platný, zlomí-li si vzorek mimo

střední třetinu rozpětí podpěr. V takovém případě je nutné zkoušku zopakovat s jiným vzorkem. Zároveň platí, že vzorky se před zkouškou kondicionují a to dle normy. Pokud k tomu nejsou příslušné informace k dispozici, platí přednostně následující podmínky: teplota 23 °C a vlhkost 50 % [17].

4.1.1 Vyhodnocení ohybové zkoušky

Během zkoušky se zaznamenává závislost působící síly F a odpovídajícího průhybu s. Průhyb vyjadřuje vzdálenost, o kterou se v místě vprostřed mezi podpěrami vychýlí horní či dolní plocha zkušebního tělesa. Smluvní průhyb s_c [mm] je definován jako bod, kdy je dosaženo hodnoty 1,5x tloušťky vzorku h. Hodnoty důležitých napětí, průhyby a deformace se určí z křivek závislostí síla – průhyb, deformace – průhyb [17].

Napětí v ohybu σ_f se vypočítá po dosazení naměřených hodnot do vzorce:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \qquad [MPa] \tag{3}$$

kde F je působící síla [N]

L je vzdálenost podpěr [mm]

b je šířka vzorku [mm] a h je tloušťka vzorku [mm]

Zjišťuje se:

σ_{fB} Napětí v ohybu v momentu lomu [MPa]

σ_{fM} Pevnost v ohybu [MPa]

σ_{fC} Napětí v ohybu při domluveném průhybu [MPa]

Z naměřených hodnot se dá stanovit tzv. deformace ohybem ε_f [-], počítaná dle vzorce:

$$\varepsilon_f = \frac{6sh}{L^2} \qquad [-] \tag{4}$$

kde s je průhyb [mm]

h je tloušťka tělesa [mm]

Určuje se:

ε_{fB} deformace ohybem v okamžiku lomu [-]

ε_{fM} deformace ohybem na mezi pevnosti v ohybu [-]

Pro určení modulu pružnosti v ohybu E je nezbytné nejprve určit průhyby s_1 a s_2, které odpovídají hodnotám deformace ohybem $\sigma_{f1} = 0{,}0005$ a $\sigma_{f2} = 0{,}0025$ podle následující rovnice [17]:

$$s_i = \frac{\varepsilon_{fi} L^2}{6h} \qquad [mm] \tag{5}$$

i = 1,2

kde s_1 a s_2 jsou žádané průhyby [mm]

ε_{f1} a ε_{f2} jsou k nim odpovídající deformace ohybem [-]

L je vzdálenost podpěr [mm]

h je tloušťka vzorku [mm]

Pro průhyby je následně potřeba nalézt v diagramu příslušné síly, pak už lze spočítat jednotlivá napětí σ_{f1} a σ_{f2}. Konečně, modul pružnosti E v ohybu se určí dle vzorce [17]:

$$E = \frac{\sigma_{f2} - \sigma_{f1}}{\varepsilon_{f2} - \varepsilon_{f1}} \qquad [MPa] \tag{6}$$

kde σ_{f1} a σ_{f2} [MPa] jsou napětí v ohybu pro průhyby s_1 a s_2 [mm]

Tyto rovnice a vztahy jsou platné pouze v oblasti linearity napětí a deformace. Lze tedy říct, že ve většině případů jsou přesné pouze pro malé průhyby [17].

4.2 Měření tvrdosti (Shore)

Tvrdost vyjadřuje odpor materiálu proti vniknutí cizího tělesa, jedná se tedy o důležitou charakteristiku. Pro polymery platí, že při zatěžování dochází k deformaci v celém jejich objemu. Tvrdost u polymerů tudíž vyjadřuje odpor objemu celého zkoušeného vzorku materiálu proti vniknutí zkušebního tělesa [19].

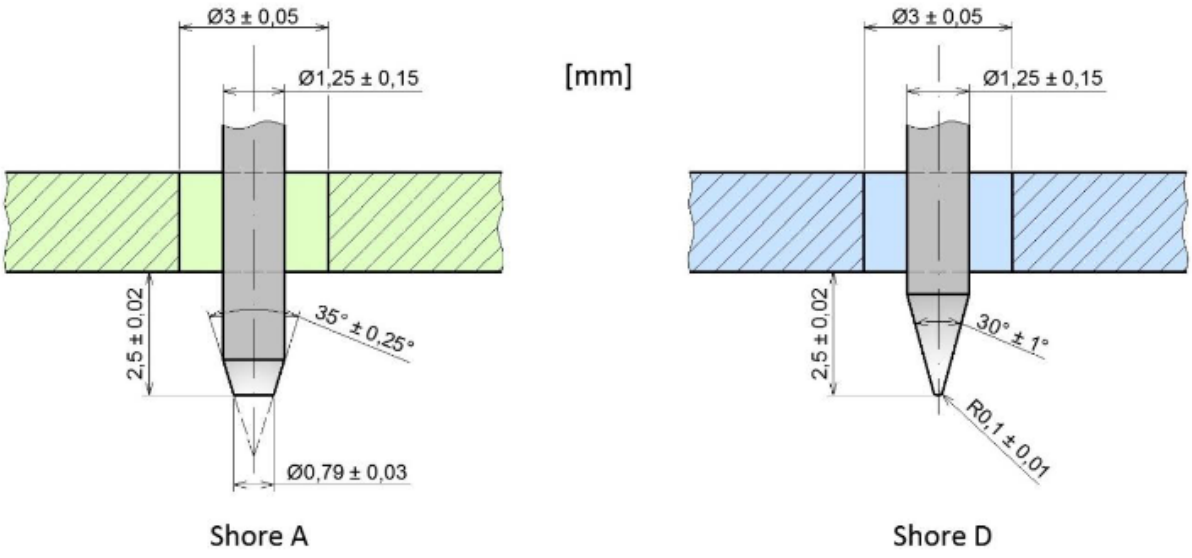
Zkoušky tvrdosti lze v zásadě dělit na dvě skupiny: na zkoušky vnikací a na zkoušky elastické interakce povrchu a zkušebního tělesa. Zkouška vnikací je obvyklá především pro kovy a sklo, pro polymery se častěji používá zkouška elastické interakce povrchu a zkušebního tělesa [19].

