



Bakalářská práce

Plazmová modifikace skluznic lyží

Studijní program:

B0719A130001 Nanotechnologie

Autor práce:

Timon Josef Hozák

Vedoucí práce:

Ing. Martin Šetina

Oddělení pokročilých materiálů

Liberec 2024



Zadání bakalářské práce

Plazmová modifikace skluznic lyží

<i>Jméno a příjmení:</i>	Timon Josef Hozák
<i>Osobní číslo:</i>	M21000076
<i>Studijní program:</i>	B0719A130001 Nanotechnologie
<i>Zadávající katedra:</i>	Katedra chemie
<i>Akademický rok:</i>	2023/2024

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši současného stavu skluznic a vosku.
2. Zvažte typy plazmatických úprav a jejich využití.
3. Navrhněte možné principy modifikací.
4. Proveďte měření kluzných vlastností před navrhovanými úpravami.
5. Proveďte měření s navrženými modifikacemi.
6. Zhodnoťte přínosy.

Rozsah grafických prací: dle potřeby dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 50 stran
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

1. BURŠÍKOVÁ, Vilma. Surface energy evaluation of plasma treated materials by contact angle measurement. Brno: Masaryk University, 2004. ISBN 80-210-3563-3.
2. DVOŘÁK, František, Lada MAŠKOVÁ a Jan WEISSHÄUTEL. Běh na lyžích. Vyd. 1. Praha: Olympia, 1992. 129 s. ISBN 8070331399.
3. BEČKA, Jan. Tribologie. Praha: České vysoké učení technické, 1997. ISBN 80-01-01621-8.

Vedoucí práce: Ing. Martin Šetina
Oddělení pokročilých materiálů

Datum zadání práce: 11. září 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 14. května 2024

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

prof. Ing. Josef Šedlbauer, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 14. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má bakalářská práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Plazmová modifikace skluznic lyží

Abstrakt

Závěrečná práce se zabývá úpravami skluznic lyží atmosférickým plazmatem jako potenciální alternativou k perfluorovaným látkám v parafínech, které byly dříve používány k urychlení lyží a snížení procesu tření mezi povrchem skluznic a sněhem. Tyto látky byly nedávno zakázány legislativním nařízením Evropské komise kvůli environmentálním a zdravotním rizikům. Při řešení bakalářské práce je provedeno hodnocení, identifikace a analýzy různými metody a modifikací povrchu, které by mohly sloužit jakožto náhrada těchto zakázaných látky. Cílem práce je poskytnout ucelený přehled výsledků různých typů modifikací, které poslouží jako základ pro budoucí výzkum, například v rámci diplomové práce, a přispět tak k dalšímu rozvoji tohoto výzkumného směru.

Tato bakalářská práce byla vypracována v kolaboraci s GPT-4 od OpenAI.

Klíčová slova

Modifikace povrchu, atmosférické plazma, skluznice lyží, plazmový prekurzor, tribologické vlastnosti, fyzikální vlastnosti.

Plasma modification of ski slides

Abstract

The thesis addresses modifications of ski bases using atmospheric plasma as a potential alternative to perfluorinated substances in paraffins, which were previously used to accelerate skis and reduce the friction process between the base surface and the snow. These substances were recently banned by a legislative regulation of the European Commission due to environmental and health risks. In resolving the bachelor's thesis, evaluations, identifications, and analyses are conducted using various methods and surface modifications that could serve as replacements for these banned substances. The goal of the work is to provide a comprehensive overview of the results of various types of modifications, which will serve as a basis for future research, such as in a master's thesis, thereby contributing to the further development of this research direction.

This thesis was created in collaboration with GPT-4 by OpenAI.

Keywords

Surface modification, atmospheric plasma, ski slide, plasma precursor, tribological properties, physical properties.

Poděkování

Rád bych vyjádřil svou upřímnou vděčnost všem, kteří mě podporovali během realizace mé závěrečné práce. Speciální poděkování patří vedoucímu práce, Ing. Martinu Šetinovi za jeho podporu, vedení a cenné rady hlavně v oblasti plazmové modifikace, které byly klíčové. Dále bych chtěl poděkovat paní Ing. Totce Bakalové, Ph.D., za její odborné názory na práci a pomoc při analýze dat, jejíž přístup byl vždy vysoce profesionální a inspirativní. V neposlední řadě bych chtěl vyjádřit svou vděčnost své rodině a přátelům, kteří mě neustále podporovali a poskytovali mi motivaci v průběhu celého studia a psaní této práce. Díky vám všem jsem mohl úspěšně dokončit tento projekt a rozšířit své vědomosti a dovednosti.

Obsah

Úvod.....	16
Teoretická část	17
1 Plazma	17
1.1 Plazmová úprava.....	18
1.1.1 Za atmosférického tlaku.....	18
1.1.2 Za nízkého tlaku.....	18
1.2 Generování plazmatu	18
1.2.1 LTE plazma	19
1.2.2 Non-LTE plazma.....	20
1.3 Typy výbojů	21
1.3.1 Výboje atmosférické	21
1.3.2 Vyfoukávané korónové a obloukové výboje.....	22
1.4 Plazmové prekurzory Argon a Dusík.....	23
1.4.1 Argon	23
1.4.2 Dusík.....	23
2 Skluznice lyží	25
2.1.1 Materiál pro výrobu skluznice	25
2.1.2 Výroba extrudované skluznice.....	26
2.1.3 Výroba sintrované skluznice.....	27
2.1.4 Transparentní skluznice	27
2.2 Struktury skluznic	28
2.2.1 Tvorba struktury.....	28
2.2.2 Možnosti struktur.....	29
3 Typy běžeckých lyží.....	29
3.1.1 Rozdělení běžeckých lyží	30
4 Vosky	31
4.1 Druhy vosků.....	31
4.2 Fluor v parafínech a jeho zákaz používání	31
5 Metodiky hodnocení.....	32
5.1 Tribologické vlastnosti povrchu	32
5.1.1 Tření a mazání.....	32
5.1.2 Kluzné tření.....	33
5.1.3 Statické tření a dynamické tření.....	34

5.1.4	Opotřebení.....	35
5.1.5	Tribometr pro suché a kapalné prostředí TRB ³	35
5.2	Drsnost povrchu.....	36
5.2.1	Parametry charakterizující nerovnosti povrchu.....	36
5.2.2	Konfokální mikroskop – Sensofar S Neox.....	38
5.3	Smáčivost povrchu.....	40
5.3.1	Úhel smáčení.....	40
5.3.2	Youngova rovnice smáčení rovinného povrchu.....	41
5.3.3	Surface Energy Evaluation System.....	42
Praktická část		44
6	Příprava vzorků	44
6.1	Úprava povrchu plazmou.....	45
7	Měření na konfokálním mikroskopu.....	46
8	Hodnocení drsnosti povrchu po tribologii	50
8.1.1	Porovnání hodnot drsnosti povrchu.....	53
9	Hodnocení smáčivosti povrchu	54
10	Hodnocení tribologických vlastností.....	57
Závěr.....		61
Použitá literatura.....		63
Přílohy		65
A	Snímky konfokálního mikroskopu vzorků skluznic před a po tribologickém měření	65

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Plazmová tryska (The Magnum Group 2024b)	23
Obrázek 1.1: Princip plazmové funkcionalizace (upraveno) (Troup 2014).....	24
Obrázek 1.2: Neošetřený vzorek (a), funkcionalizovaný vzorek (b) (Troup 2014).....	24
Obrázek 2.1: Polymerizace ethylenu (The Science Hive 2024).....	26
Obrázek 2.2: Krystalické a amorfni oblasti (Grasmeder 2017)	26
Obrázek 5.1: Tribometr pro suché a kapalné prostředí TRB ³	35
Obrázek 5.1: Objasnění vybraných výškových parametrů textury povrchu ((Jankových a Bumbálek 2014)	37
Obrázek 5.2: Výstupky Sp a prohlubně Sv profilu (Petřkovská, Ph.D. 2013).....	37
Obrázek 5.3: Největší výška profilu (Petřkovská, Ph.D. 2013)	38
Obrázek 5.4: Střední aritmetická úchylka profilu (Petřkovská, Ph.D. 2013).....	38
Obrázek 5.1: Konfokální mikroskop na KM.....	39
Obrázek 5.2: Výsledky mikroskopu jednoho z naměřených vzorků	40
Obrázek 5.1: Smáčení povrchu (Chieng et al. 2019)	41
Obrázek 5.1: Silová rovnováha na rozhraní fází (Svoboda 2010)	42
Obrázek 5.1: Surface Energy Evaluation System na KM	42
Obrázek 6.1: 10 typů vzorků připravených pro jednotlivá měření	44
Obrázek 6.1: Systém pro plazmovou úpravu	45
Obrázek 6.2: Jednotlivé průtoky prekurzorů – a) Argon (7,2 l/min), b) Dusík (4,9 l/min)	46
Obrázek 7.1: Popis krabicového grafu	47
Obrázek 7.2: Drsnost povrchu vzorku s minimální hodnotou Sa (obrázek vlevo) a maximální hodnotou Sa (obrázek vpravo)	49
Obrázek 7.3: Největší výška výstupku Sp u vzorku Argon + parafin (obrázek vlevo) a u vzorku Dusík + parafin (obrázek vpravo)	50
Obrázek 8.1: Porovnání drsnosti povrchu před a po tribologickém měření.....	52
Obrázek 9.1: Vysoce hydrofilní povrch skluznice ovlivněné prekurzorem dusíku	56
Obrázek 9.2: Hydrofobní povrch skluznice s parafinem obsahující fluor	57
Obrázek 10.1: Příprava vzorku pro měření na tribometru TRB ³	57
Obrázek 10.2: Průběh třecího koeficientu na povrchu vzorku skluznice s parafinem zažehleným plazmou za sucha	58

Seznam grafů

Graf 7.1: Graf znázorňující hodnoty parametru Sa pro jednotlivé typy vzorků	48
Graf 7.2: Graf znázorňující hodnoty parametru Sp pro jednotlivé typy vzorků	49
Graf 7.3: Graf znázorňující hodnoty parametru Sz pro jednotlivé typy vzorků	50
Graf 8.1: Graf znázorňující hodnoty Sa pro jednotlivé typy vzorků po tribologii.....	51
Graf 8.2: Graf znázorňující hodnoty Sp pro jednotlivé typy vzorků po tribologii.....	52
Graf 8.3: Graf znázorňující hodnoty Sz pro jednotlivé typy vzorků po tribologii.....	53
Graf 8.4: Graf porovnávací výsledky drsnosti povrchu Sa před a po tribologickém měření	54
Graf 9.1: Smáčivost povrchu jednotlivých vzorků.....	55
Graf 10.1: Graf dynamického tření vzorků naměřených na tribometru.....	59
Graf 10.2: Graf statického tření vzorků naměřených na tribometru	60

Seznam tabulek

Tabulka 5.1: Příklady hodnot koeficientu tření u různých materiálů.....	34
Tabulka 6.1: Připravené vzorky	46
Tabulka 7.1: Průměrné naměřené hodnoty na konfokálním mikroskopu	47
Tabulka 8.1: Průměrné naměřené hodnoty na konfokálním mikroskopu po tribologii	51
Tabulka 8.4: Porovnané průměrné naměřené hodnoty na konfokálním mikroskopu Sa před tribologickým měřením a po tribologickém měření a jejich změna v %	53
Tabulka 9.1: Průměrné naměřené hodnoty smáčivosti povrchu	55
Tabulka 10.1: Průměrné naměřené hodnoty jednotlivých tření pro různé vzorky skluznic	58

Seznam zkratek

FIS	Mezinárodní lyžařská federace
EK	Evropská komise
LTE	Lokální termodynamická rovnováha
UHMWPE	Ultra vysokomolekulární hmotnostní polyethylen
LF	Nízko fluorový
HF	Vysoko fluorový
PFOA	Perfluorooktanová kyselina
PFCs	Perfluorované sloučeniny
μ	Součinitel tření
F_T	Tangenciální třecí síla
F_N	Normálová zatěžovací síla
Sa	Průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu
Sp	Největší výška výstupku
Sz	Největší výška

Úvod

Do nedávné doby se fluor běžně používal jako přísada do lyžařských vosků, zejména parafinů, aby se zlepšily kluzné vlastnosti a ochrana skluznice lyží. Vysokofluorové parafiny (HF) a nízkofluorové parafiny (LF) prokázaly výrazně lepší kluzné vlastnosti ve srovnání s parafiny, které tyto přísady neobsahovaly. Tyto produkty však obsahovaly perfluorované chemikálie, které byly nedávno klasifikovány jako rizikové z důvodů potenciálních zdravotních a environmentálních nebezpečí.

S novým zákazem používání lyžařských parafinů s obsahem fluoru (tedy zakázaných perfluorovaných látek) pro mazání skluznic lyží, který vydala FIS (Mezinárodní lyžařská federace) jako reakci na nové legislativní nařízení Evropské komise (EK) EU 2017/1000 (Evropská komise, Generální ředitelství pro vnitřní trh, průmysl, podnikání a malé a střední podniky 2017), se servisní tým české lyžařské reprezentace začal zabývat návrhem plazmové úpravy povrchu skluznic za účelem zlepšení jejich kluzných vlastností. Jelikož servisní tým nemá laboratorní zázemí ani kapacitu pro testování, začal jsem se o tuto problematiku zajímat. Důvodem mého zájmu na toto téma byl fakt, že se mezi lyžaři pohybují již dlouho a problematika mazání lyží mě velice zajímá. Z tohoto důvodu mě toto téma zaujalo a chtěl jsem se pokusit otestovat několik variant plazmových úprav v laboratorním prostředí a zjistit tak, zdali má cenu se ubírat tímto směrem v modifikacích skluznic, nebo je potřeba nalézt jiné řešení.

Tato bakalářská práce se proto soustředí na zkoumání kluzných vlastností, smáčivosti a drsnosti povrchu nově modifikovaných produktů bez obsahu fluoru. Hlavním cílem práce je identifikovat přínosy těchto modifikovaných produktů.

Teoretická část

1 Plazma

Plazma se na Zemi vyskytuje poměrně vzácně, a to především během krátkých momentů silných elektrostatických výbojů, jako jsou blesky během bouřek, nebo v podobě světelných jevů vysoko v atmosféře, typicky nad polárními oblastmi známé jako polární záře. V každodenním životě se nejčastěji setkáváme s plazmatem, které je slabě ionizované, například v neónových světlech, zářivkách, reklamních tabulích, plazmových televizích a další spotřební elektronice. Toto slabě ionizované plazma obsahuje méně nabitých částic ve srovnání s neutrálními molekulami, a nabitě částice se často srážejí s neutrálními molekulami plynu. (Makovec 2011)

Plazma je hmota zahřátá nad své plynné skupenství na takovou teplotu, že jsou atomy zbaveny alespoň jednoho elektronu ve svých vnějších obalech a vytvářejí se tak kladné ionty v prostředí volných elektronů. Ne všechny atomy však musí být ionizovány. Chladnější plazma je ionizováno pouze z 1-10 %, přičemž zbytek plynu zůstává jako neutrální atomy nebo molekuly. Při vyšších teplotách, jako jsou teploty při výzkumu jaderné fúze, se plazma plně ionizuje, což znamená, že všechny částice jsou nabitě. (Chen a Chang 2002)

Naopak, silně ionizované plazma, které je charakteristické pro vesmírné prostředí, obsahuje většinou nabitě částice. Plazma tvoří téměř 99 % hmoty ve vesmíru a je převážně silně ionizované. V okolí Země se plazma nachází například v ionosféře, nebo magnetosféře. (Makovec 2011)

Od plynu se liší svou elektrickou vodivostí díky přítomnosti volných elektronů, což umožňuje jeho využití v různých technických aplikacích. Vodivost plazmatu závisí na koncentraci nabitých částic a na teplotě. U slabě ionizovaného plazmatu vodivost stoupá s nárůstem koncentrace nabitých částic, zatímco u silně ionizovaného plazmatu vodivost závisí na teplotě elektronů a roste s jejím zvyšováním. (Makovec 2011)

Plazma se dělí na vysokoteplotní a nízkoteplotní, v závislosti na střední energii částic. Vysokoteplotní plazma, s energií částic nad 100 eV, se vyskytuje ve hvězdách a v experimentech s termonukleární syntézou. Nízkoteplotní plazma je běžné v zářivkách a elektrických obloucích. (Makovec 2011)

1.1 Plazmová úprava

1.1.1 Za atmosférického tlaku

Výboje při atmosférickém tlaku hrají klíčovou roli nejen v aplikacích jako je polymerizace, plazmochemické čištění, ale také v procesech přípravy, aktivace a modifikace vlastností různých povrchů. Těmito zásahy dochází především ke změně povrchové energie, což má za následek změnu smáčivosti materiálů. Tyto úpravy povrchů probíhají jak prostřednictvím plazmochemického čištění a přidávání funkčních chemických skupin do povrchových vrstev materiálu, tak i prostřednictvím přímých fyzikálně-chemických změn morfologie povrchu, například změnou jeho drsnosti. (Svoboda 2010)

1.1.2 Za nízkého tlaku

Další velmi významnou oblastí aplikace plazmatu je využití vysokofrekvenčních výbojů v reaktorech a zařízeních pracujících pod nízkým tlakem. Tyto technologie umožňují aplikaci homogenních, přesně specifikovaných tenkých vrstev, ale také precizní odstranění materiálu z velmi specifických oblastí substrátů. Mezi typické aplikace patří:

- vytváření tenkých vrstev různých materiálů (například DLC – (diamond-like carbon), dielektrika, antikorozi ochranné vrstvy, polymery, polovodiče, kovy, nitridy, oxidy, a různé povlakování),
- precizní odstraňování materiálu z povrchů (čištění, odstraňování prachu, anizotropní leptání),
- úpravy vlastností povrchů (například změny povrchové energie, adheze, smáčivosti a drsnosti).

Tyto techniky nacházejí uplatnění v široké škále průmyslových sektorů, včetně strojírenství, mikroelektroniky, textilního průmyslu a automobilového průmyslu. (Svoboda 2010)

1.2 Generování plazmatu

Plazma vzniká působením energie na plyn s cílem přeuspořádat elektronovou strukturu částic (atomů, molekul) a vyprodukovat excitované částice a ionty. Tato energie může být tepelná, nebo přenášena elektrickým proudem či elektromagnetickým zářením. (Tendero et al. 2006)

Plazma za atmosférického tlaku je generované z elektrické energie. Elektrické pole přenáší energii na elektrony plynu. Tato elektronová energie je následně předávána neutrálním částicím prostřednictvím srážek. Tyto srážky podléhají pravděpodobnostním zákonům a dělí se na:

- elastické srážky: nezmění vnitřní energii neutrálních částic, ale mírně zvýší jejich kinetickou energii,
- neelastické srážky: pokud je elektronová energie dostatečně vysoká, srážky mění elektronovou strukturu neutrálních částic. To vede k tvorbě excitovaných částic nebo iontů, pokud jsou srážky dostatečně energetické.

Většina excitovaných částic má velmi krátkou životnost a vrací se do základního stavu emitováním fotonu. „Metastabilní částice“ jsou také excitované stavy, ale s dlouhou životností, protože jejich přechod zpět do základního stavu emitováním záření je omezen díky absenci povolených přechodů z daného stavu: rozpad může proběhnout pouze přenosem energie prostřednictvím srážek. (Tendero et al. 2006)

V závislosti na typu dodávané energie a množství energie přenesené do plazmatu se mění vlastnosti plazmatu, což se týče elektronové hustoty nebo teploty. Tyto dva parametry rozdělují plazmata do různých kategorií:

- plazmaty v lokální termodynamické (neboli tepelné) rovnováze (LTE – Local Thermodynamic Equilibrium),
- plazmaty mimo lokální termodynamickou rovnováhu (non-LTE).

