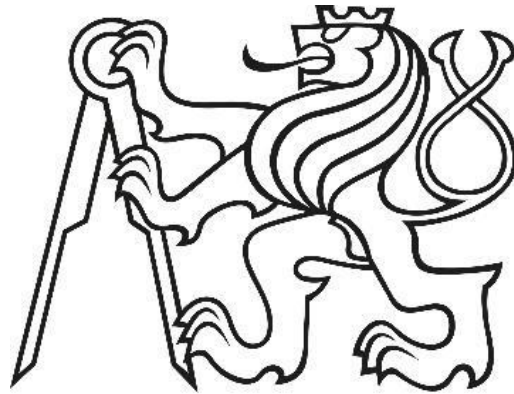


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**Fakulta strojní**

**Ústav materiálového inženýrství**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Hodnocení adheze ledu k povlakům na bázi fluoropolymerů**

**Evaluation of ice adhesion onto fluoropolymer based coatings**

Autor: Bc. Sarah Duníková

Studijní program: Výrobní a materiálové inženýrství

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

Praha 2020

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Duniková** Jméno: **Sarah** Osobní číslo: **438626**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**  
Studijní program: **Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Hodnocení adheze ledu k povlakům na bázi fluoropolymerů**

Název diplomové práce anglicky:

**Evaluation of ice adhesion onto fluoropolymer based coatings**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Literární rešerše týkající se 'icephobic' chování fluoropolymerů
- 2) Experiment: měření adheze ledu v normálovém a tangenciálním směru k vybraným fluoropolymerům
- 3) Závěry: Vyhodnocení výsledků

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] E. Vazinirasab, K. Maghsoudi, R. Jafari et al., A comparative study of the icephobic and self-cleaning properties of Teflon materials having different surface morphologies, Journal of Materials Processing Technology 276 (2020), DOI:org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116415

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

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

Datum zadání diplomové práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání diplomové práce: **31.07.2020**

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

  
Ing. Stanislav Krum, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

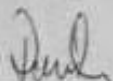
  
prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis otkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

23.6.2020  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studentky

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně, a že veškerá použitá odborná literatura je uvedena v seznamu, který je součástí této práce.

V Praze dne: .....

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu diplomové práce Ing. Stanislavu Krumovi, Ph.D. za odborné vedení, připomínky a rady při vypracování této diplomové práce, za jeho trpělivost a čas, který mi byl ochoten věnovat při konzultacích a provádění experimentu.

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá vyhodnocováním adhezní síly ledu k vybraným materiálům, s hlavním zaměřením na fluoropolymerový povlak ECTFE. Práce je rozdělena na teoretickou a experimentální část. Teoretická část je věnována obecné charakteristice ledu, definováním ledofobnosti a základními principy jejího zajištění. Následně je uvedena problematika měření adheze ledu k povrchům. Praktická část je zaměřena na experiment, ve kterém je vyhodnocováno smykové a normálové napětí při odtrhnutí ledu přilnutého k vybraným materiálům. Z výsledků je patrný značný rozdíl v adhezi ledu k slitinám kovů – dural, ocel a fluoropolymerového povlaku, ke kterému led přimrzá se značně menší adhezní silou.

## **Klíčová slova**

Adheze, fluoropolymery, ledofobnost

## **Abstract**

The diploma thesis deals with the evaluation of the adhesive strength of ice to selected materials, with the main focus on the fluoropolymer coating ECTFE. The work is divided into theoretical and experimental part. The theoretical part is devoted to the general characteristics of ice, the definition of icephobicity and the basic principles of its provision. In the next part, the problem of measuring the adhesion of ice onto surfaces is presented. The practical part is focused on an experiment in which the shear and normal stress of tearing the ice adhered to selected materials are evaluated. The results show a significant difference in the adhesion of ice to metal alloys - duralumin, steel and fluoropolymer coating, on which the ice freezes with a much smaller adhesive force.

## **Key words**

Adhesion, fluoropolymers, icephobicity

## Seznam zkratek

D	-	Fraktální dimenze
$f_s$	-	Podíl plochy kontaktu – pevná látka
$f_v$	-	Podíl plochy kontaktu – plynná látka
$f_l$	-	Podíl plochy kontaktu – kapalina
$\Delta G$	[J]	Volná energie
$\Delta H$	[J/m <sup>3</sup> ]	Objemová entalpie
l	-	Dolní limit
L	-	Horní limit
q	[C]	El. náboj
l <sub>r</sub>	[mm]	Základní délka
l <sub>n</sub>	[mm]	Vyhodnocovaná délka
MI(c)	[ $\mu$ m]	Materiálová délka profilu na úrovni c
r <sub>c</sub>	[ $\mu$ m]	Kritická velikost zárodku
R <sub>a</sub>	[ $\mu$ m]	Průměrná aritmetická úchylka profilu
R <sub>ku</sub>	[ $\mu$ m]	Špičatost posuzovaného profilu
R <sub>mr</sub>	[%]	Vzájemný materiálový poměr
R <sub>mr(c)</sub>	[%]	Materiálový podíl profilu
R <sub>p</sub>	[ $\mu$ m]	Největší výška výstupku profilu
R <sub>q</sub>	[ $\mu$ m]	Průměrná kvadratická úchylka profilu
R <sub>sk</sub>	[ $\mu$ m]	Šikmost posuzovaného profilu
R <sub>Sm</sub>	[mm]	Průměrná šířka prvků profilu
R <sub>t</sub>	[ $\mu$ m]	Celková výška profilu
R <sub>v</sub>	[ $\mu$ m]	Největší hloubka prohlubně profilu
R <sub>z</sub>	[ $\mu$ m]	Největší výška profilu
R $\Delta$ q	[ $\mu$ m]	Průměrný kvadratický sklon profilu
R $\delta$ c	[ $\mu$ m]	Rozdíl výšky úseků profilu
T <sub>g</sub>	[K]	Teplota skelného přechodu
T <sub>m</sub>	[K]	Teplota tání
X <sub>s</sub>	[ $\mu$ m]	Šířka prvku profilu

$Z_p$	[ $\mu\text{m}$ ]	Výška výstupků profilu
$Z_v$	[ $\mu\text{m}$ ]	Hloubka prohlubní profilu
$Z_t$	[ $\mu\text{m}$ ]	Výška prvků profilu
$Z(x)$	[ $\mu\text{m}$ ]	Výška pořadnice
$\vartheta$	[ $^\circ$ ]	Kontaktní úhel dle Youngova modelu
$\vartheta_{adv}$	[ $^\circ$ ]	Kontaktní úhel postupující
$\vartheta_c$	[ $^\circ$ ]	Kontaktní úhel dle Cassie - Baxterova modelu
$\vartheta_{rec}$	[ $^\circ$ ]	Kontaktní úhel ustupující
$\vartheta_{T1}$	[ $^\circ$ ]	Kontaktní úhel přechodu modelů
$\vartheta_W$	[ $^\circ$ ]	Kontaktní úhel dle Wenzelova modelu
$\varepsilon$	[ $\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	Dielektrická konstanta
$\lambda_c$	[mm]	Filtr určující rozhraní mezi složkami drsnosti a vlnitosti
$\gamma_{lv}$	[ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	Povrchové napětí na přechodu hranic kapalina/pára
$\gamma_{sv}$	[ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	Povrchové napětí na přechodu hranic pevná látka/pára
$\gamma_{sl}$	[ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	Povrchové napětí na přechodu hranic pevná látka/kapalina
$\gamma_{iw}$	[ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ]	Energie na fázovém rozhraní voda/led

# Obsah

Seznam zkratk.....	6
1 Úvod.....	9
2 Teoretická část.....	10
2.1 Led.....	10
2.1.1 Morfologie ledu.....	10
2.1.2 Námrazové jevy.....	12
2.2 Principy ledofobnosti povrchů.....	15
2.2.1 Smáčivost povrchů.....	16
2.2.2 Hydrofobnost/Superhydrofobnost.....	24
2.2.3 Zpomalení nukleace ledu.....	25
2.2.4 Hydrofobní/ledofobní povlaky.....	28
2.3 Metody měření adheze ledu.....	32
3 Experimentální část.....	35
3.1 Experimentální materiál.....	35
3.2 Měření adhezní síly.....	37
3.3 Výsledky měření.....	40
Závěr.....	48
Seznam obrázků.....	49
Seznam tabulek.....	50
Bibliografie.....	51



# 1 Úvod

Akrece ledu představuje problém pro mnohá průmyslová odvětví. Jedná se například o vzduchové turbíny nebo také transportní systémy či telekomunikace. Významná je tvorba námrazy v leteckém průmyslu, kde představuje nejen problém ekonomický, ale i bezpečnostní (viz Obr. 1) [1, 2].

Rozlišují se různé strategie zajištění omezení vzniku námrazy. Mezi aktivní ochranu můžeme řadit elektro-termální a infračervené topící systémy, nicméně takováto ochrana vyžaduje hodně energie a je ekonomicky náročná. Dalším způsobem může být použití látek, jako jsou například soli a glykoly, které snižují teplotu tání. Tato metoda ovšem negativně ovlivňuje životní prostředí. Dále se používají systémy mechanického odstranění ledu. I tento způsob má ovšem své negativní stránky, v tomto případě se jedná hlavně o nemožnost použití na určitých místech. Dalším způsobem je pak pasivní ochrana, která vychází z poznatků materiálového inženýrství a zabývá se povlaky, které mohou tvorbě ledu předejít či zpomalovat jeho tvorbu [1].

Z těchto důvodů, kdy mnohé aktivní metody bývají ekonomicky náročné, nelze je na některých místech využít či negativně ovlivňují prostředí, je snaha o vytvoření alternativních pasivních způsobů, které by zabraňovaly tvorbě ledu a uchycení ledu. Jako zatím nejvíce atraktivní se jeví využití povrchového a materiálového inženýrství k vytvoření povrchů, které by byly tzv. „ledofobní“ (icephobic) [1].



*Obr. 1 Tvorba ledových usazenin v různých odvětvích průmyslu [2]*

## 2 Teoretická část

Teoretická část této práce se v první části věnuje morfologii ledu, možnosti jeho vzniku a různým druhům námrazových jevů, se kterými se běžně setkáváme.

V druhé části je pak charakterizována ledofobnost materiálů společně se základními principy podmiňující ledofobnost povrchu materiálů. Jedná se zejména o spojitost se smáčivostí povrchu, tedy jeho hydrofobnosti nebo zpomalení nukleace ledu, dále jsou uvedeny materiály, které snižují adhezi ledu díky svému chemickému složení.

Poslední kapitola je věnována metodám měření adheze ledu a porovnání přilnavosti ledu k různým materiálům.

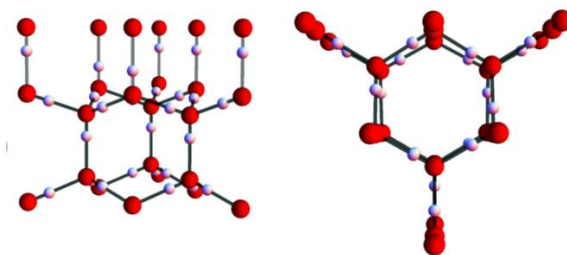
### 2.1 Led

Voda tvoří jednu ze základních složek naší planety, bez které by nebylo života. Pokrývá většinu zeměkoule, a i lidské tělo je z většiny tvořeno vodou. Jak je již známo, vodu tvoří dva atomy vodíku a jeden atom kyslíku. Vyskytuje se ve všech třech skupenstvích.

Tvorba ledu na pevném povrchu může vzniknout třemi způsoby. První možností je desublimace, tedy přeměna páry přímo na led, druhou možností je nejdříve zkapalnění páry a následné zmrznutí kapalného stavu. Poslední varianta je přeměna kapaliny na pevné skupenství [1].

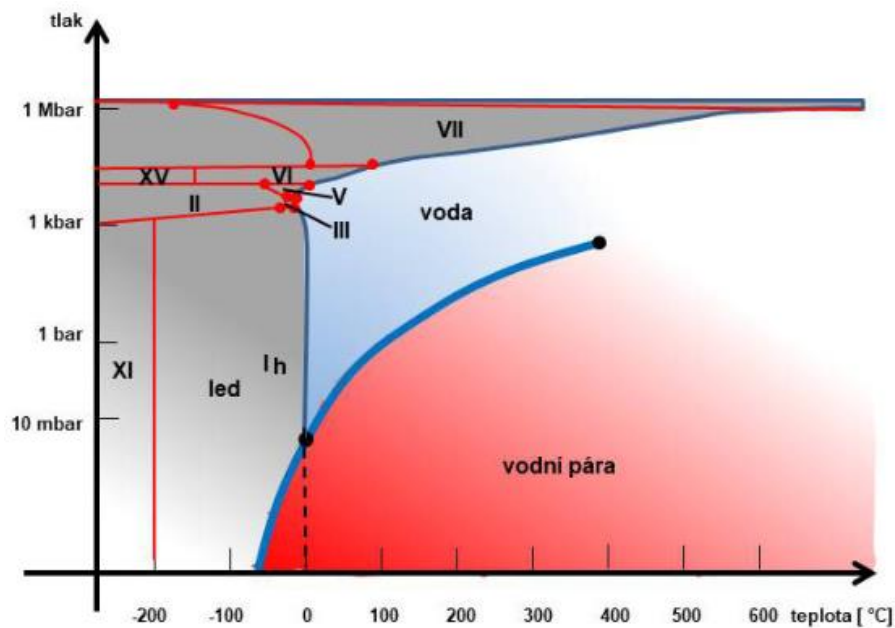
#### 2.1.1 Morfologie ledu

Je známo sedmnáct různých morfologií ledu. Ten, se kterým se běžně setkáváme, má strukturu hexagonální (viz Obr. 2) [3].



Obr. 2 Hexagonální struktura ledu označována jako Ih [4]

Tvoří se při atmosférickém tlaku a při teplotách pod 0 °C. Molekuly vody jsou uspořádány hexagonálně a krystalická mřížka má šesterečnou symetrii. Zatímco atomy kyslíku se nachází v rozích a jsou spojeny s dalšími molekulami vody pomocí vodíkových můstků, atomy vodíku jsou rozmístěny náhodně. Z fázového diagramu (viz Obr. 3) je patrné, v jakém skupenství se voda nachází při daných teplotách a tlacích. Římskými číslicemi jsou označeny různé morfologie ledu. V daném diagramu je tento druh ledu označen jako I<sub>h</sub> [3, 5, 6].



**Obr. 3 Fázový diagram vody ukazující existenci jednotlivých skupenství při dané teplotě a tlaku [3]**

Kromě ledu s šesterečným uspořádáním se lze setkat i s formou, jejíž struktura má symetrii kubickou. Takovýto druh ledu se pak označuje jako I<sub>c</sub>. V běžném životě můžeme tento druh pozorovat u sněhových vloček, které mají tříčetnou symetrii. Lze tedy předpokládat, že v horních vrstvách naší atmosféry panují podmínky pro vznik kubického ledu. V laboratorních podmínkách se ovšem ještě nepodařilo tento druh ledu vytvořit [3, 5].