Na rozdíl od zkoušky tahem či zkoušky ohybem zde není nutnost přesně definovaného zkoušeného vzorku. Pro zkoušku je možnost použít přímo povrch výrobku. Nezbytnou podmínkou je však existence dvou rovnoběžných ploch na tomto vzorku. Před samotnou zkouškou je nutno povrch vzorku dostatečně upravit, aby nedošlo k ovlivnění zkoušky. Stejně jako u předešlých zkoušek je zde důležité kondicionování. Přesné podmínky uvádí norma ČSN EN ISO 291 [19].

Metoda Shore je založena na vtlačování geometricky definovaného zkušebního tělesa do povrchu zkoušeného vzorku. Výsledná hodnota tvrdosti je nepřímo úměrná hloubce vtlačení hrotu, ale záleží i na modulu pružnosti a viskoelastických vlastnostech materiálu. Způsob zkoušky a samotné provedení je definováno normou ČSN EN ISO 868. Důležité je dodržet předepsanou dobu zatížení z důvodu vzniku trvalých deformací. Metoda Shore rozlišuje několik stupnic, každá je určena jinak tvrdému typu materiálu. Stupnice se liší zkušebním zatížením i vnikacím tělesem, není proto možný přepočet z jedné stupnice na druhou. Nejběžnější jsou stupnice Shore A a Shore D [20,21].

Shore A (Obr. 14, vlevo) používá jako vnikací těleso komolý kužel o vrcholovém úhlu 35°. Zkušební zatížení zajištěné pružinou je 8,05 N. Tloušťka vzorku se liší dle normy, ale je to 4 nebo 6 mm. V případě nedostatečné tloušťky vzorku je možné dát více vrstev na sebe k dosažení požadované hodnoty. Tato stupnice je určena pro měkké materiály – např. pro kaučuk, měkkou gumu [20,21].

Shore D (Obr. 14, vpravo) používá jako vnikací těleso kužel o vrcholovém úhlu 30°. Vrchol kuželu není ostrý, je zde rádius 0,1 mm. Zkušební zatížení pružinou je 44,45 N, minimální tloušťka vzorku je 6 mm. Také zde platí možnost vrstvení. Stupnice je určena pro tvrdé gumy, plasty či akrylové sklo [20,21].



Obr. 14: Tvrdoměry Shore A; Shore D [21]

4.2.1 Průběh zkoušky

Zkušební vzorek je umístěn na vodorovný tvrdý povrch. Následuje přiložení tvrdoměru kolmo ke vzorku. Musí platit, že vzdálenost mezi špičkou tvrdoměru a okraje vzorku je alespoň 9 mm. Opěrná patka tvrdoměru je rychle přitlačena ke vzorku, nesmí dojít ke ztrátě rovnoběžnosti. Tlak je nastaven tak, aby docházelo k pevnému kontaktu celé plochy opěrné patky a zkušebního vzorku. Tvrdost lze stanovit do 1 s od okamžiku dotyku

(tzv. okamžitá tvrdost) nebo po uplynutí stanoveného času (nejčastěji 15 s). Měření je nutno minimálně pětkrát opakovat na různých místech vzorku, která jsou od sebe vzdálená alespoň 6 mm. Výsledná tvrdost je počítána jako aritmetický průměr [21].

Tvrdost metodou Shore je v rozsahu 0 až 100, přičemž 0 je rovna plnému vtlačení hrotu a 100 je rovna nulovému vtlačení hrotu. Zápis může vypadat například [21]:

HShD / 15:70

kde D je typ stupnice (typ tvrdoměru)

15 je doba působení zkušebního zatížení v sekundách

70 je výsledná hodnota tvrdosti

Tvrdost metodou Shore lze měřit i prostřednictvím tzv. Shoreho skleroskopu a to zkouškou odrazem. Jedná se o dynamicko-elastickou zkoušku, která funguje na principu odrazu zkušebního tělesa spuštěného z určité výšky od zkoušeného vzorku. Hodnota tvrdosti se určí z výšky doskoku. Tato metoda se dnes však používá velmi zřídka [22].

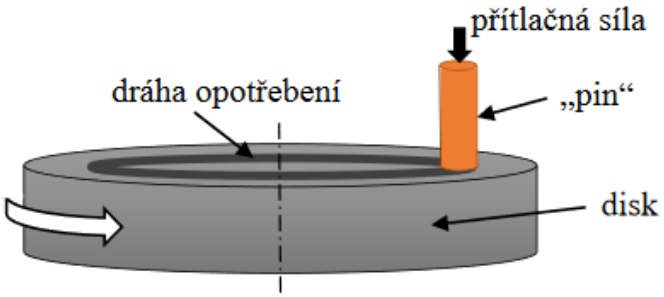
4.3 Tribologická měření (Tribometr)

Cílem tribologických měření je určit zejména koeficient tření, odolnost proti otěru, míru opotřebení a další [23].

Tření je fyzikální jev vznikající na rozmezí dvou těles, relativně se pohybujících vůči sobě v těsném kontaktu. Koeficient tření je veličina charakterizující odpor povrchů z dvou různých materiálů při tření. Odolnost proti otěru je schopnost materiálu odolávat povrchovému opotřebení [23].