Pojem lokální termodynamická rovnováha (LTE) je velmi důležitý, zejména pro spektroskopické studium plazmatu, protože určení parametrů plazmatu (distribuční funkce částic; teploty elektronů, excitace, vibrace...) je založeno na vztazích, které se liší pro plazmata v LTE nebo mimo ně. (Tendero et al. 2006)

1.2.1 LTE plazma

Vyžaduje, aby přechody a chemické reakce byly řízeny srážkami, nikoli radiačními procesy. Navíc musí být srážkové jevy mikroreverzibilní. To znamená, že každý typ srážky musí být vyvážen svým opakem (excitace/deexcitace; ionizace/rekombinace; kinetická rovnováha). LTE vyžaduje, aby lokální gradienty vlastností plazmatu (teplota, hustota, tepelná vodivost) byly dostatečně nízké, aby částice v plazmatu mohly dosáhnout rovnováhy: doba difúze musí být podobná nebo delší než čas potřebný částici k dosažení rovnováhy. U LTE plazmatu je teplota těžkých částic blízká teplotě elektronů (např.: plazmata ve fúzi). (Tendero et al. 2006)

Podle Griemova kritéria je homogenní opticky tenké plazma v LTE, pokud hustota elektronů splňuje:

$$n_e = 9 \cdot 10^{23} \left(\frac{E_{21}}{E_{H^+}} \right)^3 \left(\frac{kT}{E_{H^+}} \right) (m^{-3}) \quad (1.1)$$

kde:

- E_{21} představuje energetický rozdíl mezi základním stavem a prvním excitovaným stavem
- E_{H^+} představuje ionizační energii atomu vodíku a je rovna 13,58 eV
- T představuje teplotu plazmatu

Toto kritérium ukazuje silnou vazbu, která existuje mezi požadovanou hustotou elektronů pro LTE a energií prvního excitovaného stavu. Pravidla pro LTE jsou velmi striktní, a proto se většina plazmat od LTE odchyluje, zejména všechny typy plazmat s nízkou hustotou v laboratořích. (Tendero et al. 2006)

1.2.2 Non-LTE plazma

Odchylka od Boltzmannovy distribuce pro hustotu excitovaných atomů může vysvětlit odchýlení od LTE. U nízko ležících úrovní je rychlost deexcitace atomu indukovaná elektrony obvykle nižší než odpovídající rychlost excitace indukovaná elektrony kvůli významné rychlosti radiativní deexcitace. Další odchylka od LTE je způsobena rozdílem hmotnosti mezi elektrony a těžkými částicemi. Elektrony se pohybují velmi rychle, zatímco těžké částice lze považovat za statické: elektrony jsou tak pravděpodobněji dominantními v srážkách a fenoménech přechodů. Odchylky od LTE jsou také způsobeny silnými gradienty v plazmatu a spojenými difúzními efekty. Bylo ukázáno, že distribuce LTE může být částečná. Například, LTE může být ověřeno pro úrovně blízké ionizačnímu prahu (např. úrovně 5p a vyšší, v argonovém plazmatu): taková plazmata jsou pLTE (částečné LTE). Plazmata non-LTE lze popsat modelem s dvěma teplotami: teplotou elektronů (T_e) a teplotou těžkých částic (T_h). Vzhledem k obrovskému rozdílu hmotnosti mezi elektrony a těžkými částicemi je teplota plazmatu (nebo teplota plynu) určena T_h . Čím větší je odchylka od LTE, tím větší je rozdíl mezi T_e a T_h . (Tendero et al. 2006)

1.3 Typy výbojů

1.3.1 Výboje atmosférické

Obloukový výboj – vzniká průrazem vzduchu, kdy elektrické pole mezi elektrodami dosáhne takové síly, že ionizuje okolní vzduchové částice, což snižuje elektrický odpor vzduchu a umožňuje průchod elektrického proudu. Ionizovaný vzduch se tak stává plazmatem. Elektrický oblouk je stabilizován díky teple, které je generováno elektrickým proudem protékajícím plazmatem. Tento teplý plazmatický sloupec udržuje nízký elektrický odpor, což umožňuje udržet oblouk i při relativně nízkém napětí po jeho zapálení. Ve výrobě se výboj obvykle zahajuje vysokonapěťovým pulzem. Tento druh výboje se využívá v technickém odvětví, zejména u vysokotlakých xenonových lamp (používaných v reflektorech a projekční technice), vysokotlakých sodíkových lamp (pro veřejné osvětlení), při obloukovém svařování kovů a v analytické chemii. Pro hloubkové profilování však není vhodný. (Novosád 2015)

Jiskrový výboj – má poměrně krátkou dobu trvání. Dochází k němu, když intenzita elektrického pole mezi dvěma elektrodami přesáhne hodnoty potřebné k spuštění lavinové ionizace, ale zdroj není schopen udržet stálý elektrický proud. Na rozdíl od doutnavého výboje, který probíhá při nízkých tlacích a je charakterizován světelnou emisí v celém objemu plynu, jiskrový výboj vytváří jasnou a krátkodobou světelnou a zvukovou emisi v důsledku prudkého vybití elektrické energie. Tento jev nastává, když elektrické napětí mezi dvěma body překročí dielektrickou pevnost izolujícího média, což vede k ionizaci vzduchu a vytvoření vodivého kanálu, jímž elektrický proud prochází. Jiskrový výboj se běžně vyskytuje v přírodě jako blesk během bouřek, ale má také mnoho technických aplikací. Používá se v zapalovacích systémech spalovacích motorů, ve svářečství, v některých typech spektroskopie a jako základní princip zařízení pro generování ozónu. Liší se od jiných výbojů svou schopností přenášet velké množství energie na krátkou vzdálenost během velmi krátkého časového intervalu, což umožňuje efektivní přenos energie nebo iniciaci chemických reakcí. (Novosád 2015)

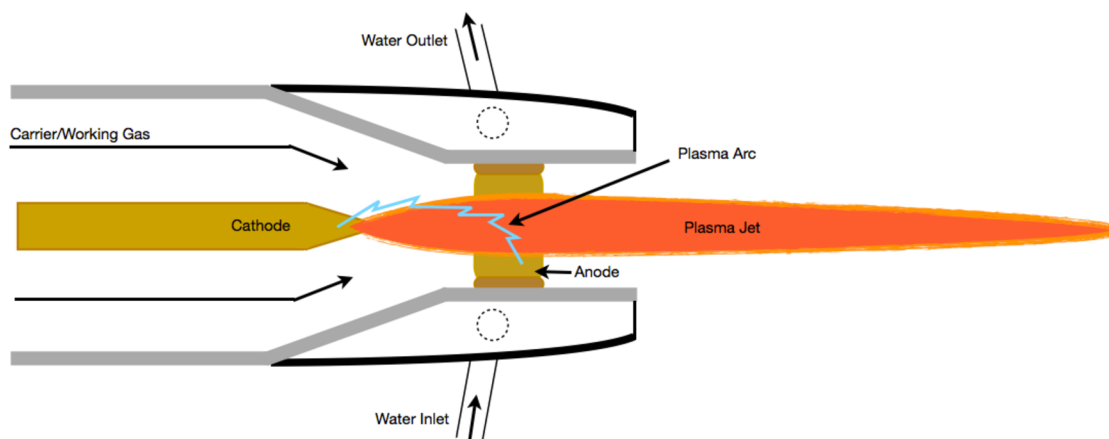
Doutnavý výboj – je specifický typ elektrického výboje, který se vyznačuje svou schopností probíhat při relativně nízkých teplotách a tlacích, což ho odlišuje od jiných typů výbojů, jako je obloukový nebo jiskrový výboj. Doutnavý výboj vzniká, když elektrický proud prochází skrz plyn při nízkém tlaku, což vede k ionizaci a vzniku plazmatu, které svítí charakteristickým způsobem. Tento jev lze často pozorovat v neonových světlech nebo plazmových displejích, kde plyn uvězněný v trubici emituje světlo, když je elektricky stimulován. Doutnavý výboj je také základem pro různé průmyslové procesy, například pro čištění povrchů, plazmové leptání

nebo plazmovou polymerizaci, kde jeho specifické vlastnosti umožňují precizní manipulaci s materiály. Rozdíl od jiných výbojů spočívá především v jeho stabilním a kontrolovatelném charakteru, což umožňuje jeho široké technologické využití. (Novosád 2015)

Koróna – typ výboje, který se objevuje v nehomogenních elektrických polích, typicky kolem ostrých hrotů, drátů, nebo hran s vysokým elektrickým napětím. Tento jev se projevuje jako vizuálně pozorovatelný světelný trs nebo aureola, často modré barvy, a je doprovázen charakteristickým praskavým zvukem. Korónový výboj nastává, když elektrické pole v okolí vysokonapěťového objektu dosáhne takové intenzity, že dojde k ionizaci vzduchu a vytvoření plazmatu, ale bez vytvoření plnohodnotného elektrického oblouku. Korónový výboj nemá přímé praktické uplatnění a většinou způsobuje energetické ztráty na vysokonapěťových vedeních. (Novosád 2015)

1.3.2 Vyfukávané korónové a obloukové výboje

Základem fungování je využívání plazmatu uvnitř plazmové trysky v prostoru mezi centrální vysokonapěťovou anodou, často tvořenou středovou tyčí, a vnější elektrodou fungující jako zemnič a tvořící obal trysky. Plazma je z trysky vyfukováno pomocí silného proudu nosného plynu (obr.1.1), obvykle vzduchu nebo dusíku, přičemž lze využít i vzácné plyny jako je například argon. Tlak nosného plynu se obvykle pohybuje od 0,5 do 1 MPa a jeho průtok dosahuje desítek litrů za minutu. Elektrický proud v trysce má radiální směr, což znamená, že plazma vycházející z trysky rychle ztrácí energii a na výstupu má velmi nízkou koncentraci elektronů a iontů. Ačkoliv plazma chladne na teplotu mezi 20 až 120 °C, stále obsahuje excitované atomy, molekuly a radikály vytvořené chemickými reakcemi v plazmatu těsně před opuštěním trysky. Tyto výboje se generují pomocí vysokonapěťových zdrojů stejnosměrného napětí a zdrojů pracujících na frekvencích v řádech desítek kHz. Vyfukované plazma se využívá pro úpravy povrchů materiálů, nanášení tenkých vrstev nebo v biologických aplikacích. Pro aplikace vyžadující nanášení kovových nebo keramických povlaků při teplotách v řádu několika tisíců Kelvinů není vhodné. (Novosád 2015)



Obrázek 1.1: Plazmová tryska (The Magnum Group 2024b)

1.4 Plazmové prekurzory Argon a Dusík

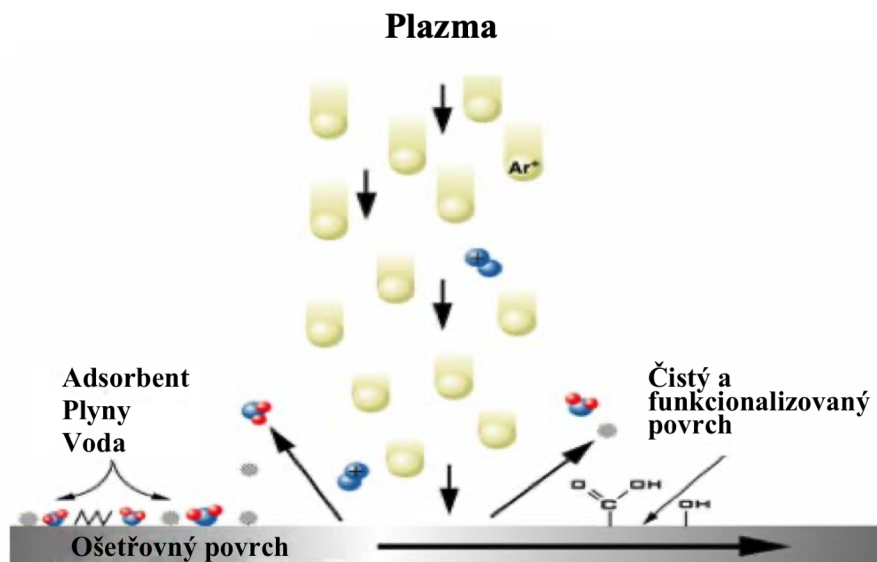
1.4.1 Argon

Argon se v procesu plazmové úpravy povrchu významně uplatňuje, jak v kombinaci s kyslíkem pro čištění povrchů z různých materiálů, tak i v samostatné aplikaci pro specifické účely. Jeho využití je klíčové při odstraňování organických nečistot z povrchů bez jakékoliv změny vlastností daného materiálu. Argonové plazma efektivně čistí, ale zároveň zachovává integritu povrchu, což je zvláště důležité například u polymerních vzorků, kde nedochází k leptání materiálu. U polymerních materiálů argonové plazma štěpí chemické vazby (C-H, C-C, C=C) přičemž dochází ke generování volných radikálů a následně to může mít důsledek změny drsnosti povrchu, povrchové energie nebo adheze povrchu. V kontextu kovových substrátů argon předchází oxidaci, protože plazma rozruší vazbu kyslíku s povrchem kovu. Díky tomu tak nachází široké uplatnění v aplikacích vyžadujících čistotu povrchu. Tato vlastnost je umocněna při použití směsi argonu s kyslíkem, která aktivuje povrch před spojovacími procesy, zatímco zároveň chrání kov před nežádoucí oxidací. Argonové plazma tak představuje velmi významnou metodu pro přípravu a úpravu povrchů v širokém spektru průmyslových aplikací, kde je důraz kladen na čistotu, přesnost a zachování materiálových charakteristik. (Plasma Etch 2022) (Troup 2014)

1.4.2 Dusík

Dusík jako prekurzor v procesu plazmové úpravy povrchu se využívá především k úpravám povrchu pro zvýšení biokompatibility povrchu, nebo ke změně hydrofility. Působením plazmatu s dusíkovým prekurzorem na povrch vzorku, na kterém je prováděna úprava, dochází

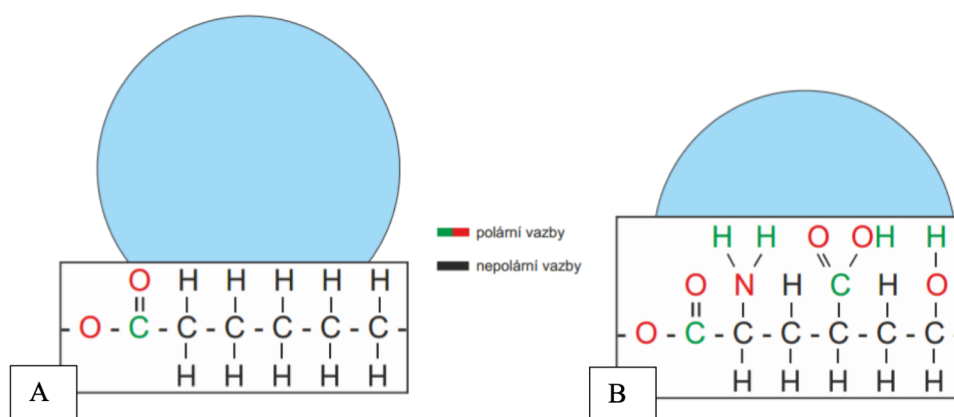
k tvorbě nových funkčních skupin, které jsou obvykle doménou aminových (N-C), iminových (N=C), nitrilových (N≡C), nebo amidových (N-C=O) skupin. Poměr těchto různých dusíkem obsahujících skupin, stejně jako množství připájeného dusíku, je však silně závislý na experimentálních podmínkách. (Wagner et al. 2003)



Obrázek 1.1: Princip plazmové funkcionalizace (upraveno) (Troup 2014)

Na obrázku 1.1 je znázorněna plazmová funkcionalizace povrchu. Během plazmového ošetření dochází k čištění a narušování povrchu pomocí plazmatu, zatímco inertní plyn zamezuje kontaminaci povrchu. Tento inertní plyn také napomáhá připojení funkčních skupin, které přináší reaktivní plyn.

Obrázek 1.2 poskytuje zjednodušený pohled na to, jak je na chemické úrovni dosaženo zvýšení smáčivosti funkcionalizovaného povrchu (Troup 2014)



Obrázek 1.2: Neošetřený vzorek (a), funkcionalizovaný vzorek (b) (Troup 2014)

2 Skluznice lyží

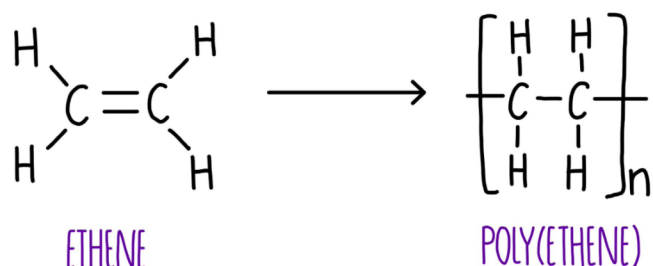
Skluznice je jedna z nejzásadnějších, ale také nejnáročnějších a nejdražších částí lyže na výrobu. Tato část lyže se vyznačuje specifickým materiálem a strukturou, aby maximalizovala výkonnost lyže při skluzu po sněhu. Tloušťka skluznice, se obvykle pohybuje v rozmezí 1 až 1,5 mm a je klíčovým faktorem, který ovlivňuje jak kvalitu, tak výkonnost lyže. Závodní lyže obvykle vyžadují silnější a širší skluznice, což umožňuje častější a detailnější úpravy povrchu, jako je broušení, pro dosažení optimálních skluzných vlastností nebo strukturování. Naopak, u turistických modelů může být skluznice tenčí, což odráží menší potřebu častých úprav a lyže jsou pak mnohem levnější. (Kalous 2019)

Výrobní proces skluznice zahrnuje dvě hlavní metody: extruzi a sintraci (viz kapitoly 2.1.2. a 2.1.3). Zatímco extrudované skluznice jsou obecně levnější a snadněji se vyrábějí, sintrací vytvořené skluznice nabízejí lepší vlastnosti, včetně vyšší odolnosti proti opotřebení a lepších skluzných charakteristik, díky pečlivě kontrolovanému procesu vytvrzování a stlačování materiálu. Tyto techniky umožňují výrobcům lyží přizpůsobit skluznice specifickým potřebám lyžařů, od rekreačního lyžování po vrcholové závody, a zajišťují, že lyže poskytují optimální výkon za všech podmínek. Obě tyto varianty skluznic jsou pak zpravidla nabízeny v černé, transparentní (bílé, teflonové) a kolorované variantě. Černé zbarvení je způsobeno přídavkem grafitu ve formě sazí, kdy u sintrovaných skluznic může podíl grafitu dosahovat až 20 % objemové hmotnosti, zatímco u extrudovaných skluznic je podíl pouze 2-5 %. S narůstajícím obsahem grafitu má skluznice lepší lubrikační vlastnosti, ale také začíná být méně pružná a více elektricky, a hlavně tepelně vodivá, což je u konstrukce lyže nežádoucí. Proto se každý výrobce skluznic snaží najít unikátní kombinaci materiálů a technologií, aby se odlišil na trhu a nabídl lyžařům skluznice, které nejlepšími možnými způsoby odpovídají jejich potřebám. Přesné složení skluznic kvůli utajování informací výrobcí nelze v bakalářské práci popsat. (Špíz 2023)

2.1.1 Materiál pro výrobu skluznice

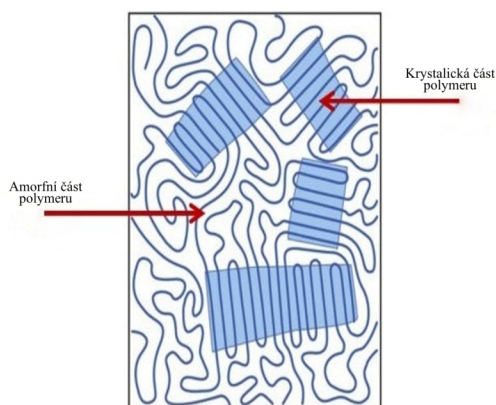
Skluznice je vyráběna z UHMWPE (Ultra High Molecular Weight Polyethylene-Ultra) - ultra vysokomolekulárního hmotnostního polyethylenu, který vzniká procesem polymerace (obr. 2.1.). Dvojná vazba mezi dvěma atomy uhlíku ethylenu se uvolňuje a reaguje s dalšími monomery za vzniku řetězce polymeru. Tento proces tak zajišťuje extrémně dlouhé molekulární řetězce, které mohou obsahovat 500 000 – 10 500 000 monomerů, což zajišťuje jedinečné

vlastnosti a schopnosti odolávat například extrémním teplotám, což je ideální pro použití v lyžařském průmyslu. (Špíz 2023)(Kalous 2019)



Obrázek 2.1: Polymerizace ethylenu (The Science Hive 2024)

V důsledku částečné krystalizace vznikají krystalické a amorfní části polymeru (obr. 2.2.). Krystalické části zajišťují tuhost a tvrdost materiálu, zatímco ty amorfní dodávají materiálu elasticitu a odolnost vůči oděru. Tento polymer je také znám pro jeho extrémní odolnost proti opotřebení a nízké koeficienty tření. S obsahem tohoto polymeru ve skluznici nabízí skluznice nejen vynikající skluzné vlastnosti, ale také vysokou odolnost. (Špíz 2023)



Obrázek 2.2: Krystalické a amorfni oblasti (Grasmeder 2017)

Pro zvýšení funkčnosti skluznice se do UHMWPE často přidávají další materiály, jako je například právě grafit. Taková to aditiva zlepšují odolnost proti opotřebení a schopnost skluznice absorbovat a udržet na svém povrchu vosk, což dále zvyšuje její skluzné vlastnosti. Kromě toho mohou různé přísady zlepšit schopnost skluznice odolávat nárazům a snižovat akumulaci statické elektřiny, která může negativně ovlivnit skluz lyže. (Špíz 2023)

2.1.2 Výroba extrudované skluznice

Granulovaný polyethylen s vysokou molekulovou hmotností je nejprve roztaven do kapalné formy, což umožňuje jeho další zpracování. Následně je tento roztavený materiál přesunut do lisovacího stroje, kde je pod tlakem formován do požadovaného tvaru a rozměru skluznice. Po

vytvarování materiál prochází procesem chlazení na válcích, aby ztuhl a stabilizoval se do finální podoby. Poté se skluznice dále upravuje – povrch se vyhlazuje a okraje seřezávají pro dokonalý vzhled a funkčnost. Tento typ skluznice se obvykle využívá u lyží určených pro rekreační lyžování, jelikož tento proces výroby vede k výrobě měkčímu a méně odolnému materiálu, což může ovlivnit skluzné vlastnosti a odolnost proti poškození. (Špíz 2023)

2.1.3 Výroba sintrované skluznice

Proces výroby sintrované skluznice začíná s polyethylenem v práškové formě, který se umístí do speciální formy. V této fázi se prášek pod vysokým tlakem a teplem roztaví a vytváří kompaktní blok, z něhož se poté odřezávají jednotlivé pláty skluznice. Tyto pláty se navíjí na cívky a předávají se výrobcům lyží, kde se dále upravují na přesné rozměry potřebné pro konkrétní modely lyží. Tento výrobní postup je technologicky náročnější a finančně nákladnější než extrudovaná výroba, což se odráží v konečné ceně lyží. (Špíz 2023)

Sintrované skluznice jsou typicky používány pro sportovní a závodní lyže díky jejich výjimečným vlastnostem – mají vyšší tvrdost a odolnost proti abrazi, což zajišťuje dlouhodobější výkon a trvanlivost. Díky své vysoké porositě tyto skluznice lépe absorbují vosk, což zlepšuje jejich skluzné vlastnosti a umožňuje lyžím dosahovat lepších výsledků. Tato kombinace vlastností dělá sintrované skluznice ideální volbou pro závodníky a náročné lyžaře, kteří požadují maximální výkon a odolnost od svého vybavení. (Špíz 2023)

2.1.4 Transparentní skluznice

Transparentní skluznice reprezentují zajímavou kapitolu v historii vývoje lyžařského vybavení, označující průkopnickou éru plastových materiálů ve výrobě skluznic. Značky jako Pertinax byly mezi prvními, které uvedly na trh skluznice v bílé, šedé nebo modré barvě. V 90. letech však byly tyto transparentní skluznice vytlačeny oblíbenějšími grafitovými skluznicemi s tmavou barvou. Přesto v současné době dochází k renesanci transparentních skluznic, které jsou vyráběny především sintrovanou metodou. Díky svým specifickým vlastnostem, jako jsou snížené třecí schopnosti a zvýšená odolnost, se transparentní skluznice ukazují jako vhodné pro univerzální použití nebo v teplejších podmínkách. Tyto skluznice tak nabízejí zajímavou alternativu k tradičním materiálům, otevírají nové možnosti v designu a funkčnosti lyžařského vybavení. (Kalous 2019)

2.2 Struktury skluznic

Strukturování skluznic lyží je klíčový proces, který má za cíl optimalizovat skluzné vlastnosti lyží tím, že na jejich povrchu vytváří specifické zářezy. Tyto zářezy, vzniklé pomocí strojové úpravy, redukuje tření mezi lyží a sněhem, což vede ke zlepšení skluzu. Díky různé hrubosti struktur je možné lyže přizpůsobit pro různé typy sněhu, od jemnějších struktur vhodných pro nový sníh po hrubší varianty ideální pro starý nebo mokřý sníh. (Kalous 2019)

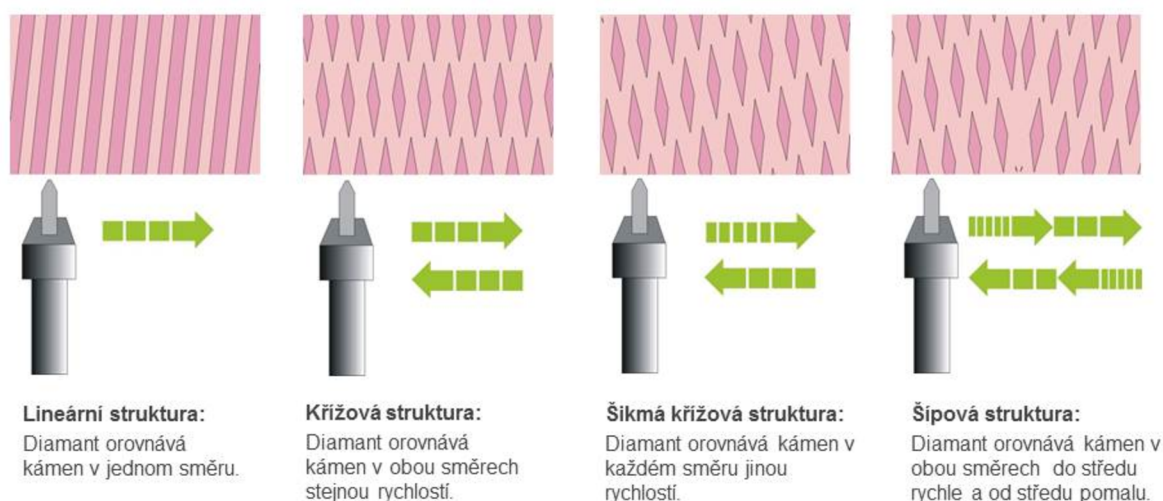
Výhodou strojového strukturování je dlouhodobá odolnost těchto struktur, které nejsou ovlivněny běžnou sezónní údržbou, jako je voskování. Výrobci lyží nabízí široké spektrum struktur, přičemž každá značka má své specifické typy, optimalizované pro různé podmínky a typy sněhu. U závodních lyží jsou tyto úpravy často ještě více specializované, aby vyhovovaly specifickým sněhovým podmínkám, zatímco u turistických lyží se většinou setkáme s univerzálnějšími strukturami. Profesionální závodníci mají často k dispozici rozsáhlý arzenál lyží se různými strukturami, aby mohli efektivně reagovat na měnící se podmínky sněhu. (Kalous 2019)

2.2.1 Tvorba struktury

Tvorba struktury na skluznici lyže je precizní proces, který začíná vyrovnáním brusného kamene pomocí diamantu, aby byl zajištěn rovnoměrný povrch. Tento krok je klíčový pro zajištění, že struktury vryté do skluznice budou konzistentní a přesné. Diamant se používá k vytvoření zářezů v brusném kameni, které jsou poté přeneseny na skluznici lyže (obr. 2.3.). Charakteristika těchto zářezů – včetně jejich hloubky a rozložení – je pečlivě kontrolována, aby odpovídala specifickým požadavkům pro různé typy sněhu, od jemných struktur pro tvrdý a ledový sníh až po hrubší pro mokřý a hrubý sníh.