Dále je možné si ve fázovém diagramu všimnout, že existuje i krystalická forma, která vzniká nad 0 °C. Tento druh ledu ovšem může existovat jen za vysokých tlaků, a je tedy pouze formou laboratorní [3].

### **2.1.2 Námrazové jevy**

Námrazové jevy mohou způsobovat řadu problémů, a to nejen na zemském povrchu, kde škodí vegetaci, ale mohou poškozovat různé objekty, jako například elektrická či telefonní vedení. Významnou oblastí, která je s tvorbou ledových vrstev úzce spjata, a tvorba námrazy či ledovky pro ni tvoří značný problém, je letecký provoz. Z analýz leteckých nehod bylo vyhodnoceno, že během posledních několika let je namrzání letadel jeden z hlavních externích příčin způsobujících, v mnoha případech až fatální, katastrofy [4, 7].

Tvorba ledu na zemském povrchu nebo objektech, na kterých dochází k jeho vzniku, je podmíněna několika meteorologickými faktory, které určují, jakých vlastností bude dosahovat. Jedná se zejména o vlhkost a teplotu vzduchu, dále rychlost větru a směr jeho proudění vzhledem k danému objektu. Je tak možné rozlišovat několik druhů vzniklého ledu [8].

#### **Zmrzlá rosa**

Rosu tvoří kapičky vody, které vznikají, pokud se teplota rosného bodu pohybuje nad nulou. Lze ji nalézt na povzích, které jsou horizontální (listy, tráva, střechy domů atp.). Pokud klesne teplota zemského povrchu pod nulu, kapičky rosy zmrznou a vzniká zmrzlá rosa, pro kterou je charakteristická bílá barva bez zřetelné krystalické struktury [9].

#### **Jíní**

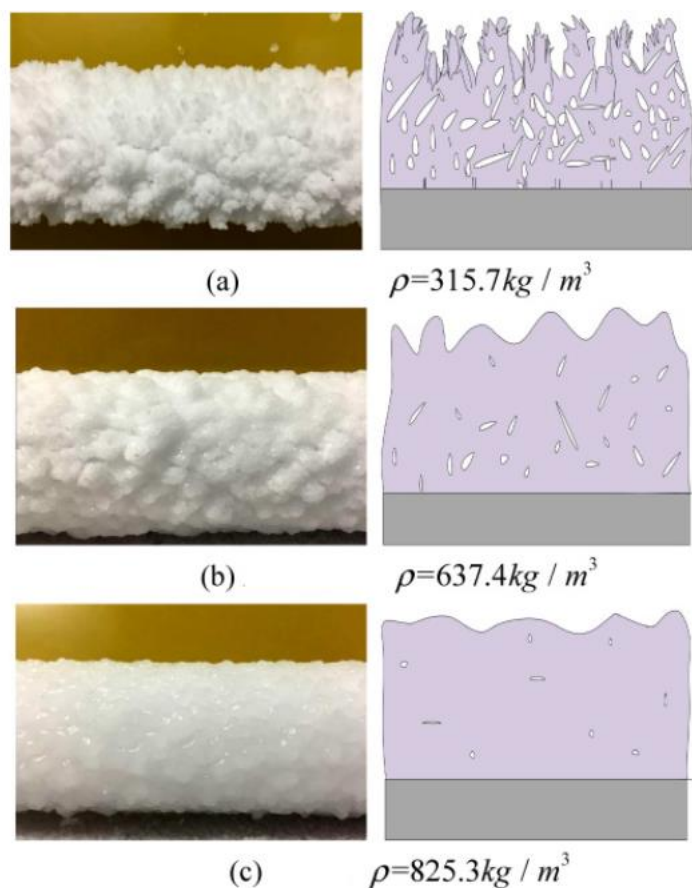
Pro vznik jíní je nutné, aby teplota rosného bodu byla pod bodem mrazu (pokud je tomu naopak, vzniká rosa). Má zřetelnou krystalickou strukturu ve tvaru jehliček a vějířů. Nejčastěji se tvoří na stéblech trávy a vodorovných plochách [9, 10].

#### **Jinovatka**

Pro vznik jinovatky je důležité, aby byl vzduch blízko stavu nasycení vodními parami a teplota byla pod  $- 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jedná se o bílou keříčkovitou usazeninu, která obvykle vzniká na hranách a rozích předmětů. Hustota jinovatky a jíní je nízká, stejně jako jejich adheze k povrchu, na kterém se tvoří a můžou tak být lehce odstraněny [7, 8, 9].

## Námraza

Vznik námrazy je jednak podmíněn dopadem vodních kapek na povrchy o teplotě pod bodem mrazu, kdy kapky mrznoucí mlhy či oblaků na daném objektu zamrzají nebo se může tvořit sublimací, tedy srážením vzdušné vlhkosti na dostatečně prochlazeném povrchu. Tvorba je nejintenzivnější na hranách předmětů proti směru větru. Čím vyšší je rychlost větru, tím intenzivněji dochází k jejímu růstu. Při teplotách vzduchu pod  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  se zpravidla výrazně zpomaluje její narůstání a s dalším poklesem teploty pak také klesá možnost jejího vzniku. Při teplotách pod  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  se námraza téměř netvoří. Rozlišují se dva druhy námrazy a to tzv. průsvitná námraza a námraza zrnitá (viz Obr. 4a, 4b) [11].



Obr. 4 Morfologie různých druhů ledové usazeniny: a) zrnitá námraza b) průsvitná námraza c) ledovka [12]

### **Zrnitá námraza**

Nejčastěji se tvoří za mlhy, kdy vodní kapky při styku s předměty, které mají teplotu v rozmezí zhruba  $-2\text{ °C}$  až  $-10\text{ °C}$ , na zemském povrchu rychle mrznou. Rychlým zmrznutím přechlazených vodních kapek nedochází k vyplnění vzduchových mezer na povrchu objektu (viz Obr. 4a) a vzniká tak tzv. zrnitá námraza. Je tvořena krystaly větvičkovitého tvaru se zrnitou strukturou a je pro ni charakteristická bílá barva. Hustota je pod  $600\text{ kg/m}^3$ . Je značně přilnavá, může být však odstraněna poměrně snadno [11, 12].

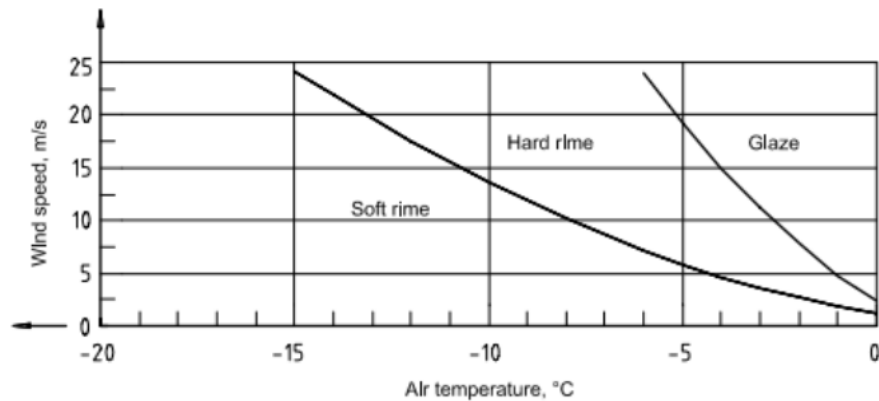
### **Průsvitná námraza**

Pomalým mrznutím kapek mlhy či oblaků, při teplotách lehce pod bodem mrazu ( $0\text{ °C}$  až  $-3\text{ °C}$ ), které před svým zmrznutím vyplní nerovnosti povrchu, vzniká průsvitná kompaktní ledová vrstva s drsným povrchem – průsvitná námraza (viz Obr. 4b). Narůstá zejména na návětrných hranách předmětů. Hustota tohoto typu námrazy se pohybuje mezi  $600 - 900\text{ kg/m}^3$ . Je velmi přilnavá a lze ji odstranit pouze rozbitím či táním. Poškozuje vegetaci, trhá elektrická a telefonní vedení a je velmi nepříznivá pro letecký provoz [11, 12].

### **Ledovka**

Jedná se o kompaktní ledovou vrstvu, která je průhledná a hladká. Neobsahuje téměř žádné vzduchové kapsy a hustota se pohybuje okolo  $900\text{ kg/m}^3$  (viz Obr. 4c). Vzniká, pokud je v určité výšce teplý vzduch, ze kterého prší. Kapky dopadající na podchlazený povrch předmětů se rozlijí a následně mrznou. Adheze takovéto ledové vrstvy je poměrně vysoká a je velice obtížné ji odstranit [11, 12].

O tom, jakým způsobem se ledová vrstva zformuje na daném povrchu, rozhoduje vícero faktorů, zejména se ale jedná o teplotu vzduchu a rychlost větru. Obr. 5 ukazuje, při jaké kombinaci těchto podmínek se tvoří zrnitá či průhledná námraza nebo zda dojde ke vzniku ledovky [8].



*Obr. 5 Vliv teploty a rychlosti větru na druh tvorby ledové vrstvy [8]*

Přechlazené vodní kapky zůstávají v kapalném stavu i pod teplotou mrazu. Tvoří se například pokud dojde k nárazu studené a teplé vzdušné masy, které vytvoří inverzní vrstvu. Tyto přechlazené kapky pak díky dopadu na podchlazený povrch mrznou. V závislosti na kinetické energii daných kapek pak buď mohou mrznout téměř okamžitě nebo pokud je jejich energie vyšší sklouzávají po povrchu letadla a zamrzají, až když je tato energie vyčerpána [13, 14].

## 2.2 Principy ledofobnosti povrchů

Ledofobní povrch nelze jednoznačně charakterizovat a k jeho popisu se používá několika přístupů. Lze jej charakterizován jako povrch, na kterém dochází k omezené tvorbě ledu nebo k zpomalení jeho tvorby. Dalším rysem je nízká přilnavost ledu k takovému materiálu– hraniční hodnotu zde tvoří adhezní napětí 10 kPa, a jako poslední je nesmáčivost povrchu, tedy odpuzování vody, která na povrchu nestihne zmrznout [2].

V návaznosti na tyto definice rozlišujeme hlavní teorie pro zajištění pasivní ochrany proti ledu, tedy vytvoření ledofobního povrchu: První, v poslední době asi nejvíce diskutovanou teorií, je užití povrchů, které jsou hydrofobní či superhydrofobní. Druhým přístupem, kterým lze zajistit, aby led na površích neulpíval, souvisí se zpomalením jeho nukleace. Další možností je používání povlaků, jejichž chemické složení způsobuje nízkou adhezi ledové vrstvy [1].

### 2.2.1 Smáčivost povrchů

Jedním z důležitých aspektů povrchů materiálů je jeho smáčivost či nesmáčivost, která může hrát klíčovou roli v oblasti jeho použití. Ve vztahu k ledofobnosti je její význam poměrně vysoký, jelikož nesmáčivost povrchu v tomto ohledu hraje klíčovou roli [1].

Smáčivost povrchu je dána jeho povrchovou energií a strukturou. Pokud lze jeden z těchto parametrů měnit, lze měnit i charakter smáčivosti, a lze tedy dosáhnout povrchu jak hydro/olejofobního, tak hydro/olejofilního [15, 16, 17].

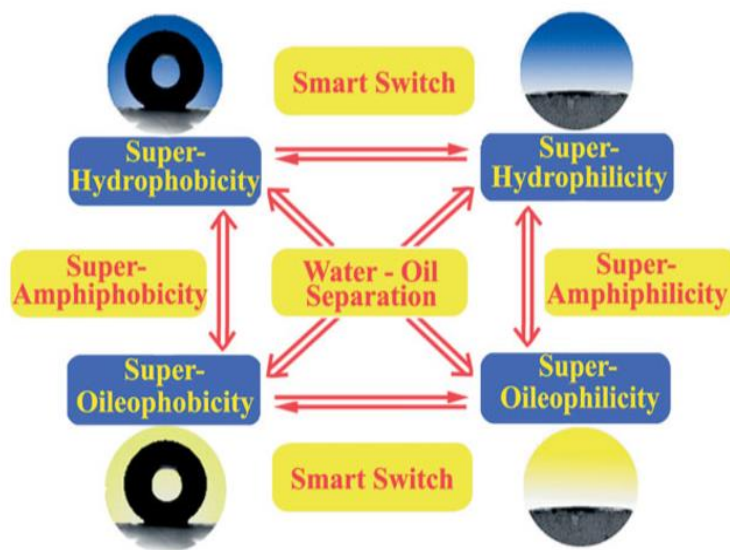
Při dopadu kapky kapaliny na materiál může dojít buď jejímu rozprostření po povrchu materiálu nebo zůstává ve formě kapky. Tyto dva jevy lze charakterizovat pomocí kontaktního úhlu  $\theta$ , který svírá povrch kapky s povrchem materiálu. Za smáčivý se označuje povrch, který s kapkou svírá kontaktní úhel  $\theta$  menší než 90. Pokud je tento úhel  $\theta$  naopak větší než 90, povrch považujeme za nesmáčivý [15, 18].

Můžeme rozlišovat superhydrofobnost či superolejofobnost, která nastává, pokud je kontaktní úhel  $\theta$  větší než 150° a superhydrofilnost/superolejofilnost, pro kterou je charakteristický kontaktní úhel  $\theta$  blíží se 0° [15, 19].

Dále je nutné uvažovat pohyb kapky po daném povrchu, kde se určují dynamické kontaktní úhly. Zde vzniká rozdíl mezi kontaktním úhlem pohybující se kapky na straně směru pohybu kapky a obráceně označující se jako hystereze kontaktního úhlu [1].

Následující obrázek (Obr. 6) vyjadřuje vztah mezi těmito čtyřmi základními jevy, které mohou nastat. Povrch, který je zároveň hydrofobní i olejofobní nazýváme jako amfifobní, v opačném případě lze analogicky konstatovat, že je povrch amfifilní, jedná se o hydrofilní a zároveň olejofilní povrch [15].





Obr. 6 Vztahy mezi smáčivými a nesmáčivými povrchy [15]

### Základní teorie smáčivosti povrchu

Popisují se čtyři základní teorie chování kapky kapaliny po dopadu na povrch. První případ popisuje Youngova rovnice (1). Jedná se o případ, kdy se kapka nachází na ideálním, rovinném, zcela hladkém povrchu (Obr. 7) [15].



Obr. 7 Vliv struktury povrchu materiálu na charakter smáčivosti [15]

Smáčivost je dána povrchovou energií, jež je vyjádřena níže zmíněnou rovnicí, kde  $\theta$  vyjadřuje kontaktní úhel, a  $\gamma_{sl}$ ,  $\gamma_{sv}$ ,  $\gamma_{lv}$  povrchové napětí na přechodu hranic jednotlivých fází (kapalina (l), pára (v) a pevné skupenství (solid)) [15].