Zařízení sloužící k provedení tribologických měření se nazývá tribometr. Tribometrů je dnes velké množství druhů, základním principem je však tření dvou těles. Existují dokonce tribometry schopné simulovat vakuum, korozivní prostředí nebo zvýšené či snížené teploty. Druhy tribometrů se liší konstrukcí dle potřeb měření. Příkladem může být metoda „Pin on disc“ znázorněna na Obr. 15 [23].

Tribometr se skládá ze dvou prvků: ze zatěžovacího tělíska a ze vzorku. Zatěžovací tělísko je v klidu, vzorek koná motoricky vyvolaný pohyb. Případně koná pohyb jak vzorek, tak zatěžovací tělísko. Tření způsobené kontaktem těchto prvků je snímáno prostřednictvím čidel a senzorů, které zaznamenávají třecí sílu, normálové zatížení a další parametry důležité pro vyhodnocení zkoušky [23].



Obr. 15: Princip tribometru „Pin on disc" [24]

III Experimentální část

Cílem experimentální části je zhodnotit vliv přítomnosti hydrofobních činidel v epoxidové pryskyřici na její mechanické vlastnosti. Tento materiál je volen z důvodu možné nízké adheze k ledu bez nutnosti strukturovat povrch. To by vedlo k volumetrickým icephobic vlastnostem, které by byly do jisté míry zachovány i po otěru. Ve studii [1] byl vytvořen icephobic povlak, který bylo třeba ředit v přesných poměrech dle relativně složité procedury. Záměrem práce je vytvoření bulkového materiálu jednoduše a bez nutnosti komplikované přípravy.

Experimentální část této práce se skládá ze tří materiálových zkoušek – ze zkoušky icephobicity, ze zkoušky tvrdosti dle metody Shore D a ze zkoušky drsnosti povrchu. Experimentálním materiálem je dvousložkový epoxid Acast 650. Jedná se o všestranně použitelnou, minerály plněnou a poměrně levnou epoxidovou pryskyřici. Její vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 1. Použitým aditivem je hydrofobní činidlo Tego Phobe 1500 N, jehož základní vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 2 [25].

Tab. 1: Vlastnosti dvousložkového epoxidu Acast 650; upraveno z [25]

Tvrdost	90 HShD
Viskozita	7000 mPas
Specifická hmotnost	1,52 g/cm^3
Zpracování	20 min
Odformování	1 hod
Barva	krémově bílá
Míchání	100 dílů složky A : 12 dílů složky B (hmotnostně)
Smrštění	0,1 %

Tab. 2: Vlastnosti hydrofobního činidla Tego Phobe 1500 N [26]

Obsah aktivní složky	cca 50 %
Barva	průhledná
Chemický popis	roztok aminofunkčních polysiloxanů
Rozpouštědlo	Ipropylene glycol mono-n-butyl ether / isoparrafine hydrocarbon C10-C13 40-10%

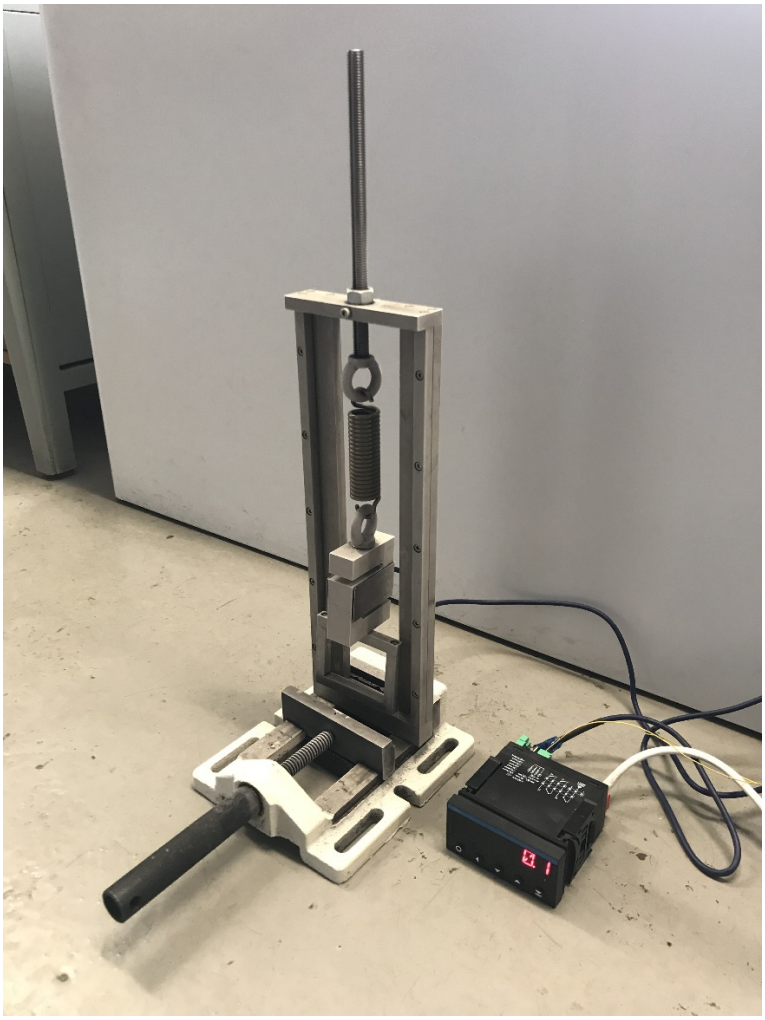
Před samotnými zkouškami je třeba připravit epoxidové vzorky ve formě obdélníkových destiček o rozměrech 120x80x10 mm. Toho je dosaženo smícháním obou složek epoxidu Acast 650 v poměru dle doporučení výrobce. Tím je získán čistý epoxid v tuhém stavu. Pro další vzorky je do směsi navíc vmícháno určené množství hydrofobního činidla Tego Phobe 1500 N. Obě zkoušky se provádí pro čtyři druhy vzorků (Tab. 3).