Dalšími faktory ovlivňujícími finální vzhled a funkčnost struktury skluznice jsou rychlost otáčení brusného kamene, rychlost, s jakou je lyže vedena přes kámen, a tlak aplikovaný během broušení. Tyto proměnné umožňují vytváření široké škály struktur, které mohou být přizpůsobeny pro specifické podmínky sněhu.

Specialisté a týmy, které se věnují vývoji struktur pro skluznice, musí mít hluboké pochopení vlastností sněhu, aby mohli vytvářet struktury, které zlepšují skluznost lyží v různých sněhových podmínkách. Správná kombinace struktury skluznice a celkové konstrukce lyže je zásadní pro dosažení optimálního výkonu, přičemž každá struktura je navržena s ohledem na maximální rychlost, stabilitu a efektivitu lyže. (Kalous 2019) (Ski Plzen 2019)



Obrázek 2.3: Základní typy struktur (Ski Plzen 2019)

2.2.2 Možnosti struktur

Různé struktury skluznic lyží jsou navrženy tak, aby odpovídaly specifickým podmínkám sněhu a optimalizovaly výkon lyží. Textura struktury skluznice se liší v závislosti na rychlosti porovnávání brusného kamene: nižší rychlosti vedou k vytvoření jemnější struktury, zatímco vyšší rychlosti vytvářejí hrubší texturu. Základním pravidlem při výběru struktury je, že pro chladnější sníh je vhodnější jemnější struktura, která zlepšuje skluznost lyží, kdežto mokrá a těžký sníh vyžaduje hrubší strukturu, která pomáhá překonávat zvýšené tření způsobené vodou na povrchu sněhu. Je však důležité mít na paměti, že hrubší struktury mohou negativně ovlivnit točivé vlastnosti lyží, a proto se v případě pochybností doporučuje volit jemnější strukturu. Tato pravidla umožňují lyžařům lépe přizpůsobit své lyže různým sněhovým podmínkám a dosáhnout tak optimálního výkonu. (Anon. 2019)

3 Typy běžeckých lyží

V běžeckém lyžování se setkáváme s několika druhy běžeckých lyží, které se navzájem liší jejich konstrukcí a celkovou charakteristikou. Různé formy lyžování, jako je turistika, rekreační běh, výkonnostní běh anebo závodní běh, spolu přinášejí specifické požadavky jako například nízká hmotnost, dobré jízdní vlastnosti, respektive vodivost a také hraje významnou roli pevnost samotné lyže.

Z tohoto důvodu se lyže určené pro turistiku nebo rekreační běhání liší ve svých vlastnostech, tvarech a specifikacích od závodních nebo sportovních lyží. Například pro turistické lyže je prioritní dobrá vodivost, zatímco u závodních lyží je klíčová rychlost. (Chovanec et al. 1983)

3.1.1 Rozdělení běžeckých lyží

Existují různé kategorie a typy běžeckých lyží, které jsou navrženy tak, aby vyhovovaly potřebám začátečníků, středně pokročilých lyžařů i elitních závodníků. Aby bylo snazší se v nich orientovat, zavedlo se označení pro jednotlivé skupiny lyží

1) Dle použití (Bačo 2009)

- Klasické lyže – slouží ke klasickému běhu, který se podobá běhu bez lyží. Skluznice obsahuje mazací komoru, na kterou se nanáší stoupací vosk pro odraz. Pro dobrý odraz a maximální využití potenciálu těchto lyží je za potřebí dobře zvládnutelná technika. Obvykle se lyže vybírají o 20-30 cm vyšší, než je výška postavy sportovce a tvrdost lyže dle hmotnosti, aby byla mazací komora při odrazu v kontaktu se sněhem.
- Lyže pro bruslení (skating, skate) – tento typ lyží bývá oproti klasickým lyžím lehčí, tvrdší, a díky absenci mazací komory (to znamená použití kluzného vosku po celé délce lyže) i rychlejší. Délka tohoto typu lyží by měla být lyžaři přibližně k nosu.
- Univerzální (combi) – lyže určené pro oba běžkařské styly (běh klasický a bruslení). Tento typ lyží je populární u začátečních lyžařů, nebo u lyžařů, kteří nechtějí mít doma několik párů lyží. Univerzální lyže jsou pak z důvodu univerzálnosti pomalejší. (Bačo 2009)

2) Dle výkonosti (Bačo 2009)

- Závodní – jsou tvrdší, velmi lehké, užší a s rychlejší skluznicí. Výhradně se používají ve strojově upravených stopách a u těchto lyží je důležitá správně zvládnutá technika běhu
- Sportovní – lyže vhodné pro pokročilé lyžaře. Stále disponují poměrně tvrdou konstrukcí, kvalitní skluznicí a nízkou hmotností. U tohoto typu lyží je za potřebí zvládnutí alespoň základní techniky
- Turistické – vhodné pro rekreační běh, turistiku nebo pro začátečníky. Lyže bývají širší pro dobrou stabilitu a pohyb i mimo upravené trasy. Jsou také měkčí, proto nevyžadují tak dobře zvládnutou techniku odrazu a dobře vedou.
- Backcountry – vhodné pro terén, mohou být využity i mimo upravené tratě, jsou určeny spíše pro chůzi než pro běh na lyžích. Mají šířku mezi turistickými běžeckými a sjezdovými lyžemi a často jsou vybaveny ocelovými hranami pro lepší stabilitu na zledovatělém povrchu. Jejich skluznice je odolná a optimální délka těchto lyží převyšuje postavu lyžaře o 10-15 centimetrů. (Bačo 2009)

4 Vosky

Vosky jsou klíčovým prvkem v lyžařském odvětví. Mazání skluznic vosky zvyšuje kluznost a zároveň chrání lyže před poškozením. Existují různé typy vosků s vlastními charakteristikami pro různé sněhové podmínky, teploty a celkové využití. Správný výběr a aplikace vosku mohou výrazně zlepšit výkon lyžaře a zároveň zajistit dlouhodobou ochranu a životnost lyží.

Stoupací vosky se používají pro lepší trakci při stoupaní, zatímco parafíny zlepšují kluznost a odolnost skluznice při sjezdu.

4.1 Druhy vosků

Vosky můžeme rozdělit do hlavních dvou kategorií na vosky stoupací, které slouží k odrazu a vosky určené pro skluz, které se nazývají parafíny.

- Stoupací vosky (určené pro odraz) – aplikují se na mazací komoru (komora pod vázáním, kde se lyže při odrazu dostává do kontaktu se sněhem) a při běhu do kopce zabraňují proklouznutí. Stoupací vosky se dělí na tuhé a tekuté. Tuhé vosky se používají převážně pro čerstvě napadaný sníh nebo pro sníh jemnozrnný. Tekuté (klistry) jsou obvykle vhodné pro starší typ sněhu, nebo pro přemrzlý či hrubozrnný typ sněhu.
- Parafíny (určené pro skluz) - jsou určeny pro skluznici a zlepšují kluznost a tím i potom rychlost lyžaře a lepší výkon. Také chrání skluznici před poškozením a opotřebením způsobeným kontaktem se sněhem, ledem, nebo při transportu. Pravidelné mazání lyží je zásadní pro zachování jejich optimálního stavu. (Bačo 2009)

4.2 Fluor v parafínech a jeho zákaz používání

Mezi parafíny obsahující fluor patří například vysoko fluorové (HF – High Fluorine) i nízko fluorové (LF – Low Fluorine) parafíny, různé urychlovače a prášky, které jsou vhodné pro závodní účely k dosažení co nejlepšího výkonu soutěžících. Fluorové sloučeniny výrazně zrychlují lyži v určitých sněhových podmínkách. Tyto typy parafínů obsahující perfluorooktanovou kyselinu (PFOA – Perfluorooctanoic Acid), jež patří mezi perfluorované sloučeniny (PFCs – Perfluorochemicals) mají mimo jiných tu vlastnost, že vytvářejí hydrofobní povrch, což je skvělé pro využití právě v mazacích materiálech. Sloučeniny PFCs však byly zařazeny mezi

perzistentní (trvalé), mezi které můžeme řadit i některé pesticidy, DDT – Dichloro-Diphenyl-Trichloroethane, polychlorované bifenyly, nebo dioxiny.

Z důvodu zařazení perfluorovaných látek, pod které spadá perfluorooktan-sulfonát (PFOS) i již zmíněná perfluorooktanová kyselina (PFOA) mezi odolné, nebo trvalé látky byl dle nařízení Evropské komise (EK) EU 2017/1000 (Evropská komise, Generální ředitelství pro vnitřní trh, průmysl, podnikání a malé a střední podniky 2017), nařízen zákaz prodeje a používání těchto látek. Koncentrace těchto látek nesmí v předmětu přesahovat 25 ppb (parts per billion).

Od zimní sezóny 2020/2021 pak FIS (Mezinárodní lyžařské federace) z důvodu zdravotních a environmentálních rizik zakázala používání fluoru úplně. (Kocanda 2020)

5 Metodiky hodnocení

5.1 Tribologické vlastnosti povrchu

Tribodiagnostika se zabývá komplexní analýzou tribologických systémů, které jsou základem pro pochopení tření, opotřebením a mazání. Tato disciplína se soustřeďuje na sledování a interpretaci interakcí mezi třecími tělesy, mazivem a okolním prostředím. Tyto interakce probíhají v dynamickém prostředí, kde jsou důležité jak materiálové vlastnosti, tak podmínky provozu. Studium těchto vztahů umožňuje nejen identifikovat a analyzovat problémy v tribologických systémech, ale také přispívá k vývoji nových materiálů a technologií pro zlepšení jejich výkonnosti a odolnosti proti opotřebením. Tribodiagnostika tak představuje klíčovou roli v různých průmyslových a výzkumných aplikacích, od automobilového průmyslu po kosmické technologie (Bečka 1997)

5.1.1 Tření a mazání

Tření je zásadním přírodním jevem, který se vyskytuje v tribologických systémech, a je vázáno na vzájemný pohyb dvou dotýkajících se prvků. Rozlišujeme vnější tření, charakterizované stykem dvou třecích ploch, a vnitřní tření, probíhající v materiálových vrstvách stejného třecího tělesa. Dále tření dělíme podle skupenství dotýkajících se materiálů:

- **Tření pevných těles** – nastává při dotyku materiálů ve stejném pevném skupenství. Toto tření má svůj původ ve vzájemné interakci povrchů těchto materiálů. Tyto povrchy se buď přirozeně, nebo uměle dotýkají a vytvářejí charakteristické adhezní vrstvy. Tento proces tření může zahrnovat mechanické a molekulární interakce jako například:

Vzájemné zachycení mikro nerovností (drsnosti) povrchů, pružná deformace těchto mikronerovností, adheze mezi mikro nerovnostmi na površích materiálů

- **Kapalinové tření** – běžné v systémech s mazivy, je ovlivněno především viskozitou a teplotními vlastnostmi maziv
- **Plynové tření** – nastává v systémech, kde se pohybové těleso nachází v plynném prostředí a je významně ovlivněno tlakem a teplotou plynu
- **Plazmové tření** – méně běžný typ, je relevantní v extrémních podmínkách, jako jsou vysoké teploty nebo ionizovaná prostředí, a je zvláště důležité v kosmickém průmyslu a vysokoteplotních aplikacích

Počet těchto druhů tření ukazuje na složitost a rozmanitost tribologických systémů a jejich aplikací. Tření a mazání mají zásadní vliv na výkonnost a spolehlivost tribologických systémů. Maziva hrají klíčovou roli v minimalizaci opotřebení a tření mezi povrchy ve vzájemném pohybu. Výběr a aplikace správného maziva je zásadní pro optimální funkci tribologického systému. (Bečka 1997)

5.1.2 Kluzné tření

Kluzné tření je základním typem tření, které se objevuje v tribologických systémech, a hodnotí se pomocí součinitele tření. Tento součinitel je bezrozměrná veličina, reprezentující poměr mezi třecí tangenciální silou a normálovou zatěžovací silou, která působí na třecí tělesa. Součinitel tření (μ) je tedy poměr mezi tangenciální třecí silou a (F_T) normálovou zatěžovací silou (F_N).

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (5.1)$$

Kromě toho lze kluzné tření vyhodnotit také z energetického hlediska, kde se posuzuje poměr energie, která je potřebná k vyrovnání třecích ztrát, vůči celkové energii, která je do systému přivedena. (Bečka 1997)

5.1.3 Statické tření a dynamické tření

Třecí síly se projevují mezi jakýmkoli pevnými objekty, které jsou ve vzájemném styku a pohybu. Tyto síly jsou ovlivněny drsností povrchu, která zapříčiňuje zaklesnutí povrchů vzájemně do sebe. Tření, které mezi povrchy vzniká můžeme rozdělit do dvou skupin. (G.U.N.T. Gerätebau 2024)

- Statické tření
- Dynamické tření

Statické tření

Statické tření se objevuje mezi povrchy dvou pevných těles, pokud na sebe tato tělesa působí silou, ale ještě nedošlo k vzájemnému pohybu. Pro posun dvou těles je nutno tuto sílu překonat. Velikost statického tření závisí na druhu materiálu, ze kterého tělesa jsou a drsnosti jejich povrchů, jak již bylo zmíněno výše. Statické tření je ve většině případů vyšší než dynamické tření. (G.U.N.T. Gerätebau 2024)

Dynamické tření

Dynamické tření nastává, pokud se těleso pohybuje po druhém a v kontaktu s ním. Zvyšuje se jeho hodnota se zvýšením drsností povrchu těles a tlakem působícím mezi nimi. Dynamická třecí síla je fyzikální síla (aktivní síla) a je úměrná normálové síle F_N . (G.U.N.T. Gerätebau 2024)

Tabulka 5.1: Příklady hodnot koeficientu tření u různých materiálů

Materiály, které na sebe působí	Koeficient tření μ
Ocel na ocel	0,1 až 0,4
Ocel na teflon	0,04
Hliník na hliník	1,1 až 1,7
Dřevo na dřevo	0,3
Polyethylen na polyethylen	0,14

(G.U.N.T. Gerätebau 2024)

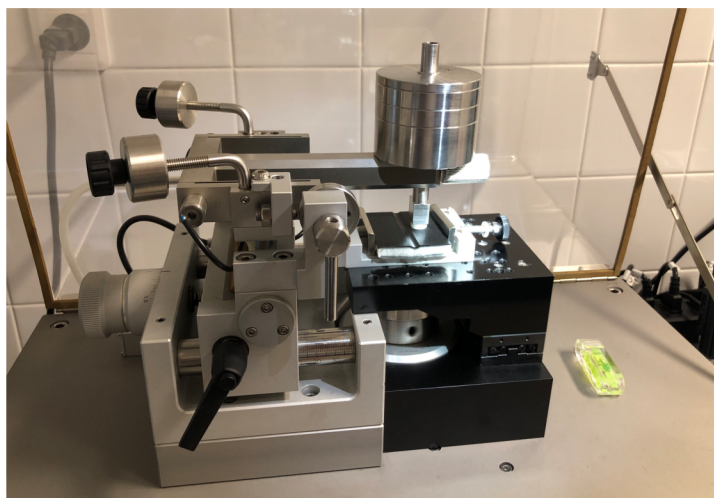
5.1.4 Opotřebení

Opotřebení, jakožto důsledek tření, se vyskytuje v různých formách, včetně adhezivního, abrazivního, erozivního, korozivního, únavového a kavitačního opotřebení. Tyto formy se liší mechanismy, kterými působí na materiál, a mají různé dopady na tribologické systémy. Například, adhezivní opotřebení zahrnuje přenos materiálu mezi dotýkajícími se povrchy, zatímco abrazivní opotřebení je způsobeno rozrýváním povrchu tvrdším materiálem. (Bečka 1997).

5.1.5 Tribometr pro suché a kapalně prostředí TRB³

Tribometr od firmy Anton Paar (obr. 5.1.) byl použit v praktické části bakalářské práce pro získání dat tření jednotlivých vzorků skluznic. Měření bylo provedeno na Katedře materiálů, FS.

Jedná se o tribometr používaný k měření třecích vlastností kontaktů, které mohou být buď mazané nebo nemazané. To umožňuje zkoumat interakce mezi dvěma materiály při tření, a to jak na suchu, tak s použitím lubrikantu. Tribometr dokáže provádět měření v širokém rozsahu otáček a zatížení a je schopen dodržovat normy ASTM G99, ASTM G133 a DIN 50324.



Obrázek 5.1: Tribometr pro suché a kapalně prostředí TRB³

Metoda „Pin-on-Flat“ (Ball-on-Flat)

Pro získání dat tření na skluznici bude využita metoda Pin-on-Disc, princip tohoto měření spočívá v tom, že těleso ve tvaru kuličky nebo hrotu, zvané pin, je pevně uchyceno a vtačuje se do testovaného vzorku určenou silou, zatímco vzorek vykonává lineárně vratný pohyb určitou rychlostí. Získaným výstupem jsou záznamy koeficientu tření v závislosti na počtu cyklů. Kromě toho jsou sledovány další tribologické hodnoty, jako je charakter a velikost opotřebení ploch, které jsou v kontaktu. (inf. KMT, FS)

5.2 Drsnost povrchu

Drsnost povrchu je míra nerovnosti povrchu, která ovlivňuje tření mezi povrchem a okolím. Při úpravě skluznice lyže je drsnost povrchu dána především pomocí různých typů kartáčů a strukturovačů při její úpravě. Tyto nástroje umožňují vytvoření specifických struktur na povrchu skluznice, které mají za cíl zlepšit odvodnění a skluznost lyže (viz kapitola 2.2 Struktury skluznic). Je důležité zdůraznit, že při této úpravě není cílem dosáhnout co nejvyšších hodnot drsnosti povrchu, ale spíše vytvořit jemné kanálky nebo struktury, které budou schopny efektivně odvádět přebytečnou vodu mezi povrchem skluznice a sněhovou vrstvou po které se lyže pohybuje. Tímto způsobem je možné zachovat optimální skluznost lyže, aniž by se zbytečně zvýšila odporová síla a zpomalovala tak skluz lyže.

5.2.1 Parametry charakterizující nerovnosti povrchu

Pro měření nerovností povrchu lze využít mnoho variant jednotlivých měření které můžeme rozdělit na základní tři třídy:

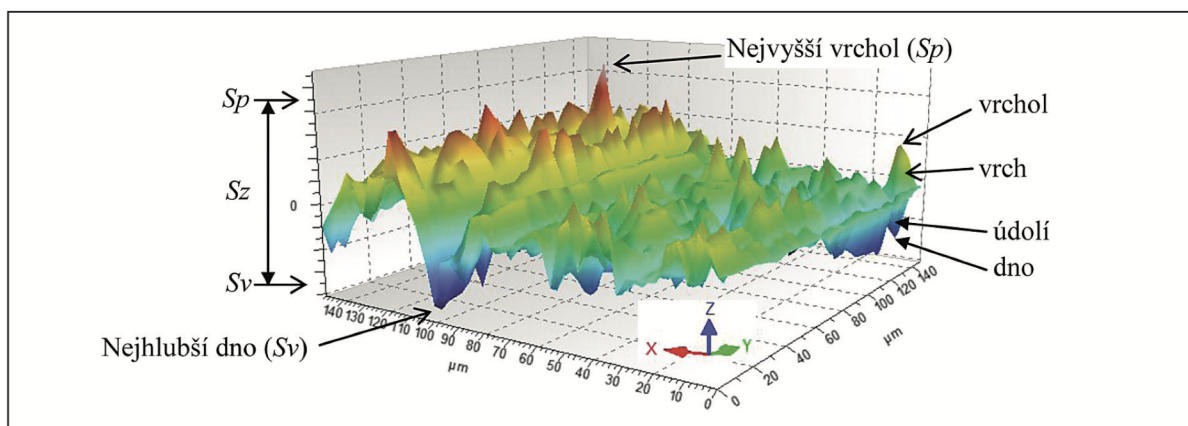
- Tvaru nerovnosti povrchu
- Nerovnost profilu ve směru výšky
- Nerovnost profilu v podélném řezu

Charakteristické parametry tvaru nerovnosti povrchu

V této třídě je podle normy ČSN EN ISO 4287 definováno několik výškových parametrů textury povrchu. Z řady parametrů, které tato norma definuje jsou v praktické části práce použity tři parametry pro vyhodnocování drsnosti povrchu skluznice. Využitými parametry jsou parametry Sa, Sp a Sz, které jsou popsány níže a také jsou vyobrazeny na obrázku 5.1. Jednotlivé parametry udávají informace v ose z, kolmé k povrchu. (Kupský 2023)

- Sa – průměrná aritmetická úchylka posuzovaného profilu drsnosti
- Sp – největší výška výstupku (výška mezi střední rovinou a nejvyšším výstupkem)
- Sz – největší výška (výška mezi nejnižší prohlubní Sv a nejvyšším výstupkem Sp)

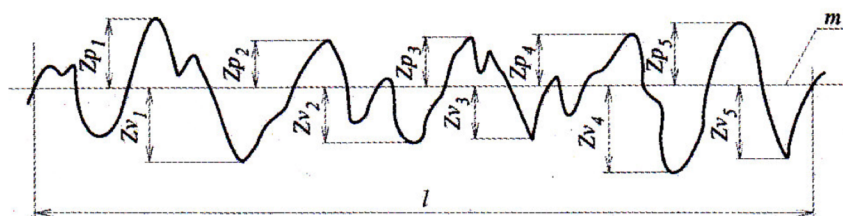
Hodnota Sa neboli průměrná aritmetická úchylka profilu je vyhodnocována softwarem, který naměří velký počet hodnot drsnosti v různých bodech povrchu a poté z jejich absolutních hodnot dopočítá výsledný aritmetický průměr. (Jankových a Bumbálek 2014) (Kupský 2023)



Obrázek 5.1: Objasnění vybraných výškových parametrů textury povrchu ((Jankových a Bumbálek 2014)

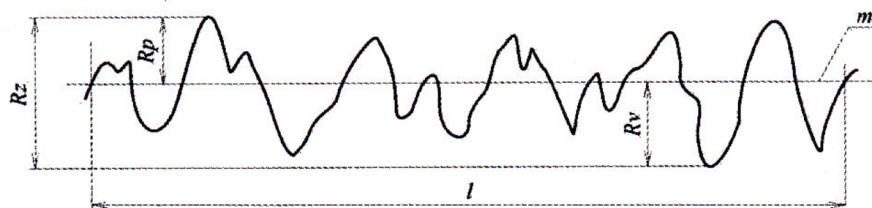
Charakteristické parametry nerovnosti povrchu ve směru výšky

- **Zp** – výška výstupku profilu – rozdíl mezi střední hodnotou profilu a nejvyšším bodem výstupku.
- **Zv** – výška prohlubně profilu – rozdíl mezi střední hodnotou profilu a nejnižším bodem prohlubně.