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (1)$$

Ve skutečnosti se ovšem nikdy nesetkáváme s ideálně rovinným povrchem a je tedy třeba uvažovat, jak se kapka kapaliny bude chovat na povrchu, jež má určitou drsnost. Pokud tedy neuvažujeme čistě rovinný povrch, popisuje možné stavy Wenzelova a Cassie-Baxterova teorie [15].

Dle Wenzelova modelu kapka zcela vyplní nerovnosti povrchu a skutečná kontaktní plocha se zvětší. Oproti tomu dle Cassie-Baxterovy teorie kapka nesmáčí povrch zcela a vznikají tak vzduchové kapsy, které kontaktní plochu rozhraní vody a pevné fáze snižují (Obr. 8) [20, 21].

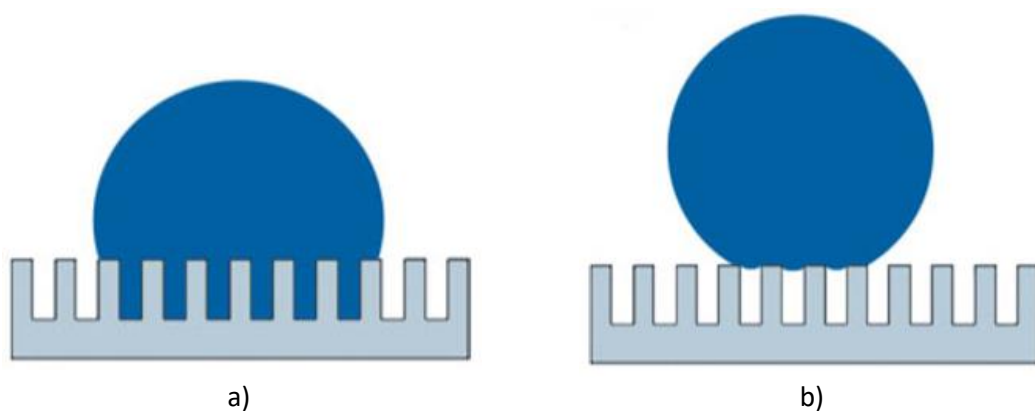
Wenzelova teorie je vyjádřena pomocí vztahu, který popisuje Rovnice 2.  $\theta_W$  je kontaktní úhel a  $r$  parametr drsnosti [15].

$$\gamma_{lv} \cdot \cos\theta_W = r \cdot (\gamma_{sv} - \gamma_{sl}) \quad (2)$$

Spojením předcházejících rovnic (1 a 2) lze dostat vztah mezi kontaktními úhly pro hladký povrch a drsný povrch dle Wenzela (Rovnice 3) [15].

$$\cos\theta_W = r \cdot \cos\theta \quad (3)$$

Z této rovnice vyplývá, že pokud je kontaktní úhel kapky kapaliny na rovinném povrchu menší než  $90^\circ$ , pro drsný povrch bude tento úhel ještě menší. Pokud jeho hodnota bude nad  $90^\circ$ , výsledný kontaktní úhel bude naopak větší. Z toho plyne, že smáčení dle Wenzelova modelu vede k zintenzivnění charakteru smáčení [15].



**Obr. 8 Chování kapky dle Wenzelova (a) a Cassie-Baxterova (b) modelu [15]**

Cassie-Baxterova teorie oproti Wenzelovi předpokládá vznik parních kapes pod kapalinou, takže kapka zůstává na povrchu a nevyplňuje nerovnosti. Rovnice definující kontaktní úhel  $\vartheta_c$  je patrná z rovnice 4, kde  $f_s$  a  $f_v$  vyjadřují pevný a plynný podíl na povrchu [15].

$$\theta_c = f_s \cdot \cos\theta_s + f_v \cdot \cos\theta_v \quad (4)$$

Protože pro danou teorii platí předpoklad, že  $f_s + f_v = 1$ ,  $\vartheta_s = \vartheta$  a  $\vartheta_v = 180^\circ$ , je možné přepsat Rovnici 4 do tvaru, který je uvedený rovnicí 5 [15].

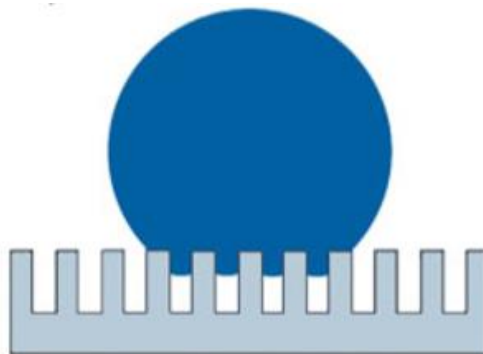
$$\cos\theta_c = -1 + f_s(\cos\theta + 1) \quad (5)$$

Lze modifikovat Rovnici 5 do podoby, která zahrnuje  $L$  a  $l$ , definující horní a dolní chování frakcí a  $D$  vyjadřující fraktální dimenzi (rovnice 6) [15].

$$\cos\theta_c = -1 + f_s \left(\frac{L}{l}\right)^{D-2} \cdot (\cos\theta + 1) \quad (6)$$

Z uvedených rovnic (rovnice 5 a 6) vyjadřující chování kapky kapaliny na drsném povrchu dle Cassie-Baxtera lze konstatovat, že pokud bude kontaktní úhel hladkého povrchu větší než  $90^\circ$  poroste i úhel pro drsný povrch stejně tak ale tento úhel poroste i pokud bude kontaktní úhel rovinného povrchu menší než  $90^\circ$ . Tento jev je způsoben právě zachycenými vzduchovými kapsami, které jsou superhydrofobní [15].

Pro povrch se stejnou drsností, jak uvádí rovnice 3 a 5, tedy existují vždy dva kontaktní úhly a charakter kontaktu kapaliny a pevného materiálu lze měnit z Cassie-Baxterova do Wenzelova módu, pokud je kapka fyzicky stlačována do povrchu materiálu. Toto vede k jevu patrnému na Obr. 9 [15].



Obr. 9 Přechod mezi Cassie-Baxterovo a Wenzelovo modelem [15]

Jedná se tedy o jakýsi přechod mezi oběma možnými stavy, kdy kapka kapaliny přechází z Cassie-Baxterova módu do Wenzelova a částečně vniká do nerovností povrchu. Tento proces doprovází i změna kontaktního úhlu, který se zmenšuje [15, 22].

Kontaktní úhel  $\vartheta_{T1}$  je pak vyjádřen z rovnic definujících úhly pro obě stádia (rovnice 7) [22].

$$\cos \theta_{T1} = \frac{f_s - 1}{r - f_s} \quad (7)$$

Hodnota tohoto úhlu pak udává mezní stav mezi oběma stádii, tedy pokud je kontaktní úhel  $\vartheta$  vycházející z Youngovy rovnice menší než úhel  $\vartheta_{T1}$ , kapsy vytvořené pod kapkou kapaliny jsou metastabilní, a charakter chování kapky kapaliny se bude řídit Wenzelovým modelem. Aby mohl nastat stav dle Cassie-Baxterova modelu, musí být povrch dostatečně hydrofobní nebo musí být hodnota úhlu  $\vartheta_{T1}$  co možná nejnižší, tak aby platila nerovnost  $\vartheta > \vartheta_{T1}$  a parní kapsy vytvořené pod kapkou byly stabilní [22].

### **Drsnost**

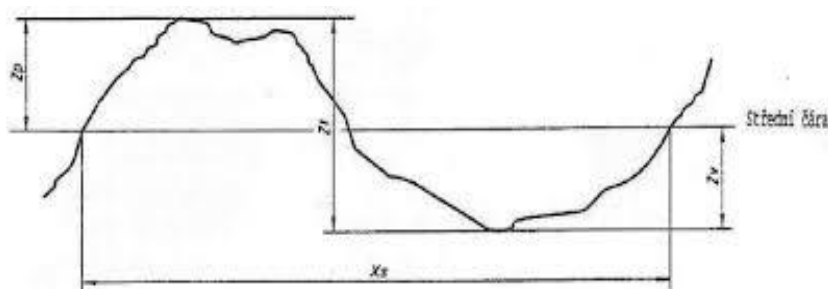
Jak již bylo zmíněno, smáčivost povrchu souvisí s jeho morfologií. I ledofobnost se k morfologii povrchu úzce váže. Aby byly hodnoty adheze ledu k určitým materiálům vypovídající, je třeba znát i drsnost takového povrchu.

Drsnost je jednou z charakteristických vlastností struktury povrchu. Definice stanovuje, že drsnost je souhrn nerovností povrchu s relativně malou vzdáleností, které nevyhnutelně vznikají při výrobě nebo jejím vlivem. Profil drsnosti je definován pomocí parametrů, které se nazývají R - parametry. Můžeme je dále rozdělovat, a to sice na [23]:

- výškové parametry (výstupky a prohlubně):  $R_z, R_p, R_v, R_c, R_t$
- výškové parametry (průměrné hodnoty pořadnic):  $R_a, R_q, R_{sk}, R_{ku}$
- délkové parametry:  $R_{Sm}$
- tvarové parametry:  $R_{\Delta q}$
- křivky a jiné a parametry:  $R_{mr}(c), R_{\delta c}, R_{mr}$

K bližšímu popsání těchto parametrů drsnosti je nejprve nutné uvést několik základních pojmů, pomocí kterých lze přesněji dané parametry vymezit [23]:

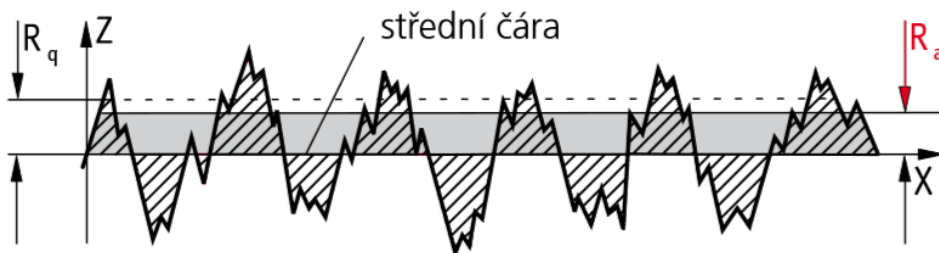
- střední čára profilu drsnosti – čára odpovídající dlouhovlnné složce potlačené filtrem profilu  $\lambda_c$
- základní délka ( $l_r$ ) – délka ve směru osy  $x$ , použitá pro rozpoznávání nerovností charakterizujících vyhodnocovaný profil
- vyhodnocovaná délka ( $l_n$ ) – délka ve směru osy  $x$ , použitá pro posouzení vyhodnocovaného profilu
- prvek profilu – výstupek profilu a přilehlá prohlubeň (Obr. 10)
- výška výstupku profilu ( $Z_p$ ) – vzdálenost mezi osou  $x$  a nejvyšším bodem výstupku prvku profilu
- hloubka prohlubně profilu ( $Z_v$ ) – vzdálenost mezi osou  $x$  a nejnižším bodem prohlubně prvku profilu
- výška prvku profilu ( $Z_t$ ) – součet výšky výstupku a hloubky prohlubně prvku profilu
- hodnota pořadnice ( $Z(x)$ ) – výška posuzovaného profilu v libovolné poloze  $x$
- šířka prvku profilu ( $X_s$ ) – délka úseku osy  $x$  protínající prvek profilu
- materiálová délka profilu na úrovni  $c$ , ( $Ml(c)$ ) – součet délek úseků získaných protnutím prvku profilu čarou rovnoběžnou s osou  $x$  v dané úrovni  $c$



Obr.10 Prvek profilu [23]

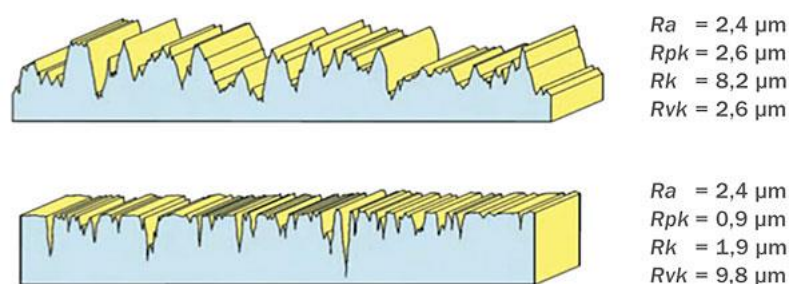
Mezi nejběžnější parametr popisující drsnost povrchu patří  $R_a$  – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti.

Parametr  $R_a$  je výškový parametr, určený aritmetickým průměrem absolutních pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky (Obr. 11) [23].



Obr. 11 Průměrná aritmetická úchylka profilu  $R_a$  [25]

Tento parametr je ale pouze statistická hodnota, která nemusí být vždy efektivní při hodnocení drsnosti povrchu. Je to dáno tím, že parametr  $R_a$  nerozlišuje mezi výstupky a prohlubněmi, a tedy samotná hodnota  $R_a$  nepředstavuje přesné popsání povrchu. Například dva povrchy se stejnou hodnotou  $R_a$  mohou mít zcela odlišný tvar profilu povrchu (Obr. 12) a tím pádem mohou mít i rozdílné vlastnosti a jejich chování z určitých hledisek nemusí být totožné [24].



Obr. 12 Rozdílnost povrchů při stejném drsnostním parametru  $R_a$

Dalším výškovým parametrem vycházejícím z průměrné hodnoty pořadnic je průměrná kvadratická úchylka posuzovaného profilu ( $R_q/RMS$ ), která je definována jako kvadratická střední hodnota pořadnic  $Z(x)$  v rozsahu základní délky [23].

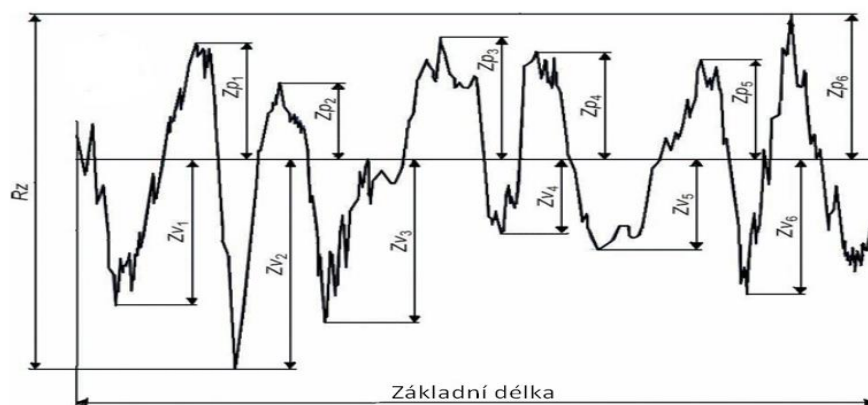
Šikmost posuzovaného profilu drsnosti ( $R_{sk}$ ) je dána podílem průměrné hodnoty třetích mocnin pořadnic  $Z(x)$  a třetí mocniny hodnoty  $R_q$  na základní délce [23].

Parametrem popisujícím špičatost profilu je  $Rku$ , tedy podíl průměrné hodnoty čtvrtých mocnin pořadnic  $Z(x)$  a čtvrté mocniny hodnoty  $Rq$  v rozsahu základní délky [23].