Tab. 3: Popis a označení jednotlivých vzorků

Popis	**Označení**
Čistý epoxid	E
Epoxid a 5 hm. % hydrofobního činidla	E5
Epoxid a 10 hm. % hydrofobního činidla	E10
Epoxid a 20 hm. % hydrofobního činidla	E20

5 Zkouška icephobicity

Zkouška icephobicity probíhá na speciálně navrženém trhacím přístroji s tenzometrem a vyhodnocovacím digitálním zařízením (Obr. 16). Díky tomuto zařízení lze odečítat sílu v newtonech během zkoušky a v momentě utržení ledu z povrchu testovaného materiálu.



Obr. 16: Měřící zařízení pro zkoušku icephobicity

5.1 Průběh zkoušky

Na testovaný vzorek (epoxid, případně epoxid s přídavkem hydrofobního činidla), který má formu obdélníkové destičky, je pomocí silikonové formy nanesena voda. Následně se vzorek nechá zmrznout v mrazicím boxu. Tím vzniká sloupec ledu přimrzlý ke zkoušenému materiálu. Následuje sundání silikonové formy, umístění vzorku do měřicího přístroje a upevnění vzorku dotažením spodní závitové tyče. Mezi upínací čelistí a vzorkem je ocelová destička, aby nedocházelo ke tření mezi vzorkem a vedením přípravku a bylo tak možné získat co nejpřesnější výsledky. Ledový sloupec je pak umístěn do ocelového rámečku. Utahováním matice na horní závitové tyči konstantní rychlostí dochází k namáhání ledového sloupce silou. Matice se utahuje až do momentu, kdy dojde k odtržení ledu od povrchu

testovaného vzorku. Výsledná síla, tedy síla, kdy dojde k odtržení, se zaznamená. Měření se opakuje pro každý ze vzorků pětkrát.

Podmínky této materiálové zkoušky jsou následující:

- kontaktní plocha S mezi ledem a vzorkem je 1610 mm^2
- teplota při odtrhávání je v rozmezí -20 až -18 °C
- rychlost zatěžování je 5 mm/min

Díky známé kontaktní ploše S $[m^2]$ a známé působící síle F $[N]$ lze snadno dopočítat smykové napětí τ $[Pa]$:

$$\tau = \frac{F}{S} \qquad [Pa] \tag{7}$$

5.2 Výsledky zkoušky

Naměřené hodnoty sil pro jednotlivé vzorky jsou zaznamenány v Tab. 4 – 7. Z těchto hodnot jsou dopočítána smyková napětí (τ) dle rovnice (7), následně jejich střední hodnoty a směrodatné odchylky (SD).

Tab. 4: Adheze k ledu čistého epoxidu (E)

Číslo měření	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
F [N]	301	235	306	283	254
τ [kPa]	186,96	145,96	190,06	175,78	157,76
$\bar{\tau}$ [kPa]	171,30				
SD [kPa]	16,99				

Tab. 5: Adheze k ledu epoxidu a 5 hm. % hydrofobního činidla (E5)

Číslo měření	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
F [N]	149	253	125	133	175
τ [kPa]	92,55	157,14	77,64	82,61	108,70
$\bar{\tau}$ [kPa]	103,73				
SD [kPa]	28,74				

Tab. 6: Adheze k ledu epoxidu a 10 hm. % hydrofobního činidla (E10)

Číslo měření	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
F [N]	151	129	147	183	177
τ [kPa]	93,79	80,12	91,30	113,66	109,94
$\bar{\tau}$ [kPa]	97,76				
SD [kPa]	12,41				

Tab. 7: Adheze k ledu epoxidu a 20 hm. % hydrofobního činidla (E20)

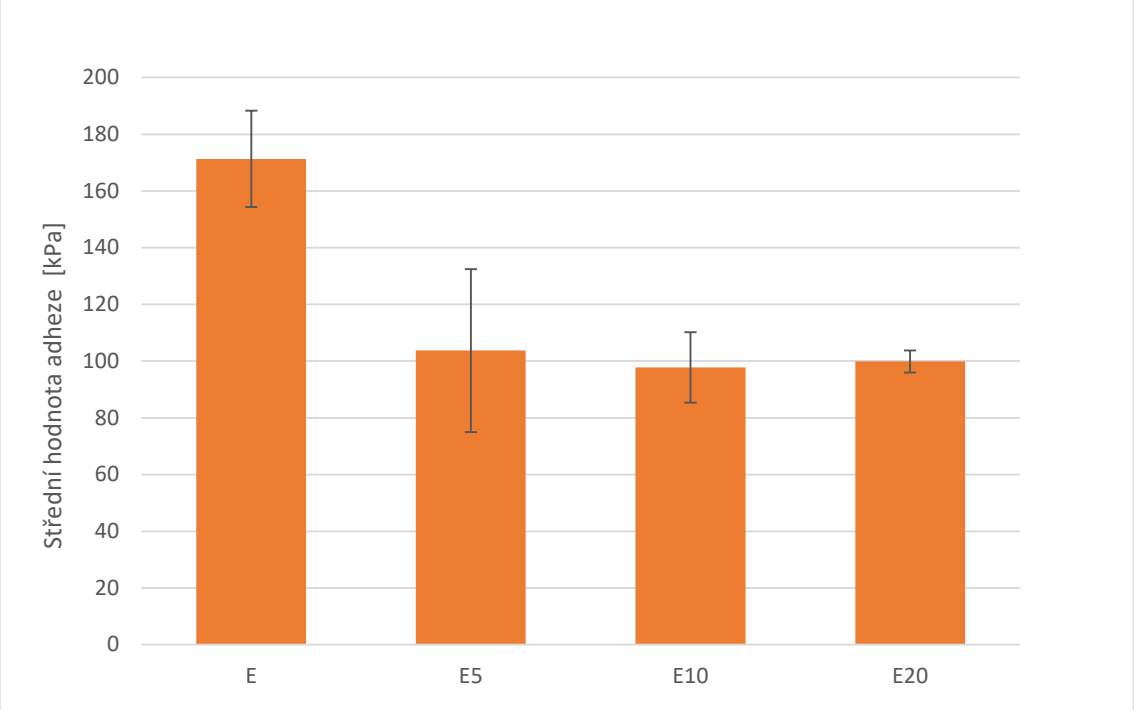
Číslo měření	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
F [N]	158	170	164	151	161
τ [kPa]	98,14	105,59	101,86	93,79	100,00
$\bar{\tau}$ [kPa]	99,88				
SD [kPa]	3,92				