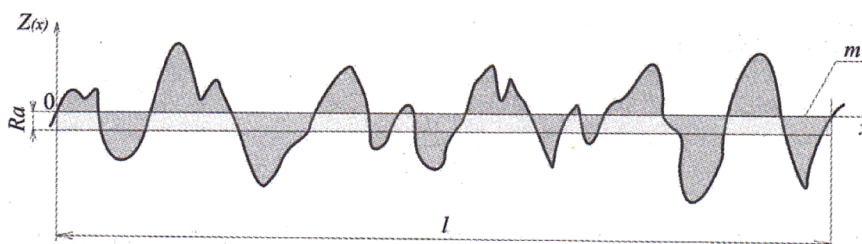
Obrázek 5.2: Výstupky S_p a prohlubně S_v profilu (Petřkovská, Ph.D. 2013)

- **Rp** – Výška nejvyššího výstupku profilu – největší výška výstupku Z_p v rozsahu základní délky vzorku
- **Rv** – Hloubka největší prohlubně profilu – největší hloubka prohlubně Z_v v rozsahu základní délky vzorku
- **Rz** – Největší výška profilu – součet nejvyššího výstupku profilu R_p a největší prohlubně profilu R_v v rozsahu základní délky vzorku



Obrázek 5.3: Největší výška profilu (Petřkovská, Ph.D. 2013)

- **Ra – Střední aritmetická úchylka profilu** – střední aritmetická hodnota absolutních odchylek profilu v rozsahu základní délky (Petřkovská, Ph.D. 2013)



Obrázek 5.4: Střední aritmetická úchylka profilu (Petřkovská, Ph.D. 2013)

5.2.2 Konfokální mikroskop – Sensofar S Neox

Konfokální mikroskop (obr. 5.1) zajišťuje bezkontaktní skenování povrchů díky kombinaci konfokální a interferometrické metody. Pro osvětlení používá čtyři nezávislá LED světla. Díky těmto metodám snímání může automaticky skládat obrázky ve třech osách (XYZ), snadno přepínat mezi různými snímacími metodami a ovládat pohyb ve všech třech osách, nastavit intenzitu osvětlení, vytvořit panoramatický obraz vzorku s navigací, zobrazit 3D model vzorku v různých režimech, provádět digitální zoom a rotaci, provádět 2D a profilová měření (výška, úhel náběžných a sestupných hran, poloměry), snadno vytvořit automatický měřicí program, měřit plošnou a profilovou drsnost podle standardních norem ISO, měřit tloušťku vrstev, zobrazovat výškovou mapu, používat vyrovnávací a filtrační algoritmy a provádět obrazovou analýzu a analýzu povrchové geometrie (vzdálenosti, plochy, objemy, výškové úrovně). (inf. KMT, FS)

Tento mikroskop má následující specifikace:

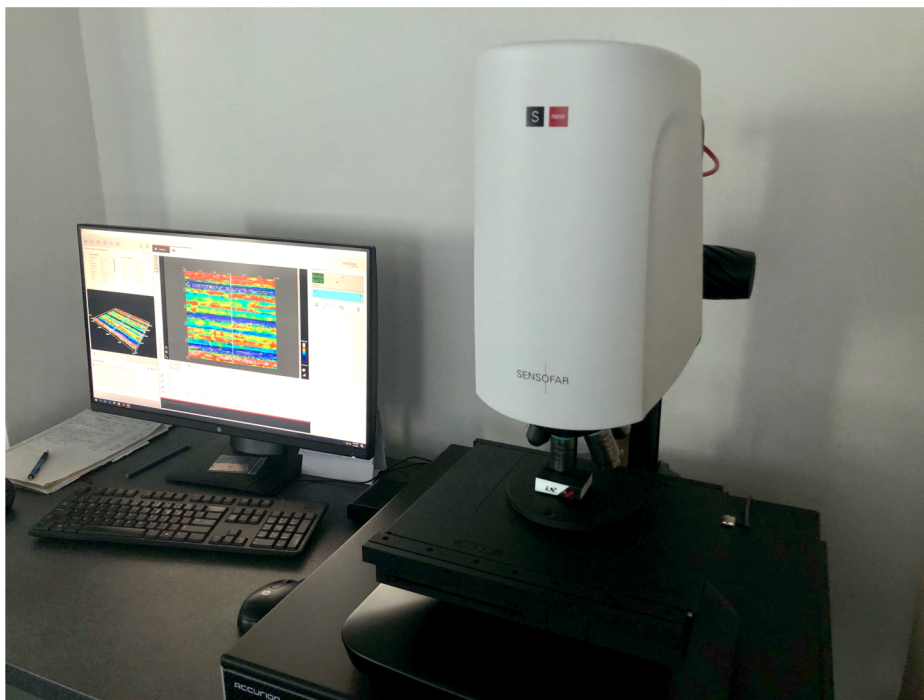
- umožňuje konfokální i interferometrickou metodu snímání
- zdrojem světla – 4x samostatná LED světla (červená, zelená, modrá, bílá)
- Zobrazení skenovaného povrchu v reálných barvách
- Možnost snímání a měření poloprůhledných vzorků
- Možnost snímání úhlů se strmostí až 70°
- motorizovaný stolek v osách XY s rozsahem pojezdu v rozsahu min. 100 x 75 mm

Mikroskop obsahuje 5 objektivů pro konfokální metodu:

- 5x min. NA 0,15, min. pracovní vzdálenost 12 mm
- 10x min. NA 0,30, min. pracovní vzdálenost 11 mm
- **20x min. NA 0,45, min. pracovní vzdálenost 1 mm**
- 50x min. NA 0,80, min. pracovní vzdálenost 1 mm
- 100x min. NA 0,90, min. pracovní vzdálenost 1 mm

Pro měření vzorků skluznic byl zvolen objektiv 20x min. NA 0,45, min. pracovní vzdálenost 1 mm. (inf. KMT, FS)

Měření výškových parametrů drsnosti povrchu bylo prováděno na Katedře materiálů, FS.



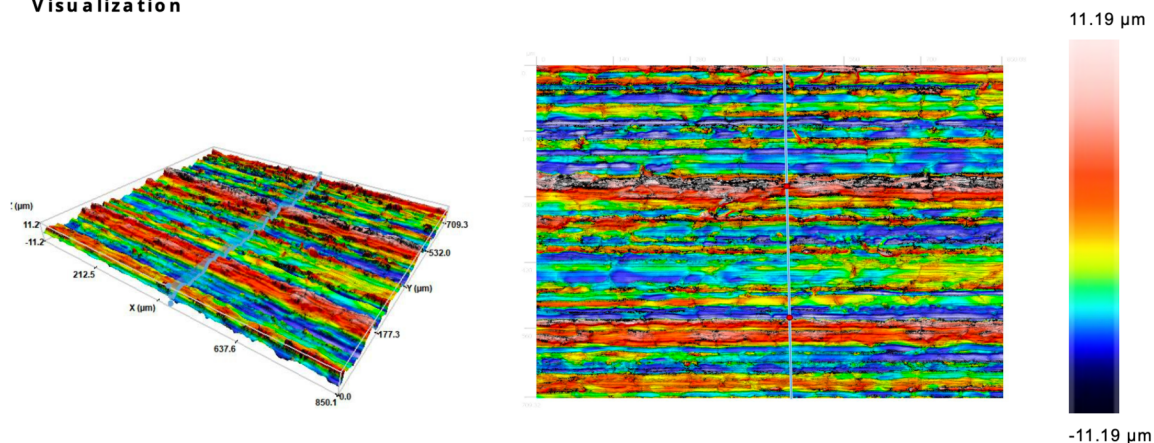
Obrázek 5.1: Konfokální mikroskop na KM

Metodika měření spočívá v umístění vzorku pod mikroskop s vybraným objektivem. Důležité je vzorek dobře zaostřit a zregulovat přísun světla. Následně je vzorek automatickým systémem mikroskopu nafocen přibližně 35 fotografiemi, který systém dále zpracuje a vygeneruje 3D a 2D obraz v softwaru na počítači. Pro naše účely byl veden příčný řez a vyhodnocení jednotlivých výšek výstupků a hloubek prohlubní. Software sám spočetl veškerá data, která byla včetně obrázku vyexportována do PDF souboru (obr 5.2).

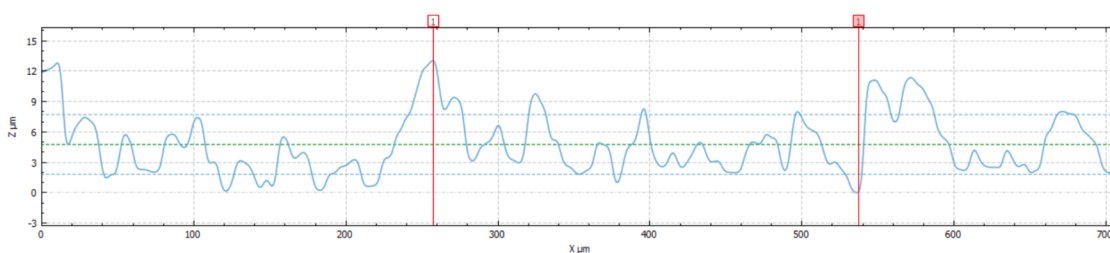
ISO 25178 / Height

Sa	2.9070 μm	Sq	3.7300 μm
Sku	3.6856	Ssk	0.8657
Smean	0.0000 μm	Sv	7.2543 μm
Sp	13.282 μm	Sz	20.537 μm

Visualization



Profile



Obrázek 5.2: Výsledky mikroskopu jednoho z naměřených vzorků

5.3 Smáčivost povrchu

Smáčivost je schopnost kapaliny přilnout k povrchu pevné látky. Tento jev je důsledkem adhezních sil, což jsou přitažlivé síly, které působí mezi dvěma různými stýkajícími se materiály, například mezi kapalinou a pevným povrchem. Smáčení je klíčovým faktorem v mnoha odvětvích a je závislý na druhu kapaliny a pevné látky, které na sebe působí. (Mechlová 2004)

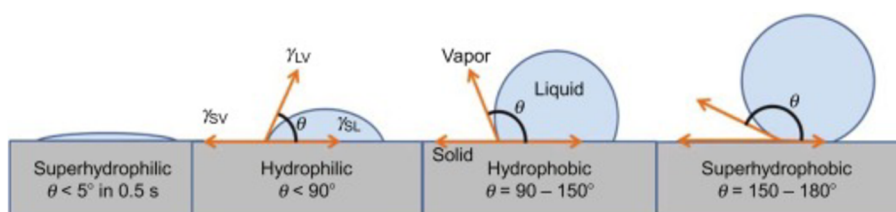
Informace o smáčení povrchu skluznice lyže s vodou při kontaktu se sněhem jsou klíčové pro optimalizaci skluzných vlastností lyží, a proto zahrnují tento typ měření mezi další měření zmíněné v odstavcích výše.

5.3.1 Úhel smáčení

Kontaktní úhel smáčení je klíčovým ukazatelem interakce mezi kapalinou a pevným povrchem v přítomnosti plynného prostředí, který určuje, zda kapalina povrch smáčí nebo nesmáčí. Povrchy, na kterých kapalina tvoří úhel menší než 90° , jsou označovány jako smáčivé nebo

hydrofilní, což značí, že kapalina, typicky voda, se k povrchu přitahuje a rozprostírá se po něm. Naopak, povrchy s kontaktním úhlem větším než 90° jsou nesmáčivé nebo hydrofobní, kde kapalina povrch odmítá a tvoří na něm kapičky (obr. 5.1). Podle velikosti kontaktního úhlu tak rozlišujeme povrchy na:

- Hydrofilní – smáčivé
- Hydrofobní – nesmáčivé (Mechlová 2004)



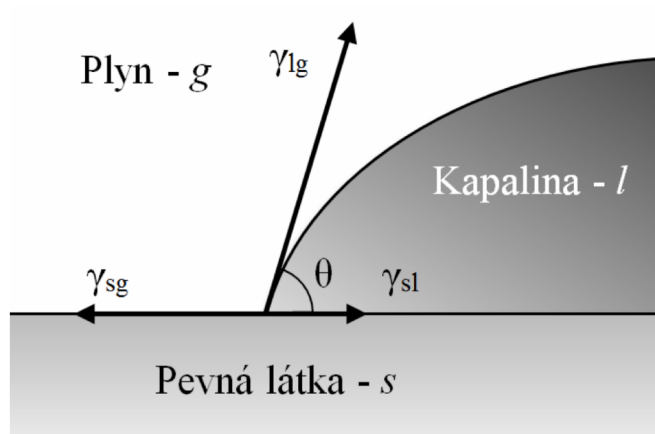
Obrázek 5.1: Smáčení povrchu (Chieng et al. 2019)

5.3.2 Youngova rovnice smáčení rovinného povrchu

Youngova rovnice se zabývá dynamikou kapky kapaliny ve třífázovém rozhraní mezi kapalinou l (*liquid*) umístěné na pevném, vodorovném povrchu s (*solid*) v plynné atmosféře g (*gas*). Thomas Young formuloval rovnici, která vyjadřuje rovnováhu mezifázových sil a napětí mezi těmito třemi fázemi.

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cos \theta \quad (5.2)$$

Rovnice uvádí, že rozdíl mezi mezifázovou volnou energií pevné látky a plynem (γ_{sg}) a mezifázovou volnou energií pevné látky a kapaliny (γ_{sl}) je roven mezifázovému napětí mezi kapalinou a plynem (γ_{lg}) vynásobenému kosinem kontaktního úhlu (θ). Tento vztah umožňuje odvodit, zda se kapalina na povrchu rozprostře (což naznačuje menší kontaktní úhel, a tedy větší smáčivost) nebo zda vytvoří více či méně kulový tvar (což naznačuje větší kontaktní úhel a menší smáčivost). Tato rovnice je zásadní pro pochopení a analýzu smáčivosti materiálů a jejich interakcí s různými kapalinami v různých atmosférických podmínkách. (Buršíková 2004)



Obrázek 5.1: Silová rovnováha na rozhraní fází (Svoboda 2010)

Pro přímý výpočet kontaktního úhlu pak lze rovnici převést do tvaru:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad (5.3)$$

5.3.3 Surface Energy Evaluation System

Stanovení smáčivosti povrchu (obr 5.1) bylo prováděno na přístroji zvaném Surface Energy Evaluation System (See System). Jedná se o Kapkovou zkoušku neboli Drop test. Při této zkoušce je kapka, která se na povrchu nachází, sledována barevnou kamerou, která nepotřebuje speciální osvětlení, ale pracuje s denním světlem. Snímek zachycený kamerou je následně zpracován v programu, který umožňuje vykreslení tvaru kapky a výpočet tečny ke středu vykresleného oblouku. Tento software také umožňuje výpočet volné povrchové energie podle různých metod, jako jsou například: Wu, Kwok-Neumann, Li-Neumann, Owens-Wendt-Rable-Kaeble, Lifshitz-van der Waals/acid-base a další.



Obrázek 5.1: Surface Energy Evaluation System na KM

Metodika měření smáčivosti povrchu je založena na poloautomatickém postupu. Nejprve se po obdržení vzorků přístroj připraví, což zahrnuje čištění a dezinfekci stolečku na ukládání vzorků,

přípravu mikropipety a čisté špičky. Manipulace se vzorky probíhá s použitím rukavic, aby nedošlo k jejich kontaminaci. Dále se přístroj nastaví podle požadovaných optických podmínek a kamera se seřídí. Poté následuje příprava měřeného vzorku a aplikace kapky standardní kapaliny. Hraniční body kapky jsou označeny a softwarové metody výpočtu volné povrchové energie usnadňují zpracování dat. Vzorky mohou být umístěny přímo na stoleček nebo v konkrétním přípravku (držáku), aby nedošlo k jejich kontaminaci. Pro zajištění opakovatelnosti výsledků se provádí minimálně 5 měření na každém povrchu. Hodnocení smáčivosti probíhá při pokojové teplotě a stanovené vlhkosti vzduchu. Použitý objem kapky je obvykle 3 μl , což umožňuje optimalizovat smáčivost povrchu. (inf. KMT, FS). Měření smáčivosti povrchu bylo prováděno na Katedře materiálů, FS.

Z důvodu kontaktu skluznice lyže výhradně se sněhem bude pro zjednodušení měření smáčivosti pro tuto práci probíhat pouze s destilovanou vodou.

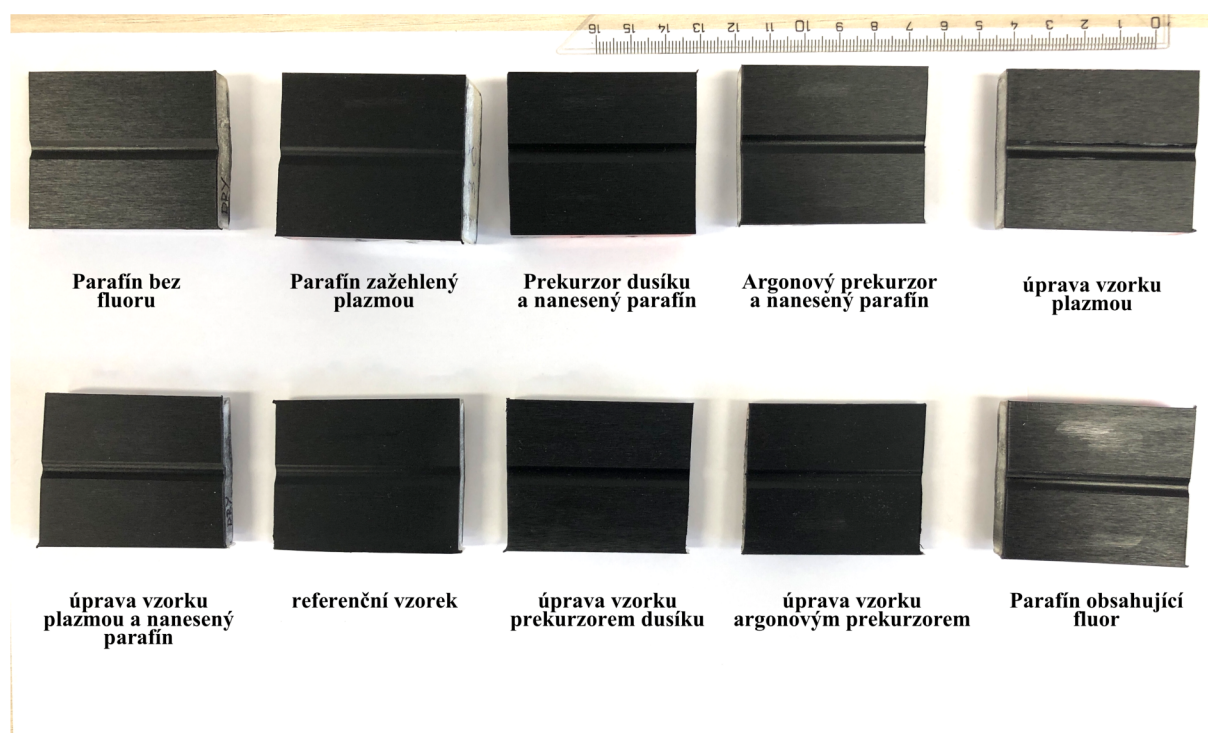
Praktická část

6 Příprava vzorků

Pro praktickou část bylo připraveno několika vzorků skluznice s odlišnou modifikací povrchu pro jednotlivé měření a následné hodnocení výsledků povrchů před a po modifikaci.

Postup přípravy jednotlivých vzorků

Z běžecské lyže bylo nařezáno několik menších vzorků stejné skluznice cca 5 cm dlouhých (obr. 6.1). U všech vzorků byl povrch skluznice vyčištěn. Čistění probíhalo pomocí hadříku namočeného do smývače Swix – Glide wax cleaner, kterým byly z povrchu skluznice odstraněny nečistoty jako je jehličí, špína mastnoty a podobně. Skluznice byla poté rozkartáčována a znovu vyčištěna hadříkem. Tímto způsobem byly připraveny všechny vzorky pro další postup.



Obrázek 6.1: 10 typů vzorků připravených pro jednotlivá měření

První typ vzorku obsahující fluorový parafín, byl připraven klasickým způsobem. Na předem vyčištěný vzorek skluznice byl nanesen parafín obsahující fluor, který byl do skluznice žehličkou zažhelen. Po vychladnutí byl přebytečný parafín pomocí škrabky ze skluznice odstraněn a pomocí ocelového a poté nylonového kartáče vyleštěn tak, aby byl vzorek totožný s takto připravenou skluznicí lyže pro jízdu.

