



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**NANÁŠENÍ TENKÝCH KOVOVÝCH
POVLAKŮ NA POLYMERNÍ MATERIÁLY**

THIN METAL COATING OF POLYMER MATERIALS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Zatloukal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Nečas, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Filip Zatloukal**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Nečas, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Nanášení tenkých kovových povlaků na polymerní materiály

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Polymerní materiály jako plasty nebo pryže jsou součástí řady strojních uzlů. Z tribologického hlediska je studium těchto materiálů velmi obtížné, jelikož se vyznačují nízkou odrazivostí a nízkou elektrickou vodivostí. Za účelem aplikace zavedených optických metod, jako je například optická interferometrie, je proto nutné nanést na základní materiál tenkou odrazivou vrstvu, která umožní popis mazacích procesů v kontaktu. Je nutné zajistit, aby nanosená vrstva měla konstantní tloušťku, neovlivnila mechanické vlastnosti základního materiálu a vykazovala dostatečně silnou přilnavost k povrchu.

Typ práce: rešeršně syntetická

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je na základě kritické rešerše a studie proveditelnosti popsat možnosti nanášení tenkých kovových odrazivých vrstev na polymerní materiály. Pozornost bude věnována zejména parametrům povlaku a jeho přilnavosti k základnímu povrchu. Dílčí cíle bakalářské práce:

- provést kritickou rešerši aktuálních vědeckých studií zabývajících se povlakováním polymerních materiálů,
- zmapovat technologie umožňující nanášet tenké vrstvy povlaků,
- navrhnout vhodnou metodologii nanášení povlaků s cílem zajistit jejich dostatečnou přilnavost,
- realizovat studii proveditelnosti za použití PDMS vzorku.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukonceni/>

Seznam doporučené literatury:

SU, B., L. HUANG, W. HUANG a X. WANG. Observation on the deformation of dimpled surface in soft-EHL contacts. *Tribology International*. 2018, 119, 521-530.

PUTIGNANO, C. a D. DINI. Soft Matter Lubrication: Does Solid Viscoelasticity Matter? *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2017, 9, 42287-42295.

MYANT, C., M. FOWELL, H. A. SPIKES a J. R. STOKES. An Investigation of Lubricant Film Thickness in Sliding Compliant Contacts. *Tribology Transactions*. 2010, 53, 684-694.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Studium poddajných kontaktů z pohledu tribologických vlastností je velmi komplikované, jelikož materiály, jako jsou polymery či pryže, se vyznačují velmi nízkou odrazivostí a elektrickou vodivostí. Tyto vlastnosti významně omezují možnosti použití konvenčních metod, které se využívají ke studiu tvorby mazacího filmu a toku maziva. Aby bylo možné zavedené metody využít, je nutné na neodrazivý povrch nanést tenkou odrazivou vrstvu. V této práci je provedena kritická rešerše aktuálních vědeckých prací zabývajících se nanášením povlaků na polymerní materiály a na základě analýzy dostupných technologií je vybrána metoda, kterou je na polydimethylsiloxanový (PDMS) vzorek nanášena tenká odrazivá vrstva různých kovů. Následně je představena studie proveditelnosti, jejímž cílem bylo objasnit, jakým způsobem nanesení vrstvy ovlivní třecí vlastnosti PDMS. Tato práce může výrazně přispět v oblasti studia poddajných kontaktů a to zejména z pohledu objasnění mechanismů mazání.

KLÍČOVÁ SLOVA

Poddajné kontakty, Mazání, Tloušťka mazacího filmu, Povlakování, PDMS

ABSTRACT

The study of compliant contacts from a tribological standpoint is very complicated due to low reflectivity and electrical conductivity of materials such as polymers or rubber. These properties significantly limit the possibilities of using conventional methods which are being used to study the film formation and lubricant flow. To enable the use of the conventional methods it is necessary to apply a thin reflective layer on the non-reflective surface. This work evaluates the current literature dealing with the coating of polymeric materials. A method was chosen based on the analysis of the currently available technologies, which is used to apply a thin reflective layer on the polydimethylsiloxane sample. This part is followed by a feasibility study to clarify the effects of the coating on friction processes. This work can significantly contribute to the field of compliant contacts, especially in terms of clarifying the mechanisms of lubrication.

KEYWORDS

Soft contacts, Lubrication, Film thickness, Coatings, PDMS

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZATLOUKAL, Filip. *Nanášení tenkých kovových povlaků na polymerní materiály*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. David Nečas, Ph.D..

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych především poděkovat vedoucímu mé práce panu Ing. Davidu Nečasovi, Ph.D. za jeho užitečné rady, čas, vstřícnost a vedení, jak během experimentu, tak celou bakalářskou prací. Dále bych rád poděkoval svojí rodině, která mě podporovala během celého studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením pana Ing. Davida Nečase, Ph.D. a dále prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 26. června 2020

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	14
2.1	Analýza problému	14
2.1.1	Izoviskozní rigidní režim	14
2.1.2	Piezoviskozní rigidní režim	14
2.1.3	Piezoviskozní elastohydrodynamický režim	14
2.1.4	Izoviskozní elastohydrodynamický režim	15
2.2	Cíl práce	15
3	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
3.1	Poddajný kontakt	16
3.2	Polydimethylsiloxan	17
3.2.1	Mechanicko-chemické vlastnosti	17
3.2.2	Aplikace a využití	18
3.3	Metody měření tloušťky filmu	19
3.3.1	Optická interferometrie	19
3.3.2	Fluorescenční mikroskopie	22
3.3.3	Ramanova spektroskopie	24
3.3.4	Elektrický odpor	25
3.3.5	Elektrická kapacita	26
3.3.6	Ostatní metody	27
3.4	Povlakování	29
3.4.1	Ponoření do lázní z roztavených kovů	29
3.4.2	Plátování	30
3.4.3	Chemická depozice z plynné fáze (CVD)	30
3.4.4	Fyzikální depozice z plynné fáze (PVD)	31
3.4.5	Galvanické pokovování	31
3.4.6	Žárové stříkání	32
3.5	Povlakování polymerních materiálů	33
3.5.1	Bezelektrická depozice	33
3.5.2	Depozice iontovým paprskem	36
3.5.3	DLC povlaky	36

3.5.4	Magnetronové naprašování	40
3.5.5	DC naprašování	41
4	DISKUZE	42
4.1	Studie proveditelnosti	45
5	ZÁVĚR	51
6	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	52
7	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	59
8	SEZNAM TABULEK	61

1 ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá nalezením vhodné metody nanášení tenkých kovových povlaků na polymerní materiály. Polymerní materiály jako plasty nebo pryže se vyskytují nejen ve strojírenských uzlech, ale také v jiných zajímavých odvětvích. V biologických aplikacích to mohou být například protézy různých částí těla, kloubní náhrady nebo kontaktní čočky. Ve strojírenství se plasty používají jako těsnění (statická i dynamická), součásti automobilů, samonosné konstrukce, kluzná ložiska, ozubená kola, vačky, formy ve slévárenství, atd.

Zkoumat tyto materiály z tribologického hlediska je náročné, protože jsou specifické svým nízkým modulem pružnosti, slabou odrazivostí a nízkou elektrickou vodivostí. Pro použití známých metod jako jsou například optická interferometrie, fluorescenční mikroskopie nebo různé elektrické metody, je nutné nanést na polymerní podklad tenký odrazivý povlak. Tento povlak umožní získat lepší výsledky při použití výše zmíněných konvenčních metod. Díky těmto výsledkům budeme schopni porozumět, mechanismům formování mazacího filmu v poddajném kontaktu.

Při volbě metody nanášení povlaku bude kladen důraz na zajištění konstantní tloušťky nanesené vrstvy, dostatečně silnou přilnavost k povrchu a neovlivnění vlastností základního materiálu. Velmi důležitá je také jakost povrchu a drsnost, která může výrazně ovlivnit tloušťku mazacího filmu a tím i přesnost měření. Vhodnost zvolené metody pro nanášení povlaku bude ověřena pomocí studie proveditelnosti.

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2.1 Analýza problému

Při styku povrchů materiálů můžeme rozlišovat dva typy kontaktu - tuhý a poddajný. Pro zvýšení účinnosti, snížení opotřebení povrchů a minimalizaci tření mezi povrchy je často velmi výhodné oddělit povrchy tenkým mazacím filmem. V závislosti na kombinaci materiálů a maziva rozlišujeme v zásadě čtyři různé režimy mazání [1].

2.1.1 Izoviskozní rigidní režim

Mazací režim vzniká při kontaktu tuhých (nepoddajných) těles, kdy je elastická deformace zanedbatelná vzhledem k tloušťce filmu. V místě dotyku těles dochází ke vzniku kontaktního tlaku o velikosti 1–50 MPa. Tento tlak je příliš nízký, aby zvýšil viskozitu maziva nebo významně změnil geometrii kontaktu. Izoviskozní rigidní mazací režim je typický pro mazané části stoje s nízkým zatížením a vysokými rychlostmi [1],[2].

2.1.2 Piezoviskozní rigidní režim

U tohoto mazacího režimu je elastická deformace v kontaktu těles malá a zanedbatelná. Kontaktní tlak je dostatečně velký na to, aby zapříčinil změnu viskozity maziva. Pro mazání styku těles v tomto režimu je nutné používat kapalinu s viskozitou velmi citlivou na tlak. Tento mazací systém se vyskytuje v praktických aplikacích jen velmi zřídka. Jedním z příkladů jsou mírně zatížené válečky v kuželíkových ložiscích [1], [2].

2.1.3 Piezoviskozní elastohydrodynamický režim

Piezoviskozní elastohydrodynamický režim se vyskytuje u nekonformních kontaktů materiálů s vysokým modulem pružnosti (kovy, keramiky). V místě dotyku těles dochází k velmi vysokým kontaktním tlakům o velikosti 0,5–4 GPa. Tento tlak má za následek nezanedbatelnou elastickou deformaci kontaktních povrchů. Dále ovlivňuje viskozitu maziva a tloušťku filmu mezi povrchy těles. Tento režim mazání se vyskytuje například v případě kontaktu ozubených kol, kuličkových a válečkových ložisek [1], [2].

2.1.4 Izoviskozní elasto-hydrodynamický režim

Tento mazací režim vzniká při kontaktu těles s nízkým modulem pružnosti, jako jsou polymery, a proto je pro tuto bakalářskou práci stěžejní. Ve strojírenství existuje velké množství těchto mazaných poddajných kontaktů. V kontaktu dochází k významné elastické deformaci, která ovlivňuje tloušťku filmu mezi povrchy těles. Kontaktní tlak je nízký, aby zapříčinil změnu viskozity maziva. Mazací režim je charakteristický pro poddajný kontakt, který bude rozebrán níže [1], [2].

Studie poddajných kontaktů je velmi obtížná, jelikož se poddajné materiály jako jsou polymery vyznačují špatnou odrazivostí (znemožňuje využití optické interferometrie) a nízkou elektrickou vodivostí (znemožňuje využití elektrických metod) [20]. Z tohoto důvodu je nutné na základní polymerní materiál nanést tenkou kovovou vrstvu, která umožní použití experimentálních konvenčních metod. Tato tenká vrstva by neměla ovlivnit mechanické vlastnosti základního materiálu a drsnost. Dále musí mít povlak konstantní tloušťku po celém povrchu a musí dostatečně přilnout k základnímu materiálu.

2.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je provést kritickou rešerši v oblasti metod nanášení tenkých kovových vrstev. Dále zjistit možnosti použití těchto metod na polymerní materiály s primárním zaměřením na polydimethylsiloxan (PDMS). Tyto možnosti podložit vědeckými pracemi a zhodnotit parametry nanesených povlaků v těchto pracích s věnováním pozornosti na přilnavost k základnímu povrchu.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- provést kritickou rešerši aktuálních vědeckých studií zabývajících se povlakováním polymerních materiálů,
- zmapovat možné technologie nanášení tenkých kovových a odrazivých vrstev,
- z kritické rešerše navrhnout vhodnou metodu k nanášení povlaků s cílem zajistit dostatečnou přilnavost,
- zajistit nanášení povlaku na vzorek PDMS,
- provést studii proveditelnosti s cílem objasnit vliv nanesené vrstvy na třecí vlastnosti základního materiálu.