Lze tedy konstatovat, že hodnota šikmosti posuzovaného profilu  $Rsk$  je hodnota asymetrie hustoty amplitudové křivky a strmost profilu drsnosti  $Rku$  je strmost hustoty amplitudové křivky. Oba tyto parametry jsou ovlivněny jednotlivými špičkami a rýhami, proto je jejich praktický význam redukován [25].

Největší výška výstupku profilu ( $Rp$ ) je výška  $Zp$  největšího výstupku profilu v rozsahu základní délky a podobně hloubka největší prohlubně profilu ( $Rv$ ) je hloubka  $Zv$  nejnižší prohlubně profilu v rozsahu základní délky [23].

Největší výška profilu ( $Rz$ ) je součet výšky největšího výstupku profilu  $Zp$  a hloubky největší prohlubně profilu drsnosti  $Zv$  na základní délce (Obr. 13) [23].



Obr. 13 Největší výška profilu  $Rz$  [26]

Poslední výškovým parametrem je průměrná výška prvků profilu ( $Rc$ ), která je dána průměrnou hodnotou výšek  $Zt$  prvků profilů na základní délce [23].

Délkový parametr  $Rsm$  určuje průměrnou šířku prvků profilu. Tento parametr je definován jako střední hodnota šířek  $Xs$  prvků profilu v rozsahu základní délky [23].

Tvarový parametr střední kvadratický sklon profilu ( $R\Delta q$ ) je pak střední kvadratická hodnota jednotlivých sklonů pořadnic  $dZ(x)/dX$  uvnitř základní délky [23].

Křivky a odpovídající parametry se definují spíše na vyhodnocované délce než na délce základní, protože poskytuje stabilnější křivky a parametry. Patří sem parametry  $Rmr(c)$ ,  $R\delta c$  a  $Rmr$  [23].

Materiálový podíl profilu drsnosti ( $Rmr(c)$ ) je poměr délky materiálu elementů profilu  $MI(c)$  na dané úrovni  $c$  k vyhodnocované délce [21].

Rozdíl výšky úseku profilu ( $R\delta c$ ) je svislá vzdálenost mezi úrovněmi dvou úseků daného materiálového poměru [23].

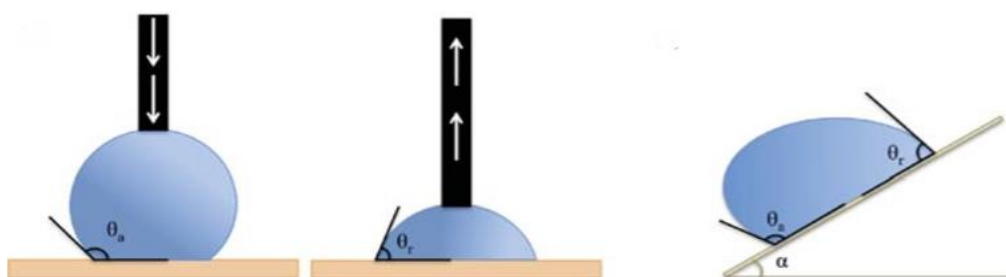
Vzájemný materiálový poměr ( $Rmr$ ) je materiálový poměr určený na úrovni části profilu  $R\delta c$  vztažený k úrovni  $Rmr0$  [23].

## 2.2.2 Hydrofobnost/Superhydrofobnost

Vztah hydrofobnosti povrchu k ledofobnosti se dá popsat pomocí následujících teorií:

### Kontaktní plocha a hystereze kontaktního úhlu

Je nutné uvažovat, jak se kapka bude pohybovat po daném povrchu. Na povrchu s určitou drsností je možné pozorovat rozdíl mezi kontaktním úhlem pohybující se kapky na straně směru pohybu kapky a obráceně. Rozdíl těchto úhlů je pak označován jako hystereze kontaktního úhlu. Přední část kapky v daný moment svírá s povrchem tzv. postupový kontaktní úhel  $\vartheta_{adv}$  zatímco zadní část se pohybuje pod ustupujícím kontaktním úhlem  $\vartheta_{rec}$  (viz Obr. 14). Co nejmenší hystereze zajišťuje, aby kapka stekla po povrchu, a přitom co nejméně kontaminovala daný povrch [1, 22].



Obr. 14 Možnosti měření úhlů  $\vartheta_{adv}$  a  $\vartheta_{rec}$  [27]



V případě, kdy uvažujeme teorii smáčivosti dle Wenzelova modelu, kontaktní plocha kapky s podkladem je větší než její průmět na povrchu podkladu a rozdíl mezi kontaktními úhly  $\vartheta_{adv}$  a  $\vartheta_{rec}$  je vysoký. V případě Cassie-Baxterova modelu je naopak kontaktní plocha menší než průmět kapky na povrchu a rozdíl mezi danými kontaktními úhly je malý [1].

Povrchy s nízkou hysterezí, kde se smáčivost řídí modelem dle Cassie-Baxtera, vykazují menší kontaktní plochu mezi ledem a povrchem, na kterém se tvoří. Adhezní síla ledu u takovýchto povrchů je pak nižší a mohou tedy být ledofobními. Naopak je tomu u povrchů s vysokou hysterezí, jež se smáčí dle Wenzelova modelu. U těchto povrchů je plocha kontaktu s ledem větší a je tedy větší i jeho adheze k povrchu [28, 29].

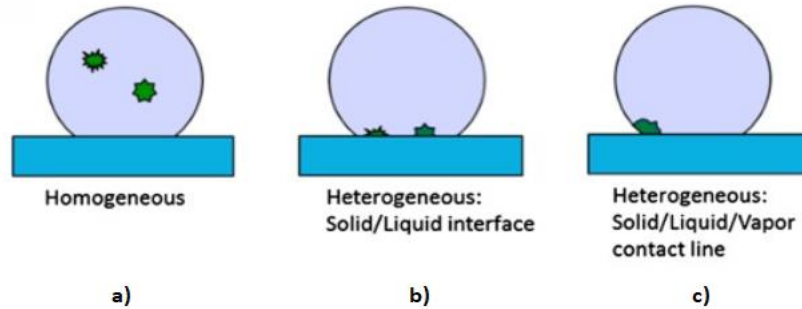
### **Zpomalení nukleace**

Hydrofobní materiály dle Cassie-Baxterova modelu po dopadu kapky na svůj povrch způsobují zpoždění v tuhnutí kapky vody. Tento jev podporuje několik faktorů. Prvním je malá kontaktní plocha, a tedy nízká rychlost přenosu tepla mezi kapkou vody a podkladem. Dalším faktorem je pak přítomnost vzduchových kapes na rozhraní kapaliny a pevného materiálu. Posledním je pak nižší pravděpodobnost heterogenní nukleace ledu [1, 30].

Téma hydrofobních materiálů ve vztahu k ledofobnosti ovšem zůstává předmětem diskuze. Povrchy s určitou nano/mikro texturou, které jsou superhydrofobní díky výskytu vzduchových kapes pod vodní kapkou naopak mohou být zdrojem heterogenní nukleace ledu. Stejně tak drsnost povrchu může na vzniklou ledovou vrstvu působit spíše jako kotva a adheze ledu k takovému povrchu je naopak vyšší [31].

### **2.2.3 Zpomalení nukleace ledu**

Další možností, jak zajistit, aby byl povrch materiálu ledofobní, spočívá ve snížení teploty tuhnutí kapky vody na co možná nejnižší teploty a zpomalení procesu tuhnutí. Proces krystalizace a následný růst krystalů ledu popisují klasické teorie homogenní a heterogenní nukleace (viz Obr. 15) [31].



Obr. 15 Princip homogenní a heterogenní nukleace zárodku [31]

### Homogenní nukleace

Homogenní nukleace (viz Obr. 15a) spočívá ve fázové přeměně spojené se snížením Gibbsovy volné energie systému, kdy voda během ochlazování spontánně zamrzá a vzniká led. Nutnými podmínkami doprovázejícími nukleaci zárodku jsou přechlazení, fluktuace struktury a fluktuace energie [31]

Nukleace zárodku pro krystalizaci vzniká, pokud dojde k vytvoření dostatečného množství vodíkových vazeb ve stejném místě, kde vytvoří tento zárodek. Ten následně mění svůj tvar i velikost do fáze, kdy dojde k jeho rapidní expanzi a způsobí krystalizaci. Kritická velikost zárodku  $r_c$ , který je schopen vyvolat následnou krystalizaci je dána rovnicí 8:

$$r_c = \frac{\gamma_{IW}}{\Delta G} \quad (8)$$

kde  $\gamma_{IW}$  je energie na fázovém rozhraní voda/led a  $\Delta G$  volná energie vycházející z Gibbs - Helmholtzovy rovnice (viz rovnice 9), kde  $\Delta H$  představuje objemovou entalpii ( $\Delta H = 287 \text{ MJ/m}^3$ ) a  $T_m$  teplotu tání ledu ( $T_m = 273 \text{ K}$ ) [31].

$$\Delta G = \frac{\Delta H \cdot (T_m - T)}{T_m} \quad (9)$$

Pokud zárodek pro nukleaci nedosáhne tohoto kritického parametru, který je odlišný pro každou teplotu (viz rovnice 8 a 9), dojde k jeho opětovnému rozptýlení na molekuly vody [31].

## Heterogenní nukleace

V běžné praxi se s homogenní nukleací většinou nesetkáváme. Mnohem snáze, tedy s nižší nutnou volnou energií nukleace, která je dána redukcí energetické bariéry pevným povrchem, probíhá nukleace heterogenní (viz Obr. 11b). V některých případech může ovšem vzniknout jisté zpoždění při nukleaci zárodku, které pak odpovídá homogenní nukleaci. Jedná se o případy, kdy je povrchová energie materiálu velmi nízká a drsnost jeho povrchu je menší než kritická velikost zárodku, která ovšem zatím není jasně definovaná [31].

Tento způsob nukleace na rozhraní kapalina/pevný povrch je popsán následující rovnicí (Rovnice 10), kde  $\Delta G_{c'}$  vyjadřuje volnou energetickou bariéru, která je redukována vzhledem k volné energii homogenní nukleace  $\Delta G_c$  o faktor zahrnující geometrii povrchu  $f(\vartheta)$  [31].

$$\frac{\Delta G_{c'}}{\Delta G_c} = f(\theta) \quad (10)$$

Z dané rovnice je patrné, že pokud budeme uvažovat čistě rovinný povrch, kde faktor  $f(\vartheta)$  závisí jen na kontaktním úhlu  $\vartheta$ , v případě úplně nesmáčivého povrchu (kontaktní úhel  $\theta = 180^\circ$ ) odpovídá potřebná nukleační energie energii pro vznik homogenní nukleace [31, 32].

Pokud budeme uvažovat reálný povrch s určitou drsností, je vliv geometrické struktury na volnou energii potřebnou pro vznik heterogenní nukleace popsán pomocí konvexního/konkávního povrchu. V tomto případě je volná energie popsána následující rovnicí:

$$\Delta G_{c'} = \Delta G_c \cdot g(R, \theta) \quad (11)$$

kde  $R$  určuje poloměr kulové konvexní či konkávní plochy a  $\vartheta$  je kontaktní úhel zárodku s těmito povrchy. Funkci  $g(R, \vartheta)$  lze vyjádřit pomocí rovnice zahrnující kritickou velikost zárodku pro homogenní nukleaci  $r_c$  (rovnice 12). Z této rovnice je pak patrné, že přiblížení k podmínkám homogenní nukleace dochází, pokud je funkce  $g(R, \vartheta)$  rovna jedné. Tohoto lze dosáhnout, pokud je hodnota poměru  $R/r_c$  co možná nejmenší, tedy pokud jsou nerovnosti povrchu menší než kritická velikost zárodku.

Je-li poměr  $R/r_c$  neměnný, hodnota funkce závisí na kontaktním úhlu  $\vartheta$  a hodnota dané funkce roste, pokud se tento úhel zvětšuje [32].

$$g(R, \theta) = \frac{1}{2} \left[ 1 - \cos^3(\phi + \theta) - 3 \left( \frac{R}{r_c} \right)^2 \cos\theta(1 - \cos\phi) + \left( \frac{R}{r_c} \right)^3 (2 - 3\cos\phi + \cos^3\phi) \right] \quad (12)$$

Pomocí Rovnice 11 a 12 lze konstatovat, že menší rozměry geometrických nerovností povrchu a větší kontaktní úhel  $\vartheta$  způsobuje zvětšení volné energetické bariéry, což vede k nižším teplotám zamrznání a delší časové prodlevě při nukleaci zárodku [28].

V předchozích odstavcích byla popsána heterogenní nukleace na rozhraní kapalina/pevný povrch. Je třeba však uvažovat, že k tvorbě zárodku může dojít i na třífázovém rozhraní kapalina/pevný povrch/plyn (viz Obr. 11c) [31].

Základní principy vzniku nukleace zůstávají stejné, nicméně na tomto rozhraní byla v některých případech pozorována vyšší pravděpodobnost pro možný vznik zárodku oproti jeho nukleaci na dvoufázovém rozhraní či pouze v samotné kapce [33].

Některé studie poukazují na souvislost teploty, při které dochází k nukleaci na rozhraní všech tří fází s kontaktním úhlem, který ovšem není jedinou proměnou, která tento jev může ovlivňovat. Dále bylo zjištěno, že k takovéto nukleaci dochází při vyšších teplotách a na drsnějších površích. Oproti tomu ale existují obdobné studie prokazující opak [33].

Výše uvedené teorie, ale zatím nejsou dostatečně podloženy a otázka rozdílu mezi nukleací zárodku na kontaktní linii tří fází oproti nukleaci na kontaktní ploše dvou fází zatím nebyla zcela uspokojivě odpovězena [33].

#### 2.2.4 Hydrofobní/ledofobní povlaky

V předchozích kapitolách byla popsána hydrofobnost a s tím spojená ledofobnost povrchů hlavně z hlediska jejich morfologie. Ve skutečnosti ledofobnost ovlivňuje nejen morfologie, ale i chemické složení povrchu. Mezi ledofobní povlaky řadíme kromě již zmíněných superhydrofobních povlaků také ty s nízkou povrchovou energií a tzv. SLIPs (slippery liquid – infused lporous surfaces) povlaky [34, 35].

## Povlaky s nízkou povrchovou energií

Adheze ledu k povrchu je ovlivněna interakcí polárních molekul ledu s daným povrchem. Základní fyzikální mechanismy, kterými je tato interakce podmíněna jsou vodíkové vazby, van der Waalsovi síly a síly elektrostatické, které jsou z uvedených nejdominantnější. Materiály s nízkou permitivitou tedy značně snižují adhezi ledu ke svému povrchu [35].