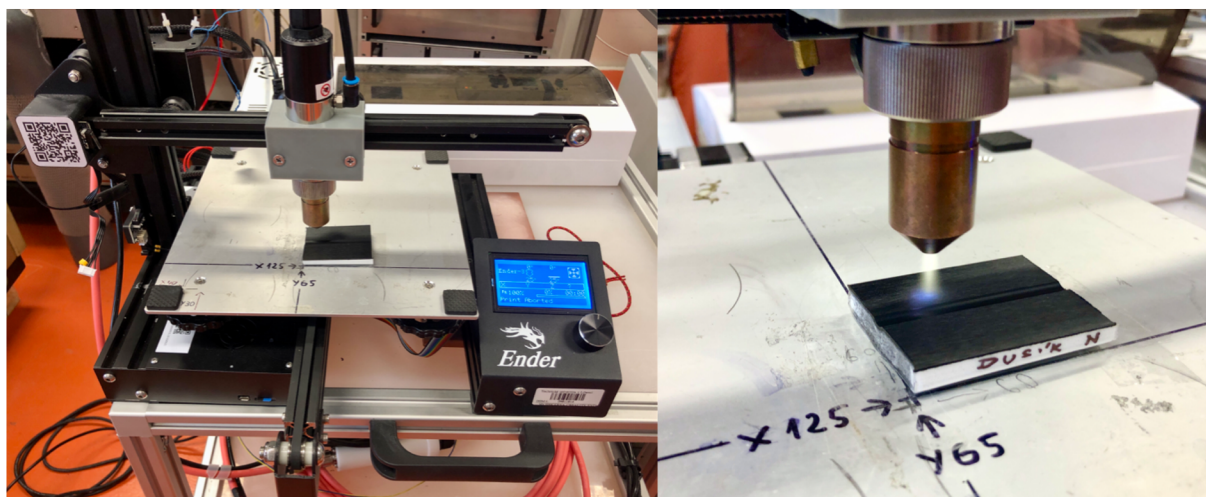
Podobným postupem byl připraven vzorek skluznice s parafínem, který neobsahuje fluor. Jelikož je tento parafín v tekutém stavu, není potřeba ho do skluznice zažehlovat. Parafín byl pouze nanesen na skluznici a po zaschnutí byl ocelovým kartáčem rozkartáčován a nylonovým kartáčem vyleštěn.

Dalším vzorkem byla samotná čistá skluznice bez jakékoliv úpravy – referenční vzorek. Ostatní vzorky již byly ošetřeny plazmovou úpravou popsanou v následující kapitole (6.1).

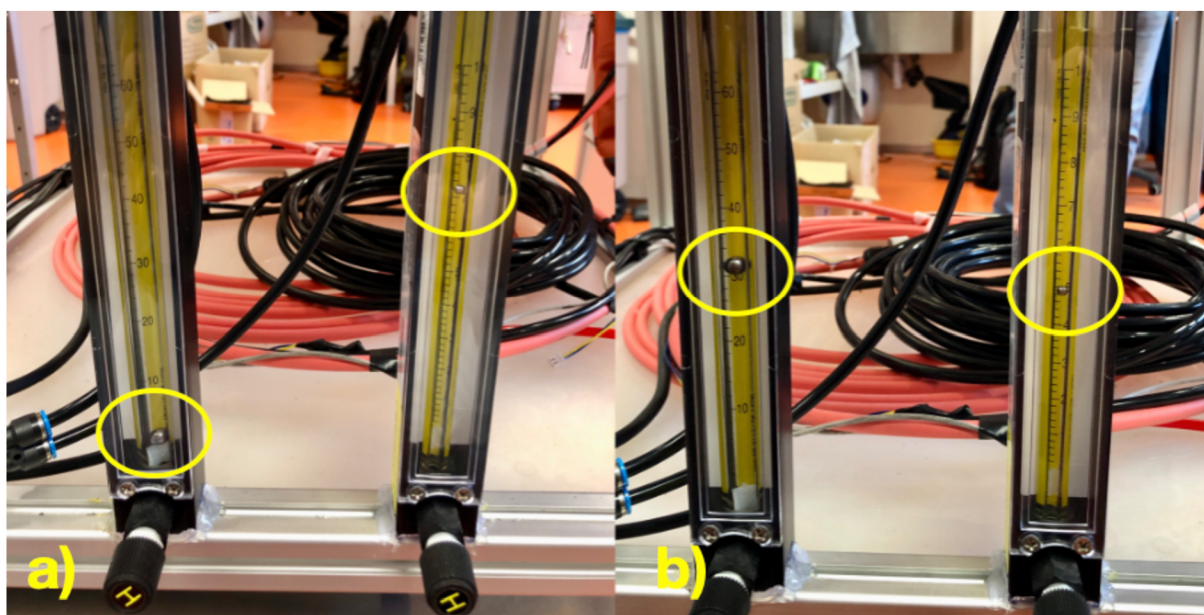
6.1 Úprava povrchu plazmou

Pro tento typ úpravy očištěné skluznice lyže byla použita plazmová tryska typu PS2000EM V 8.0 od výrobce Relyon Pasma GmbH, která byla upevněna na konstrukci 3D tiskárny, aby byl její pohyb konstantní a snadno naprogramovatelný. Výška pojezdu tužky nad vzorkem byla nastavena na 12 mm a byla pro všechny povrchové úpravy tato vzdálenost od povrchu vzorku zachována.

Pomocí plazmové trysky bylo připraveno několik vzorků, jejichž povrchy byly funkcionalizovány atmosférickou plazmou, plazmou s přidáním prekurzoru argonu (Ar) a dusíku (N₂). Postup přípravy je na obrázku 6.1. Průtok argonu byl nastaven na hodnotu 7,2 l/min a průtok dusíku poté na hodnotu 4,9 l/min (obr 6.2). Postup úpravy skluznice pomocí plazmy je zachycen na fotkách níže.



Obrázek 6.1: Systém pro plazmovou úpravu



Obrázek 6.2: Jednotlivé průtoky prekurzorů – a) Argon (7,2 l/min), b) Dusík (4,9 l/min)

Veškeré připravené vzorky byly rozděleny do 4 kategorií znázorněných v tabulce 6.1:

Tabulka 6.1: Připravené vzorky

Úprava bez atmosférického plazmatu	Referenční vzorek
	Skluznice s parafinem obsahující fluor
	Skluznice s parafinem neobsahující fluor
Úprava povrchu skluznice plazmatem bez parafinu	Skluznice s plazmou
	Skluznice s argonovým prekurzorem
	Skluznice s prekurzorem dusíku
Úprava skluznice plazmatem a následné nanesení parafinu	Skluznice s plazmatem a parafinem
	Skluznice s argonovým prekurzorem a parafinem
	Skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem
Zažhnutí parafinu plazmatem	Skluznice s parafinem zažhnutým plazmou

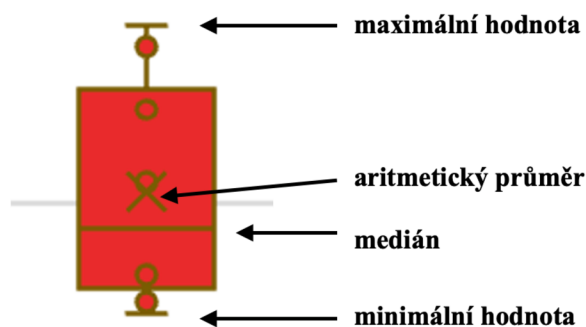
7 Měření na konfokálním mikroskopu

Naměřené hodnoty jednotlivých měření na konfokálním mikroskopu Sensofar S Neox byly zpracovány v Excelu. Každý vzorek byl naměřen celkem šestkrát pro docílení větší přesnosti měření. Z jednotlivých hodnot byl poté v programu vypočten průměr se směrodatnými odchylkami. Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 7.1.

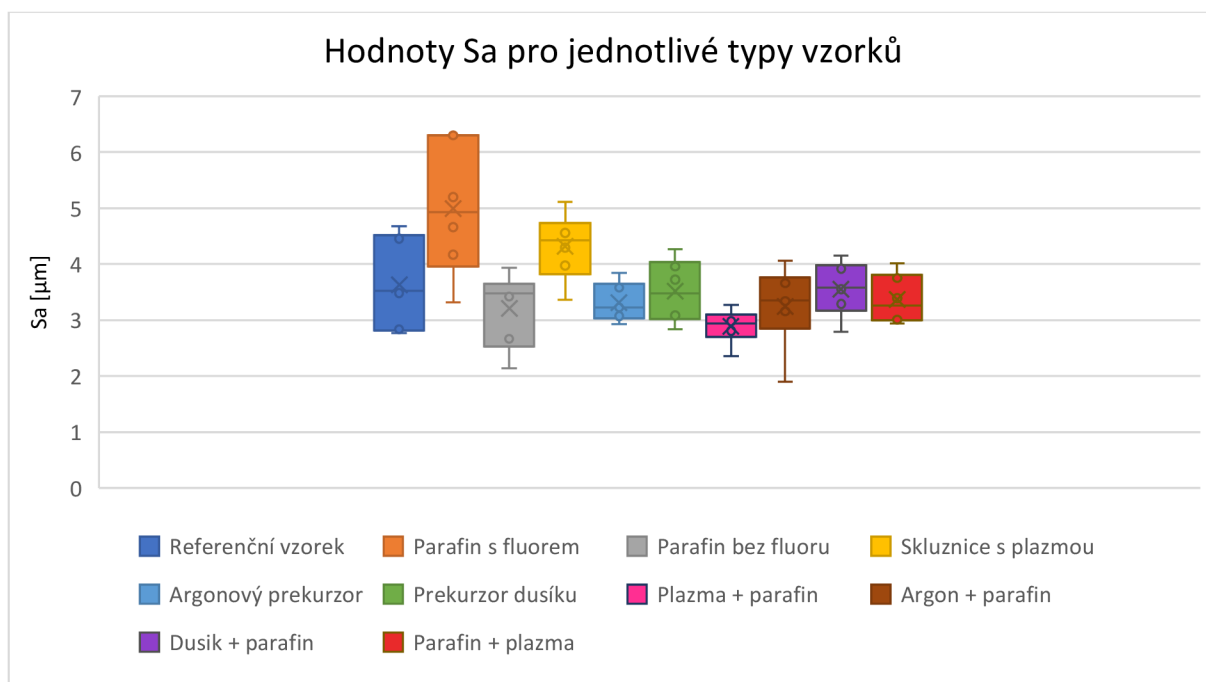
Tabulka 7.1: Průměrné naměřené hodnoty na konfokálním mikroskopu

---	Průměrné naměřené hodnoty		
	Sa [μm]	Sp [μm]	Sz [μm]
Referenční vzorek	$3,63 \pm 0,73$	$10,26 \pm 1,11$	$22,53 \pm 3,42$
Skluznice s parafinem obsahující fluor	$4,99 \pm 1,09$	$10,36 \pm 1,98$	$23,20 \pm 4,21$
Skluznice s parafinem neobsahující fluor	$3,21 \pm 0,61$	$7,93 \pm 1,81$	$19,34 \pm 3,47$
Skluznice s plazmatem	$4,32 \pm 0,55$	$11,94 \pm 1,09$	$27,30 \pm 2,19$
Skluznice s argonovým prekurzorem Ar	$3,31 \pm 0,31$	$11,24 \pm 1,39$	$21,69 \pm 1,42$
Skluznice s prekurzorem dusíku N	$3,52 \pm 0,51$	$11,27 \pm 1,78$	$21,88 \pm 3,32$
Skluznice s plazmatem a parafinem	$2,89 \pm 0,28$	$8,28 \pm 1,18$	$17,38 \pm 2,02$
Skluznice s argonovým prekurzorem a parafinem	$3,25 \pm 0,67$	$9,04 \pm 2,27$	$19,23 \pm 4,26$
Skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem	$3,55 \pm 0,44$	$9,03 \pm 0,56$	$20,76 \pm 1,40$
Skluznice s parafinem zažehleným plazmou	$3,37 \pm 0,40$	$9,91 \pm 0,73$	$22,03 \pm 1,24$

Na následujících grafech (7.1, 7.2, 7.3) jsou zpracované naměřené průměrné hodnoty výškových parametrů (Sa, Sp, Sz) společně s jejich mediánem. Na obrázku 7.1. je detailní popis jednotlivých parametrů, které lze z krabicového grafu vyčíst.



Obrázek 7.1: Popis krabicového grafu



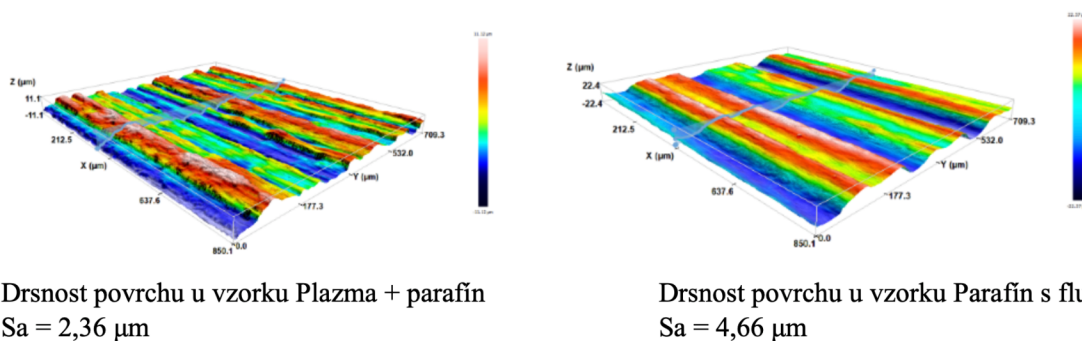
Graf 7.1: Graf znázorňující hodnoty parametru Sa pro jednotlivé typy vzorků

Na grafu 7.1 můžeme u jednotlivých vzorků pozorovat změnu naměřených hodnot u výškového parametru Sa (průměrnou aritmetickou úchylku), které jsou stěžejní pro povrch skluznice. U referenčního vzorku a u vzorku s parafinem obsahující a neobsahující fluor byl pozorován výrazný rozptyl naměřených hodnot oproti ostatním vzorkům. To může být způsobeno strukturou, která byla na povrchu vytvořena, nebo vytvořením drážek na povrchu skluznici kartáčem. Na povrchu tak mohou zůstat zbytky materiálu skluznice, která prošla kartáčovou úpravou před nanesením parafinu, ale i poté. Jednotlivá měření tedy závisí i na konkrétním místě skluznice, které bylo vybráno pro měření.

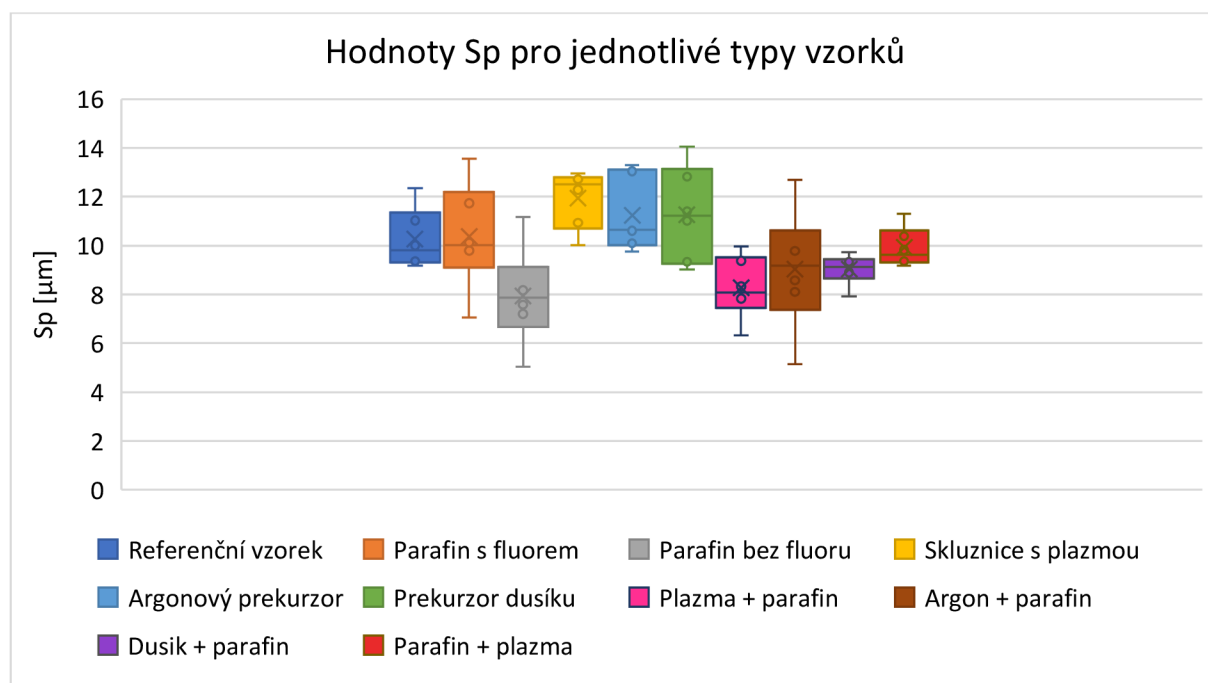
Nejnižší hodnota výškového parametru Sa je pozorována u vzorku, který byl ošetřen plazmatem a následně byl nanesen parafin (označení vzorku: Plazma + parafin). Průměrná hodnota $2,89 \pm 0,28 \mu\text{m}$ výškového parametru Sa může být ovlivněna právě zarovnáním povrchu skluznice pomocí plazmatu od nečistot a nerovností způsobených kartáčováním skluznice lyže.

Pokud se zaměříme výhradně na vzorky skluznic, které byly modifikovány atmosférickou plazmou a atmosférickou plazmou s prekurzorem argonu a dusíku, lze si všimnout, že z těchto tří povrchů má nejvyšší hodnotu parametru Sa vzorek opracovaný jen plazmou. Hodnoty drsnosti povrchů skluznic, opracovaných s prekurzory argonu a dusíku, jsou nižší oproti plazmě bez prekurzoru. Hodnota drsnosti povrchu opracovaného za pomoci argonového prekurzoru je $3,31 \mu\text{m}$, zatímco při opracování povrchu za pomoci prekurzoru dusíku je hodnota $3,52 \mu\text{m}$. K velmi podobným výsledkům dospěli autoři článku, který se zabývá modifikací polyethylenu pomocí plazmy a různých plynných prekurzorů. Nejnižší výsledek byl naměřen za použití

argonového prekurzoru, dále pak prekurzoru dusíku a samotné plazmatu mělo hodnotu nejvyšší, z našich výsledků 4,32 μm . (Abusrafa et al. 2019)



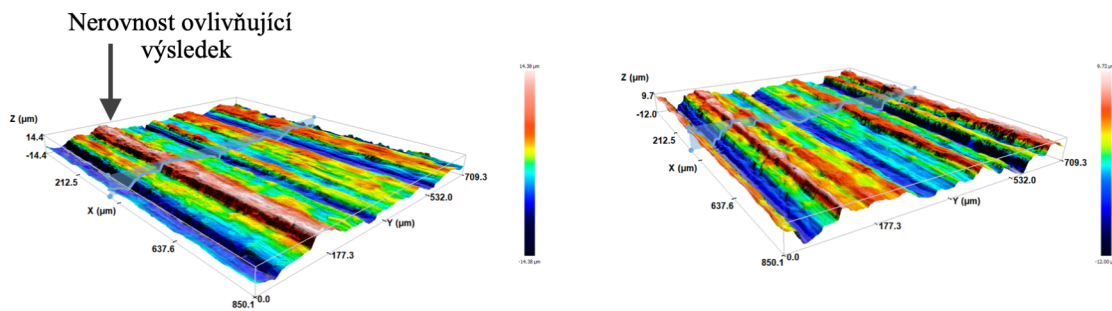
Obrázek 7.2: Drsnost povrchu vzorku s minimální hodnotou Sa (obrázek vlevo) a maximální hodnotou Sa (obrázek vpravo)



Graf 7.2: Graf znázorňující hodnoty parametru Sp pro jednotlivé typy vzorků

Graf 7.2 poukazuje na hodnotu výškového parametru Sp (největší výška výstupku). Opět lze na obrázku pozorovat větší rozptyl výsledků u vzorků skluznice s parafinem obsahující fluor a u skluznice s parafinem neobsahující fluor.

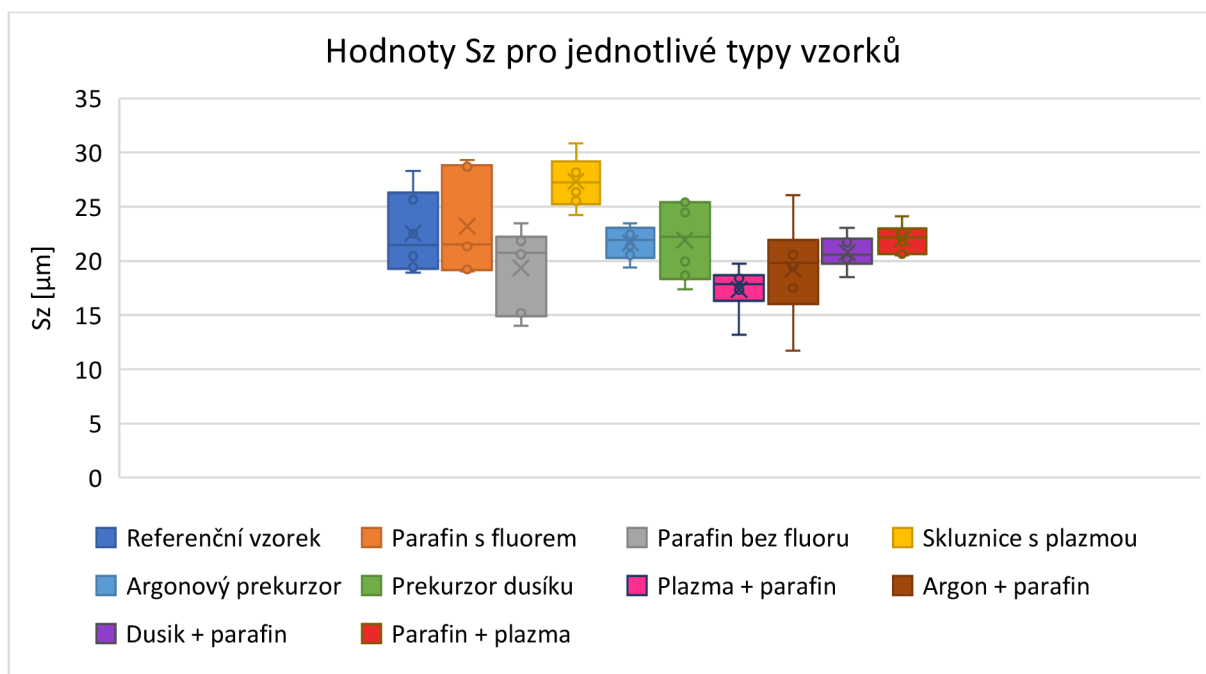
Zajímavým výsledkem pak může být vzorek argonového prekurzoru s parafinem, který má modifikaci provedenou velmi podobným způsobem jako vzorek s prekurzorem dusíku, avšak má o dost větší rozptyl. To může být opět způsobeno kartáčovou úpravou skluznice. U vzorku s prekurzorem dusíku můžeme mluvit o nejmenším rozptylu tohoto typu měření. Průměrné hodnoty těchto dvou měření však zůstávají skoro totožné (argon 9,04 μm ; dusík 9,03 μm).