3 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3.1 Poddajný kontakt

Poddajný kontakt lze chápat jako kontaktní dvojici těles, kde je alespoň jedno těleso z materiálu s nízkým modulem pružnosti. Tyto kontakty jsou přítomny v mnoha praktických technických i biologických aplikacích, například u stěračů předních i zadních skel automobilu, automobilových pneumatik při kontaktu s vozovkou a kontaktních čoček. U těchto kontaktů převažuje izoviskózní elastohydrodynamický mazací režim (I-EHL). I-EHL je charakteristický tím, že kontaktní tlak je dostatečně velký, aby způsobil elastickou deformaci těles, což způsobuje změnu tloušťky tenkého filmu, který tyto tělesa odděluje. Naopak je tento tlak nízký a nedostatečný, aby způsobil jakoukoliv podstatnou změnu viskozity tekutiny [3, 4]. Studie chování poddajného kontaktu v reálném uspořádání např. kontaktní čočky s okem je velice složité. Abychom byli schopni dostatečně nasimulovat tento kontakt, tak se často využívá zjednodušených laboratorních konfigurací, jako je například kontakt kuličky a disku, kde rozlišujeme tyto tři následující konfigurace. Zprvé kulička je poddajná a disk tuhý, zadruhé kulička je tuhá a disk poddajný a zatřetí kulička i disk jsou z poddajného materiálu. Tyto konfigurace umožňují systematickou modifikaci vlastností třecích povrchů, aby bylo lehčí porozumět tomu, co řídí mazání v poddajných kontaktech. V klasické teorii elastohydrodynamického režimu mazání (EHL) pro malé deformace elastických těles mezi výše uvedenými konfiguracemi není žádný rozdíl. Avšak pokud je materiál viskoelastický nebo je charakterizován složitější reologií, tak je porušen druhý předpoklad klasické teorie EHL, tj. předpoklad dokonalé elasticity. Tudíž v našem případě při I-EHL je konfigurace důležitým faktorem. Przemyslaw Sadowski a Stanislaw Stupkiewicz tyto konfigurace zkoumají za použití nitrilového butadienového kaučuku (NBR) [5]. Více se však pro studii poddajného kontaktu využívá materiál nazývaný polydimethylsiloxan.

Studium poddajných kontaktů je problematické, jelikož jeho podstata limituje použití konvenčních metod, které analyzují utváření mazacího filmu ve styku dvou těles. Velmi významný omezující faktor je ten, že poddajné materiály jako jsou polymery se vyznačují špatnou odrazivostí a nízkou elektrickou vodivostí. Proto je nutné na tyto materiály nanést tenký odrazivý povrch, který bude mít konstantní tloušťku, dobrou přilnavost a odolnost proti opotřebení. Formování mazacího filmu je z tribologických vlastností poddajného kontaktu velmi podstatná informace [6]. Následující kapitola bude věnována materiálu polydimethylsiloxanu, jelikož se tento materiál často využívá k modelování poddajného kontaktu. Dále budou přestaveny experimentální metody pro studium mazacího filmu, obecné metody využívané k povlakování materiálů a metody povlakování polymerních materiálů.

3.2 Polydimethylsiloxan

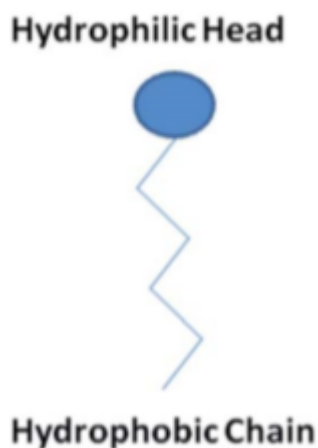
PDMS se řadí do skupiny polymerních organokřemičitých sloučenin a běžně se označuje jako silikon. PDMS je nejvíce používaný organický polymer na bázi křemíku [7]. Je biokompatibilní, průhledný, nehořlavý, nezpůsobuje buněčnou toxicitu, propustný pro plyny a nepropustný pro vodu. Vyznačuje se velmi zvláštními reologickými vlastnostmi. Chemická struktura je založena na hlavním řetězci siloxanu (Si–O–Si) s methylovými skupinami (–CH₃) fixovaný vazbou Si–C. Celý chemický vzorec vypadá následovně $\text{CH}_3[\text{Si}(\text{CH}_3)_2\text{O}]_n\text{Si}(\text{CH}_3)_3$, kde n je počet monomerních jednotek, které se opakují [8]. Jeho hlavní nevýhody jsou špatná chemická kompatibilita, nízká tvrdost a nízký Youngův modul pružnosti. Polysiloxany vykazují velmi vysokou citlivost na ionizující záření, které způsobuje chemické změny a zhoršení fyzikálních vlastností. Pokud vystavíme PDMS záření těžkých iontů (např. C, N), tak způsobí degradaci methylových skupin, tvorbu hydroxylových skupin (COH) a štěpení hlavního řetězce. Když bude PDMS ozářeno lehkými ionty (např. H, He), způsobí to oddělení vedlejších skupin methyly a tvorbu anorganických skupin podobných oxidu křemičitému. V tomto případě materiál zesklouvatí a dojde ke zvýšení modulu pružnosti a také jeho tvrdosti. Zkoumání vlastností a mikrostruktury PDMS při ozařování je popsáno [9].

3.2.1 Mechanicko-chemické vlastnosti

PDMS je materiál, který se při dlouhých dobách toku nebo při vysokých teplotách chová jako viskózní kapalina podobná medu. Při krátkých dobách toku nebo nízkých teplotách působí jako elasticky pevná látka podobná pryži. Tato vlastnost se nazývá viskoelasticita, což je forma nelineární elasticity vyskytující se u nekystalických polymerů [10]. Viskoelastické vlastnosti lze měřit pomocí dynamické mechanické analýzy. Mechanické vlastnosti umožňují PDMS přizpůsobit se rozmanitému množství povrchu. Jelikož jsou tyto vlastnosti ovlivněny řadou faktorů, lze si tento polymer upravit podle potřeby. Díky tomu je PDMS potenciální kandidát na aplikaci v mikrofluidních a mikroelektromechanických systémech [11]. Z pohledu chemické kompatibility je PDMS hydrofobní, což znamená, že neinteraguje s vodou a netvoří s ní vodíkové můstky nebo jen velmi málo [12]. Ovšem je k dispozici několik způsobů, jak jej učinit hydrofilnějším, tudíž jsme schopni ho navlhčit vodou, ale tyto úpravy mají pouze dočasný účinek. Vliv hydrofobie na tření a utváření mazacího filmu je uvedeno [13].

3.2.2 Aplikace a využití

PDMS je povrchově aktivní látka [14], což jsou sloučeniny, které snižují povrchové napětí mezi dvěma povrchy (tekutinami, plynem a tekutinou, tekutinou a pevnou látkou). Povrchově aktivní látka (Obr. 3-1) se skládá z hydrofobní části, která se nazývá ocas a hydrofilní části, nazývajících se hlava. S povrchově aktivní látkou přicházíme do styku každý den. Například při umývání nádobí používáme saponát působící jako povrchově aktivní látka, která umožní odstranění mastnoty z povrchu.



Obr. 3-1 Povrchově aktivní látka, převzato a upraveno z [15]

Využití PDMS nalezneme také v odpěňovačích nebo se používá jako odpěňovací činidlo [14]. Úkolem odpěňovačů je eliminovat existující pěnu při výrobě průmyslových kapalin a odpěňovací činidlo zabraňuje tvorbě další pěny. Další využití zaujímá jako razící pryskyřice v postupu měkké litografie. Tento proces spočívá ve vytvoření elastického „razítka“, které dokáže přenést částice o velikosti několika nanometrů na různé povrchy. Dále se s materiálem PDMS můžeme setkat v lékařství a kosmetice [16][17], elastomerní skořápka prsních implantátů je vyrobena z PDMS [18], vyskytuje se v hydraulické kapalině pro diferenciály a spojky atd.

3.3 Metody měření tloušťky filmu

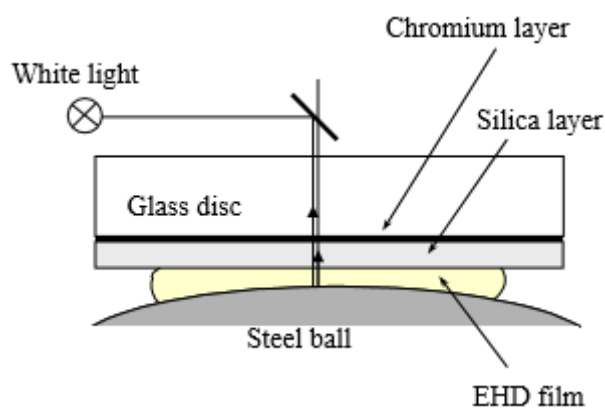
Techniky pro měření tloušťky mazacího filmu a jejich vývoj v oblasti EHL jsou dlouhodobě důležitým tématem. Jsou navrhovány metody založené na různých fyzikálních jevech, kde se berou v potaz různé vlastnosti kapalin. V počátku byl výzkum v podstatě numerický, ale v důsledku experimentálního ověření se tato oblast významně vyvinula. V dnešní době pomocí výkonných výpočetních zdrojů a vývojem konkrétních numerických modelů byl umožněn výpočet tloušťky, tlaku, teploty a smykového napětí na jakémkoliv místě ve filmu. Proto bylo nutné srovnávání a validování výpočtu s experimenty. Pro detekci přítomnosti, tloušťky, tlaku a teploty filmu bylo navrženo mnoho experimentálních metod. Můžeme si je rozdělit do tří skupin [19], [20]:

- Optické metody (interferometrie a fluorescenční mikroskopie).
- Elektrické metody (změna elektrického odporu a elektrické kapacity).
- Ostatní (akustické a nukleonické)

3.3.1 Optická interferometrie

Optická interferometrie se řadí mezi nejpřesnější a nejpoužívanější metody pro měření tloušťky mazacího filmu v oblasti EHL mazání. Hlavní nevýhody této metody jsou nutnost použití odrazivého povrchu jednoho z těles a omezený měřicí rozsah. Optická interferometrie byla vyvinuta v roce 1962, ale v pozdějších letech se dočkala mnoha vylepšení, které umožnily zvětšení rozsahu měření, přesnosti a také rozlišení [19].

Optická interferometrie je metoda, využívající interferenci světla. Simulátor pro měření, tzv. laboratorní tribometr, který je znázorněn na Obr. 3-2, se skládá z rotujícího skleněného disku a rotující ocelové kuličky. Každý element je poháněn svým nezávislým motorem a otáčky jsou řízeny počítačem. Disk je potažený polopropustnou chromovou vrstvou na straně, kde dochází ke kontaktu s kuličkou, která je napůl ponořena do maziva [1]. Při osvětlení tohoto kontaktu se část paprsku odrazí od chromové vrstvy a druhá část od lesklé kuličky, dojde ke změně intenzity a vlnové délky světla, jelikož paprsek odražený od kuličky urazí delší vzdálenost. Poté se každému odstínu barvy přiřadí tloušťka filmu pomocí kalibrace [3]. Množství odraženého světla ovlivňuje vlnová délka světla a úhel, při kterém světlo dosáhne rozhraní těchto dvou materiálů [21]. Světlo do kontaktu svítí skrze skleněný disk a odražené světlo je vedeno do spektrometru, pro určení vlnové délky a tím i tloušťky filmu v jednom místě kontaktu. Jinou možností je, že se světlo zachytí přímo a interferenční barvy světla se porovnávají pro získání map tloušťky filmu [1]. Velmi přesné měření a určování extrémně tenkých filmů nám umožňuje interference mezi světelnými vlnami [20].