Z porovnání dopočtených středních hodnot smykových napětí je zřejmé, že samotná přítomnost hydrofobního činidla snižuje adhezi ledu k povrchu vzorku – smykové napětí potřebné k odtržení ledu je nižší.

Pro vzorek E je střední hodnota smykového napětí rovna 171,30 kPa, pro vzorek E5 je tato hodnota rovna 103,73 kPa, pro vzorek E10 je rovna 97,76 kPa a pro vzorek E20 je pak rovna 99,88 kPa. Střední hodnoty adheze a jejich směrodatné odchylky jsou graficky zobrazeny v Obr. 17.

Rozdíly hodnot adheze vyplývající z různých koncentrací činidla jsou však poměrně nízké. Proto je nutné brát v potaz i rozptyl naměřených hodnot.

Nejvyšší rozptyl naměřených hodnot vykazuje vzorek E5, jeho směrodatná odchylka je 28,74 kPa. Z dopočtených hodnot směrodatných odchylek u jednotlivých vzorků lze vidět, že rozptyl naměřených hodnot s rostoucí koncentrací klesá. Nejnižšího rozptylu dosahuje vzorek E20 – jeho směrodatná odchylka má hodnotu 3,92 kPa.



Obr. 17: Střední hodnoty adheze a jejich směrodatné odchylky

Z výsledků měření nelze s jistotou říci, že s vyšší koncentrací činidla adheze klesá – pro prověření této skutečnosti by bylo vhodné provést větší počet měření.

6 Zkouška tvrdosti metodou Shore D

S ohledem na skutečnost, že epoxid patří mezi tvrdší materiály, zkouška tvrdosti probíhá dle metody Shore D. Jedná se o normovanou materiálovou zkoušku. Princip zkoušky a její průběh je podrobně popsán v teoretické části, konkrétně v kapitole 4.3 Měření tvrdosti (Shore).

6.1 Výsledky zkoušky

Tab. 8: Tvrdost čistého epoxidu dle metody Shore D (E)

Číslo měření	1	2	3	4	5
$HShD$	87	88	83	88	86
$\overline{HShD}$	86,40				
SD	1,85				

Tab. 9: Tvrdost epoxidu a 5 hm. % hydrofobního činidla dle metody Shore D (E5)

Číslo měření	1	2	3	4	5
$HShD$	81	85	84	82	85
$\overline{HShD}$	83,40				
SD	1,62				

Tab. 10: Tvrdost epoxidu a 10 hm. % hydrofobního činidla dle metody Shore D (E10)

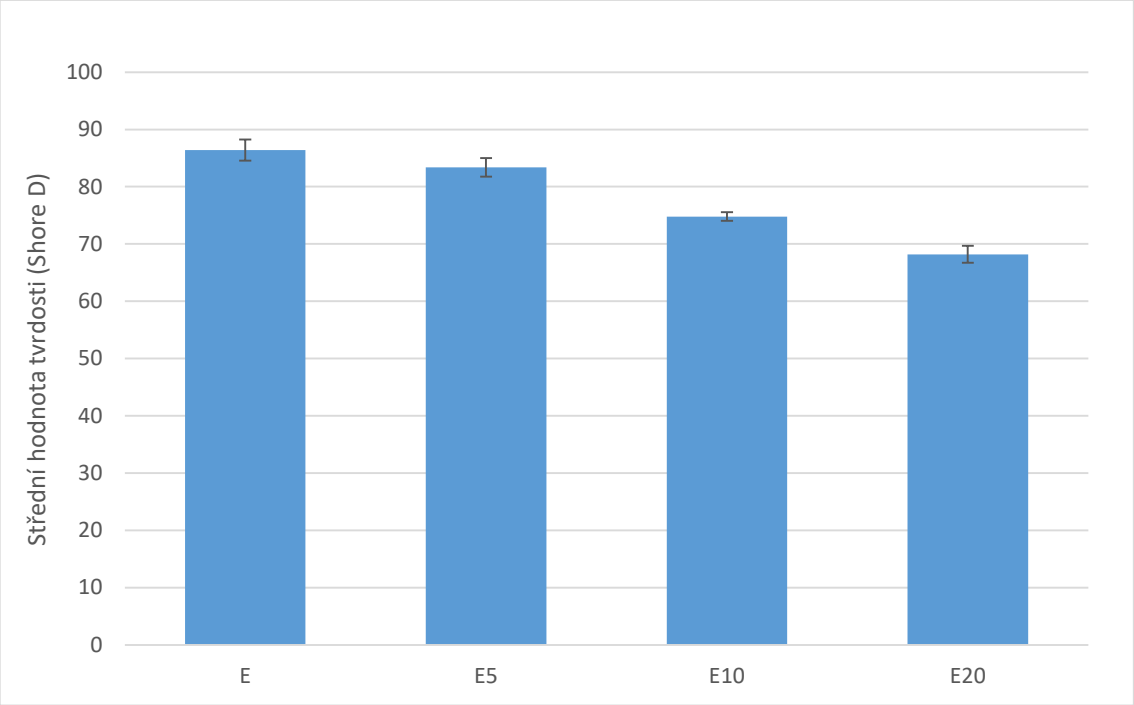
Číslo měření	1	2	3	4	5
$HShD$	74	75	74	75	76
$\overline{\mathrm{HShD}}$	74,80				
SD	0,75				