Největší výška výstupku u vzorku Argon + parafin
 $Sp = 12,69$

Největší výška výstupku u vzorku Dusík + parafin
 $Sp = 9,72$

Obrázek 7.3: Největší výška výstupku Sp u vzorku Argon + parafin (obrázek vlevo)
a u vzorku Dusík + parafin (obrázek vpravo)



Graf 7.3: Graf znázorňující hodnoty parametru Sz pro jednotlivé typy vzorků

Výrazný rozptyl naměřených hodnot Sz (výška mezi nejnižší prohlubní a nejvyšším výstupkem) byl pozorován opět u vzorků referenční skluznice a u vzorku s parafínem obsahující fluor i neobsahující fluor.

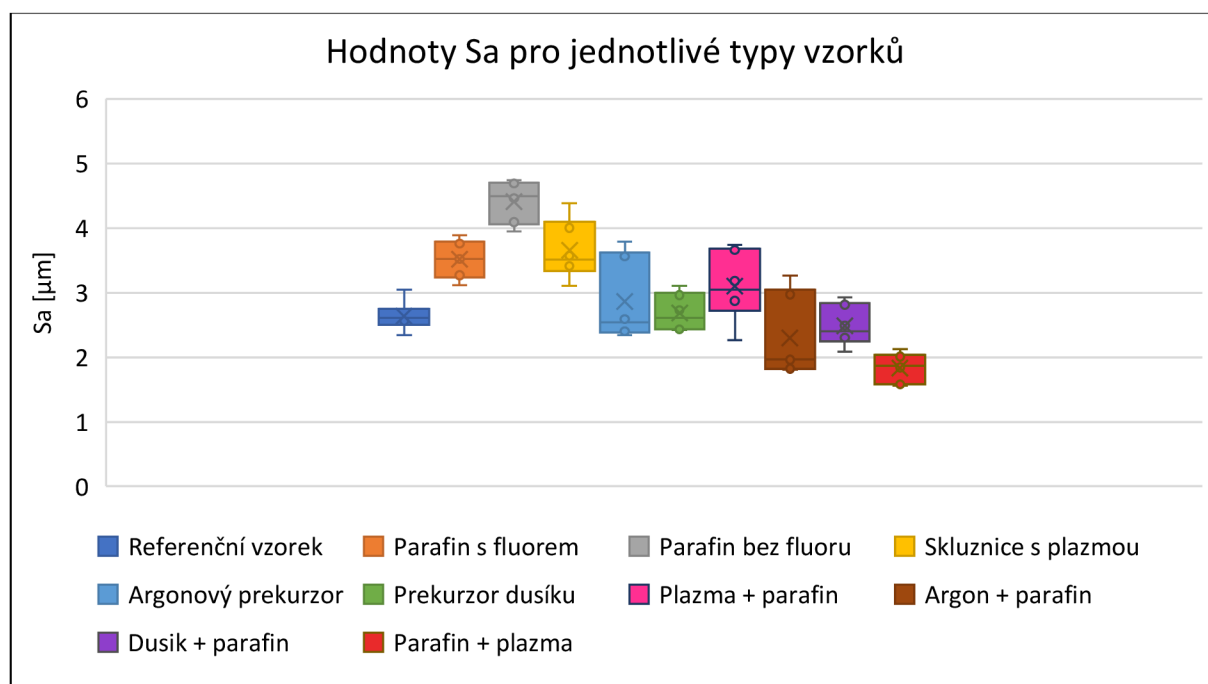
8 Hodnocení drsnosti povrchu po tribologii

Aby bylo možno porovnat změnu výškových parametrů drsnosti povrchu jednotlivých skluznic před a po tribologickém měření (v důsledku tření pinem), bylo nutno opět vzorky skluznic nafotit na konfokálním mikroskopu. Výsledné hodnoty pak byly zpracovány v programu Excel a průměrné hodnoty se směrodatnými odchylkami byly vloženy do tabulky 8.1.

Tabulka 8.1: Průměrné naměřené hodnoty na konfokálním mikroskopu po tribologii

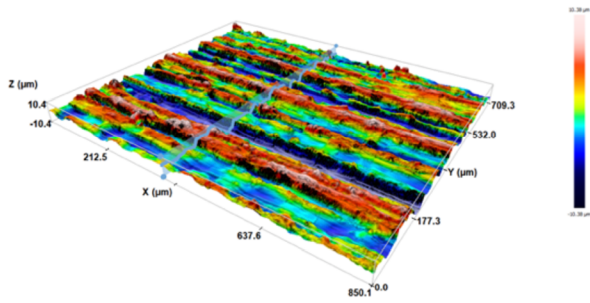
---	Průměrné naměřené hodnoty		
	Typ vzorku	Sa [μm]	Sp [μm]
Referenční vzorek	2,63 ± 0,21	5,09 ± 0,59	17,02 ± 1,50
Skluznice s parafinem obsahující fluor	3,51 ± 0,27	4,92 ± 0,32	17,92 ± 0,56
Skluznice s parafinem neobsahující fluor	4,41 ± 0,29	6,98 ± 0,67	22,57 ± 0,83
Skluznice s plazmou	3,65 ± 0,42	6,20 ± 0,91	21,68 ± 1,70
Skluznice s argonovým prekurzorem Ar	2,86 ± 0,59	5,98 ± 0,97	21,06 ± 3,76
Skluznice s prekurzorem dusíku N	2,69 ± 0,27	6,09 ± 0,43	16,14 ± 0,80
Skluznice s plazmou a parafinem	3,10 ± 0,50	6,74 ± 1,35	16,53 ± 3,16
Skluznice s argonovým prekurzorem a parafinem	2,30 ± 0,59	4,61 ± 1,06	14,28 ± 2,99
Skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem	2,49 ± 0,30	4,71 ± 0,44	16,36 ± 1,68
Skluznice s parafinem zažehleným plazmou	1,84 ± 0,21	4,60 ± 0,50	14,79 ± 2,44

Na následujících grafech (8.1, 8.2, 8.3) jsou zpracované naměřené průměrné hodnoty výškových parametrů (Sa, Sp, Sz) po měření na tribologii. V důsledku tření a pojezdem pinu po skluznici lyže by hodnoty drsnosti povrchu měly být nižší než u měření na konfokálním mikroskopu před tribologií.

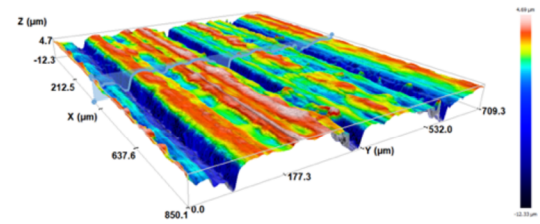


Graf 8.1: Graf znázorňující hodnoty Sa pro jednotlivé typy vzorků po tribologii

V grafu 8.1 si lze všimnout výrazného poklesu rozptylu naměřených hodnot u referenčního vzorku, u skluznice s parafinem obsahující fluor i u skluznice neobsahující fluor. Pokles těchto hodnot může být způsoben především přejížděním pinu po povrchu skluznice a zahlazením tak větších nerovností povrchu. Porovnání povrchu referenčního vzorku skluznice je zobrazeno na obrázku 8.1, kde lze pozorovat výrazně vyšší drsnosti povrchu u vzorku skluznice před tribologickým měřením.

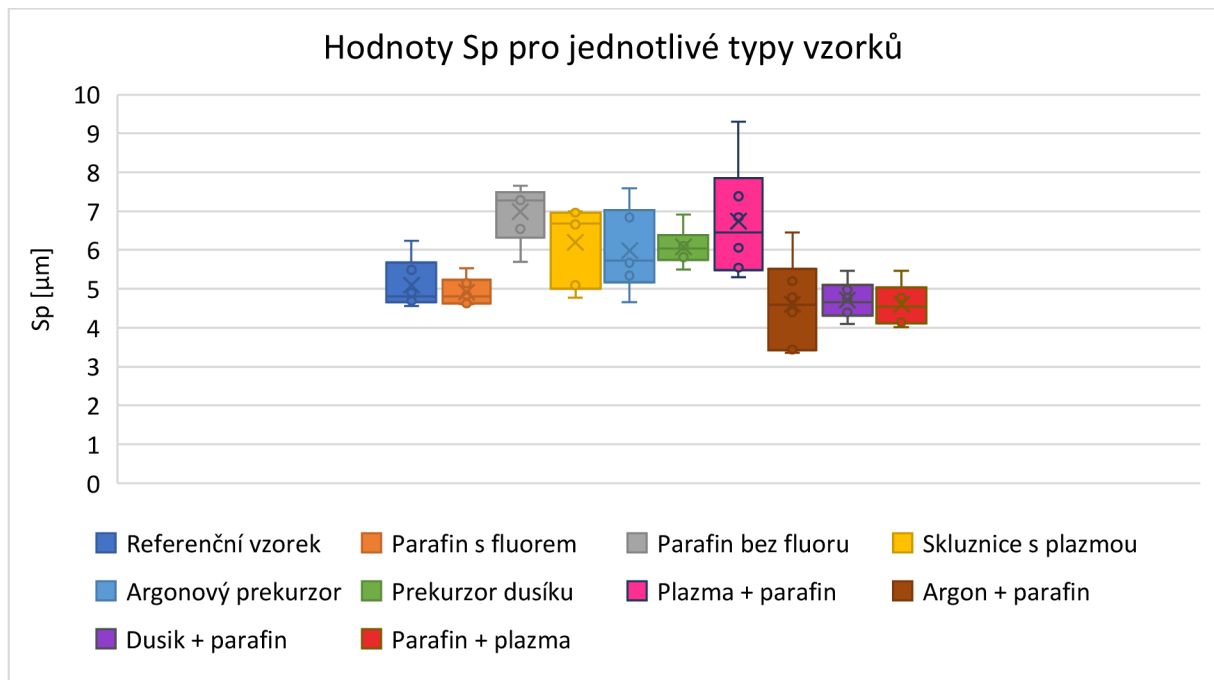


Drsnost povrchu referenčního vzorku před tribologickým měřením

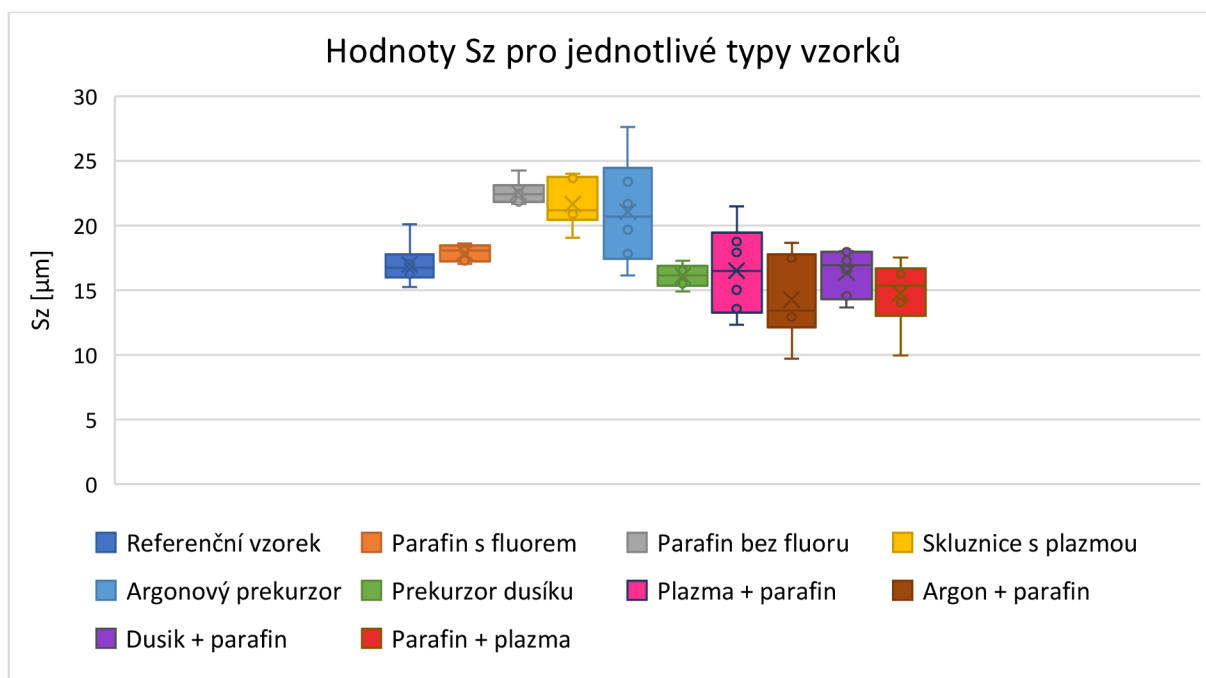


Drsnost povrchu referenčního vzorku po tribologickém měření

Obrázek 8.1: Porovnání drsnosti povrchu před a po tribologickém měření



Graf 8.2: Graf znázorňující hodnoty Sp pro jednotlivé typy vzorků po tribologii



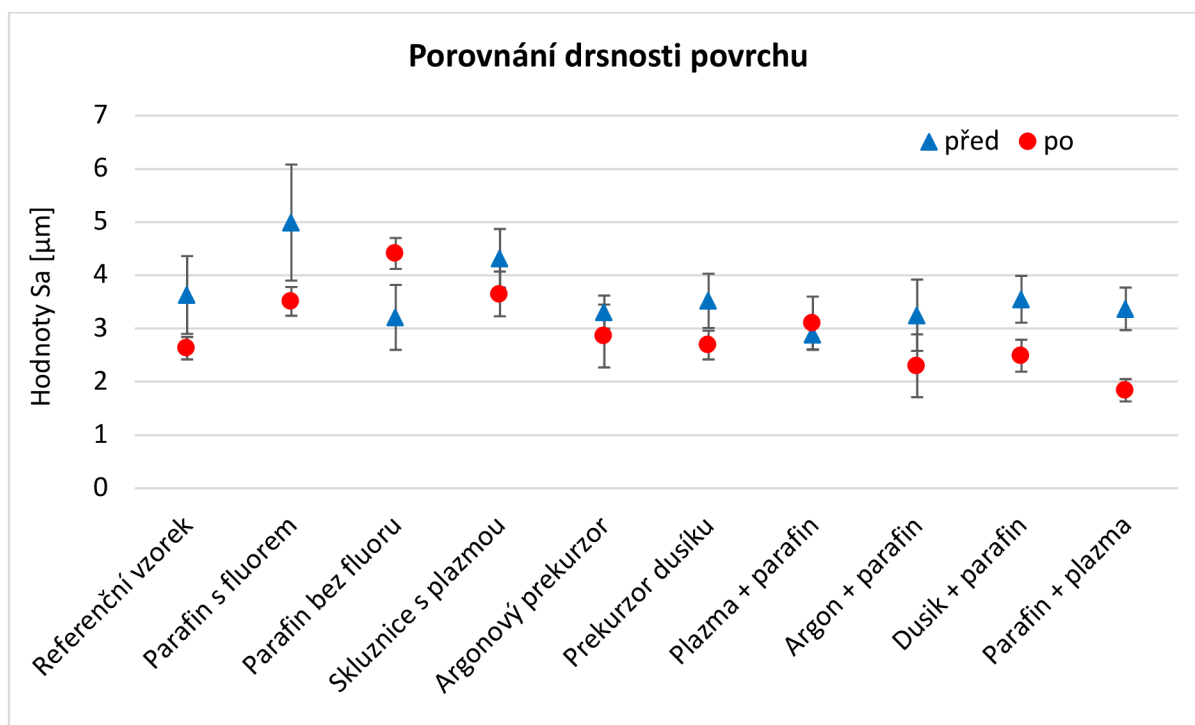
Graf 8.3: Graf znázorňující hodnoty Sz pro jednotlivé typy vzorků po tribologii

8.1.1 Porovnání hodnot drsnosti povrchu

Následně byly průměrné hodnoty drsnosti povrchu před provedením tribologického měření porovnány s hodnotami po tribologickém měření a zaneseny do následující tabulky 8.4. Tabulka byla rozdělena na měření před a po tribologickém experimentu a na procentuální pokles, popřípadě nárůst (záporné hodnoty) průměrné aritmetické úchylky drsnosti povrchu v %.

Tabulka 8.2: Porovnané průměrné naměřené hodnoty na konfokálním mikroskopu Sa před tribologickým měřením a po tribologickém měření a jejich změna v %

---	Průměrné naměřené hodnoty Sa [μm]			
	Typ vzorku	Před	Po	Pokles v %
	Referenční vzorek	$3,63 \pm 0,73$	$2,63 \pm 0,21$	27,50
	Skluznice s parafinem obsahující fluor	$4,99 \pm 1,09$	$3,51 \pm 0,27$	29,70
	Skluznice s parafinem neobsahující fluor	$3,21 \pm 0,61$	$4,41 \pm 0,29$	-37,40
	Skluznice s plazmou	$4,32 \pm 0,55$	$3,65 \pm 0,42$	15,50
	Skluznice s argonovým prekurzorem Ar	$3,31 \pm 0,31$	$2,86 \pm 0,59$	13,60
	Skluznice s prekurzorem dusíku N	$3,52 \pm 0,51$	$2,69 \pm 0,27$	23,60
	Skluznice s plazmou a parafinem	$2,89 \pm 0,28$	$3,10 \pm 0,50$	-7,30
	Skluznice s argonovým prekurzorem a parafinem	$3,25 \pm 0,67$	$2,30 \pm 0,59$	29,20
	Skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem	$3,55 \pm 0,44$	$2,49 \pm 0,30$	29,90
	Skluznice s parafinem zažehleným plazmou	$3,37 \pm 0,40$	$1,84 \pm 0,21$	45,40



Graf 8.4: Graf porovnávající výsledky drsnosti povrchu Sa před a po tribologickém měření

Největší procentuální pokles hodnoty drsnosti (viz graf 8.4) sledujeme u vzorku skluznice s parafinem zažehleným plazmou o 45,4 %. Další, již o něco menší, ale stále můžeme hodnotit jako výrazný pokles pozorujeme u vzorku skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem. Zde je pokles 29,9 %. V podstatě stejný pokles pak můžeme pozorovat u podobně modifikovaného vzorku skluznice s argonovým prekurzorem a parafinem, který má hodnotu 29,2 %.

Lze porovnat, že razantní pokles hodnot byl způsoben u vzorků, které byly ošetřeny plazmou před nanesením parafinu (graf 8.4). Tato úprava tak mohla zlepšit přilnavé vlastnosti parafinu a udržet tak parafin déle na skluznici, což napomáhá snížit tření.

U vzorku skluznice s parafinem neobsahující fluor pozorujeme naopak poměrně výrazné navýšení hodnoty drsnosti povrchu o 37,4 % a u vzorku skluznice s plazmou a parafinem pak o 7,3 %.

9 Hodnocení smáčivosti povrchu

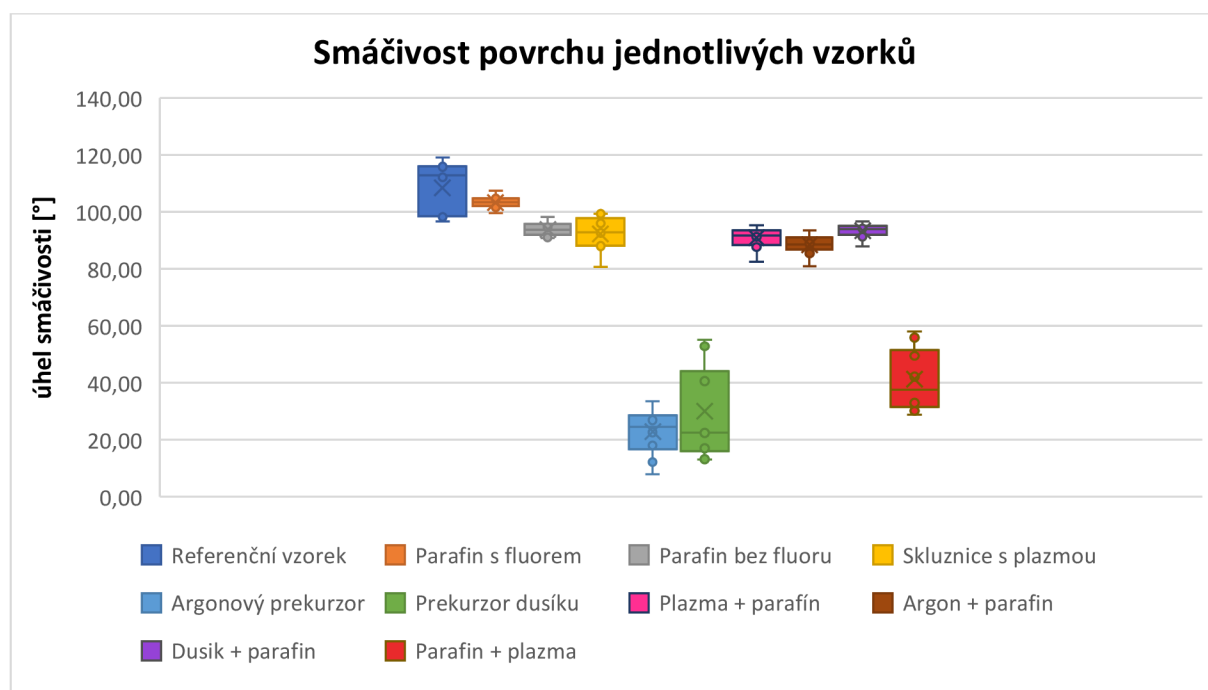
Průměrné hodnoty jednotlivých měření smáčivosti za pomoci sady Surface energy evaluation system byly zpracovány v Excelu (viz tabulka 9.1). Na každém povrchu bylo provedeno 10 měření pro docílení větší přesnosti výsledků. Z jednotlivých hodnot byl poté v programu vypočten průměr a směrodatná odchylka. Výsledná data jsou uvedena v tabulce 9.1.

Tabulka 9.1: Průměrné naměřené hodnoty smáčivosti povrchu

Typ vzorku	Průměr velikosti úhlů smáčení ve °
Referenční vzorek	108 ± 8
Skluznice s parafinem obsahující fluor	103 ± 8
Skluznice s parafinem neobsahující fluor	94 ± 2
Skluznice s plazmou	92 ± 4
Skluznice s argonovým prekurzorem Ar	23 ± 3
Skluznice s prekurzorem dusíku N	30 ± 15
Skluznice s plazmou a parafinem	91 ± 2
Skluznice s argonovým prekurzorem a parafinem	88 ± 6
Skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem	93 ± 2
Skluznice s parafinem zažehleným plazmou	41 ± 11

Nepřesnost měření smáčivosti povrchu je oproti ostatním měřením v této práci velká. Lze si toho povšimnout například u vzorků skluznice s argonovým a dusíkovým prekurzorem, nebo také u skluznice s parafinem zažehleným plazmou (tabulka 9.1). Z důvodu vysoké hydrofilicity povrchu, záleží na rychlosti vytvoření fotografie kapky, než se kapka zcela rozlije po povrchu, proto se hodnoty velice liší. Důvodem velké odchylky od průměrných hodnot u těchto vzorků může být také způsobeno nerovnoměrným ovlivněním povrchu prekurzorem.