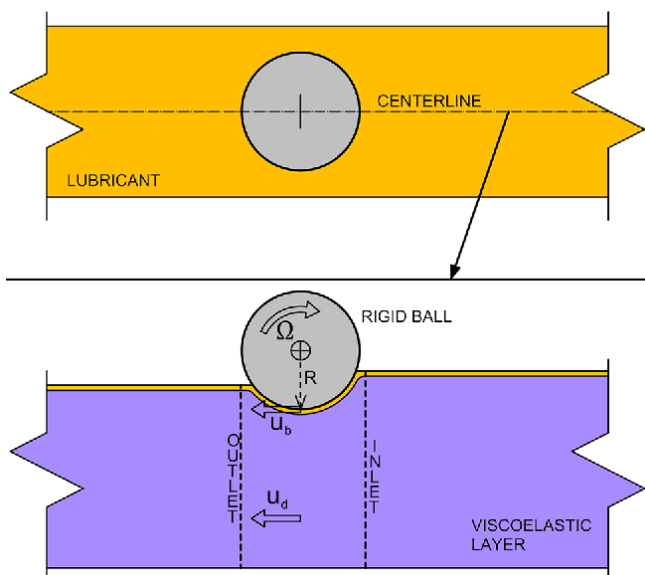


Obr. 3-2 Schéma optické metody interferometrie, převzato a upraveno z [22]

Myant a kol. [23] použili optickou interferometrii k měření tloušťky mazacího filmu za podmínek nízkého zatížení a nízkého tlaku mezi vysoce deformovatelnými povrchy. Jelikož se jedná o I-EHL kontakt, tak předpokládají, že tloušťka maziva závisí spíše na elastických vlastnostech těles, u kterých dochází ke kontaktu, než na reologii maziva. Měřený kontakt byl vytvořen mezi ocelovou koulí potaženou PDMS vrstvou a diskem z obyčejného skla. Na osvětlení kontaktu bylo využito monochromatické světlo o vlnové délce $\lambda = 625\text{--}635\text{ nm}$ a pomocí kamery s intenzivním zobrazením byl detekován interferenční obraz kontaktu přes skleněný disk. Autoři uvedli, že přesnost měření na interferometru záviselo na třech podmínkách odrazivých povrchů. Povrchy disku i PDMS musí být opticky hladké, rozdíl mezi počáteční odchylkou od dokonalé geometrie těles a deformace způsobená tlakem musí být malá a odrazivost skla by měla být srovnatelná s odrazivostí PDMS. V této studii byly získány nové rovnice pro I-EHL kontakt, které vykazovali mírnou odchylku od rovnic dostupných v literatuře [24]. Dále bylo popsáno rozložení tlaků a filmových profilů. Byl nadhozen výzkum za použití pevné PDMS koule bez ocelového podkladu, pro potvrzení výsledků z jejich studie o vlastnostech I-EHL kontaktů.

Ve studii od autorů Marx, Guegan a Spikes [1] byl popsán vývoj techniky konvenční optické interferometrie pro měření tloušťky filmu u I-EHL kontaktů a její použití při zkoumání platnosti existujících rovnic určujících tloušťku filmu v těchto kontaktech. Pro vytvoření kontaktu byly použity dva polymerové disky potažené reflexním chromovým povlakem o tloušťce 20-30 nm a ocelová kulička nesená na válcích, která je zatížena proti spodní straně disku. Pomocí chromových povlaků bylo možné získat vysoce kvalitní interferogramy a díky nim získat tloušťku filmu. Tyto hodnoty filmu byly porovnány s existujícími rovnicemi I-EHL získaných z počítačového modelování a následně byly navrženy rovnice pro minimální tloušťku. Ve studii byl poprvé experimentálně pozorován přechod tloušťky filmu z kontaktu do postranních laloků, jak bylo předpovězeno. Schopnost mapovat tloušťky filmu v I-EHL kontaktu může poskytnout nové významné příležitosti ve výzkumu mazání, jako například studie podmínek vysoké smykové rychlosti přítomné v těchto kontaktech a zkoumání dopadu struktury povrchu.

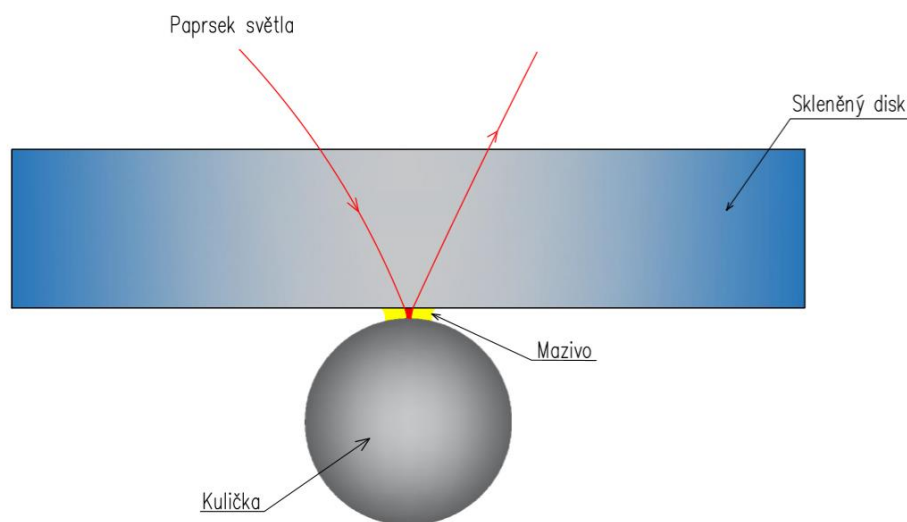
V práci od Putignana a Diniho [25] byla navržena nová modelovací soustava za pomoci měření interferometrickou metodou. Autoři se zaměřili na účinek viskoelastivity na mazání a rozložení tlaku v kontaktu, především při vstupu a výstupu kapaliny. Na Obr. 3-3 je zobrazen kontakt, který byl využit při tomto experimentu. Pomocí numerické metodologie byly osvětleny zvláštnosti lineárně viskoelastických materiálů, při lubrikovaném kontaktu a také bylo vysvětleno ne-Hertzovské rozdělení tlaku s ohledem na skutečnou reologii pevných látek. Dále bylo prokázáno, že při řešení mazání I-EHL kontaktů je potřeba pečlivě zohlednit roli viskoelastivity a také že při vstupu mazacího filmu do kontaktu je tlak maximální.



Obr. 3-3 Schéma kontaktu, převzato a upraveno z [25]

3.3.2 Fluorescenční mikroskopie

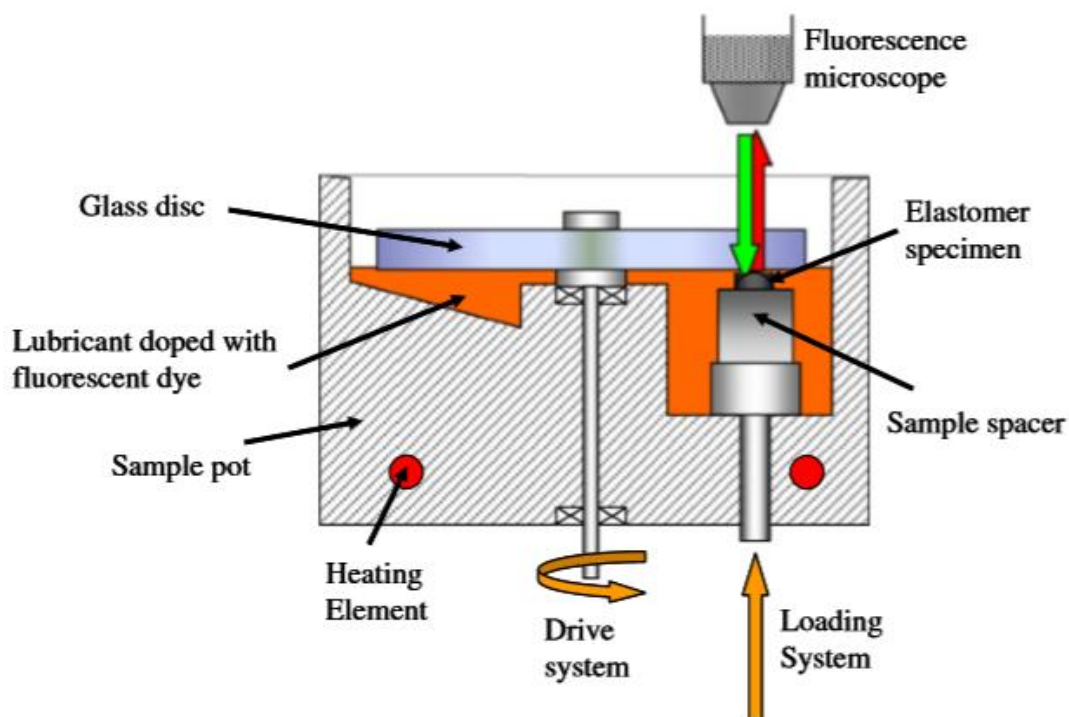
Princip fluorescenční mikroskopie (Obr. 3-4) je založen na získávání informací z intenzity emise, kterou vyzáří barvivo. Barvivo je látka, která absorbuje dopadající fotony a vyzáří (emituje) fotony o vyšší vlnové délce. Vyzářený svazek je snímán a oddělen pomocí soustavy optických filtrů [26]. Pomocí počtu fluorescenčních molekul se stanoví intenzita záření (emitace) a vytvoří se kalibrační křivka, která se vztahuje k tloušťce filmu. Pro ozáření se používají rtuťové výbojky a laserové paprsky. Možná nevýhoda této metody spočívá ve snížení přesnosti měření při vyšší koncentraci barviva, které může ovlivnit vlastnost transportu kapaliny do kontaktu [20].



Obr. 3-4 Schéma metody fluorescenční mikroskopie

Předmětem práce Reddyhoffa a kol. [27] bylo pozorování toku maziva a tvorba filmu v EHL kontaktech. Znalost o utváření filmu a tečení maziva by byla prospěšná při určování součinitele tření mezi povrchy. Tribologický kontakt v této studii byl vytvořen mezi ocelovou koulí a skleněným diskem a sledován pomocí fluorescenčního mikroskopu. Vnášené mazivo do kontaktu bylo barveno fluorescenčním barvivem a osvětleno laserem. Při úplném zaplavení kontaktu barvivem intenzita fluorescence dobře korelovala s měřením při použití optické interferometrie, což naznačilo užití fluorescence pro mapování tloušťky filmu u kontaktů, kde jsou optické metody nepraktické, například u poddajných kontaktů. Aby bylo možné sledovat tok maziva, bylo přidáváno do dráhy kontaktu fluorescenční barvivo obsaženo v lubrikantu. Poté byla hranice mezi fluorescenčním a nefluorescenčním lubrikantem stržena do kontaktu a sledována při průchodu přes kontakt. Jelikož se technika nacházela teprve ve vývoji, tak autoři uvádí, že kvůli smíchání obarvených a neobarvených částí maziva před vstupem do kontaktu nejsou výsledky zcela přesvědčivé, avšak ukázali možnost aplikace fluorescenční metody v širokém měřítku.

Laserem indukovanou fluorescenční techniku (LIF) použili Myant, Reddyhoff a Spikes [28], pro měření tloušťky filmu v kontaktu mezi opticky hladkým PDMS hemisférickým vzorkem a skleněným diskem bez povlaku (Obr. 3-5). Koule je statická a otáčející se disk vnáší kapalinu do kontaktu. Pro zajištění přivedení maziva je spodní povrch disku do něj ponořený. Byly využity tři druhy maziva, čistý glycerol, glycerol s vodou v poměru 1:1 a čistá voda, vše s příměsí fluorescenčního barviva. Kontakt osvětlili laserovým světlem o vlnové délce $\lambda = 532$ nm a přes skleněný disk byl tento kontakt sledován pomocí fluorescenčního mikroskopu. V první sadě experimentů zkoumají maziva a schopnost měřit tloušťku filmu pomocí LIF při plně zaplaveném kontaktu. V druhé sadě experimentů nanесли na spodní stranu disku malé množství lubrikantu místo ponoření, kvůli sledování hladovění (menší množství maziva) kontaktu a také zvýšili rychlost strhávání. Naměřené hodnoty tloušťky filmů v této studii se pohybují v rozmezí 200 nm až 25 μm . Pro tekutiny s nízkou viskozitou bylo zjištěno, že tloušťka filmu byla nižší, než u kapalin s vysokou viskozitou. Tato odchylka v tloušťce filmu je připisována poklesu viskozity maziva v důsledku kombinace tepelných účinků laseru a schopnosti glycerolu pohlcovat okolní vlhkost. Autoři poukazují na možnost snížení tloušťky filmu pomocí pečlivého výběru barviva a použití dvoubarevné laserem indukované fluorescence, která by měla umožnit vysoce kvalitní zobrazování.