Tab. 11: Tvrdost epoxidu a 20 hm. % hydrofobního činidla dle metody Shore D (E20)

Číslo měření	1	2	3	4	5
$HShD$	67	70	67	70	67
$\overline{\mathrm{HShD}}$	68,20				
SD	1,47				

Naměřené a dopočtené hodnoty této materiálové zkoušky jsou uvedeny v Tab. 8 – 11. Z porovnání středních hodnot tvrdostí pro jednotlivé vzorky je zřejmé, že čím vyšší je podíl hydrofobního činidla ve vzorku, tím nižší je výsledná tvrdost. Je zřetelné, že už pouhá přítomnost hydrofobního činidla způsobuje pokles tvrdosti vzorku. Střední hodnota tvrdosti pro vzorek E je HShD 86,40, pro vzorek E5 je to HShD 83,40, pro vzorek E10 je hodnota

HShD 74,80 a konečně pro vzorek E20 je hodnota HShD 68,20. Z výpočtu směrodatných odchylek je vidět, že nejvyššího rozptylu naměřených hodnot dosahuje vzorek samotného epoxidu E, kde směrodatná odchylka je rovna hodnotě HShD = 1,85. Naopak nejnižší rozptyl hodnot vykazuje vzorek E10, kde směrodatná odchylka je pouze HShD 0,75. Střední hodnoty tvrdostí a jejich směrodatné odchylky jsou graficky zobrazeny v Obr. 18.



Obr. 18: Střední hodnoty tvrdostí a jejich směrodatné odchylky

Tvrdost dle metody Shore D pro čistý epoxid se blíží katalogové hodnotě udávané výrobcem HShD 90. Drobná odchylka od této hodnoty může být způsobena například nedostatečným rozmícháním vytvrzující složky při přípravě epoxidu.

7 Zkouška drsnosti povrchu

Dle teorie popsané v teoretické části v kapitole 1.1 Smáčivost by na ledofobnost mohla mít vliv i samotná drsnost povrchu. Zkouška drsnosti povrchu se provádí tzv. profilometrem. Pro účely následujících měření je použit optický profilometr Zygo NewView 7200.

Podmínka této materiálové zkoušky je následující:

- Základní délka l (délka, na které je drsnost měřena) je rovna 0,5 mm

7.1 Výsledky zkoušky

Tab. 12: Drsnost čistého epoxidu (E)

Číslo měření	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Ra [nm]	116	109	132	128	126	113
Rz [nm]	870	1479	588	471	360	381
$\overline{\mathrm{Ra}}$ [nm]	120,67					
$\overline{Rz}$ [nm]	691,50					

Tab. 13: Drsnost epoxidu a 5 hm. % hydrofobního činidla (E5)

Číslo měření	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Ra [nm]	53	56	129	29	63	90
Rz [nm]	308	206	762	154	202	272
$\overline{\mathrm{Ra}}$ [nm]	70,00					
$\overline{Rz}$ [nm]	317,33					

Tab. 14: Drsnost epoxidu a 10 hm. % hydrofobního činidla (E10)

Číslo měření	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Ra [nm]	99	96	175	60	52	103
Rz [nm]	305	319	918	242	219	284
$\overline{\mathrm{Ra}}$ [nm]	97,50					
$\overline{Rz}$ [nm]	381,17					

Tab. 15: Drsnost epoxidu a 20 hm. % hydrofobního činidla (E20)

Číslo měření	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Ra [nm]	78	112	95	94	82	82
Rz [nm]	265	300	301	292	253	244
$\overline{\mathrm{Ra}}$ [nm]	90,50					
$\overline{Rz}$ [nm]	275,83					

Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 12 – 15. Z výsledků je patrné, že vzorek čistého epoxidu E vykazuje vyšší drsnost než vzorky s hydrofobním činidlem. Střední hodnota střední aritmetické úchylky profilu vzorku E je 120,67 nm, nejvyšší střední hodnota největší výšky profilu Rz je pak 691,50 nm. Naopak nejnižší střední hodnotu střední aritmetické úchylky má vzorek E5 s hodnotou 70 nm a nejnižší střední hodnotu Rz má vzorek E20 s hodnotou 275,83 nm.

Vyšší drsnost nemodifikovaného vzorku (čistého epoxidu) by mohla mít vliv na adhezi ledu k povrchu. Nicméně tato skutečnost by šla potvrdit pouze za předpokladu, že by byly při měření adheze ledu k povrchu všechny vzorky stejně hladké.