Náboje na ledu indukují stejné a opačné náboje na kovech, zatímco na dielektrikách je indukovaný náboj menší a je dán dielektrickou konstantou následující rovnicí (13) [36]:

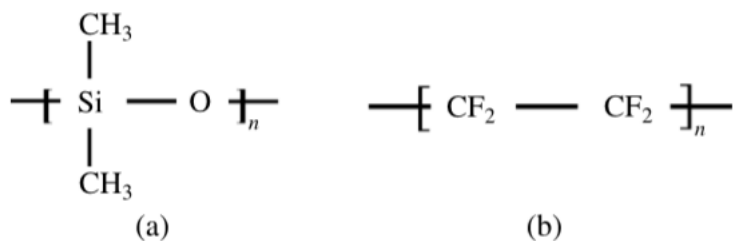
$$q' = q \cdot \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \quad (13)$$

kde  $q'$  je obrazný náboj indukovaný nábojem  $q$  na povrchu ledu a  $\varepsilon$  je dielektrická konstanta povrchu, na kterém led ulpívá. Z této rovnice (13) vyplývá, že materiál s velmi nízkou dielektrickou konstantou značně snižuje adhezní sílu ledu redukcí elektrostatických sil [36].

Do této skupiny se řadí hlavně polymery obsahující fluoridy a silikonové polymery [35, 37].

Fluoropolymery mají velmi nízkou permitivitu, která vede k snížení elektrostatických sil, které jsou hlavní příčinou adheze ledu k danému povrchu. Z fluoropolymerů je nejběžněji využívaným polytetrafluorethylen (PTFE) (viz Obr. 16b) [37, 38].

Silikonové povlaky (viz Obr. 16a) jsou další skupinou, která má ledofobní potenciál. Interakční energie mezi těmito polymery a vodou je až třikrát menší, než je tomu u fluorovodíkových polymerů. Silikony mají také nízkou teplotu skelného přechodu  $T_g$ , která ovlivňuje mobilitu molekuly. Pokud je tato teplota nízká, segmenty molekuly mohou měnit svoji polohu a polymer je pak nazýván jako flexibilní či měkký a odpovídá amorfnímu stavu. Rozdílné mechanické vlastnosti mezi takovýmto materiálem a ledem pak vedou k jeho velmi nízké adhezi [37].



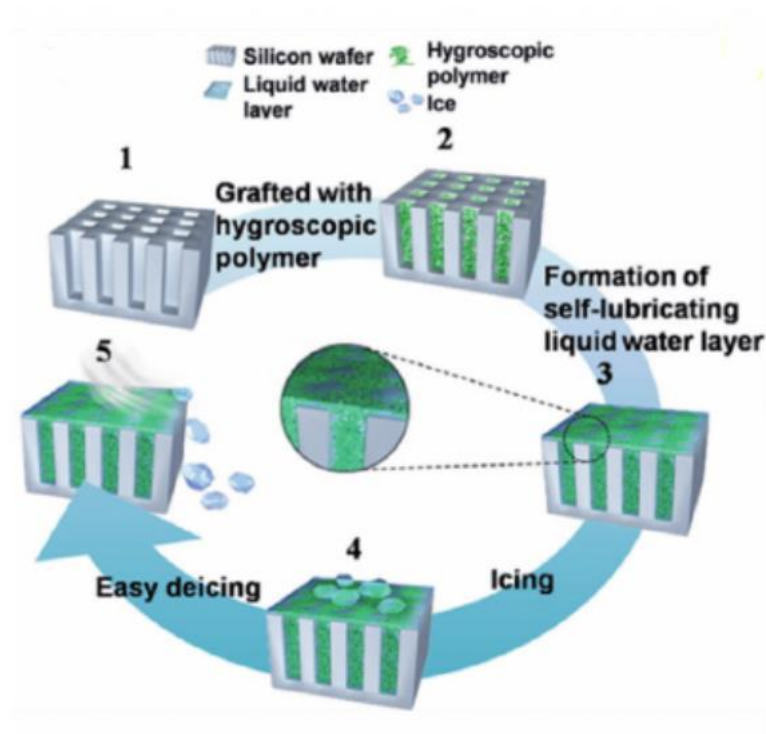
Obr. 16 Strukturální vzorce polymerů a) silikon b) PTFE [37]

### SLIP (sliperry liquid – infused porous) povlaky

Jedná se o povlaky inspirované rostlinou čeledi Nephentes s určitou texturou/porezitou, ve kterých je obsažena kapalina. V závislosti na použité kapalině se pak rozdělují na povlaky s vrstvou na olejové či vodní bázi [35].

V případě povlaků s vrstvou oleje dochází k vytvoření rovinné vrstvy, která je navíc chemicky homogenní, tedy značně se redukuje možnost vzniku heterogenní nukleace zárodku. Jedná se o nanostrukturální povlak s nízkou povrchovou energií molekul oleje, který může být například perfluorovaný olej. Tyto povlaky vykazují vynikající ledofobní vlastnosti, mají ovšem značnou nevýhodu, kterou je jejich nízká trvanlivost. Značná část tohoto lubrikantu se vypařuje nebo odvádí pryč s každým cyklem zmrznutí/tání. Pro trvalou ochranu proti námraze je tedy nutnost jeho doplňování. Další nevýhodou tohoto jevu je pak škodlivost olejů pro životní prostředí [35].

Dalším typem jsou pak povlaky, kde lubrikační činidlo tvoří kapaliny na vodní bázi. Používají se například povlaky, které obsahují zesíťnou (poly) akrylovou kyselinu, hyaluronovou kyselinu či hydrofilní polyurethanové částice. Hygroskopické polymery zesíťné (poly) ethylenglykoldiakrylátem absorbují vodu a bobtnají. Pokud je teplota dostatečně snížena, polymerní síť nasátá vodou migruje z mikropórů povlaku na povrch a dochází samomaznému jevu (viz Obr. 17). Tímto je adheze ledu značně redukována a led může být snadno odstraněn i mírným větrem [35].



Obr. 17 Princip SLIP povlaku [34]

## Elastomery

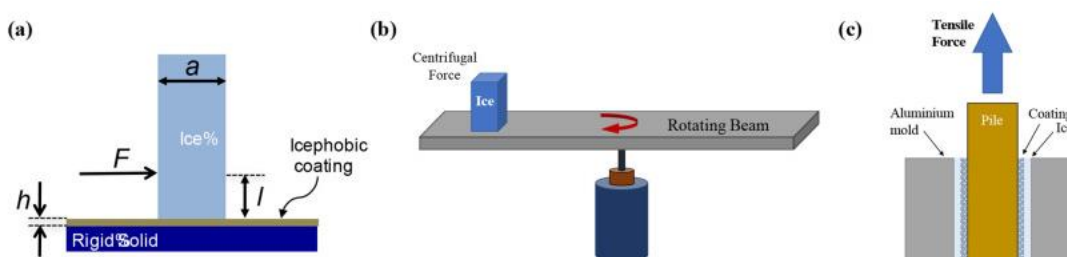
Použití elastomerů k zajištění ledofobnosti je asi vůbec nejnovějším přístupem v této oblasti. Ledofobnost takovýchto polymerů je dána jejich viskoelasticitou, což znamená, že vykazují chování jak látky pevné, tak látky kapalné. Řetězce takovýchto makromolekul jsou z části pohyblivé a umožňují tak prokluz na rozhraní s pevnou látkou – tedy i ledovou vrstvou [39].

## 2.3 Metody měření adheze ledu

Existují dvě hlavní skupiny metod, pomocí kterých se měří adheze ledu k povrchům. První skupinu tvoří metody, které jsou založené na principu odtrhnutí vzniklé ledové vrstvy od povrchu, kde led se tvoří v omezeném prostoru, běžně mezi dvěma povrchy – tzv. sendvič. Adhezní síla je pak vyjádřena smykovou silou potřebnou k oddělení ledu od povrchu. Tyto metody jsou nejběžněji užívané [40].

Druhou skupinu pak tvoří metody, kde depozice ledu probíhá v neuzavřeném prostoru. Patří sem testy, kde je led oddělován ohýbáním vzorků nebo například podrobení daného vzorku odstředivé síle [40].

V zásadě se nejčastěji používají tři zkoušky měření adheze ledu k ledofobním materiálům, mezi které patří kyvetová zkouška, metoda s použitím odstředivé síly a metoda tahová (viz Obr. 18) [2].



Obr. 18 Metody měření adhezní síly ledu a) kyvetová zkouška b) metoda odstředivé síly c) tahová metoda [2]

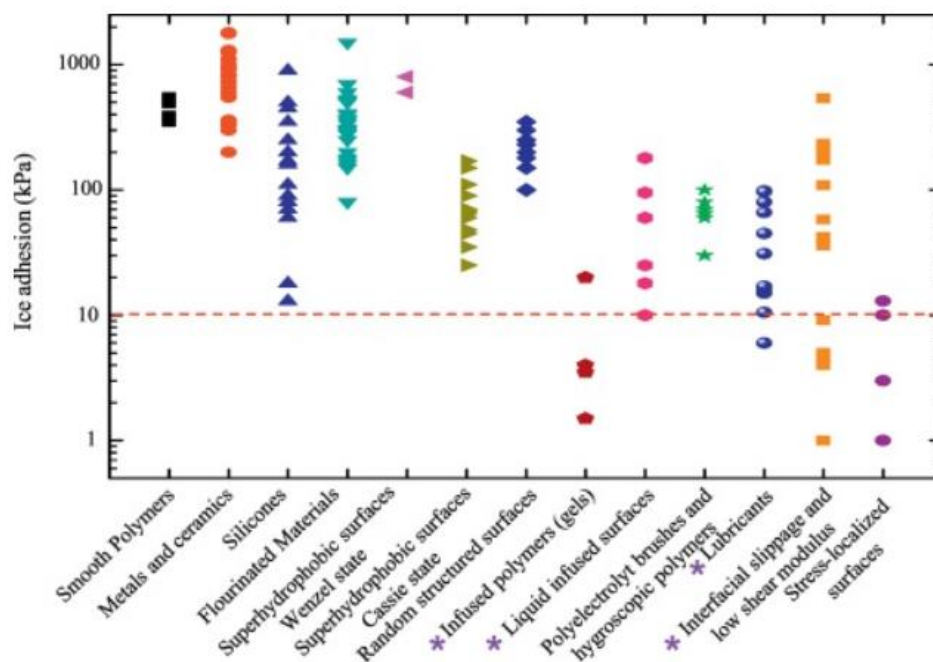
První zkouška spočívá ve vytvoření ledových sloupců s definovanou geometrií – kyvet na zmrzlém ledofobním podkladu. Do takovýchto tvarových nádob se nejprve nalije voda, které v důsledku ochlazení na zmrzlém podkladu vytvoří led. Následně se měří síla nutná k odtržení jednotlivých sloupců [2].

Další zkouškou, která se velmi často využívá je metoda, při které se využívá odstředivá síla.



Principem této zkoušky je vytvoření ledové vrstvy na špičce nosníku či křídla, které se následně uvádí do rotačního pohybu. Rychlost rotace postupně narůstá a mezi ledem a ledofobním povlakem vzniká smykové napětí. Adhezní síla je pak určována pomocí odstředivé síly, při které došlo k porušení tohoto rozhraní [2].

Zkouška, ve které se síla adheze ledu k povlaku měří pomocí odtrhnutí při tahové zkoušce se skládá ze zařízení, které je tvořeno dvěma soustřednými válci. Vnitřní povrch většího válce je povlakován testovaným ledofobním povlakem, vnitřní válec je tvořen pouze základním materiálem, kterým je pro oba válce hliník. Prostor mezi těmito válci je zaplněn vodou a celá sestava se nechává zmrznout. Po vytvoření ledu se následně aplikuje tahová síla na vnitřní válec. Adhezní síla ledu na hliníku a hliníkových slitinách je velká (z tohoto důvodu se hodnoty adheze ledu na hliníku berou jako výchozí pro porovnávání) a k porušení tedy dochází na rozhraní ledu a ledofobního povlaku na vnějším válci. Síla, při které dojde k porušení je pak opět výchozí pro určení adhezní síly [2].



Obr. 19 Hodnoty adheze pro různé typy materiálů [2]

Obr. 19 znázorňuje hodnoty adhezní síly pro různé typy materiálů. Pro každý zkoušený materiál je patrný značný rozptyl hodnot, který je dán mnoha faktory, důležité je uvést rozdílnost použitých, které nejsou nijak normovány zkoušek i podmínky, za kterých jsou prováděny. [2].

Za ideální ledofobní povlak považujeme takový, ze kterého se led oddělí svou vlastní vahou nebo pomocí menších sil (například působení větru) [2].

Mezní hodnotou, která takovýto povlak definuje se pohybuje od nejmenší hodnoty, kdy je adhezní síla definována jako 10kPa po nejčastěji uváděnou, která dosahuje hodnoty 150kPa. Nutno podotknout, že tato hodnota není nijak normována a její hodnota se dle různé literatury mění [2].

### 3 Experimentální část

Praktická část této práce pojednává o srovnání adhezní síly v tangenciálním a normálovém směru mezi třemi materiály. Hlavní pozornost je věnována povlaku ECTFE, jehož chování je následně porovnáváno s ocelí a hliníkem ve dvou povrchových úpravách – leštěné a soustružené. ECTFE bylo vybráno z důvodu, že popis jeho "ledofobní" vlastnosti nejsou příliš dostupné.

#### 3.1 Experimentální materiál

Zkouška byla provedena pro vzorky z následujících materiálů (Tab. 1):

*Tab. 1 Materiály použité pro experiment*

Materiál	Kvalita povrchu	
Dural AW-2030 T3 [AlCu4PbMg], EN 573-3	soustružený	leštěný
Ocel X5CrNiCuNb16-4, W.-Nr. 14542	soustružená	leštěná
Povlak ECTFE		

Jak již bylo zmíněno v úvodu, hlavním zkoumaným materiálem je povlak fluoropolymeru ECTFE s obchodním názvem *Halar*. Fluoropolymery jsou materiály s nízkou relativní permitivitou – tedy snižuje se náboj indukovaný na povrchu a tímto se pak snižuje i adhezní síla ledu, který se k povrchu přitahuje hlavně pomocí elektrostatických sil a Van der Waalsovou interakcí.

ECTFE je zkratka pro semikrystalický polymer, konkrétně kopolymer ethylenu a chlorotrifluorethylenu. Tento materiál se obecně vyznačuje velmi dobrou chemickou i tepelnou odolností a žáruvzdorností. Základní mechanické vlastnosti jsou uvedeny v Tab. 2. Typické aplikace tohoto kopolymeru jsou tedy hlavně pro vysoce korozní prostředí či prostředí se silnými minerálními či oxidačními kyselinami – jedná se tedy například o reaktory, potrubní systémy, odsavače par apod. [41].