Výsledky hodnot a jejich velikost rozptylu je dobře viditelná na grafu 9.1.



Graf 9.1: Smáčivost povrchu jednotlivých vzorků

Naměřené hodnoty znázorněné v grafu 9.1 lze rozdělit na tři skupiny. Hydrofobní povrchy, u kterých je úhel smáčení větší než 90°. Do této skupiny můžeme zahrnout referenční vzorek a vzorek skluznice s parafinem, který obsahuje fluor. Další skupinu vzorků lze popsat jako

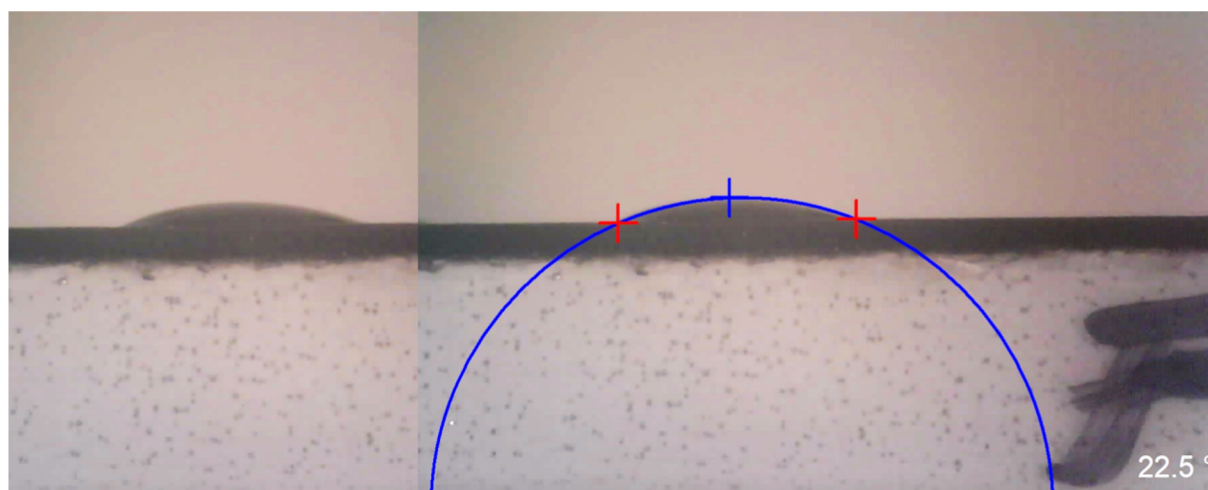
mírně hydrofilní. Vzorky jako skluznice s parafinem neobsahující fluor, skluznice s plazmou, skluznice s plazmou a parafinem, skluznice s argonovým prekurzorem a parafinem a skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem mají úhel smáčení v rozmezí 88-94°.

Do třetí skupiny lze zahrnout tři vzorky, které se dle výsledků velice liší od ostatních. Vzorky skluznice s argonovým prekurzorem, skluznice s prekurzorem dusíku a skluznice s parafinem zažehleným plazmou můžeme považovat za vysoce hydrofilní, jak je znázorněno na grafu. U těchto hodnot si lze na grafu jednoduše povšimnout vysoké nepřesnosti a odchylky, která byla, jak již bylo zmíněno výše, zapříčiněna vysokou hydrofilitou a u měření tak šlo o rychlost pořízení fotografie (viz obrázek 9.1).

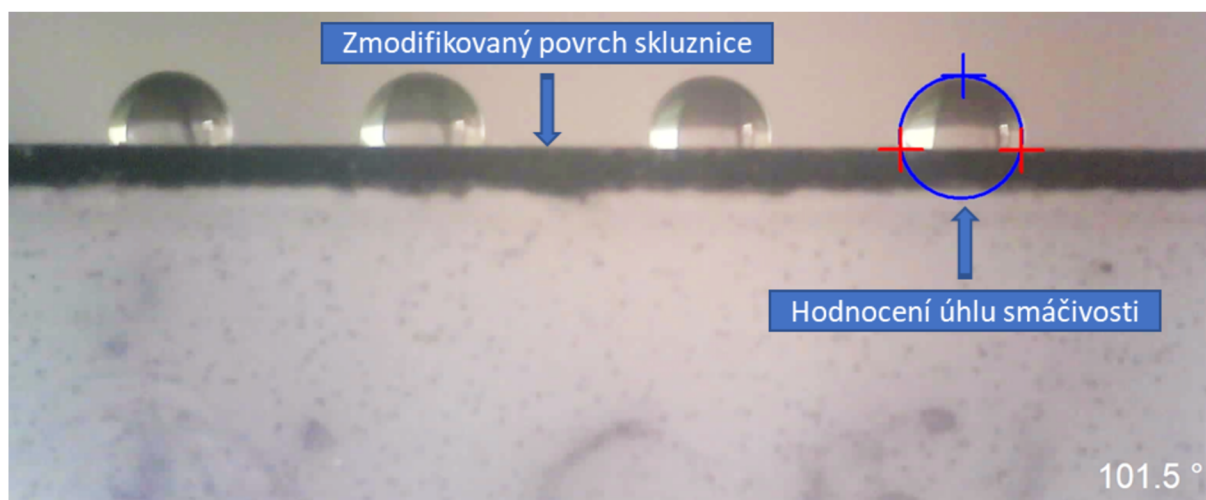
K výsledkům zvýšení hydrofility u vzorku polyethylenu po plazmové úpravě s přítomností argonu jako prekurzoru došli také autoři článku „Formation of wettability gradient surface of PET by maskless argon microplasma jet“. Mimo jiné u vzorků s funkcionalizací povrchu pomocí plynových prekurzorů také potvrdili zvýšení drsnosti povrchu. (Wang et al. 2023)

K velmi podobným výsledkům pak došli autoři u modifikace povrchu polyethylenu pomocí plazmy s dusíkovým prekurzorem, kde výsledky potvrdili zvýšení smáčivosti povrchu. (Wagner et al. 2003)

Studiem zvýšení hydrofobity povrchu, tedy úhlu smáčení povrchu upraveným parafinem s obsahem fluoru se zabýval výzkum vlivu obsahu fluorového aditiva na fyzikální a fyzikálně-chemické vlastnosti. Autoři tohoto výzkumu došli k závěru, že se s obsahem fluoru ve vosku zvyšuje hydrofobita látky, tedy poté i ošetřeným vzorkem. Podle grafu 9.1 je patrné, že výsledný úhel smáčivosti povrchu u vzorku parafínu s fluorem je větší než u parafínu, který fluor neobsahuje. (Rogowski et al. 2007)



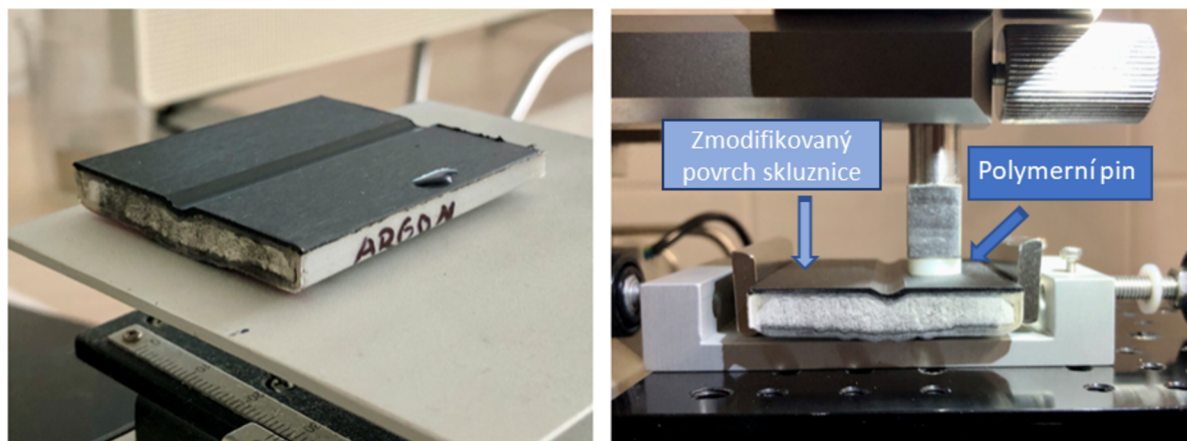
Obrázek 9.1: Vysoce hydrofilní povrch skluznice ovlivněné prekurzorem dusíku



Obrázek 9.2: Hydrofobní povrch skluznice s parafinem obsahující fluor

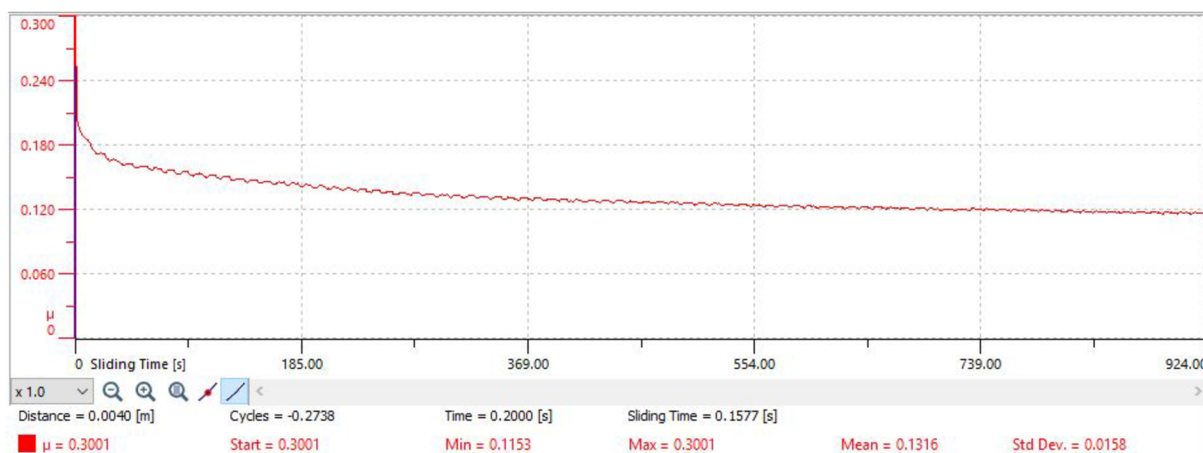
10 Hodnocení tribologických vlastností

Měření koeficientu tření probíhalo na tribometru pro suché a kapalně prostředí TRB³. Upravený vzorek byl vložen do svěraku na pojízdném stolku a upevněn tak, aby byl jeho povrch vodorovný (obr. 10.1). Následně byl nainstalován pin z polymerního materiálu o průměru (10 mm), aby simuloval plochu tření. Zatížení pinu bylo nastaveno na 10 N, délka ojeté dráhy 30 metrů, rychlost pojezdu na $4,5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obrázek 10.1: Příprava vzorku pro měření na tribometru TRB³

Na obrázku 10.2 je znázorněn průběh dynamického koeficientu tření u vzorku skluznice s parafinem zažehleným plazmou za sucha. Na obrázku je vidět, že při zvyšujícím se počtu cyklů dochází k postupnému poklesu hodnoty třecího koeficientu. Obrázek dále ukazuje hodnotu statického koeficientu tření, minimální a maximální hodnotu koeficientu tření, průměrnou hodnotu a směrodatnou odchylku dynamického koeficientu tření.

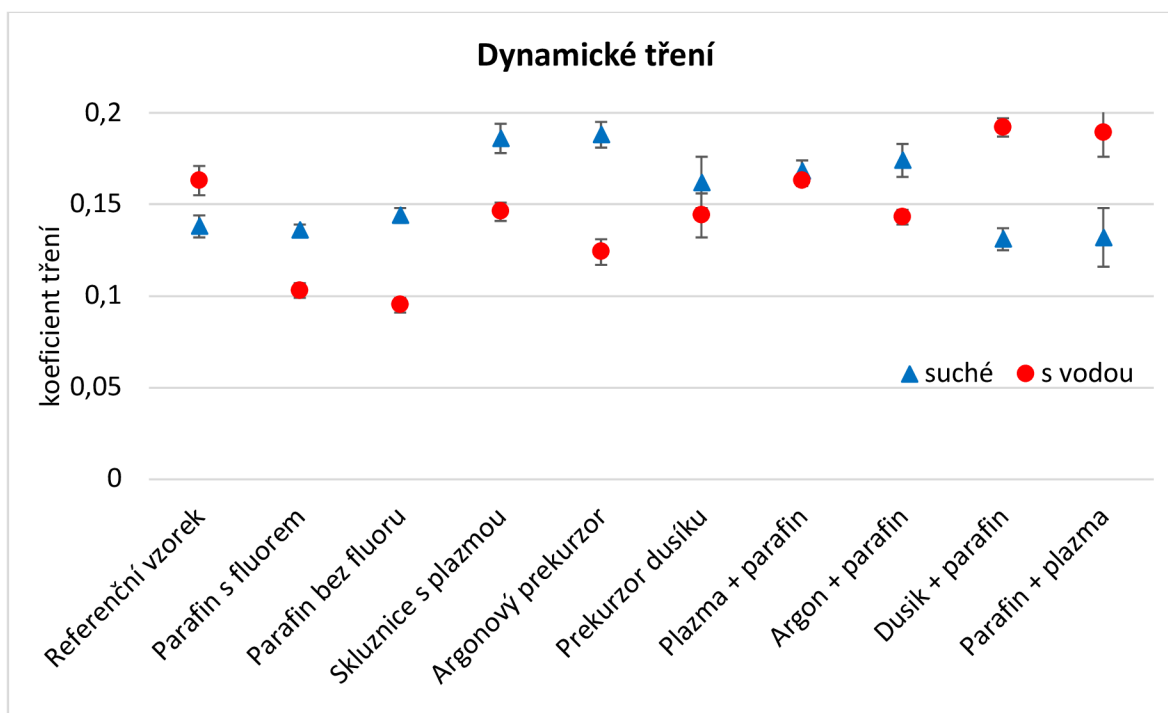


Obrázek 10.2: Průběh třecího koeficientu na povrchu vzorku skluznice s parafínem zažehleným plazmou za sucha

Měření tribologie probíhalo dvěma způsoby – za sucha a s vytvořeným vodního filmu mezi skluznicí a pinem. Výsledné hodnoty měření se směrodatnou odchylkou jsou zapsány v tabulce 10.1 a rozděleny na měření za sucha jako „Suché tření“ a „Tření za použití vody“. Dále byl vytvořen graf 10.1 pro znázornění výsledků dynamického koeficientu tření za sucha a za použití vody. Graf 10.2 pak znázorňuje výsledky statického koeficientu tření za sucha a za použití vody.

Tabulka 10.1: Průměrné naměřené hodnoty jednotlivých tření pro různé vzorky skluznic

Typ vzorku	Suché tření		Tření za použití vody	
	Dynamické t.	Statické t.	Dynamické t.	Statické t.
Referenční vzorek	0,138 ± 0,006	0,211	0,163 ± 0,008	0,069
Parafín obsahující fluor	0,136 ± 0,003	0,090	0,103 ± 0,004	0,154
Parafín neobsahující fluor	0,144 ± 0,004	0,072	0,095 ± 0,004	0,126
Skluznice s plazmou	0,186 ± 0,008	0,239	0,146 ± 0,005	0,177
Argonový prekurzor Ar	0,188 ± 0,007	0,242	0,124 ± 0,007	0,194
Prekurzor dusíku N	0,162 ± 0,014	0,300	0,144 ± 0,012	0,211
Plazma a parafín	0,168 ± 0,006	0,176	0,163 ± 0,003	0,149
Argonový prekurzor a parafín	0,174 ± 0,009	0,156	0,143 ± 0,004	0,116
prekurzor dusíku s parafínem	0,131 ± 0,006	0,258	0,192 ± 0,005	0,046
parafín zažehlený plazmou	0,132 ± 0,016	0,300	0,189 ± 0,013	0,277



Graf 10.1: Graf dynamického tření vzorků naměřených na tribometru

Výsledné hodnoty koeficientu dynamického tření viditelné na grafu 10.1 lze rozdělit do dvou skupin, a to za sucha s vodním filmem. Na grafu je zřejmé, že nejnižší hodnoty tření za sucha jsou prakticky totožné u vzorku skluznice s prekurzorem dusíku a parafínem a také u vzorku s parafínem zažehleným plazmou s průměrnou hodnotou 0,131 a 0,132. U tohoto měření byla nejmenší hodnota dosažena u vzorku skluznice s parafínem obsahující fluor, který měl hodnotu 0,103.

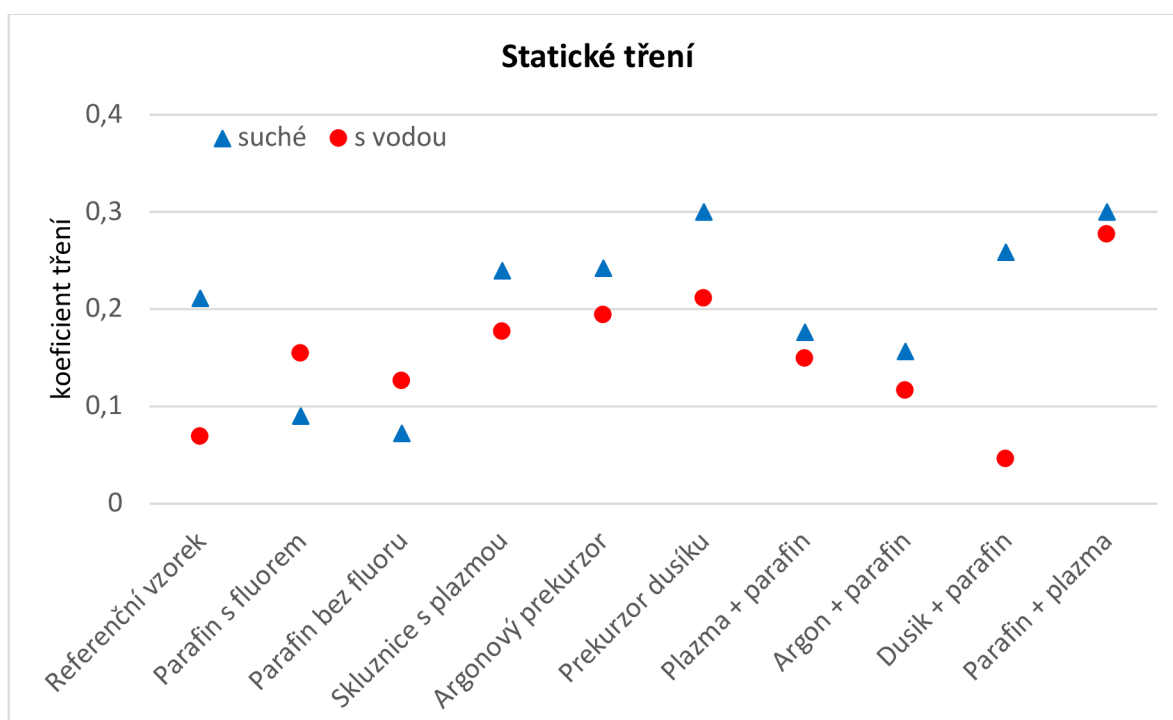
Naopak nejvyšší koeficient tření pak pozorujeme u vzorku skluznice s argonovým prekurzorem, který činí 0,188. Tato skluznice stejně jako skluznice s prekurzorem dusíku, nebo plazmou, nejsou ošetřeny žádným parafínem, a tudíž lze předpokládat hodnoty mnohonásobně vyšší. Zvýšení koeficientu tření u takto upraveného povrchu oproti referenčnímu pozorovali i autoři studie „Modifikace povrchu HDPE pomocí plazmy s argonovým prekurzorem“. (Liu et al. 2010)

Nečekaným výsledkem pak může být vzorek skluznice s argonovým prekurzorem a parafínem, jehož hodnotu koeficientu tření (0,174) bychom mohli očekávat podobnou, jako tomu bylo u vzorku skluznice s prekurzorem dusíku a parafínem (hodnota 0,131), z důvodu podobného ošetření aplikace plazmy s prekurzorem a následného nanesení parafínu.

Hodnoty jednotlivých koeficientů tření s vodním filmem se velice liší. Nejnižší hodnoty vycházejí u vzorku skluznice s parafínem bez fluoru (0,095) a u vzorku skluznice s parafínem obsahující fluor (0,103). U parafínu obsahující fluor se tento výsledek mohl předpokládat, protože i samotné parafíny obsahovaly právě fluor jako urychlovač. Zvláštní je však výsledná a zároveň

nejnižší hodnota koeficientu tření u parafinu neobsahující fluor. Tento druh parafinu zdatelně snižuje rychlost lyži v reálných podmínkách.

Jedny z nejvyšších hodnot koeficientu tření s vodním filmem pak byly naměřeny naopak u vzorků, které měli nejlepší výsledky za sucha. Tedy u vzorku skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem a také u vzorku s parafinem zažehleným plazmou. Hodnoty těchto vzorků s vodním filmem pak činily 0,192 a 0,189.



Graf 10.2: Graf statického tření vzorků naměřených na tribometru

Na grafu jednotlivých koeficientů statického tření si můžeme povšimnout, že jednotlivé hodnoty vzorků oproti předchozímu grafu 10.1 mají větší mnohem větší rozptyl.

Nejnižší hodnotu u vzorků za sucha pozorujeme u vzorku skluznice s parafinem neobsahující fluor s hodnotou 0,072, zatímco nejvyšší hodnota je u vzorku skluznice s prekurzorem dusíku a u vzorku skluznice s parafinem zažehleným plazmou. U obou těchto vzorků je hodnota koeficientu 0,3.

Ještě větší pokles hodnot pak pozorujeme u vyhodnocování vzorků s vodním filmem. Nejnižší hodnotou statického koeficientu tření je hodnota 0,046 u vzorku skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem. Naopak nejvyšší hodnota pak byla naměřena u vzorku skluznice s parafinem zažehleným plazmou s hodnotou 0,277.

Závěr

Bakalářskou práci jsem vypracoval podle zadání a s cílem prokázat užitečné vlastnosti různých povrchových úprav skluznic lyží za pomoci atmosférického plazmu a použití různých prekurzorů.

Teoretická část práce seznamuje čtenáře s obecným pojmem plazmatu různými typy plazmové úpravy za atmosférických podmínek. Dále se čtenář dočte o plazmových prekurzorech, druhů skluznicích lyží a typech běžeckých lyží, o různých voskách, které se využívají pro mazání skluznic a zlepšení jejich kluzných vlastností. V neposlední řadě jsou v práci rozepsány i samotné metody hodnocení, které byly využity v praktické části práce.

Praktická část je zaměřena na samotné hodnocení a zpracování do grafů a tabulek dosažených výsledků povrchových vlastností. Hodnoceny byly výškové parametry drsnosti povrchu, úhel smáčivosti a koeficient dynamického a statického tření za sucha a s vodním filmem. Ze zpracovaných dat lze odvodit následující závěry:

Drsnost povrchu

Mezi vzorky s nejmenší průměrnou aritmetickou úchylkou drsnosti (S_a) můžeme řadit vzorek skluznice s plazmatem a parafínem, jehož hodnota činí $2,89 \mu\text{m}$. Dále také vzorek skluznice s parafínem neobsahující fluor s hodnotou $3,21 \mu\text{m}$ a vzorek skluznice s argonovým prekurzorem a parafínem ($3,25 \mu\text{m}$). Naopak největší drsnost povrchu byla pozorována u vzorku skluznice s parafínem obsahující fluor, u které byla zaznamenána hodnota $4,99 \mu\text{m}$ a u skluznice s plazmatem byla průměrná aritmetická úchylka drsnosti povrchu $4,32 \mu\text{m}$.