IV Diskuze a závěr

Hlavní motivací této bakalářské práce bylo získat materiál na bázi epoxidu, který by díky vhodným aditivům vykazoval nízkou adhezi k ledu a zároveň porovnat vliv těchto aditiv na výsledné mechanické vlastnosti. Toho bylo dosaženo v experimentální části prostřednictvím přípravy vzorků, měření a zkoušek. Aby se materiál mohl považovat za ledofobní, hodnota smykového napětí nutná k odstranění ledu z povrchu by za teploty −20 °C neměla být vyšší než 100 kPa. Po vyhodnocení výsledků a výpočtu středních hodnot smykových napětí se lehce pod tuto hodnotu dostaly vzorek epoxidu Acast 650 s 10 hm. % hydrofobního činidla Tego Phobe 1500 N, kde střední hodnota smykového napětí vyšla 97,76 kPa a vzorek epoxidu s 20 hm. % hydrofobního činidla, kde střední hodnota smykového napětí vyšla 99,88 kPa. Tyto výsledky je ale vzhledem k relativně velkým směrodatným odchylkám třeba brát s rezervou a z tohoto důvodu nelze jednoznačně tvrdit, že se jedná o icephobic materiál. Rozdíl mezi čistým epoxidem a epoxidem obsahujícím hydrofobní činidlo je však znatelný – střední hodnota smykového napětí u čistého epoxidu vychází 171,30 kPa. Srovná-li se střední hodnota smykového napětí u čistého epoxidu a střední hodnota smykového napětí u epoxidu s 10 hm. % hydrofobního činidla, vychází, že smykové napětí nutné k odstranění ledu je téměř o 43 % nižší ve prospěch vzorku s činidlem.

Z mechanických vlastností se experimentální část práce zaměřila pouze na tvrdost a následně i drsnost povrchu. Tvrdost byla měřena dle metody Shore D, drsnost pomocí optického profilometru. Z naměřených a dopočtených výsledků lze konstatovat, že přidání hydrofobního činidla má na tvrdost poměrně značný vliv – s rostoucí koncentrací činidla tvrdost povrchu klesá. Nejvyšší střední hodnotu tvrdosti vykázal vzorek čistého epoxidu s hodnotou HShD 86,40. Naopak nejnižší střední hodnotu tvrdosti vykázal vzorek epoxidu s 20 hm. % hydrofobního činidla s hodnotou HShD 68,20. Rozdíl středních hodnot tvrdostí čistého epoxidu a epoxidu s 20 hm. % hydrofobního činidla je cca 21 %. Nejvyšší drsnost byla

naměřena u vzorku čistého epoxidu. Zdali však tato vyšší hodnota drsnosti měla vliv na adhezi ledu k povrchu nelze z provedených měření jednoznačně říci.

Z uvedených výsledků plyne, že přítomnost hydrofobního činidla Tego Phobe 1500 v epoxidové pryskyřici Acast 650 vede ke snížení adheze ledu k povrchu. Na druhé straně však snižuje tvrdost a tím i otěruvzdornost, která je v řadě potenciálních využití neméně důležitá. S přihlédnutím k vlastním, relativně vysokým, hodnotám adheze ledu ke zkoušeným povrchům není tento materiál pro icephobic aplikace zajímavý.

Seznam obrázků

Obr. 1: Kontaktní úhel popsán Youngovou rovnicí (pro hladký povrch) [2] 13
Obr. 2: Wenzelův model drsnosti [2] 14
Obr. 3: Model Cassieho-Baxtera [2] 14
Obr. 4: Hystereze kontaktního úhlu [4] 15
Obr. 5: Lotosový list [5] 16
Obr. 6: Homogenní a heterogenní nukleace ledu [2] 18
Obr. 7: Superhydrofobní povrch (vlevo), SLIPS (vpravo) [2] 19
Obr. 8: Porušení stavu Cassieho-Baxtera; upraveno z [2] 21
Obr. 9: Makromolekula epoxidu v idealizované podobě [7] 24
Obr. 10: Glycidilová skupina; upraveno z [9] 24
Obr. 11: Epoxidová skupina; upraveno z [9] 25
Obr. 12: Základní typy namáhání [16] 28
Obr. 13: Ohybová zkouška (výchozí bod) [17] 29
Obr. 14: Tvrdoměry Shore A; Shore D [21] 33
Obr. 15: Princip tribometru „Pin on disc" [24] 35
Obr. 16: Měřící zařízení pro zkoušku icephobicity 38
Obr. 17: Střední hodnoty adheze a jejich směrodatné odchylky 41
Obr. 18: Střední hodnoty tvrdostí a jejich směrodatné odchylky 43

Seznam tabulek

Tab. 1: Vlastnosti dvousložkového epoxidu Acast 650; upraveno z [25] 36
Tab. 2: Vlastnosti hydrofobního činidla Tego Phobe 1500 N [26] 37
Tab. 3: Popis a označení jednotlivých vzorků 37
Tab. 4: Adheze k ledu čistého epoxidu (E) 39
Tab. 5: Adheze k ledu epoxidu a 5 hm. % hydrofobního činidla (E5) 40
Tab. 6: Adheze k ledu epoxidu a 10 hm. % hydrofobního činidla (E10) 40
Tab. 7: Adheze k ledu epoxidu a 20 hm. % hydrofobního činidla (E20) 40
Tab. 8: Tvrdost čistého epoxidu dle metody Shore D (E) 42
Tab. 9: Tvrdost epoxidu a 5 hm. % hydrofobního činidla dle metody Shore D (E5) 42
Tab. 10: Tvrdost epoxidu a 10 hm. % hydrofobního činidla dle metody Shore D (E10) 42
Tab. 11: Tvrdost epoxidu a 20 hm. % hydrofobního činidla dle metody Shore D (E20) 42
Tab. 12: Drsnost čistého epoxidu (E) 44
Tab. 13: Drsnost epoxidu a 5 hm. % hydrofobního činidla (E5) 44
Tab. 14: Drsnost epoxidu a 10 hm. % hydrofobního činidla (E10) 45
Tab. 15: Drsnost epoxidu a 20 hm. % hydrofobního činidla (E20) 45