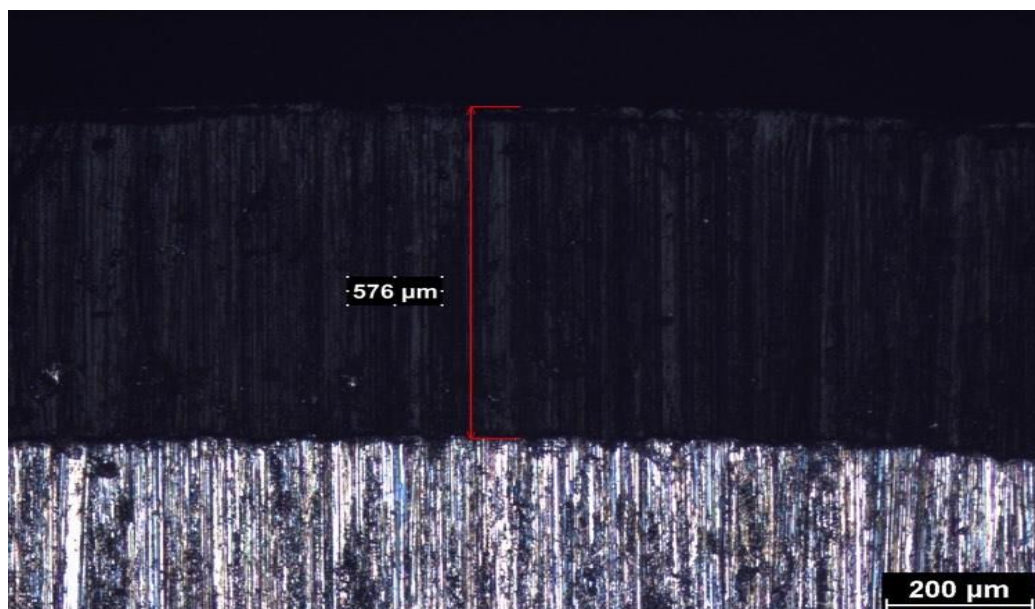
Tab. 2 Vybrané vlastnosti materiálu Halar

Teplota tání [°C]	Modul pružnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Dielektrická konstanta
240 - 245	1 700	32	48	2,5

Povlak byl na základní materiál deponován ručně žárovým nástřikem. Skládá se ze dvou vrstev tzv. primer a top coat. Primer se skládá z materiálu označeného jako Grade 6614 a používá se ke zlepšení adheze nanášeného polymeru k základnímu materiálu. Top coat je již pak tvořen samotným testovaným materiálem s označením Grade 6104.

Napětí na pistoli při deponování se pohybuje mezi 30 až – 50 kV s proudovým rozmezím 20 – 25 mA. Vrstvy byly vypékány v rozmezí teplot 250 – 290 °C.

Velikost částic prášku primeru je dle měření na elektronovém skenovacím mikroskopu 30 až 60 μm. Částice top coatu se pohybují v rozmezí 80 – 120 μm. Celková tloušťka povlaku se pohybuje okolo 570 μm (tloušťka povlaku je patrná z Obr. 20).



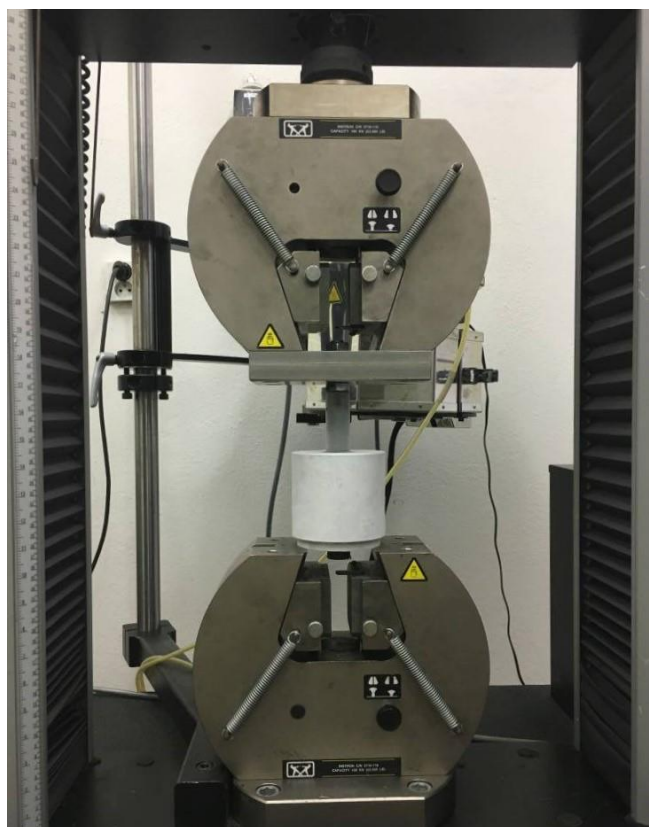
Obr. 20 Tloušťka povlaku ECTFE

## 3.2 Měření adhezní síly

Pro měření adhezní síly byly provedeny zkoušky, ve kterých docházelo k odtrhnutí ledové vrstvy od daného testovaného materiálu v tangenciálním a normálovém směru.

### Zkouška pro měření smykového napětí

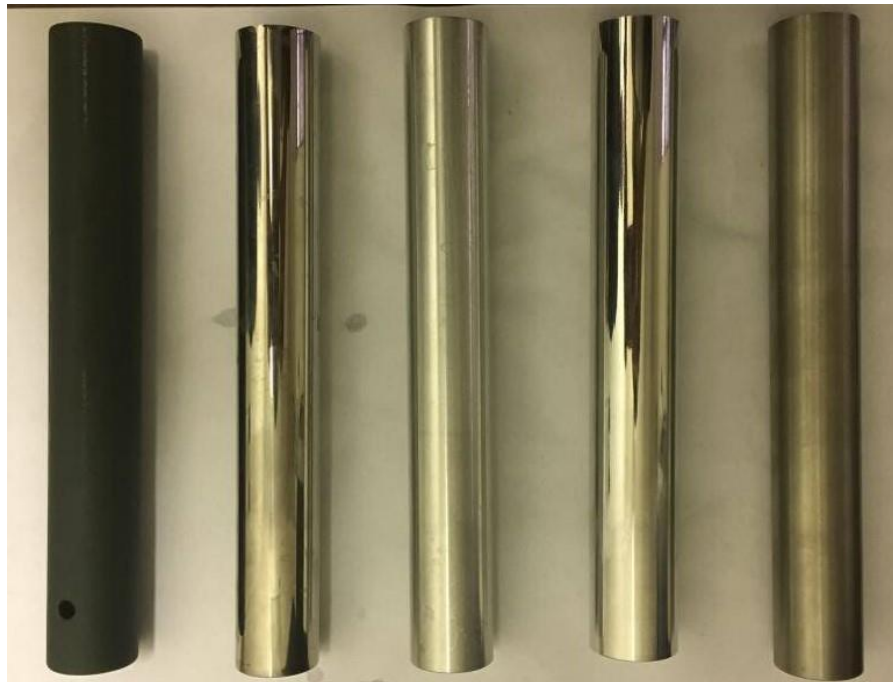
Zkouška pro měření smykového napětí je patrná na Obr. 21. Jedná se o tlakovou zkoušku, která se provádí na speciálním přípravku (viz Obr. 22), ve kterém dochází k přimrznutí testovaného materiálu a ledové vrstvy, která je v prostoru mezi vnějším hliníkovým válcem a experimentálním materiálem, který tvoří vnitřní válec (použité testovací tyče viz Obr. 23). Změřená síla při odtrhnutí vzhledem k ploše ledové vrstvy pak udává smykové napětí.



*Obr. 21 Tlaková zkouška pro měření smykového napětí*



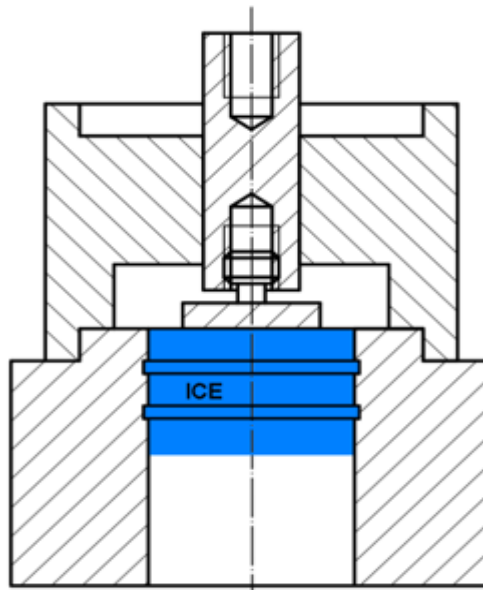
**Obr. 22 Přípravek pro měření smykového napětí**



**Obr. 23 Vzorky pro měření smykového napětí (zleva: povlak ECTFE, dural leštěný a soustružený, ocel leštěná a soustružená)**

## Zkouška pro měření normálového napětí

Měření normálového napětí pak probíhá pomocí zkoušky patrné na Obr. 24.



Obr. 24 Schéma zkoušky pro měření normálového napětí

Tato metoda je založena na principu, kdy se nejprve na dně formy vytvoří ledová plocha, na kterou se následně pokládá testovaný vzorek. Poté se celý přípravek opět nechá zmrazit. Odtrhovou sílu pak měříme pomocí siloměru. Pomocí přepočtu této síly k ploše opět dostáváme napětí charakterizující adhezní sílu, tentokrát ale normálové.

Zde je nutné podotknout chybovost této zkoušky. Měření čistě normálového napětí vyžaduje namáhání pouze na tah. V našem případě ovšem nelze čistě tento způsob namáhání simulovat. Po položení vzorku na ledovou vrstvu dochází k určitému propadnutí vzorku do ledové plochy, která se vzorkem nepatrně ohřeje. Je nutné tedy brát v potaz, že je vzorek mírně ledovou plochou obklopen a při odtrhávání nedochází k čistě tahovému namáhání.



*Obr. 25 Přípravek pro měření napětí v normálovém směru*

Pro zamražení vzorků pro obě dvě zkoušky byla použita vždy stejná teplota  $T = -40\text{ °C}$  s dobou výdrže na této teplotě 8 hodin.

### 3.3 Výsledky měření

Adhezní síla ledu k jednotlivým povlakům odpovídá normálovému či smykovému napětí  $\tau$ , vypočteného ze vzorce:

$$\tau = \frac{F}{S},$$

kde  $F$  – síla při odtržení [N] a  $S$  – kontaktní plocha [mm<sup>2</sup>].



## Měření adhezní síly – tangenciální směr

Měření adhezní síly v tangenciálním směru proběhlo vždy na pěti vzorcích, z jejichž výsledků byla vypočítána průměrná hodnota a standardní směrodatná odchylka. Síla  $F$  je odečtena rovnou ze softwaru během tlakové zkoušky, kontaktní plocha mezi testovanou tyčí a ledem je pak tvořena pláštěm testované tyče a výškou vodního sloupce, výpočet je patrný v Tab. 3:

Tab. 3 Výpočet kontaktní plochy

Vnitřní poloměr vnějšího válce [dm]	0,195
Vnější poloměr testované tyče [dm]	0,120
Plocha podstavy vodního sloupce [dm <sup>2</sup> ]	0,074
Objem nalité vody [dm <sup>3</sup> ]	0,050
Výška vodního sloupce [dm]	0,674
Kontaktní plocha [mm <sup>2</sup> ]	5079

Vypočtené hodnoty smykových napětí pro ocel a hliník jsou patrné z Tab. 4 až 7:

Tab. 4 Výpočet smykového napětí pro soustružený dural

Dural - soustružený					
Vzorek č. [-]	1	2	3	4	5
Síla [N]	5814	7311	6672	6267	3528
$\tau$ [kPa]	1144,63	1439,35	1313,55	1233,82	694,58
$\tau_{Ds}$	(1165 $\pm$ 284) kPa				

Tab. 5 Výpočet smykového napětí pro leštěný dural

Dural - leštěný					
Vzorek č. [-]	1	2	3	4	5
Síla [N]	4774	3916	3545	5026	4862
$\tau$ [kPa]	939,88	770,96	697,92	989,49	957,21
$\tau_{DI}$	(871 $\pm$ 128) kPa				

Tab. 6 Výpočet smykového napětí pro soustruženou ocel

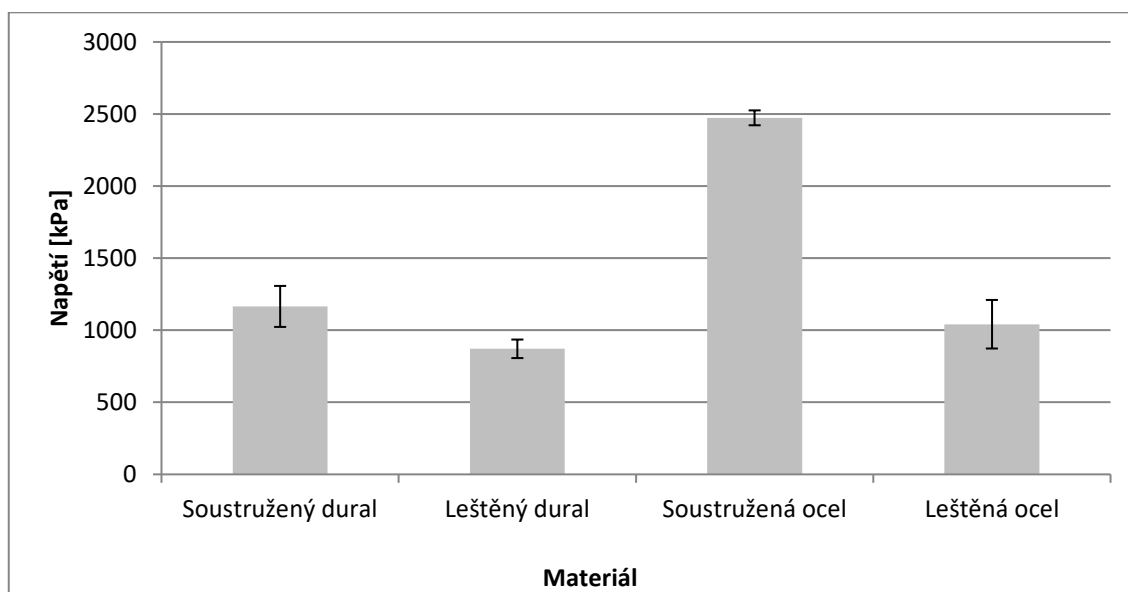
Ocel - soustružená					
Vzorek č. [-]	1	2	3	4	5
Síla [N]	12465	13285	11964	12229	12879
$\tau$ [kPa]	2454,05	2615,48	2355,41	2407,58	2535,55
$\tau_{Os}$	(2473 $\pm$ 103) kPa				

Tab. 7 Výpočet smykového napětí pro leštěnou ocel

Ocel - leštěná					
Vzorek č. [-]	1	2	3	4	5
Síla [N]	4422	3410	4495	6565	7561
$\tau$ [kPa]	870,58	671,34	884,95	1292,48	1488,57
$\tau_{01}$	(1041 $\pm$ 336) kPa				

V následujícím grafu (viz Obr. 26) jsou pro porovnání uvedené vypočtené průměrné hodnoty smykových napětí pro dané materiály.