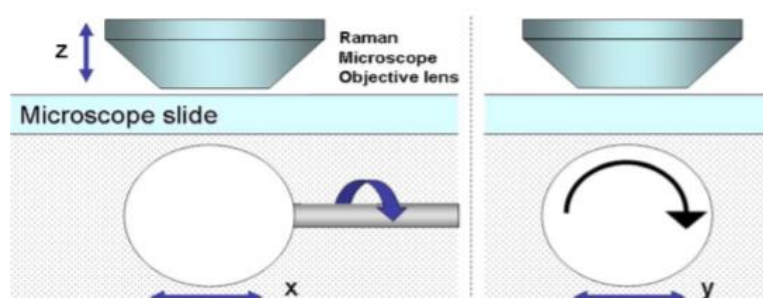
Obr. 3-5 Schéma kontaktu mezi vzorkem a diskem, převzato a upraveno z [28]

3.3.3 Ramanova spektroskopie

V této metodě se využívá Ramanova rozptylu. Po osvětlení vzorku monochromatickým světlem dochází k různým procesům. Celé světlo je odraženo nebo přenášeno, aniž by proběhla interakce s hmotou, ale malá část absorbovaného světla je bez jakékoliv změny frekvence emitována zpět ve všech směrech. Tento proces se nazývá Rayleighův rozptyl a je označován, jako elastický rozptyl světla. Ještě slabší část světla se rozptýlí se změnou energie, kdy tato změna je způsobena excitací vibrační energie uvnitř vzorku. Tato část světla je nepružná a nazývá se Ramanův rozptyl. Zmíněné energetické změny mohou být pozitivní Stokesův rozptyl, anebo negativní anti-Stokesův rozptyl. Tyto Stokesovy rozptylové vrcholy jsou umístěny symetricky kolem vrcholu Rayleighova rozptylu. Symetrie je způsobena přechodem mezi vibračním stavem energie. Intenzity Stokesova rozptylu a anti-Stokesova rozptylu jsou odlišné, protože záleží na energetických stavech molekul před excitací.

Jelikož Ramanovo spektrum přímo souvisí s vibrační energií vzorku, tak je charakteristické pro zkoumaný materiál. Dokáže poskytnout informace o chemické struktuře a vazbách. Některé vlivy fyzikálních parametrů se mohou rozšířit na molekulární měřítko hmoty, což nám umožní použít Ramanovu spektrometrii k jejich měření např. měření tloušťky filmu, tlaku a teploty [19].

Bongaerts a kol. [29] využili Ramanovu spektrometrii pro měření tloušťky filmu, tření a optické zobrazení kontaktu. Tribologický kontakt byl vytvořen z rotující PDMS koule, která je tlačena na průhledné hydrofobní a hydrofilní křemenné sklíčko, přes které byl kontakt pozorován (Obr. 3-6). Jako mazivo byla použita voda, glycerol a kukuřičný sirup. Minimální povrchovou rychlost, kterou se koule otáčela byla 2 mm/s, jelikož použitelná maximální rychlost je 4000 mm/s, tak nejvyšší rychlost, která byla při měření použita je 2000 mm/s, protože při větších rychlostech docházelo k odskoku kontaktu. Podařilo se získat údaje o tření v celém rozsahu rychlostí a zjistilo se, že tloušťka filmu byla menší než předpokládaná tloušťka z numerických výpočtů, což může být způsobeno hladověním kontaktu. V závěrečné části autoři poukázali na důsledek změny složení emulze na lubrikační vlastnosti kontaktu a vybízí k nahrazení PDMS koule jinými materiály, pro pochopení mazacích vlastností v I-EHL kontaktech.



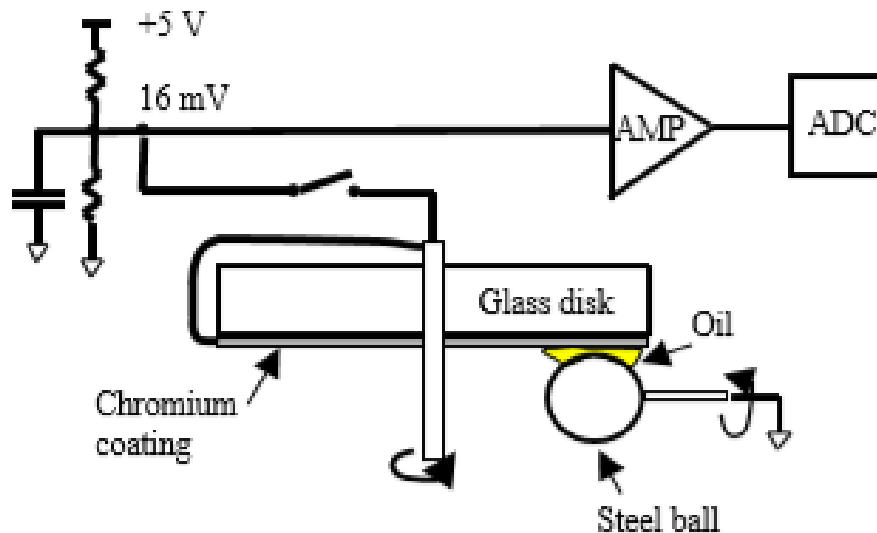
Obr. 3-6 Schéma metody Ramanovy spektroskopie, převzato a upraveno z [29]

3.3.4 Elektrický odpor

Metoda je založena na přímé závislosti elektrického odporu s tloušťkou filmu, který se nachází mezi třecími plochami. Pokud při měření filmu dojde k dotyku třecích kovových ploch, tak je odpor roven nule. Naopak velké hodnoty odporu se očekávají při úplném oddělení těchto ploch mazivem, což naznačuje přítomnost filmu. Nevýhodou metody je ztížená kalibrace elektrického odporu v kontaktu s tloušťkou filmu, kvůli kolísání elektrického odporu, které je zapříčiněné změnou vodivosti používaných maziv [19].

Mezi první, kdo využil tuto metodu, se řadí Courtney-Pratt a Tudor [30], kteří v roce 1946 studovali tvorbu filmu mezi pístním kroužkem a stěnou válce spalovacího motoru během provozních podmínek. V roce 1952 je následovali Lane a Hughes [31] a zabývali se mazáním ozubených kol v dotyku zubů. Ve studii bylo zjištěno, že tloušťka filmu po povrchu zubu není rovnoměrná a závisí na rychlosti odvalování zubů, přičemž tloušťka filmu byla nejtenčí při nejvyšších rychlostech. Po zvýšení zátěže se snižovala tloušťka mazacího filmu a při nižším zatížení byla tloušťka poměrně silná. Autoři uvádí, že přiřazení hodnot elektrického odporu k tloušťce filmu nebylo možné, avšak získané hodnoty naznačili velmi tenký film nebo porušení filmu při nejvyšších rychlostech odvalování.

Popsáním tvorby filmu pomocí měření elektrického odporu se zabývali Guangteng, Olver a Spikes [32]. Byl použit skleněný disk potažený tenkou vrstvou chromu (Obr. 3-7). Vrstva byla dostatečně tlustá, aby vedla elektrický proud, ale naopak dostatečně tenká, aby neovlivnila kontaktní napětí a tím i tloušťku filmu. Kontakt byl vytvořen pomocí rotující ocelové koule, která je tlačena proti spodní straně skleněného disku a oddělena vrstvou mazacího oleje. Na obvod vrstvy chromu bylo přivedeno napětí, ocelová koule byla uzemněna a pomocí mikropočítače byl přes tento kontakt měřen elektrický odpor. Za užití optické interferometrie byla sledovaná tvorba filmu, při kontaktu ocelové koule se skleněným diskem potaženým semi-reflexní vrstvou chrómu. A následně byly hodnoty elektrického odporu z předešlého experimentu porovnávány s naměřenou tloušťkou filmu, za účelem přímého přiřazení hodnot elektrického odporu k tloušťce filmu. Tato práce byla předběžná a zaměřena pouze na jednu zkušební tekutinu, při použití tří drsností kuliček. Autoři poukazují, že metoda by mohla být zdokonalena a má příslib při dalším chápání tvorby filmu v různých kontaktech.



Obr. 3-7 Schéma metody elektrického odporu, převzato a upraveno z [32]

3.3.5 Elektrická kapacita

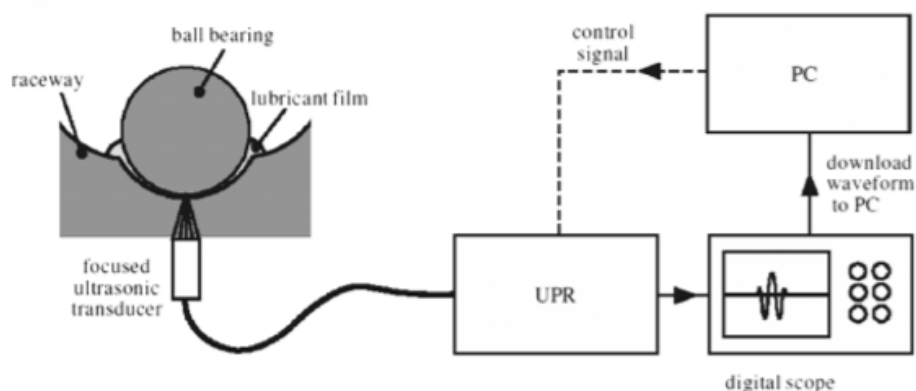
Při připojení kovových desek namířených proti sobě k elektrickému proudu se mezi deskami vytvoří kapacita, jejíž velikost bude závislá na ploše jednotlivých desek, vzdálenosti desek a dielektrické kapalině, která tyto desky odděluje. Jelikož kapacita přímo souvisí se vzdáleností povrchů desek, lze ji využít k měření tloušťky filmu, který se nachází mezi nimi. S měnící se tloušťkou kapalného filmu se bude měnit i kapacita. Přesnost metody záleží na dielektrických vlastnostech maziva a jejich ovlivnění teplotou nebo tlakem [19],[20].

Metodu elektrické kapacity pro měření tloušťky v trubici s malým průměrem využili Ziqiang a kol. [33]. Yongxin a kol. [34] ve své studii navrhli kapacitní senzor s dielektrickým povlakem, aby kapalina neovlivnila přesnost měření. Při experimentu byla měřena tloušťka tekoucí vody mezi kovovým povrchem a senzorem navrženým v této práci.

3.3.6 Ostatní metody

Akustická metoda

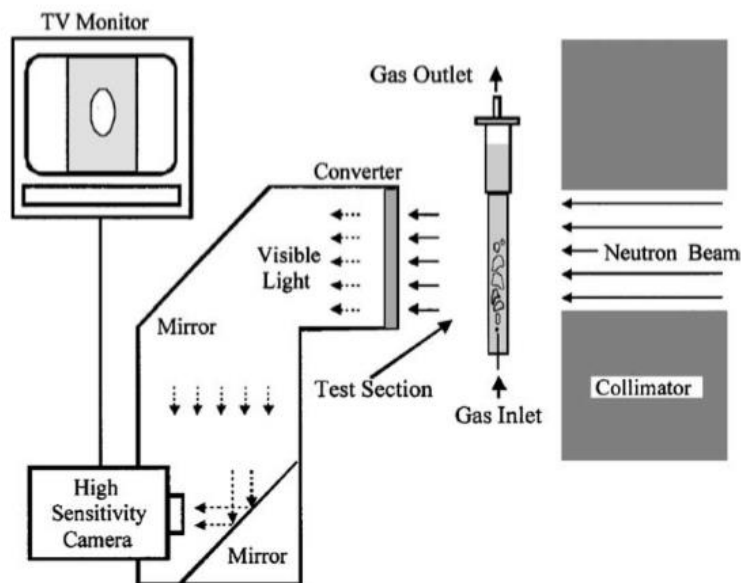
První zmínky o této metodě jsou počátkem roku 2000. Využívá dvou hlavních výhod a to, že je neinvazivní a nevyžaduje průhledný materiál, proto může být použita na skutečné součásti stroje. Schéma akustické metody je zobrazeno na Obr. 3-8. Ultrazvukový pulzní přijímač vygeneruje vysokonapěťový impuls, piezoelektrický měnič je tímto impulzem buzený a vydává širokopásmový impuls ultrazvukové energie. Tento impuls je přijímán poté co se odrazí od vrstvy maziva a převeden na hodnotu tloušťky filmu za užití výpočetních metod [19].