Smáčivost povrchu

Největší průměrná hodnota úhlu smáčení (hydrofobita) byl pozorován u povrchu referenčního vzorku, u kterého byl naměřen úhel 108° , následoval povrch vzorku skluznice s parafínem obsahující fluor s úhlem smáčení 103° . Nejnižší průměrná hodnota úhlu smáčení (hydrofilita) byla prokázána u povrchu vzorků, které byly ošetřeny plazmatem nebo plazmatem s prekurzorem argonu či dusíku. Úhel naměřen u vzorku skluznice s argonovým prekurzorem argonu byl 23° a u vzorku skluznice s prekurzorem dusíku - 30° .

Koeficient dynamické tření

Měření koeficientu tření probíhalo za sucha a také s vodním filmem. Nejnižší průměrnou hodnotu koeficient tření za sucha byl pozorován u vzorku skluznice s prekurzorem dusíku a parafínem, který měl hodnotu $0,131$. Velmi podobný výsledek byl pozorován u vzorku skluznice s parafínem zažehleným plazmou s hodnotou $0,132$. Nejvyšší průměrnou hodnotu koeficient tření za sucha byl pozorován u vzorku skluznice s argonovým prekurzorem s koeficientem tření $0,188$.

Výsledky koeficientu tření s vodním filmem se na upravených površích lišily. Nejmenší průměrnou hodnotu koeficient tření byla zaznamenána u vzorku skluznice s parafinem neobsahující fluor (0,095), dále u vzorku skluznice s parafinem obsahující fluor (0,103), kdežto vzorek skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem a vzorek skluznice s parafinem zažehleným plazmou byly s vodním filmem nejvyšší (0,192 a 0,189).

Bakalářská práce byla vypracována v souladu s popsány úkoly v zadání. Tímto lze shrnout, že veškeré cíle zadání bakalářské práce byly splněny. Bakalářská práce je přínosem pro další rozpracování výzkumného směru a zároveň shrnutím různých typů povrchových modifikací a úprav skluznic za pomoci plazmatu a plazmových prekurzorů. Výzkum by v tomto směru měl pokračovat ať už jinými typy prekurzorů, tak také praktickým ověřením laboratorních výsledků v reálném prostředí, což přinese spoustu užitečných informací pro odborníky. Práce s modifikacemi povrchů byla velice zajímavá a dle mého názoru by mohla určitě posloužit i české lyžařské reprezentaci jako zdroj informací o různých modifikacích povrchů.

Použitá literatura

- ABUSRAFA, Aya, Salma HABIB, Igor KRUPA, Mabrouk OUEDERNI a Anton POPELKA, 2019. Modification of Polyethylene by RF Plasma in Different/Mixture Gases. *Coatings* [online]. **9**, 145. Dostupné z: doi:10.3390/coatings9020145
- BAČO, Radomír, 2009. *Současné trendy v technologii mazání běžeckých lyží*. Brno. Masarykova univerzita.
- BEČKA, Jan, 1997. *Tribologie*. Vyd. 1. Praha: ČVUT. ISBN 978-80-01-01621-3.
- BURŠÍKOVÁ, Vilma, 2004. *Surface energy evaluation of plasma treated materials by contact angle measurement*. 1st ed. Brno: Masaryk University. ISBN 978-80-210-3563-8.
- EVROPSKÁ KOMISE, GENERÁLNÍ ŘEDITELSTVÍ PRO VNITŘNÍ TRH, PRŮMYSL, PODNIKÁNÍ A MALÉ A STŘEDNÍ PODNIKY, 2017. *NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2017/1000*. 6 2017.
- GRASMEDER, John, 2017. *Polymer Crystallinity: A Detailed Overview* [online]. 2017. Dostupné z: <https://www.victrex.com/en/blog/2017/polymer-crystallinity-hpp-explained-part-3>
- G.U.N.T. GERÄTEBAU, 2024. *Static and kinetic friction* [online]. 2024. Dostupné z: https://www.gunt.de/images/download/static_kinetic_friction_english.pdf
- CHEN, Francis F. a Jane P. CHANG, 2002. *Lecture Notes on PRINCIPLES OF PLASMA PROCESSING*. Los Angeles. University of California.
- CHIENG, Buong Woei, Nor Azowa IBRAHIM, Noraniza Ahmad DAUD a Zainal Abidin TALIB, 2019. Chapter 8 - Functionalization of Graphene Oxide via Gamma-Ray Irradiation for Hydrophobic Materials. In: Suraya Abdul RASHID, Raja Nor Izawati Raja OTHMAN a Mohd Zobir HUSSEIN, ed. *Synthesis, Technology and Applications of Carbon Nanomaterials* [online]. B. m.: Elsevier, Micro and Nano Technologies, s. 177–203. ISBN 978-0-12-815757-2. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815757-2.00008-5>
- CHOVANEC, Felix, JAROSLAV POTMĚŠIL a Miroslav JAVORSKÝ, 1983. *Běh na lyžích*. 2. vyd. Praha: Olympia. ISBN 27-040-83.
- JANKOVÝCH, Róbert a Bohumil BUMBÁLEK, 2014. *VÝŠKOVÉ PARAMETRY TEXTURY POVRCHU* [online]. 2014. první. B. m.: MM publishing, s.r.o. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/36375>
- KALOUS, Martin, 2019. *Výběr a příprava běžeckých lyží na bruslení*. Brno. Bakalářská práce. Masarykova univerzita.
- KOCANDA, Tomáš, 2020. V hlavní roli fluor: Proč a co bude dál? *bezky.net* [online]. Dostupné z: <https://bezky.net/clanek/1713-v-hlavni-rol-i-fluor-proc-a-co-bude-dal>
- KUPSKÝ, David, 2023. *Hodnocení profilových parametrů textury povrchu a posouzení shody se specifikací na výkrese*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- LIU, Hengjun, Yanan PEI, Dong XIE, Xingrui DENG, Y. X. LENG, Yong JIN a Nan HUANG, 2010. Surface modification of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) by argon plasma. *Applied Surface Science* [online]. **256**(12), 3941–3945. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.01.054>
- MAKOVEC, Michal, 2011. *Sestavení a testování vysokofrekvenčních plazmových trysek s aerosoly*. Brno. Bakalářská práce. MASARYKOVA UNIVERZITA.
- MECHLOVÁ, Erika, 2004. *Molekulová fyzika 1: molekulové jevy v kapalinách*. Vyd. 1.

Ostrava: Ostravská univerzita. ISBN 978-80-7042-989-1.

NOVOSÁD, Lukáš, 2015. *Interakce nízkoteplotního neizotermního plazmatu s kondenzovanou fází*. Brno. Disertační práce. MASARYKOVA UNIVERZITA.

PETŘKOVSKÁ, PH.D., Ing. Lenka, 2013. *TECHNICKÁ MĚŘENÍ A METROLOGIE TEORETICKÝ ZÁKLAD*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. ISBN 978-80-248-3035-3.

PLASMA ETCH, 2022. *What is Argon Plasma?* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.plasmaetch.com/argon-plasma.php>

ROGOWSKI, Isabelle, Didier LEONARD, Jean-Yves GAUVRIT a Pierre LANTERI, 2007. Influence of fluorine-based additive content on the physical and physicochemical properties of ski gliding wax. *Cold Regions Science and Technology* [online]. **49**(2), 145–150. ISSN 0165-232X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2007.03.010>

SKI PLZEN, 2019. *Základní struktury* [online]. 2019. Dostupné z: <https://www.skiplzen.cz/struktura-na-skluznici-po-vybrusu-na-kameni-2-4>

SVOBODA, Tomáš, 2010. *Modifikace povrchů plazmovými tryskami*. Brno. DIPLOMOVÁ PRÁCE. MASARYKOVA UNIVERZITA.

ŠPÍZ, Lubor, 2023. *Nordicmag*. **2023**(61), 82.

TENDERO, Claire, Christelle TIXIER, Pascal TRISTANT, Jean DESMAISON a Philippe LEPRINCE, 2006. Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* [online]. **61**(1), 2–30. ISSN 05848547. Dostupné z: doi:[10.1016/j.sab.2005.10.003](https://doi.org/10.1016/j.sab.2005.10.003)

THE MAGNUM GROUP, 2024. *Working diagram of a DC plasma torch*. 2024.

THE SCIENCE HIVE, 2024. *The science sauce: Your Daily Dollop of science revision* [online]. 2024. Dostupné z: <https://www.thesciencehive.co.uk/polymers-aqa>

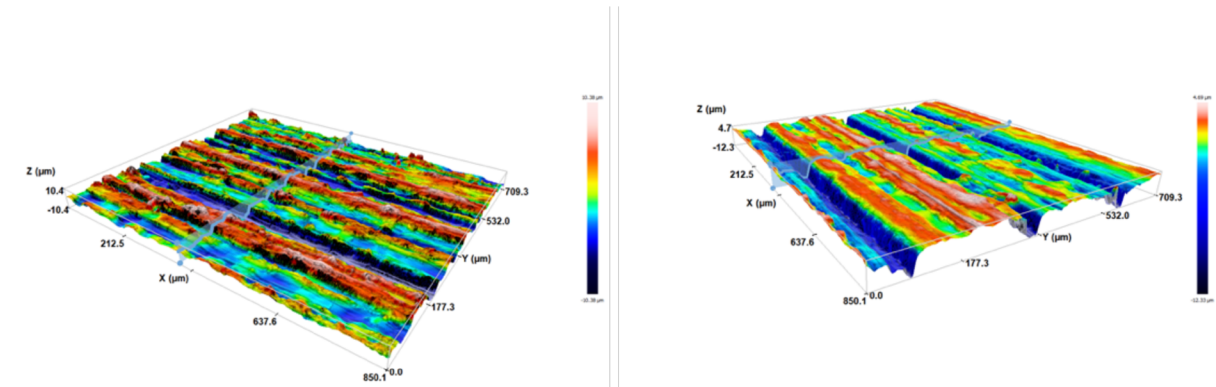
TROUP, František, 2014. *Povrchová funkcionizace materiálů s využitím plazmových technologií*. České Budějovice. DIPLOMOVÁ PRÁCE. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích.

WAGNER, A. J., D. H. FAIRBROTHER a F. RENIERS, 2003. A Comparison of PE Surfaces Modified by Plasma Generated Neutral Nitrogen Species and Nitrogen Ions. *Plasmas and Polymers* [online]. **8**(2), 119–134. ISSN 1572-8978. Dostupné z: doi:[10.1023/A:1023942211714](https://doi.org/10.1023/A:1023942211714)

WANG, Tao, Xin WANG, Weizhi YANG, Jie SHENG a Liping SHI, 2023. Formation of wettability gradient surface on polyethylene terephthalate by maskless argon microplasma jet writing for droplet self-driven application. *Applied Surface Science* [online]. **628**, 157383. ISSN 0169-4332. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157383>

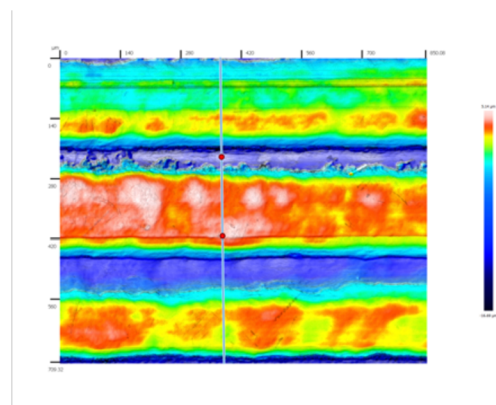
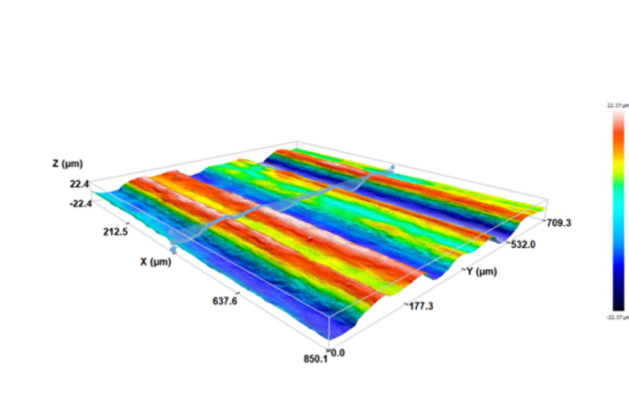
Přílohy

A Snímky konfokálního mikroskopu vzorků skluznic před a po tribologickém měření



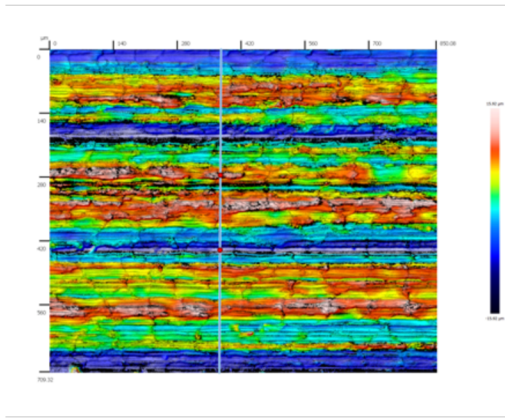
Drsnost povrchu referenčního vzorku skluznice před tribologickým měřením

Drsnost povrchu referenčního vzorku skluznice po tribologickém měření

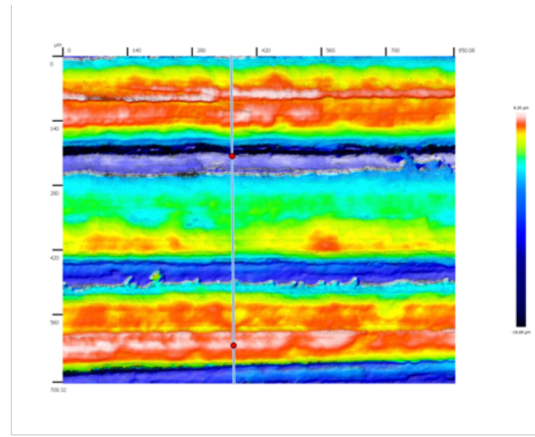


Drsnost povrchu skluznice s parafínem obsahující fluor před tribologickým měřením

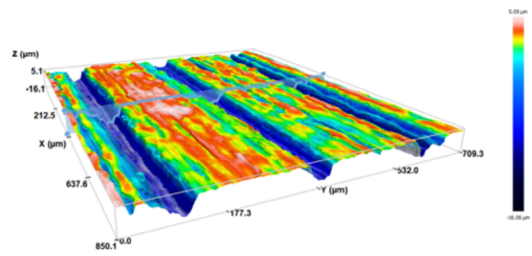
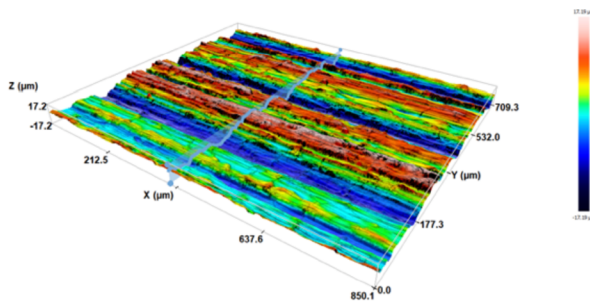
Drsnost povrchu skluznice s parafínem obsahující fluor po tribologickém měření



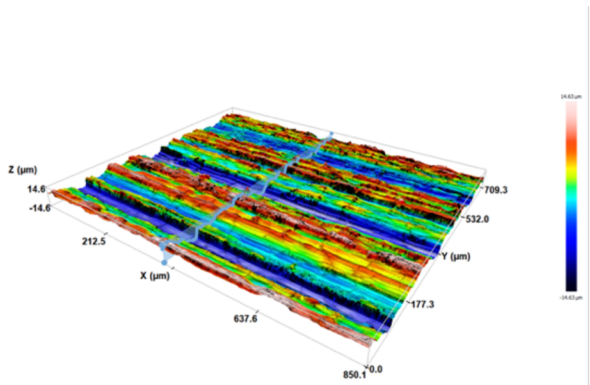
Drsnost povrchu skluznice s parafinem neobsahující fluor před tribologickým měřením



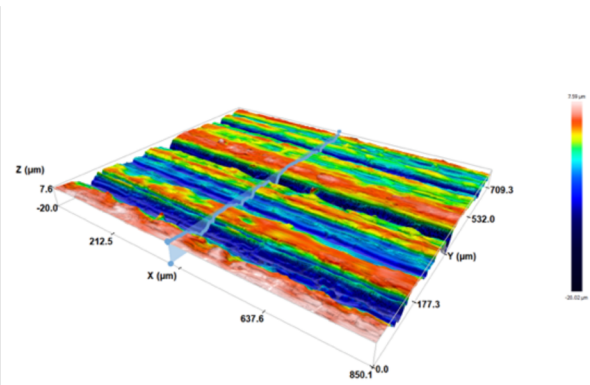
Drsnost povrchu skluznice s parafinem neobsahující fluor po tribologickém měření



Drsnost povrchu skluznice s plazmovou úpravou před tribologickým měřením

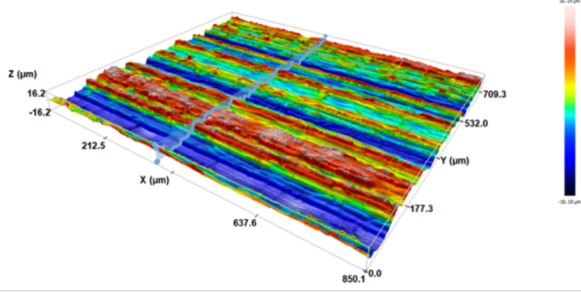


Drsnost povrchu skluznice s plazmovou úpravou po tribologickém měření

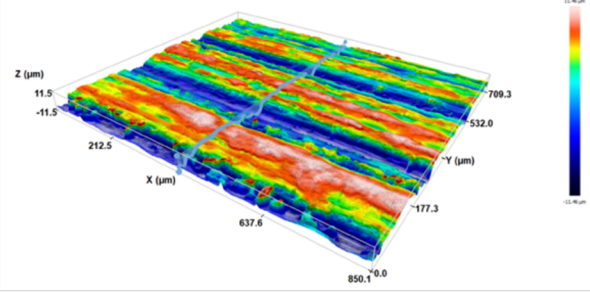


Drsnost povrchu skluznice s argonovým prekurzorem před tribologickým měřením

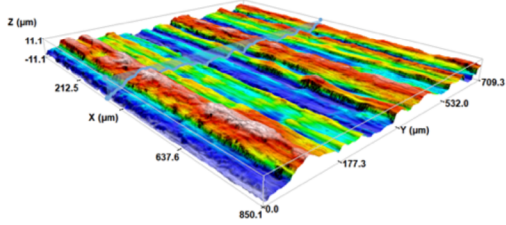
Drsnost povrchu skluznice s argonovým prekurzorem po tribologickém měření



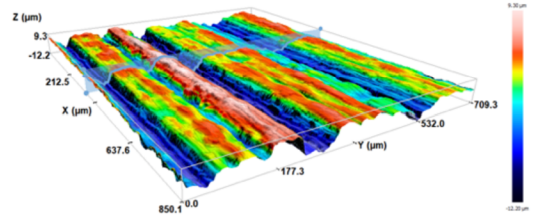
Drsnost povrchu skluznice prekurzorem dusíku před tribologickým měřením



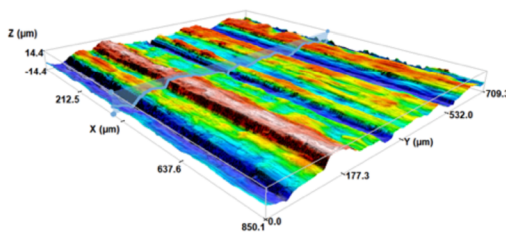
Drsnost povrchu skluznice prekurzorem dusíku po tribologickém měření



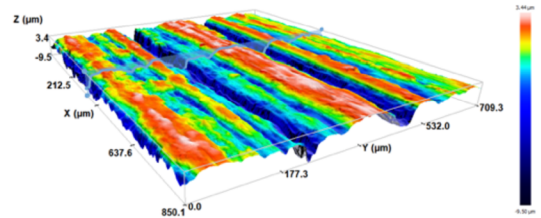
Drsnost povrchu skluznice s plazmou a parafinem před tribologickým měřením



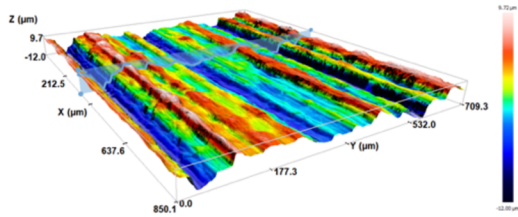
Drsnost povrchu skluznice s plazmou a parafinem po tribologickém měření



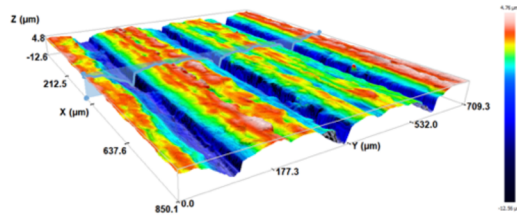
Drsnost povrchu skluznice s argonovým prekurzorem a parafinem před tribologickým měřením



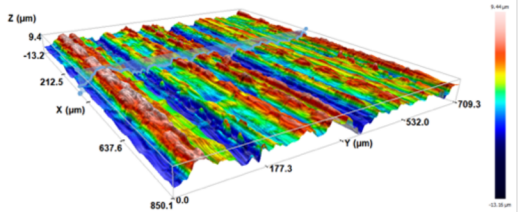
Drsnost povrchu skluznice s argonovým prekurzorem a parafinem po tribologickém měření



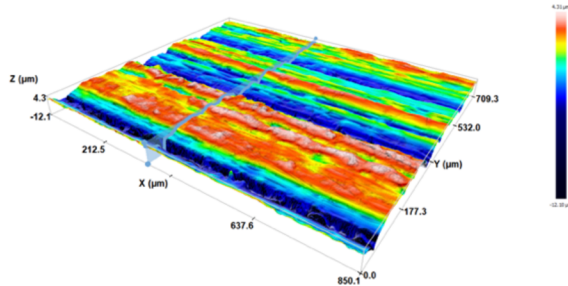
Drsnost povrchu skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem před tribologickým měřením



Drsnost povrchu skluznice s prekurzorem dusíku a parafinem po tribologickém měření



Drsnost povrchu skluznice s parafinem zažehleným plazmou před tribologickým měřením



Drsnost povrchu skluznice s parafinem zažehleným plazmou po tribologickém měření