Jak je z grafu patrné, největší smykové napětí, a tedy i nejvyšší adhezní sílu vykazoval led na povrchu oceli, která byla soustružená. Druhou nejvyšší hodnotu adhezní síly pak vykazuje soustružený dural, následuje leštěná ocel a nejmenší adheze byla naměřena u leštěného duralu.



Obr. 26 Graf smykových napětí pro dané materiály

Tyto hodnoty nejsou v souladu s teoretickým předpokladem, který vychází z toho, že hliník má k ledu ze všech materiálů nejvyšší adhezi. Tyto experimenty ale ve většině případech neuvádějí detailnější informace o materiálu – například o jeho konkrétním složení, povrchové úpravě apod.

Dále lze sledovat, že u obou materiálů je adhezní síla ledu menší k povrchu, který byl leštěný. Nižší drsnost, tedy hladší povrch způsobuje, že led na povrchu neulpívá tak vysokou silou, jako u povrchu drsnějšího. Toto lze vysvětlit tím, že na hladkém povrchu nedochází k zapadání kapek do nerovností a tím i k nárůstu reálné kontaktní plochy a po zmrznutí může ledová vrstva snadněji klouzat po povrchu.

Pro povlak ECTFE bylo testováno celkem pět vzorků. Pro každý vzorek byla měřena drsnost – parametr Ra a Rz. Hodnoty jednotlivých drsnostních parametrů jsou uvedeny v Tab. 8.

**Tab. 8 Hodnoty drsnostních parametrů pro vzorky s povlakem ECTFE**

Vzorek		1	2	3	4	5
Ra [ $\mu\text{m}$ ]	1. měření	0,362	0,46	0,567	0,47	0,426
	2. měření	0,261	0,266	0,314	0,43	0,261
	3. měření	0,348	0,359	0,616	0,396	0,485
	průměr	0,324	0,362	0,499	0,432	0,391
Rz [ $\mu\text{m}$ ]	1. měření	0,7	1,12	0,96	1,45	0,79
	2. měření	0,83	0,84	0,64	1,23	0,57
	3. měření	0,69	0,88	0,96	1,05	1,09
	průměr	0,740	0,947	0,853	1,243	0,817

Každý vzorek byl vystaven tlakové zkoušce celkem třikrát. Jako v případě předchozích materiálů, síla při odtržení byla rovnou odečítána z PC a stejně je tomu tak v případě odtrhové plochy, která je vypočtena identicky. Hodnoty výsledných smykových napětí jsou uvedeny v následujících tabulkách Tab. 9 – 13.

**Tab. 9 Výpočet smykového napětí pro povlak ECTFE - 1. vzorek**

Povlak ECTFE - 1. vzorek			
Měření č. [-]	1	2	3
Síla [N]	605	1428	677
$\tau$ [kPa]	119	281	133
$\tau_1$	(178 $\pm$ 90) kPa		

**Tab. 10 Výpočet smykového napětí pro povlak ECTFE - 2. vzorek**

<b>Povlak ECTFE - 2. vzorek</b>			
Měření č. [-]	1	2	3
Síla [N]	948	1502	380
$\tau$ [kPa]	187	296	75
$\tau_2$	(186 $\pm$ 110) kPa		

**Tab. 11 Výpočet smykového napětí pro povlak ECTFE - 3. vzorek**

<b>Povlak ECTFE - 3. vzorek</b>			
Měření č. [-]	1	2	3
Síla [N]	869	1088	776
$\tau$ [kPa]	171	214	153
$\tau_3$	(179 $\pm$ 32) kPa		

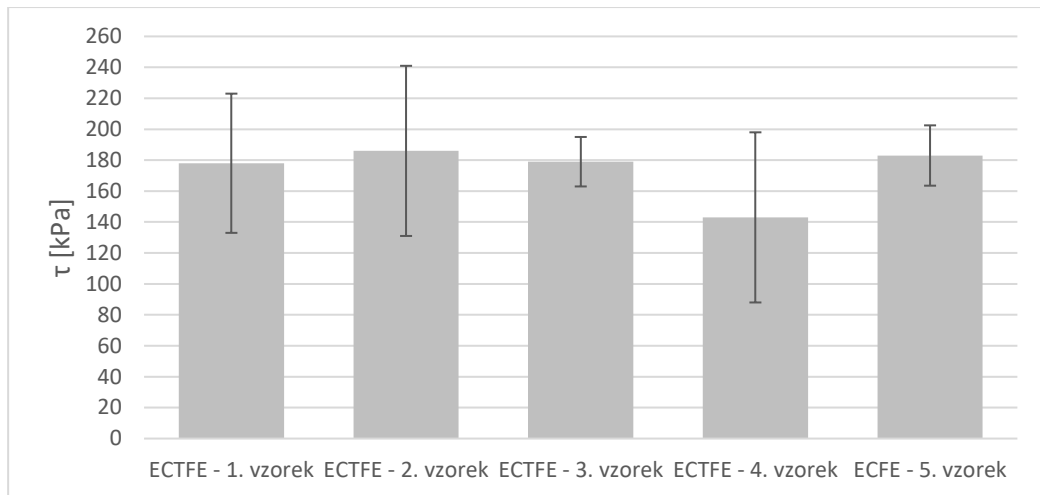
**Tab. 12 Výpočet smykového napětí pro povlak ECTFE - 4. vzorek**

<b>Povlak ECTFE - 4. vzorek</b>			
Měření č. [-]	1	2	3
Síla [N]	1368	375	432
$\tau$ [kPa]	269	74	85
$\tau_4$	(143 $\pm$ 110) kPa		

**Tab. 13 Výpočet smykového napětí pro povlak ECTFE - 5. vzorek**

<b>Povlak ECTFE - 5. vzorek</b>			
Měření č. [-]	1	2	3
Síla [N]	1155	852	777
$\tau$ [kPa]	227	168	153
$\tau_5$	(183 $\pm$ 39) kPa		

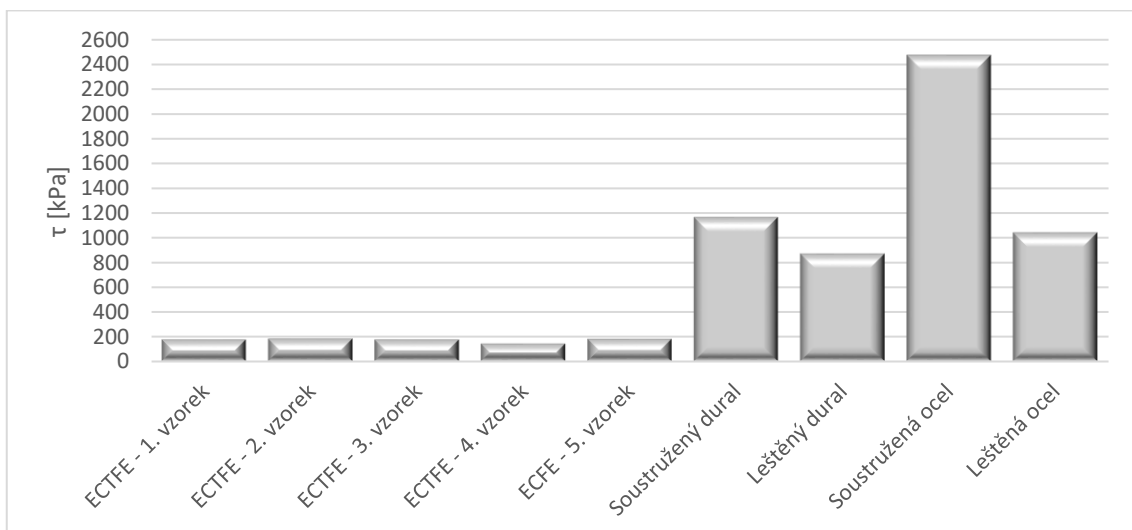
Grafické znázornění hodnot smykových napětí pro uvedených pět vzorků je patrné na Obr. 27.



**Obr. 27 Grafické znázornění hodnot smykových napětí pro povlak ECTFE**

Maximální hodnoty smykového napětí, tedy nejvyšší přilnavost ledu k povlaku ECTFE vykazuje vzorek č. 2, kdy  $\tau_2 = 186$  kPa. Naopak nejnižší adheze byla naměřena u vzorku č. 4, kde smykové napětí dosahuje hodnoty  $\tau_4 = 143$  kPa.

Pokud porovnáme tyto hodnoty s předchozími materiály (viz Obr. 28), adhezní síla ledu k povlaku ECFE se pohybuje o řád méně, než je tomu u oceli a duralu v obou povrchových úpravách. Ledofobnost fluorového povlaku je tedy značně vyšší, než je tomu u těchto dvou kovů.



**Obr. 28 Hodnoty smykových napětí všech testovaných materiálů**

## Měření adhezní síly – normálový směr

Pro měření adhezní síly v normálovém směru byla použita zkouška, jež je detailněji popsána v předchozí kapitole. Jejím principem je zavěšení přípravku, ve kterém je přimrzlý experimentální materiál k ledové ploše na siloměr tak, že při zdvihu dojde k odtržení vzorku od ledu. Tato síla je pak použita pro výpočet adhezní síly, která je vyjádřena pomocí normálového napětí, které je vypočteno jako podíl síly k ploše:

$$\tau = \frac{F}{S},$$

kde  $F$  – síla při odtržení [N] a  $S$  – kontaktní plocha [mm<sup>2</sup>].

Tato zkouška byla použita pouze pro měření 1. vzorku povlaku ECTFE a soustružené oceli a duralu.

Kontakt mezi testovaným materiálem a ledovou vrstvou je tvořen kruhovou plochou, která je vypočtena v následující tabulce Tab. 14.

**Tab. 14 Výpočet kontaktní plochy pro normálové napětí**

Průměr vzorku [mm]	20
Plocha odtrhu [mm <sup>2</sup> ]	314

Výpočet normálového napětí pro ocel, dural (soustružené) a povlak ECTFE je pak patrný z Tab. 15 – 17.

**Tab. 15 Výpočet normálového napětí – povlak ECTFE (1. vzorek)**

Povlak ECTFE - 1. vzorek			
Měření č. [-]	1	2	3
Síla [N]	2	7	5
$\tau$ [kPa]	6	22	16
$\tau_{1N}$	(15 ± 8) kPa		

**Tab. 16 Výpočet normálového napětí – dural soustružený**

<b>Dural - soustružený</b>					
Měření č. [-]	1	2	3	4	5
Síla [N]	381	206	401	344	557
$\tau$ [kPa]	1213	656	1276	1095	1773
$\tau_{DN}$	(1203 $\pm$ 400) kPa				

**Tab. 17 Výpočet normálového napětí – ocel soustružená**

<b>Ocel - soustružená</b>					
Měření č. [-]	1	2	3	4	5
Síla [N]	429	412	520	378	373
$\tau$ [kPa]	1366	1311	1655	1203	1187
$\tau_{ON}$	(1345 $\pm$ 189) kPa				

Hodnoty normálových napětí pro tyto tři uvedené materiály vykazují stejnou tendenci adheze k ledu, jako je tomu u smykového napětí, kdy adhezí síla je maximální u soustružené oceli, následuje dural a minimální hodnoty pak dosahuje povlak ECTFE.

## Závěr

Cílem práce bylo vyhodnotit adhezní sílu ledu k jednotlivým experimentálním materiálům, kterými byly ocel a dural s různými povrchy – soustružené a leštěné a následně fluoropolymerový povlak ECTFE. Vyhodnocení adhezní síly probíhalo pomocí tlakové zkoušky k zjištění smykového napětí a pomocí zkoušky pro vyhodnocení napětí normálového.

Z hodnot smykových napětí, charakterizující adhezní sílu pro ocel (W. Nr. 14542) a dural (AW -2030 T3) dosahují nejvyšší hodnoty oba materiály ve stavu bez povrchové úpravy – v soustruženém stavu, v leštěném stavu je adhezní síla pro ocel i dural vždy nižší. Maximální adheze je pak dosaženo v soustruženém stavu u oceli, kdy smykové napětí  $\tau = 2473$  kPa. Naopak minimální hodnoty tohoto napětí je dosaženo u leštěného duralu  $\tau = 871$  kPa.

Pro povlak ECTFE bylo zkoumáno celkem pět vzorků. K možnosti lepší specifikace povrchu povlaku byly pro všechny vzorky měřeny drsnostní parametry Ra a Rz. Smyková napětí pro daný fluoropolymerový povlak se pohybovala v rozmezí od minimální hodnoty  $\tau = 143$  kPa po maximální  $\tau = 186$  kPa. Podle uvedených kritérií ledofobnosti (150 kPa) lze ECTFE považovat za téměř ledofobní materiál.

Zvolená metoda měření smykového napětí vnáší nutnost vyšší síly na odtržení, protože zmrzlý led se roztahuje a zvyšuje se tření. Očekává se, že pokud by měření proběhlo pomocí zkoušky, kdy je přimrzlý kus ledu na volném povrchu, který by byl z boku odtlačován, zjištěné napětí by bylo o něco nižší.

Při porovnání hodnot smykových napětí analyzovaných slitin kovů a fluoropolymerového povlaku je patrný značný rozdíl, kdy fluoropolymer ECTFE dosahuje hodnot o řád nižších, než je tomu u oceli a duralu. Adhezní síla k tomuto typu materiálu je tedy značně nižší. Měřením adhezní síly dle normálového napětí bylo dosaženo obdobných výsledků. Tento jev je způsoben nízkou relativní permitivitou, která vede ke snížení elektrostatických sil, které jsou jednou z hlavních příčin adheze ledu k povrchu materiálu. Měření těchto charakteristik bude předmětem dalšího výzkumu. Rovněž bude měřena i volná povrchová energie.