Obr. 3-8 Schéma akustické metody, převzato a upraveno z [19]

Nukleonická metoda

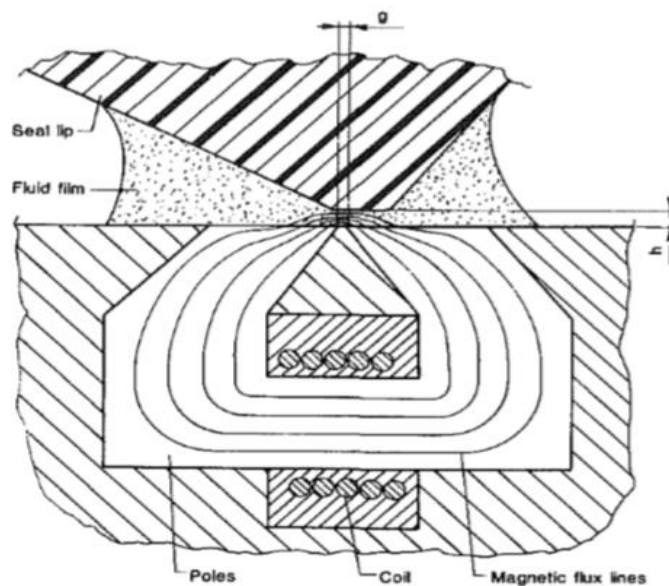
Metoda je založena na útlumu záření při průchodu mazivem. Jelikož je útlum v kapalinách a pevných látkách větší než u plynů, tak je stupeň ztráty intenzity záření při průchodem maziva prostředkem k určení struktury filmu, který paprskem protíná. V metodě se využívá stíněný zdroj záření, který má jeden otvor vybavený reflexním zaměřovačem za účelem vytvoření paprsku záření. Za testovacím úsekem je deska (tzv. převodník), která vyzařuje záblesky světla při nárazu záření a pomocí fotosenzorů se zachytí rozložení světla na této desce [20]. Obr. 3-9 zobrazuje schéma nukleonické metody při použití neutronového paprsku, které využili Saito a kol. [35].



Obr. 3-9 Schéma nukleonické metody, převzato a upraveno z [35]

Magnetická metoda

Metodu měření pomocí magnetické metody použili Poll a Gabelli [36]. Rozptýlili částice magnetitu o průměrné velikosti 10 nm v kapalině. Bylo uvedeno, že velikost částic je dostatečně malá, aby nerušili tvorbu filmu nebo bylo způsobeno opotřebení. Magnetický obvod byl vytvořen tak (Obr. 3-10), aby byl magnetický tok veden magnetickou tekutinou obsaženou v kontaktu. Pomocí vysoké propustnosti magnetitu by mohla být indukčnost a impedance cívky, která poskytuje magnetický potenciál kalibrována pro zjištění množství tekutiny v kontaktu a tím určení hodnoty tloušťky filmu. Technika má bohužel řadu nevýhod, tou největší je nutnost použití magnetické kapaliny.



Obr. 3-10 Schéma magnetické metody, převzato a upraveno z [36]

3.4 Povlakování

Navzdory tomu, že materiály (kovy, slitiny, super slitiny) mají dobré vlastnosti, tak nemohou splnit všechny požadavky, při různorodých provozních namáháních. Také v souvislosti se zhoršováním vlastností povrchů za provozu při různých okolních podmínkách bylo logické vyvinout metody ochrany povrchů nebo způsoby, jak zlepšit jejich vlastnosti. Právě za účelem zlepšení povrchových vlastností materiálů se na tyto materiály začaly nanášet různé druhy povlaků s cílem zajistit lepší vlastnosti, které základní materiál nemá nebo mít nemůže. Povlaky mohou být vyrobeny z jakéhokoliv materiálu, avšak rozhodují jeho vlastnosti a přilnavost k základnímu materiálu. Za povlak se rozumí každá vrstva, která se nanese nebo vznikne na povrchu základního materiálu. Využití povlaků není jen pro zlepšení povrchových vlastností, ale používají se také jako ochrana materiálu proti působení vnějšího prostředí jako je například oxidace a koroze. Ve strojírenství se povlaky využívají především pro snížení tření, opotřebení a zvýšení životnosti nástrojů.

Charakteristická vlastnost povlaku je jeho tloušťka, podle které si můžeme povlaky rozdělit do dvou skupin:

- Tenké povlaky v řádech mikrometrů.
- Tlusté povlaky, kde tloušťka je udávána v desetínách milimetrů.

Důležitější je rozdělení na homogenní a heterogenní nebo jednovrstvé a dvou-či vícevrstvé. Homogenní povlaky jsou vytvořeny z jedné látky a heterogenní jsou tvořeny ze dvou nebo více fází o různých vlastnostech a různém složení. Další dělení povlaků je podle účelu použití (proti korozi, odolnost proti opotřebení) a různých vlastností (fyzikálních, elektrických, magnetických, s malý či velkým součinitelem tření atd.) [37].

3.4.1 Ponoření do lázní z roztavených kovů

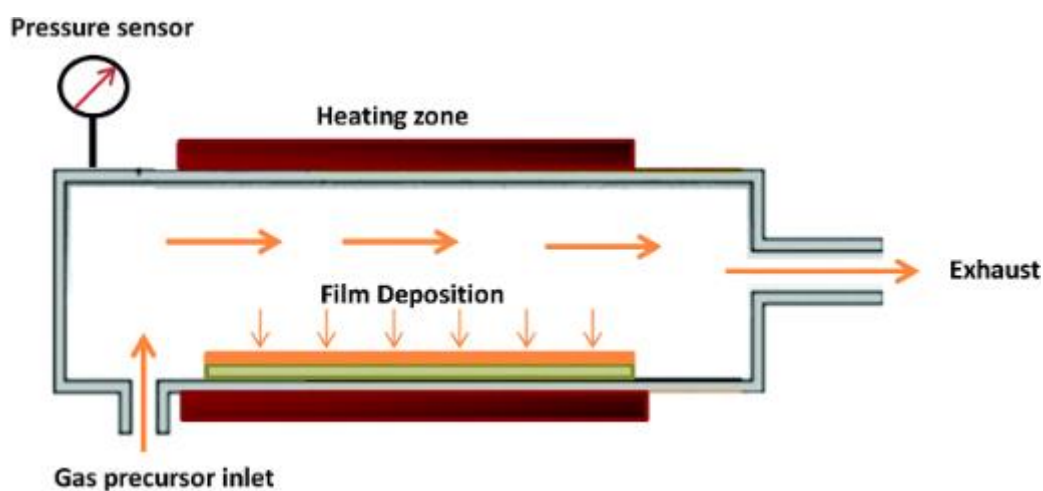
Součást, která má očištěný povrch mořením, leštěním nebo jiným způsobem se ponoří do lázně z roztaveného kovu, který chceme na povrch nanést. Po ohřátí a omočení povrchu se součást z lázně vytáhne a ochladí. Podmínkou vzniku povlaku je, že lázeň musí mít takové vlastnosti, aby zapříčinila vznik difuze v místě styku součásti s lázní. Rozhodující parametry vzniku povlaku jsou teplota, viskozita lázně, doba ponoru a podmínky krystalizace. Výhoda metody je možnost vytvářet povlaky na různorodých tvarech součástí o libovolných velikostech [37]. Povlaky jsou výhradně využívány, jako prostředek proti korozi, ale také kvůli trvanlivosti a univerzálnosti. Povlaky se nanášejí na široké spektrum součástí od šroubů po mosty, přes sochy, zábradlí, nosné konstrukce, stožáry, nosníky atd. [38].

3.4.2 Plátování

Plátování patří mezi klasické hutní metody. Vytvářejí se zpravidla kovové povlaky běžnou technologickou operací, např. válcováním. Na součást, na kterou chceme povlak nanést, se položí nanášený materiál o požadované tloušťce a po ohřevu se tvářením za tepla nebo za studena oba materiály zpracují na požadovaný rozměr. Technologie se využívá u ocelí v kombinaci s nerezavějícími oceli i neželeznými kovy. Při plátování dutých i plochých těles se využívá výbuchu, kde tlaková vlna přitiskne nanášený materiál na očištěný povrch tělesa. Ke spojení pomáhá i spolupůsobící plastická deformace nanášeného materiálu [37]. Metoda plátování se využívá při výrobě plechů, ložiskových pánví, trubkovnic do výměníků tepla, vystělkování přírub nebo opláštění hřídelí [39].

3.4.3 Chemická depozice z plynné fáze (CVD)

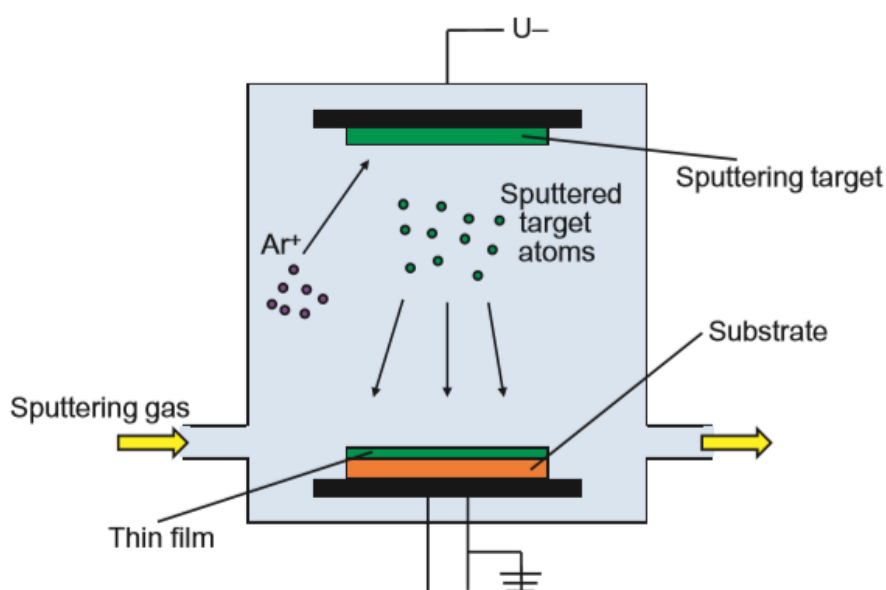
CVD je metoda pro výrobu povlaků pomocí tepelně iniciovaných chemických reakcí. Nanášený materiál je dodáván do povlakovací komory prostřednictvím par, které se buď rozkládají nebo reagují s dalšími parami a vytvářejí povlak na základním materiálu (Obr. 3-11). Do reakční zóny jsou páry průběžně přiváděny a vedlejší produkty se odvádějí pryč. Proces lze provést ve vakuu nebo za atmosférického tlaku. Pomocí této metody jsme schopni nanést velmi tenké povlaky na kovech i na nekovových materiálech. Depoziční teploty se pohybují v rozmezí 720–1050 °C. Nanést povlak pomocí CVD můžeme na nástrojové oceli, keramiku, grafit, slitiny niklu a karbidy wolframu [40].



Obr. 3-11 Schéma metody CVD, převzato a upraveno z [41]

3.4.4 Fyzikální depozice z plynné fáze (PVD)

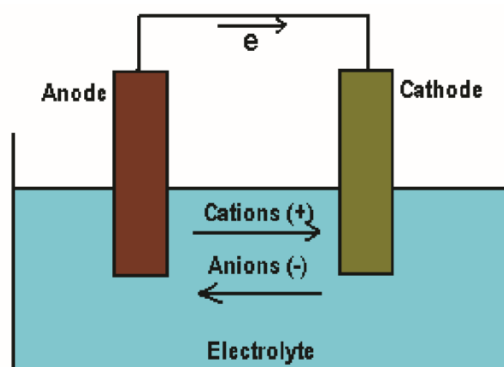
Povlakovací materiál se v reakční nádobě při vysokém vakuu převede do plynné fáze za pomoci elektronového děla, nízkonapěťového oblouku nebo bombardováním urychlenými ionty inertního plynu. Povlaky se vytváří pomocí reaktivní depozice, při které se složky potřebné pro vytvoření sloučeniny dávkuje v přesném poměru a sloučenina vznikne během transportu částice z odpařovače k základnímu materiálu (Obr. 3-12). Pro lepší přilnavost povlaku pomáhají urychlované ionty ochranného plynu dopadající na základní povrch. Nanesení povlaku je možné pod 500 °C, tudíž nedochází ke strukturálním změnám základního materiálu. Pomocí metody PVD se dají nanést velmi tenké povlaky s vynikajícími fyzikálními i chemickými vlastnosti, např. nízké tření, vysoká tvrdost, odolnost vůči otěru a vysokým teplotám [42].