Bibliografie

[1] WU, Xinghua, Shunli ZHENG, Daniel A. BELLIDO-AGUILAR, Vadim V. SILBERSCHMIDT a Zhong CHEN. Transparent icephobic coatings using bio-based epoxy resin. *Materials and Design* [online]. 2018, (140), 516-523 [cit. 2020-10-18]. ISSN 0264-1275. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2017.12.017

[2] SHEN, Yizhou, Xinghua WU, Jie TAO, Chunling ZHU, Yuekun LAI a Zhong CHEN. Icephobic materials: Fundamentals, performance evaluation, and applications. *Progress in Materials Science* [online]. 2019, (103), 509-557 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2019.03.004

[3] *Úhel smáčení* [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_es-001/hesla/uhel_smaceni.html

[4] KRÁSNÝ, Ivo. *Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů* [online]. Zlín, 2010 [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14169/kr%C3%A1sn%C3%BD_2010_dp.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Lubomír Lapčík.

[5] Life is as fragile as a drop of water on a lotus leaf. *Helios Dermatology* [online]. [cit. 2020-12-03]. Dostupné z: https://www.heliosderm.com/lotus-leaf-las-vegas-dermatology.html

[6] IRAJIZAD, Peyman, Sina NAZIFI a Hadi GHASEMI. Icephobic surfaces: Definitions and figures of merit. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2019, (269), 203-218 [cit. 2020-12-04]. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cos.2019.04.005

[7] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.

[8] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery* [online]. 2015 [cit. 2020-10-18]. ISBN 978-80-88058-68-7. Dostupné z: https://publi.cz/eknihy/?book=180-polymery

[9] MLEZIVA, Josef a Jaromír ŠŇUPÁREK. *Polymery: výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přeprac. vyd. Praha: Sobotáles, 2000. ISBN 80-859-2072-7.

[10] KOČÍ, Vladimír. Posouzení životního cyklu výroby epoxidové pryskyřice. *Chemické Listy* [online]. 2014, **108**(10), 967-975 [cit. 2020-10-18]. ISSN 1213-7103. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/452/452

[11] PATOČKA, Jiří. NEBEZPEČÍ PLASTOVÝCH LAHVÍ: Může za to bisfenol A?. *TOXICOLOGY.CZ* [online]. 2008 [cit. 2020-10-18]. Dostupné z: http://toxicology.cz/modules.php?name=News&file=article&sid=189

[12] EHRENSTEIN, Gottfried W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN ISBN978-80-86960-29-6.

[13] HORÁK, Luděk. *Analýza elektrických vlastností epoxidových pryskyřic s různými plnivy v teplotní a kmitočtové závislosti* [online]. Brno, 2018 [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www__base/zav__prace__soubor__verejne.php?file__id=172318. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Jiří Kazelle.

[14] MENŠÍK, Martin. *Vliv aditiv na vlastnosti epoxidových pryskyřic* [online]. Zlín, 2008 [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: http://195.178.95.140:8080/handle/10563/7539. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Antonín Blaha.

[15] *PLASTY* [online]. [cit. 2020-10-19]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/plasty.pdf

[16] HLUCHÝ, Miroslav a Josef BENEŠ. *Strojírenská technologie: pro SPŠ nestrojnické*. Praha: SNTL, 1981. ISBN 04-219-81.

[17] SOBOTOVÁ, Jana, Zdeňka JENÍKOVÁ, Elena ČIŽMÁROVÁ a Jakub HORNÍK. *Nauka o materiálu I. a II.: Cvičení*. 2. dotisk 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-05550-2.

[18] SUCHÝ, Marek. *Mechanické vlastnosti plastů: Mechanical properties of plastics* [online]. Brno, 2009 [cit. 2020-10-29]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www__base/zav__prace__soubor__verejne.php?file__id=17446. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Eva Novotná.

[19] BERČÍK, Pavel. *Měření tvrdosti polymerů* [online]. Zlín, 2012 [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/10563/22947. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce David Maňas.

[20] Metoda dle Shore. *HANYKO Praha: Vše pro zkoušení materiálů* [online]. [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrdost-a-jak-se-meri/shore/

[21] ŠŤASTNÝ, Patrik. *Měření tvrdosti polymerů* [online]. Zlín, 2011 [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: https://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/14768/%c5%a1%c5%a5astn%c3%bd__2011__bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce David Maňas.

[22] Tvrdost. *Měření tvrdosti* [online]. 2011 [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: http://www.merenitvrdosti.cz/tvrdost.html

[23] NEŠPOR, Vít. *Přehled současných metod a zařízení pro měření koeficientu tření v mazaném kontaktu třecích povrchů* [online]. Brno, 2011 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5480/final-thesis.pdf?sequence=6. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Daniel Koutný.

[24] KOUDELKOVÁ, Lenka. *Odolnost proti otěru žárově zinkovaných povlaků* [online]. Praha, 2016 [cit. 2020-12-14]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/66533/F2-BP-2016-Koudelkova-Lenka-BP__KOUDELKOVA__2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Jan Kudláček.

[25] Epoxidy: EpoxAcast 650. *SILIKONY s.r.o.* [online]. [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: https://www.silikonysro.cz/epoxidy/epoxacast-650

[26] TEGO® Phobe 1500 N: Hydrophobing agent. *COATINO: THE DYNAMIC FORMULATION NETWORK* [online]. [cit. 2021-06-22]. Dostupné z: https://www.productcenter.coating-additives.com/pdf/daten/engl/Phobe__1500__N.pdf