## Seznam obrázků

Obr. 1 Tvorba ledových usazenin v různých odvětvích průmyslu [2] .....	9
Obr. 2 Hexagonální struktura ledu označována jako $I_h$ [4] .....	10
Obr. 3 Fázový diagram vody ukazující existenci jednotlivých skupenství při dané teplotě a tlaku [3] .....	11
Obr. 4 Morfologie různých druhů ledové usazeniny: a) zrnitá námraza b) průsvitná námraza c) ledovka [12] .....	13
Obr. 5 Vliv teploty a rychlosti větru na druh tvorby ledové vrstvy [8] .....	15
Obr. 6 Vztahy mezi smáčivými a nesmáčivými povrchy [15] .....	17
Obr. 7 Vliv struktury povrchu materiálu na charakter smáčivosti [15] .....	17
Obr. 8 Chování kapky dle Wenzelova (a) a Cassie-Baxterova (b) modelu [15] .....	18
Obr. 9 Přechod mezi Cassie-Baxterovo a Wenzelovo modelem [15] .....	19
Obr. 10 Prvek profilu [23] .....	21
Obr. 11 Průměrná aritmetická úchylka profilu $R_a$ [25] .....	22
Obr. 12 Rozdílnost povrchů při stejném drsnostním parametru $R_a$ .....	22
Obr. 13 Největší výška profilu $R_z$ [26] .....	23
Obr. 14 Možnosti měření úhlů $\theta_{adv}$ a $\theta_{rec}$ [27] .....	24
Obr. 15 Princip homogenní a heterogenní nukleace zárodku [31] .....	26
Obr. 16 Strukturní vzorce polymerů a) silikon b) PTFE [37] .....	30
Obr. 17 Princip SLIP povlaku [34] .....	31
Obr. 18 Metody měření adhezní síly ledu a) kyvetová zkouška b) metoda odstředivé síly c) tahová metoda [2] .....	32
Obr. 19 Hodnoty adheze pro různé typy materiálů [2] .....	33
Obr. 20 Tloušťka povlaku ECTFE .....	36
Obr. 21 Tlaková zkouška pro měření smykového napětí .....	37
Obr. 22 Přípravek pro měření smykového napětí .....	38
Obr. 23 Vzorky pro měření smykového napětí (zleva: povlak ECTFE, dural leštěný a soustružený, ocel leštěná a soustružená) .....	38
Obr. 24 Schéma zkoušky pro měření normálového napětí .....	39
Obr. 25 Přípravek pro měření napětí v normálovém směru .....	40
Obr. 26 Graf smykových napětí pro dané materiály .....	42

Obr. 27 Grafické znázornění hodnot smykových napětí pro povlak ECTFE .....45

Obr. 28 Hodnoty smykových napětí všech testovaných materiálů .....45

## Seznam tabulek

Tab. 1 Materiály použité pro experiment.....	35
Tab. 2 Vybrané vlastnosti materiálu Halar.....	36
Tab. 3 Výpočet kontaktní plochy.....	41
Tab. 4 Výpočet smykového napětí pro soustružený dural .....	41
Tab. 5 Výpočet smykového napětí pro leštěný dural .....	41
Tab. 6 Výpočet smykového napětí pro soustruženou ocel.....	41
Tab. 7 Výpočet smykového napětí pro leštěnou ocel .....	42
Tab. 8 Hodnoty drsnostních parametrů pro vzorky s povlakem ECTFE.....	43
Tab. 9 Výpočet smykového napětí pro povlak ECTFE - 1. vzorek .....	43
Tab. 10 Výpočet smykového napětí pro povlak ECTFE - 2. vzorek.....	44
Tab. 11 Výpočet smykového napětí pro povlak ECTFE - 3. vzorek.....	44
Tab. 12 Výpočet smykového napětí pro povlak ECTFE - 4. vzorek.....	44
Tab. 13 Výpočet smykového napětí pro povlak ECTFE - 5. vzorek.....	44
Tab. 14 Výpočet kontaktní plochy pro normálové napětí .....	46
Tab. 15 Výpočet normálového napětí – povlak ECTFE (1. vzorek).....	46
Tab. 16 Výpočet normálového napětí – dural soustružený.....	47
Tab. 17 Výpočet normálového napětí – ocel soustružená .....	47

## Bibliografie

- [1] JAMIL, Muhammad Imran, Abid ALI, Fazal HAQ, Qinghua ZHANG, Xiaoli ZHAN a Fengqiu CHEN. Icephobic Strategies and Materials with Superwettability: Design Principles and Mechanism. *Langmuir* [online]. 2018, (34) [cit. 2020-04-04].  
Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/336823684\\_Icephobic\\_Strategies\\_and\\_Materials\\_with\\_Superwettability\\_Design\\_Principles\\_and\\_Mechanism](https://www.researchgate.net/publication/336823684_Icephobic_Strategies_and_Materials_with_Superwettability_Design_Principles_and_Mechanism)
- [2] IRAJIZAD, Pezman, Sina NAZIFI a Hadi GHASEMI. Icephobic surfaces: Definition and figures of merit. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2019 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0001868618303312>
- [3] STULÍKOVÁ, Ivana. *Není led jako led* [online]. 2019 [cit. 2020-04-02]. Dostupné z:  
<https://www.matfyz.cz/clanky/1283-neni-led-jako-led>
- [4] BENTON, Owen, Olga SIKORA a Nic SHANNON. *Electromagnetism on ice: classical and quantum theories of proton disorder in hexagonal water ice* [online]. 2015 [cit. 2020-05-03]. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/275054682\\_Electromagnetism\\_on\\_ice\\_classical\\_and\\_quantum\\_theories\\_of\\_proton\\_disorder\\_in\\_hexagonal\\_water\\_ice](https://www.researchgate.net/publication/275054682_Electromagnetism_on_ice_classical_and_quantum_theories_of_proton_disorder_in_hexagonal_water_ice)
- [5] KONITZER, Franziska. *Eis ist nicht gleich Eis* [online]. 2017 [cit. 2020-04-02].  
Dostupné z: <https://www.weltderphysik.de/thema/hinter-den-dingen/eis-ist-nicht-gleich-eis/>
- [6] V. HOBBS, Peter. *Ice physics* [online]. New York: Oxford University Press Inc., 2010 [cit. 2020-04-02]. ISBN 978-0-19-958771-1.  
Dostupné z: [https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=7Is6AwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=ph2QnPvp1c&sig=YICwC62IZtkEGWgkC1coChKm7g&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=7Is6AwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=ph2QnPvp1c&sig=YICwC62IZtkEGWgkC1coChKm7g&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- [7] CAO, Yihua, Wenyuan TAN a Zhenlong WU. Aircraft icing: An ongoing threat to aviation safety. *Aerospace Science and Technology* [online]. 2018, (75) [cit. 2020-04-03]. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1270963817317601#br0390>

- [8] Weather condition and different types of icing. *Vindportalen.no* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.vindportalen.no/Vindportalen-informasjonssiden-om-vindkraft/Vindkraft/Cold-climate-English/Weather-condition-and-different-types-of-icing>
- [9] VODIČKOVÁ, Kateřina. *Jak vzniká rosa, jíní nebo jinovatka* [online]. 2019 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://www.meteopress.cz/vysvetleni/jak-vznika-rosa-jini-nebo-jinovatka/>
- [10] WORKING GROUP B2.16. *GUIDELINES FOR METEOROLOGICAL ICING MODELS, STATISTICAL METHODS AND TOPOGRAPHICAL EFFECTS* [online]. 2006 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://cigreindia.org/CIGRE%20Lib/Tech.%20Brochure/291%20Guidelines%20for%20Meteorological%20Icing%20Models,%20Statistical%20Methods%20and%20Topographical%20Effects.pdf>
- [11] ČESKÝ HYDROMETEOROLOGICKÝ ÚSTAV. *Námrazové jevy* [online]. [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/meteo/om/vystrahy/napoveda/namrazy.html>
- [12] GOEL, Anand. Design of Transmission Lines for Atmospheric Icing. *Atmospheric Icing of Power Networks* [online]. Springer Science+Business Media B.V., 2008 [cit. 2020-05-03]. ISBN 978-1-4020-8530-7. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=J\\_cFD7GPr38C&pg=PA328&lpg=PA328&dq=soft+rime+hard+rime+glaze&source=bl&ots=hGytok3EIJ&sig=ACfU3U1h8cqkWOGTqpiTXRR\\_Yc17Cx6uvw&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjXprG3qZbpAhUEzaQKHVAdABOQ6AEwEHoECAYQAQ#v=onepage&q=soft%20rime%20hard%20rime%20glaze&f=false](https://books.google.cz/books?id=J_cFD7GPr38C&pg=PA328&lpg=PA328&dq=soft+rime+hard+rime+glaze&source=bl&ots=hGytok3EIJ&sig=ACfU3U1h8cqkWOGTqpiTXRR_Yc17Cx6uvw&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjXprG3qZbpAhUEzaQKHVAdABOQ6AEwEHoECAYQAQ#v=onepage&q=soft%20rime%20hard%20rime%20glaze&f=false)
- [13] BRAGG, M., T. BASAR a M. SELING. *Smart icing systems for aircraft icing safety* [online]. AIAA, 2002 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2002-813>
- [14] ZERNKOVICH, Nick. *Understanding in-flight icing* [online]. Transport Canada Aviation Safety Seminar, 2004 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.529.529&rep=rep1&type=pdf>

- [15] JIANG, Lei a Xinjian FENG. Design and Creation of Superwetting/Antiwetting Surfaces. *Advanced Materials* [online]. 2006 [cit. 2020-04-03]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/adma.200501961>
- [16] RUSSELL, T.P. Surface-Responsive Materials. *Science* [online]. 2002 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://science.sciencemag.org/content/297/5583/964?hwshib2=authn%3A1588664487%3A20200504%253A089aaed9-dfb1-4539-a360-defa877bbb0f%3A0%3A0%3A0%3Ah%2BpHKVSMcVdXox%2BNogswdg%3D%3D>
- [17] CREVOISER, Guillaume de, Pascale FABRE, Jean/Marc CORPART a Ludwik LEIBLER. Switchable Tackiness and Wettability of a Liquid Crystalline Polymer. *Science* [online]. 1999 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://science.sciencemag.org/content/285/5431/1246>
- [18] KŘÍŽ, Martin. *Hydrofilita a hydrofobita jako klíč k řízení vlastností povrchů* [online]. Brno, 2009 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/zynxi/Diplomova\\_prace\\_Kriz.pdf](https://is.muni.cz/th/zynxi/Diplomova_prace_Kriz.pdf). Diplomová práce. MASARYKOVA UNIVERZITA.
- [19] ONER, Didem a Thomas J. MCCARTHY. Ultrahydrophobic Surfaces. Effects of Topography Length Scales on Wettability. *Langmuir* [online]. American Chemical Society, 2000 [cit. 2020-05-04]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/la000598o>
- [20] WENZEL, Robert N. RESISTANCE OF SOLID SURFACES TO WETTING BY WATER. *Industrial Engineering Chemistry* [online]. 1936 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ie50320a024>
- [21] CASSIE, A. B. D. a S. BAXTER. Wettability of porous surfaces. *Transactions of the Faraday Society* [online]. 1944 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/1944/tf/tf9444000546#!divAbstract>
- [22] BICO, José, Uwe THIELE a David QUÉRÉ. *Wetting of textured surfaces* [online]. 2002 [cit. 2020-04-04]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.3.7677&rep=rep1&type=pdf>

- [23] ČSN EN ISO 4287: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda – Termíny, definice a parametry struktury povrchu. Český normalizační institut, 1999
- [24] A Different Slice of Surface Finish. *Quality Magazine* [online]. 2014 [cit. 2017-12-12]. Dostupné z: <https://www.qualitymag.com/articles/92095-a-different-slice-of-surface-finish>
- [25] *Parametry drsnosti* [online]. [cit. 2017-12-19]. Dostupné z: <http://www.klz.inshop.cz/inshop/files/6910230/Parametry%20drsnosti%20Mahr-NEW.pdf>
- [26] Měření drsnosti. *M & B Calibr* [online]. [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: <http://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [27] WOLFS, Mélanie, Thierry DARMANIN a Frédéric GUITTARD. *SUPERHYDROPHOBIC POLYMERS* [online]. Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, Université de Nice-Sophia [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/0471440264.pst594>
- [28] KULINICH, S.A. a M. FARZANEH. Ice adhesion on super-hydrophobic surfaces. *Applied Surface Science* [online]. 2009, (255) [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433209006369?via%3Di> hub
- [29] KULINICH, S.A. a M. FARZANEH. How Wetting Hysteresis Influences Ice Adhesion Strength on Superhydrophobic Surfaces. *Langmuir* [online]. 2009 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/26778962\\_How\\_Wetting\\_Hysteresis\\_Influences\\_Ice\\_Adhesion\\_Strength\\_on\\_Superhydrophobic\\_Surfaces](https://www.researchgate.net/publication/26778962_How_Wetting_Hysteresis_Influences_Ice_Adhesion_Strength_on_Superhydrophobic_Surfaces)
- [30] TOURKINE, Piotr, Marie LE MERRER a David QUORO. Delayed Freezing on Water Repellent Materials. *Langmuir* [online]. 2009 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/26288416\\_Delayed\\_Freezing\\_on\\_Water\\_Repellent\\_Materials](https://www.researchgate.net/publication/26288416_Delayed_Freezing_on_Water_Repellent_Materials)
- [31] 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 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642519300271>

- [32] *Geometric model for the critical-value problem of nucleation phenomena containing the size effect of nucleating agent* [online]. XU, Donghua a William L. JOHNSON. 2005 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://authors.library.caltech.edu/1453/1/XUDprb05.pdf>
- [33] SEAR, R.P. The non-classical nucleation of crystals: microscopic mechanisms and applications to molecular crystals, ice and calcium carbonate. *International Materials Review* [online]. 2012 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1179/1743280411Y.0000000015?scroll=top&needAccess=true&instName=National+Library+of+Technology>
- [34] ZHANG, Songnan, Jianying HUANG, Yan CHENG, Hui YANG, Zhong CHEN a Yuekun LAI. Bioinspired Surfaces with Superwettability for Anti-Icing and Ice-Phobic Application: Concept, Mechanism, and Design. *Advanced Science* [online]. 2017 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/sml.201701867>
- [35] ZHANG, Kaiqiang, Bo LIU, Chao TAO, Yunhui ZHAO, Xiaohui LI, Kongying ZHU a Xiaozan YUAN. Strategies for anti-icing: low surface energy or liquid-infused? *RSC Advances* [online]. 2016 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://pubs.rsc.org/-/content/articlelanding/2016/ra/c6ra11383d/unauth#cit60>
- [36] FILLION, R.M., A.R. RIAHI a A. EDRISY. A review of icing prevention in photovoltaic devices by surface engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2014 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114000252>
- [37] MENINI, Richard a Masoud FARZANEH. Advanced Icephobic Coatings. *Journal of Adhesion Science and Technology* [online]. 2012 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1163/016942410X533372?needAccess=true&instName=National+Library+of+Technology>
- [38] GOLOVIN, Kevin, Sai P.R. KOBAKU a Duck Hyun LEE. Designing durable icephobic surfaces. *Science Advances* [online]. 2016 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/297889284\\_Designing\\_durable\\_icephobic\\_surfaces](https://www.researchgate.net/publication/297889284_Designing_durable_icephobic_surfaces)

- [39] VAZIRINASAB, E., K. MAGHSOUDI, G. MOMEN a R. JAFARI. A comparative study of the icephobic and self-cleaning properties of Teflon materials having different surface morphologies. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2020 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013619303875>
- [40] BRASSARD, Jean - Denis, Caroline LAFORTE, Frédéric GUÉRIN a Caroline BLACKBURN. Icephobicity: Definition and Measurement Regarding Atmospheric Icing. *Advanced Polymeric Science* [online]. 2017 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z:  
[https://www.researchgate.net/publication/323107147\\_Icephobicity\\_Definition\\_and\\_Measurement\\_Regarding\\_Atmospheric\\_Icing#pf14](https://www.researchgate.net/publication/323107147_Icephobicity_Definition_and_Measurement_Regarding_Atmospheric_Icing#pf14)
- [41] Halar® ECTFE for Coatings. *Solvay.com* [online]. [cit. 2020-05-05]. Dostupné z:  
<https://www.solvay.com/en/halar-ectfe/coatings>