Obr. 3-12 Schéma metody PVD, převzato a upraveno z [43]

3.4.5 Galvanické pokovování

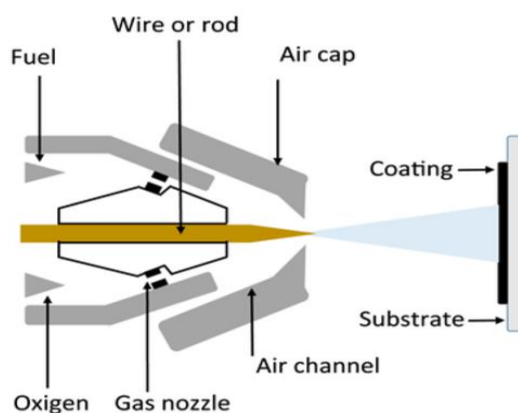
Galvanické pokovování je proces, kde se ionty kovu pohybují v roztoku, kterým prochází elektrické pole, tak aby vytvořili povlak na elektrodě. Využívá se stejnosměrného proudu, kdy je základní materiál připojen jako katoda (-) a materiál, který chceme nanést, jako anoda (+) (Obr 3-13). Obě elektrody jsou ponořeny do elektrolytu s obsahem solí nebo iontů umožňující průchod elektrického proudu. Na anodě oxiduje použitý kov a přechází do roztoku v podobě iontů. Na katodě se rozpuštěný kov redukuje pomocí těchto iontů a vytváří povlak. Rychlost rozpuštění anody se rovná rychlosti pokovování katody a tato rychlost je přímo úměrná procházejícímu proudu [44].



Obr. 3-13 Schéma metody galvanického pokovování, převzato a upraveno z [45]

3.4.6 Žárové stříkání

Pomocí metody žárového stříkání je umožněno nanášet a vytvářet kovové, kovokeramické a keramické povlaky na všech typech kovových konstrukčních materiálů, vyrobených a upravených různým tepelným zpracováním [46]. Nejjednodušší provedení metody spočívá v zahřátí materiálu, který je k dispozici ve formě prášku nebo drátu, do roztaveného či polotekutého stavu. Nanášený materiál se pohání k uložení pomocí proudu plynu nebo stlačeného vzduchu a vytváří povlak na základním materiálu (Obr. 3-14). Nanášet je možné jak materiál, který se skládá z jednoho prvku, tak slitiny nebo kompozity s lepšími fyzikálními vlastnostmi. Těchto vlastností můžeme dosáhnout pouze žárovým nástřikem. Existuje několik způsobů nahřívání materiálů - spalováním paliva, plazmovým stříkáním nebo systémem elektrického oblouku. Povlaky je možné nanášet za běžných atmosférických podmínek nebo v kontrolovaných atmosférických prostředích [47]. Kovové povlaky vytvořené touto metodou nachází uplatnění u částí převodovek, hydraulických prvků, pístnic, ozubených kol atd. Keramické povlaky jsou díky mimořádné životnosti předurčeny pro povrchy plunžrů čerpadel, prvky armatur, ploch těsnění a ucpávek [48].



Obr. 3-14 Schéma metody žárového stříkání, převzato a upraveno z [49]

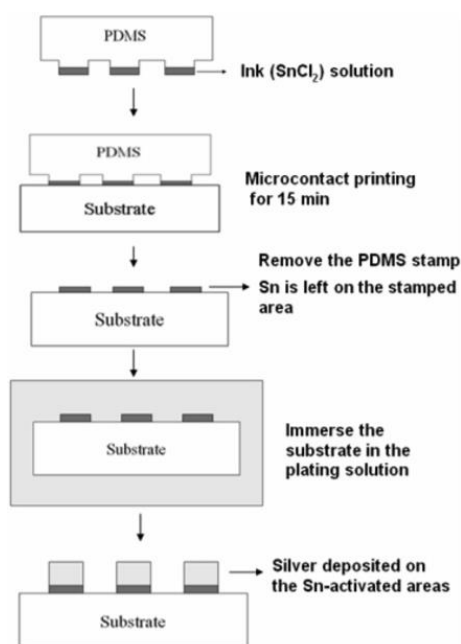
3.5 Povlakování polymerních materiálů

3.5.1 Bezelektrická depozice

Bezelektrické nanášení kovů je široce používaný proces pro výrobu jemných vzorů kovů na základním materiálu. Kovy, které se používají na nanášení jsou například měď, stříbro, zlato, nikl a kobalt. Elektrolytická depozice vzniká autokatalytickým redoxním procesem při němž je kation kovu, který chceme nanést, redukován s rozpustným redukčním činidlem na povrchu základního materiálu. Tento proces se využívá pouze na površích, které ho mohou katalyzovat. Avšak nekatalytické povrchy mohou být aktivovány kovovým katalyzátorem, jako je např. palladium. Dále si ukážeme různé metody aktivace těchto povrchů katalyzátorem [50].

Mikrokontaktní tisk - metoda PSL

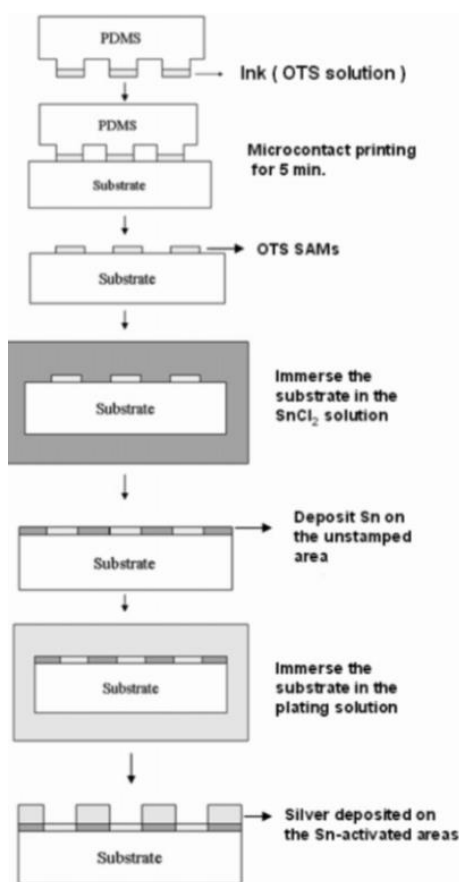
Princip metody Printing Seeding Layer (PSL) (Obr. 3-15) je založen na přenosu katalyzátoru z razítka, které je vyrobené z PDMS materiálu na základní materiál [50]. Substrát, na který chceme nanést kovový povlak, musí být před aktivací upraven kvůli zajištění silné interakce s katalyzátorem. Příprava substrátu obsahuje čištění povrchu, oxidaci povrchu k vytvoření povrchové hydroxylové skupiny a silanizaci povrchu. PDMS razítko se ponoří do roztoku katalyzátoru aby se lehce navlhčil jeho povrch, osuší se pod proudem dusíku a ručně se umístí na připravený substrát. Podle potřeby může být na razítko vytvořen mírný tlak pro zajištění kontaktu se substrátem a přenosu katalyzátoru. Po oddělení razítka od substrátu se substrát vloží do předem připraveného pokovovacího roztoku na určitou dobu.



Obr. 3-15 Schéma metody PSL, převzato a upraveno z [51]

Mikrokontaktní tisk - metoda PML

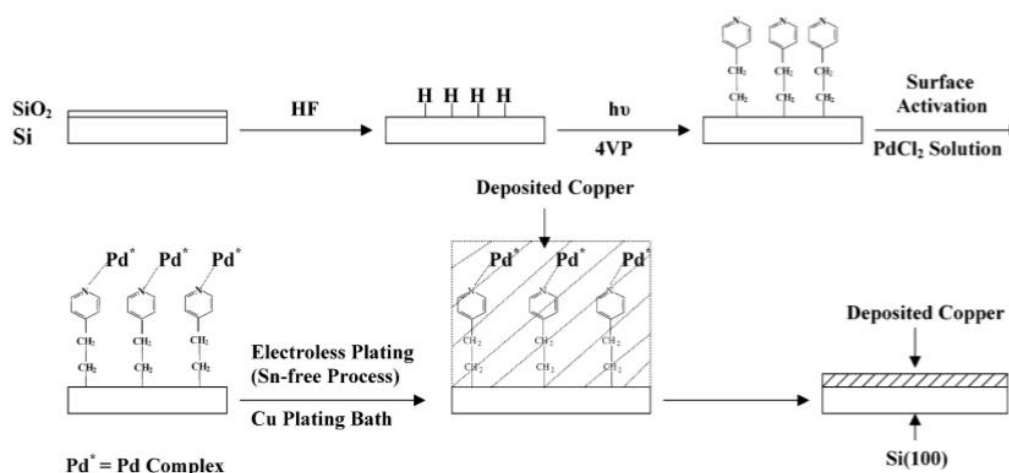
Při použití metody Printing Masking Layer (PML) (Obr. 3-16) se nanese roztok oktadecyltrichlorsilanu (OTS) na substrát pomocí PDMS známky za účelem vytvoření maskovací vrstvy. Nanesení monovrstvy musí proběhnout ve zcela izolovaném a kontrolovaném prostředí, aby se zamezilo vniku stop vody z okolní atmosféry. Substrát se vzorovanou maskovací vrstvou se ponoří do roztoku katalyzátoru (např. chloridu cínatého) a ten se uchytlí na neznačené oblasti substrátu. Po vytažení vzorku z roztoku se opláchnou vodou a vysuší dusíkem. Následuje ponoření do předem připravené pokovovací lázně na určitou dobu. Kovový povrch se objevuje pouze na místech aktivovaných katalyzátorem [51].



Obr. 3-16 Schéma metody PML, převzato a upraveno z [51]

Leptání povrchu kyselinou

Další možností aktivace povrchu je využití kyseliny fluorovodíkové (Obr. 3-17) [52]. Očištěný vzorek se ponoří do kyseliny kvůli odstranění oxidů z povrchu a k zanechání rovnoměrného vodíkového zakončení povrchu. Vzorek s tímto zakončením se umístí do zkumavky ve které je ethanol nebo roztok 4-vinylpyridinu (4VP) a proplachuje se čistým argonem. Po propláchnutí se zkumavka utěsní zátkou z kaučuku a je ozářena UV zářením po stanovenou dobu. Poté se substrát důkladně opláchne ethanolem, kvůli odstranění 4VP, ponoří do roztoku katalyzátoru na požadovaný čas a znovu opláchně, tentokrát destilovanou vodou. Nakonec se substrát ponoří do připravené pokovovací lázně pro vytvoření povlaku.



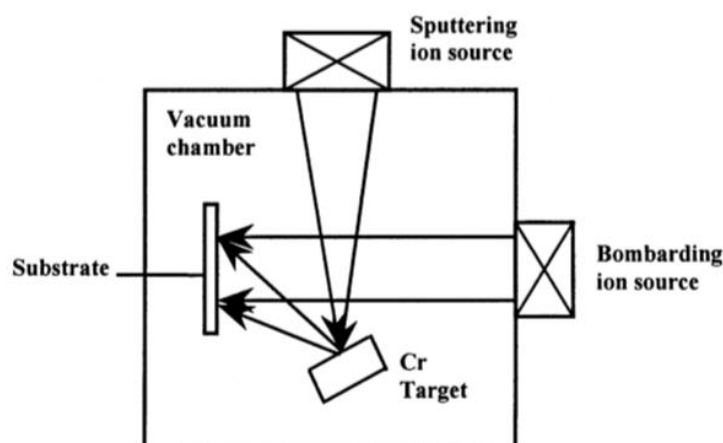
Obr. 3-17 Schéma metody leptání kyselinou, převzato a upraveno z [52]

Modifikace povrchu organickou monovrstvou

K podobné aktivaci povrchu, která je uvedena výše, se využívají aminosilany, jako jsou (3-aminopropyl) -trimethoxysilan (APTMS) a (3-mercaptopropyl) -trimethoxysilan (MPTMS). Substrát se vyčistí za pomoci ultrazvuku v acetonu a ethanolu a usuší. Vyčištěný substrát se ponoří do roztoku APTMS a ozáří UV zářením za účelem vzniku vrstvy podobné křemíku. Po vytvoření této požadované vrstvy se substrát ponoří do bezvodého toluenu s MPTMS pod atmosférou dusíku a opláchně se toluenem. Takto připravený substrát se zahřívá při 120 °C kvůli odstranění zbytkového rozpouštědla a podpory chemisorpce MPTMS. Pomocí těchto kroků se na konci chemických řetězců povrchu substrátu vytvoří monovrstva se skupinami -SH (thioly). Následně se tyto vrstvy ozáří UV zářením a modifikují se, aby byly hydrofilní. Modifikovaný substrát se vloží do připravené pokovovací lázně [53].

3.5.2 Depozice iontovým paprskem

Nanášení povlaků ukládáním pomocí iontového paprsku se ukázalo jako všestranná technika s kontrolovanými stechiometriemi a mechanickými vlastnostmi. Jedná se o metodu fyzikální depozice materiálu (PVD) za současného bombardování povrchu ionty (Obr. 3-18). Metoda PVD je zodpovědná za vytváření povlaku na základním materiálu, zatímco iontový tok dodává kinetickou energii. Tato energie má za následek přemísťování a migraci atomů na povrchu substrátu, což vede ke zlepšení vlastností povlaků. Zdroje energetického iontu a kondenzovatelného materiálu jsou rozdělené do dvou odlišných zařízení, tudíž je lze řídit nezávisle. Povlakování se provádí ve vysokém vakuu [54], [55], [56].



Obr. 3-18 Schéma metody depozice iontovým paprskem, převzato a upraveno z [54]

3.5.3 DLC povlaky

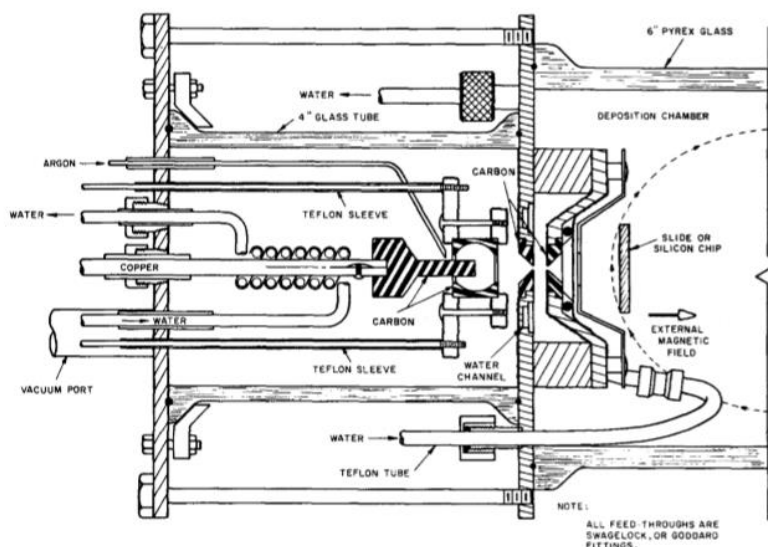
Diamantu podobné uhlíkové, diamon-like carbon (DLC), povlaky jsou v tribologických aplikacích mnohem častěji využívány, díky jejich nízkému statickému a dynamickému koeficientu tření a vysoké odolnosti proti opotřebení. Povlaky dosahují tvrdosti až 70 GPa [57]. Nanášení těchto povlaků je možné za nízkých teplot a vysokých nanášecích rychlostí za použití různých metod nanesení. DLC povlaky jsou převážně amorfni, ve kterých vedle sebe existují shluky mikrokrystalické struktury s vazbou sp^3 , sp^2 a matrice [58].

Uhlík je schopný díky hybridizaci jeho orbitalů tvořit velké množství struktur (krystalických nebo amorfních). Hybridizace je sjednocení energeticky jiných orbitalů daného atomu, které vzniká prostorovou konfigurací vytvářené molekuly. Vlastnosti vzniklých alotropických modifikací závisí na druhu vazeb atomů s molekulami. Konfiguraci sp^3 nalezneme v diamantu. Jde o konfigurace, kde jsou orbitály tvořeny všemi čtyřmi valenčními elektrony uhlíku a vytváří tvar pravidelného tetraedru. Konfigurace sp^2 je charakteristická pro grafit. Orbitály ve tvaru rovnostranného trojúhelníku jsou vytvořeny pomocí tří ze čtyř valenčních elektronů uhlíku [59]. V následující části si rozebereme různé metody nanášení DLC povlaků.

Depozice iontovým paprskem

Pomocí metody depozice iontovým paprskem je možné nanášet DLC povlaky při pokojové teplotě. Místo zahřátí základního materiálu je možné potřebnou energii ke vzniku a růstu povlaku získat z kinetické energie zrychleného iontového svazku nanášeného materiálu. Tato kinetická energie může být řízena upravením potenciálu základního materiálu. K nanášení povlaku dochází okolo tlaku $1,3 \cdot 10^{-4}$ Pa.

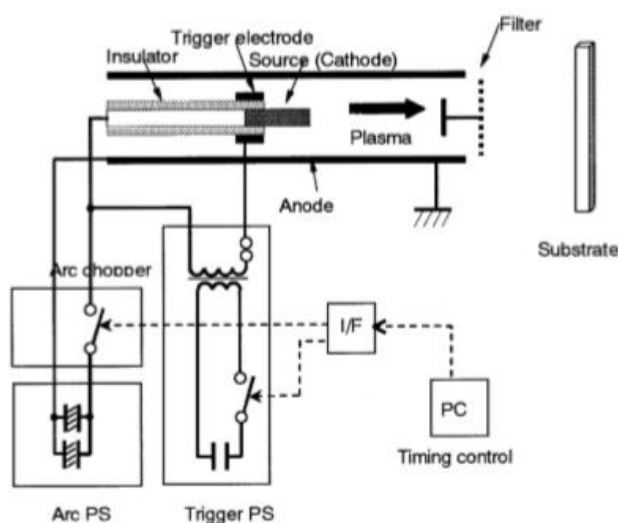
K nanesení tenkých povlaků se používá zdroj (Obr. 3-19), který může produkovat, jak pozitivní ionty plynů, tak i pozitivní ionty pevného materiálu. Tento zdroj iontů je složen ze zdrojové a depoziční komory, které jsou odděleny otvorem o průměru 1,5 mm. Zdrojová komora obsahuje plazmový zdroj a využívá se v ní vysokotlakého výboje k vytvoření kladných iontů uhlíku. Pomocí výboje se zavedou atomy uhlíku do plazmy, kde jsou vysokoenergetickými elektrony ionizovány. Následně jsou ionty vytahovány ze zdrojové do depoziční komory, a to výbojem vedeným k základnímu materiálu za využití magnetického pole, které upravuje elektronové dráhy ke správnému nasměrování plazmy a snížení rozptylu iontového paprsku [60].



Obr. 3-19 Schéma metody depozice iontovým paprskem u DLC povlaků, převzato a upraveno z [60]

Vakuové obloukové nanášení

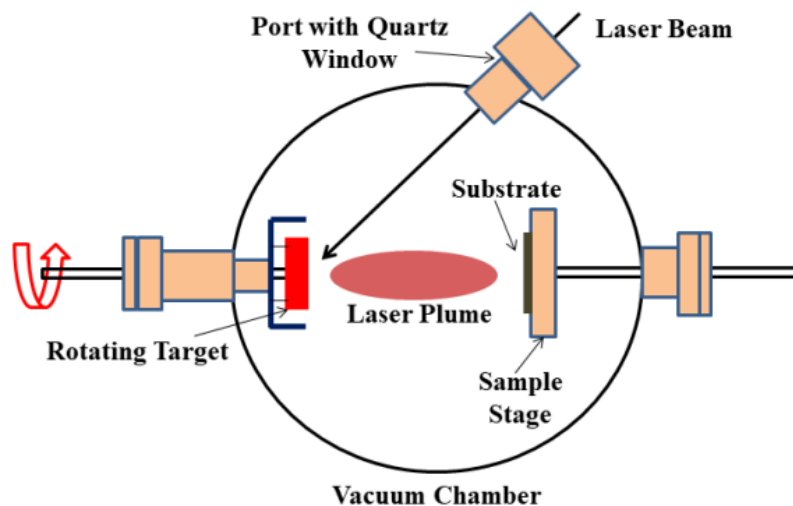
Vakuový oblouk je silnoproudý elektrický výboj, který vytváří páry odpařováním elektrod (Obr. 3-20). Pára ionizuje díky výboji a vytvoří plazmu vedoucí proud oblouku. Plazma je tvořena materiálem elektrod s příměsí reaktivních plynů, které mohou být přítomny v komoře. Následně tato plazma vytvoří povlak kondenzací, buď na vnitřních částech zařízení nebo na základním materiálu, který je v tomto zařízení umístěn a na který chceme povlak nanést. Výboje označujeme jako katodické nebo anodické oblouky podle toho, jestli je primárním zdrojem katoda nebo anoda [61]. Nevýhodou metody vakuového obloukového nanášení je zhoršení kvality povlaku tvorbou makročásteček [62]. Nejjednodušší možností odstranění makročásteček je za pomoci magnetického pole a magnetických filtrů [63].



Obr. 3-20 Schéma metody vakuového obloukového nanášení, převzato a upraveno z [62]

Pulzní laserová depozice

Metoda pulzní laserové depozice (PLD) je založena na umístění uhlíkového terče - typicky grafitu, do vakua a následném ozáření pulzním laserovým paprskem o vysoké intenzitě (Obr. 3-21) [57]. Terč je díky energii laseru odpařován a vzniká vysokotlaká plazmatická oblast. Plazma vytváří vysokoenergetický oblak během hypersonického rozpínání. Po umístění základního materiálu do tohoto oblaku se začnou tvořit uhlíkové povlaky se strukturou a vlastnostmi od grafitu po diamant. A to v závislosti na vstupních parametrech laseru, prostředí komory a teplotě základního materiálu.



Obr. 3-21 Schéma metody pulzní laserové depozice, převzato a upraveno z [64]

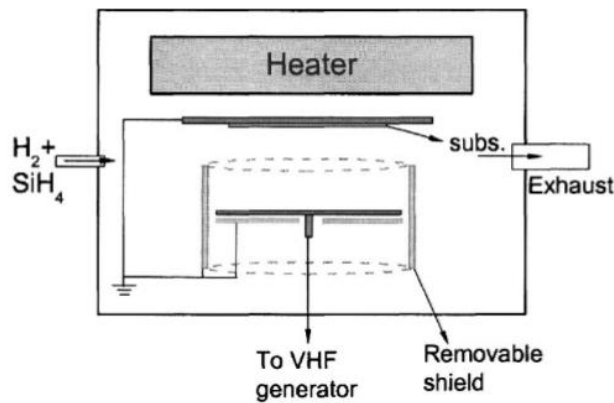
Pro uložení povlaků s vlastnostmi podobnými diamantu je potřeba minimální úroveň výkonu laseru na základním materiálu. Pro dobrou tvrdost povlaků je potřeba vakuum a nízká teplota základního materiálu. Při teplotách nad 150 °C vznikají povlaky podobné grafitu a při použití vodíkového prostředí s teplotami nad 300 °C vznikají povlaky podobné diamantu [57].

Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition (PACVD)

U metody PACVD se využívá nižších teplot než u klasické CVD metody. Zařízení používané při povlakování metodou PACVD zvládne samotné povlakování, ale i nitridaci či iontové čištění povrchů. Na znečištěný povrch základního materiálu dopadají kladně nabitě ionty používaného plynu a díky vysoké kinetické energii vyrazí nečistoty z povrchu materiálu. Pro zlepšení adheze povlaku a základního materiálu se provádí plazmová nitridace. Ke tvorbě povlaku dojde při vyloučení kladně nabitých atomů vznikajících v plazmě na záporně nabitěm základním materiálu. Energie plynné atmosféry v komoře je zvyšována za pomoci ionizace a aktivace v plazmatickém výboji. Vytvoření plazmy je možné vnějším elektrickým zdrojem nebo reaktivním plynem. Povlaky vytvořené metodou PACVD splňují vysoké požadavky na otěruvzdornost, životnost a tvrdost [65].

Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)

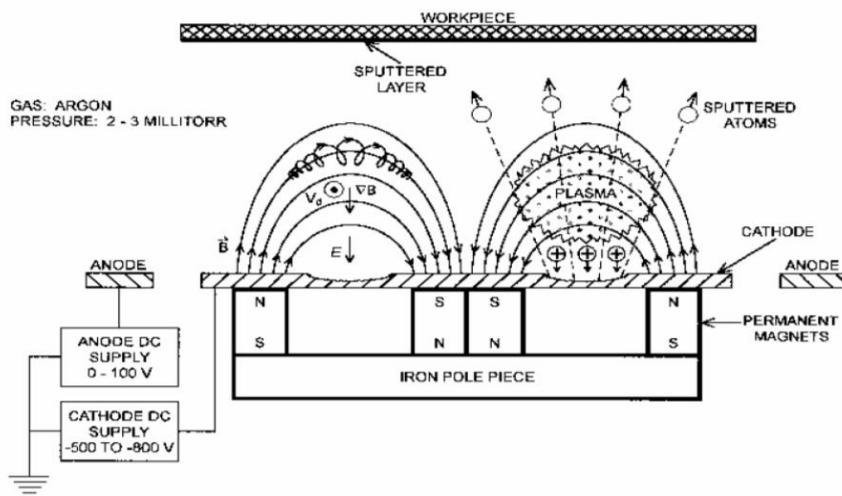
Metoda PECVD je vylepšená obdoba metody PACVD. Principem vzniku povlaku technologií PECVD je zavedení reakčních plynů mezi elektrody umístěné ve vakuu (Obr 3-22). Reakční plyny mezi elektrodami vytvoří plazmu, která vyvolává chemické reakce a ta vede k tomu, že se reakční plyn ukládá na základní materiál [66]. Chemické reakce mohou v plazmatu probíhat za nižších teplot, tudíž je možné nanášet povlaky na tepelně citlivé materiály [67]. Výhodou PECVD je dobrá adheze povlaku a vysoká přilnavost k základnímu materiálu.



Obr. 3-22 Schéma metody PECVD, převzato a upraveno z [68]

3.5.4 Magnetronové naprašování

Tato metoda využívá velmi výkonnou a účinnou elektronku nazývanou magnetron, na kterou můžeme narazit v mikrovlnných troubách [67]. Magnetronové naprašování je proces nanášení povlaků ve vakuu a spadá do kategorie PVD. Je možné nanášet mnoho typů materiálů, jako jsou kovy, keramika, ale především můžeme nanášet na různé typy základních materiálů [69]. Materiál, který se má nanést, je bombardován ionty inertních plynů za pomoci výboje plazmatu (Obr 3-23). Náraz těchto iontů na terč způsobí vypuzení atomů z terče do prostoru. Tyto vypuzené atomy se potom ukládají na základní materiál a vzniká povlak [70]. Magnetrony vytvářejí magnetické pole, v kterém elektrony u základního materiálu mění trajektorii, srážejí se a vytváří větší ionizaci plazmy. To nám umožňuje nanášet za nižšího tlaku, který je prospěšný pro vytvoření kvalitnějších povlaků [71]. Může být použit vysoce výkonný impulsní magnetronový zdroj, kde je generován vysokonapěťový impuls za účelem výroby velmi husté plazmy, která vytvoří dobře přilnavé povlaky na základní materiál při nízkých teplotách.



Obr. 3-23 Schéma metody magnetronového naprašování, převzato a upraveno z [72]

3.5.5 DC naprašování

Stejnoseměrné DC naprašování je metoda, při které se využívá doutnavého výboje. Terč z vodivého materiálu je připojen jako katoda a povlakovaný základní materiál je zapojen jako anoda. K terči se přivede záporné stejnosměrné napětí a do komory se ventilem vpustí inertní plyn. Při zapálení doutnavého výboje je terč bombardován kladnými ionty pracovního plynu a jsou z něj vyráženy atomy do prostoru komory. Tyto atomy vstoupí do doutnavého výboje a jsou přitahovány na anodu, kde přistanou a vytvoří povlak. Nanášení povlaků probíhá v rozmezí tlaků od 10 do 18,6 Pa, protože při tlaku nižším než 1 Pa nelze doutnavý výboj udržet. Zatímco při vyšším tlaku dochází k častějším srážkám atomů s pracovním plynem, tudíž nejsou kvalitně ukládány na základní materiál [67].

4 DISKUZE

V diskuzní části zhodnotíme vlastnosti povlaků nanesených pomocí výše zmíněných metod nanášení s ohledem na přilnavost povlaku k základnímu materiálu. Jelikož cílem práce je nanést povlak na materiál PDMS, který je na bázi křemíku, jak je zmíněno výše. Bude pozornost nanesení povlaku upřena převážně na křemíkové materiály, materiály na bázi křemíku nebo přímo polymery. Probereme okolní podmínky za kterých byl povlak nanesen a jejich vliv na kvalitu a vlastnosti povlaků.

Hidber a kol. [50] použili ve své práci metodu PSL k nanesení mědi na křemíkové pláty, sklo a polymery za laboratorních podmínek okolního prostředí. Autoři uvádí, že předúprava substrátu pouze neumožnila přenos katalyzátoru, ale také zlepšila přilnavost nanášeného kovového povlaku na základní materiál. Pro zkoušku přilnavosti byly použity vzorky o tloušťce filmu 500 nm. Testy provedené na těchto vzorcích ukázaly, že přilnavost byla vyšší na polymerech, než na skleněných nebo křemíkových substrátech. Z práce vyplývá další důležitý poznatek a to, že větší drsnost základního materiálu může pomoci k lepší přilnavosti povlaku. Po podrobné studii struktur povlaku byly odhaleny jejich vady a autoři uvádí tři možné důvody. Prvním důvodem je, že nanášení probíhalo za podmínek okolního prostředí, kde prach a atmosférické kontaminanty mohly vést k vadám. Druhý důvod uvádí možnost vady substrátu před nanášením a třetím důvodem je možnost usazení kontaminujících látek z pokovovací lázně na substrátu.

V práci od autorů Hsu, Yeh, Lo a Chen [51] bylo provedeno porovnání metod PSL a PML při nanášení stříbra na skleněné substráty. I když byla morfologie povrchu substrátu před pokovováním odlišná mezi povrchy vyrobenými metodou PSL a metodou PML, tak morfologie povlaku po pokovování byla pro obě metody totožná. U metody PSL se objevily částice stříbra na neaktivovaném povrchu součásti, což mohlo být způsobeno neočekávaným usazováním katalyzátoru v neaktivované oblasti substrátu. Nanášení povlaků metodou PML bylo provedeno při 45 °C a to pro tři různé doby pokovování. Po dobu pokovování 4 minuty byla tloušťka povlaku 138 nm, po dobu 30 minut byla 303 nm a 349 nm byla tloušťka povlaku při pokovovací době 60 minut. Z toho vyplývá, že se velikost povlaku zvyšuje při delší době pokovování. Z doby pokovování autoři vyvodili, že se mění i drsnost. Při době pokovování 4 minut bylo nanášené stříbro zrnité a kulaté. Po prodloužení doby se zrna stříbra zvětšovala a měnila do nepravidelného tvaru. Drsnost povlaku se s pokovovací dobou více zvyšovala u povlaku vyrobeného metodou PML. To poukazuje na to, že metoda PML má lepší schopnost vytvářet povlaky než metoda PSL. Autoři této práce se také zaměřili na vliv teploty při které je povlak nanášen. Nanášení bylo provedeno při teplotách 25 °C, 45 °C a 65 °C a zjistilo se, že povlakování je rychlejší při vyšších teplotách. Avšak je nutné podotknout, že se pokovovací lázeň stává nestabilní a zakalenou, pokud teplota přesáhne 55 °C.

Aktivace povrchu pomocí leptání kyselinou a následné nanesení mědi na křemíkové substráty bylo použito v práci [52]. Část práce je zaměřena na změny drsnosti povrchu substrátu zapříčiněné povrchovými úpravami před vlastním povlakováním. Autoři uvádí, že po každé úpravě se drsnost substrátu zvýšila a tuto skutečnost částečně přiřazují tvorbě oxidu křemičitého na povrchu. Druhá část práce je zaměřena na přilnavost povlaku k základnímu materiálu. Dále bylo uvedeno, že povlak velmi dobře přilnul k substrátu kvůli silné interakci 4VP vrstvy s atomy palladia a mědi.

Nanesení povlaku mědi na polyethylentereftalát (PET) za pomoci modifikace povrchu bylo popsáno zde [53]. Jedná se o metodu založenou na nanášení bez použití katalyzátoru, jelikož by mohl poškodit elektrické vlastnosti mědi. Povlak byl nanesen za teploty 50 °C po dobu 2 hodin. Povlak vykazoval dobrou odrazivost, relativně nízkou drsnost a nižší elektrickou vodivost, než je běžné u samostatné mědi. Snížení elektrické vodivosti zapříčinila malá zrna s malými hranicemi, které rozptylují elektrony. Nanesení povlaku touto metodou je možné na široké spektrum povrchů, na nichž se mohou vytvořit thiolové monovrstvy.

Nanášení povlaků pomocí bezelektrické depozice se převážně využívá v elektrotechnice a v odvětvích, kde je nutné nanášet povlaky o opravdu malých rozměrech. Hlavní nevýhody spočívají ve vytváření povlaků pouze v aktivovaných místech katalyzátorem a lepšímu růstu povlaku na drsných površích. Vzhledem k těmto nevýhodám, by bylo komplikované nanést povlak na celý povrch kuličky, pomocí které nejčastěji simulujeme kontakt při laboratorních experimentech, s dostatečně nízkou drsností. Tato drsnost může ovlivnit použití konvenčních metod nebo zkreslit jejich výsledky.

Povlak nitridu chromu na křemíkový substrát byl nanesen pomocí depozice iontovým paprskem [54]. Povlak byl nanášený ve vakuové komoře při základním tlaku $1,5 \cdot 10^{-4}$ Pa a energie bombardování iontů dusíku byla v rozmezí 5–40 keV. Drsnost povrchu povlaku se mění s energií bombardování. Při nízké energii bombardování má povlak hladkou strukturu a při vyšší energii drsnější strukturu. Stejně to funguje i u tvrdosti povlaku. S vyšší energií se zvyšuje tvrdost, jelikož při vyšší energii bombardování může být více této energie usazováno v povlaku a je vytvořeno více dislokačních struktur. V kombinaci s intersticiálním účinkem atomů dusíku se tvrdost povlaku zvyšuje. Naopak je to u přilnavosti povlaku. S vyšší energií bombardování se snižuje přilnavost k základnímu materiálu. Tato přilnavost je vyšší při použití metody depozice iontovým paprskem, než u metody PVD, a to právě díky iontovému paprsku.

Metodou depozice iontovým paprskem se dají nanést také DLC povlaky. V práci [60] byl nanesen DLC povlak na křemíkový substrát o tloušťce několik mikronů. Teplota substrátu při povlakování byla asi o 10 °C větší než teplota místnosti, kde byl povlak nanášen. Tento povlak vykazuje dobrou odolnost, dielektrické vlastnosti a optické vlastnosti, které nahrávají k využití optické interferometrie. Další výhodou těchto povlaků nanesených pomocí metody depozice iontovým paprskem je velmi dobrá přilnavost k základnímu materiálu.

DLC povlaky je možné nanášet také za využití vakuové depoziční metody. V literatuře [63] je povlak nanesen na silikonový substrát. Kvůli chlazení byl substrát upevněn na vodou chlazeném držáku. Základní tlak byl okolo 10^{-4} Pa a uhlíkové ionty měly energii 20–30 eV. Nanesená tloušťka povlaku se pohybovala v rozmezí od 70 do 100 nm. Autoři se v práci zaměřili na pulzní předpětí substrátu a jeho vliv na výsledné vlastnosti povlaku. Během předpětí 100 V byly vytvořeny nejtvrďší filmy s nízkým koeficientem tření. Zatímco při předpětí 2400 V se výrazně zlepšila přilnavost filmů k základnímu materiálu a bylo možné nanést tlustší povlaky bez jeho praskání.

Pro zkoumání mechanických vlastností povlaků vyrobených pulzní laserovou depozicí [57] byly využity DLC povlaky o tloušťce 0,5 μm . Tyto povlaky měly tvrdost asi 60 GPa a koeficienty tření od 0,07 do 0,12. Avšak tyto vlastnosti, jako tvrdost, s sebou nesou i značná úskalí. Velmi tvrdé povlaky jsou křehké, mají zbytkové napětí a špatnou přilnavost k základnímu materiálu. Při nanášení na snadno deformovatelné substráty povlaky praskají a dochází k delaminaci. Díky přidání vodíku se povlaky stávají měkčími, flexibilnějšími a mají lepší přilnavost, oproti vyšší náchylnosti k opotřebení.

K uložení DLC povlaků na polyethylen s ultravysokomolekulární hmotností (UHMW-PE) byla použita metoda PECVD [73]. Povlaky byly nanášeny za konstantního tlaku o velikosti 1 Pa. Teplota povlakování byla držena pod 100 °C. Tloušťka nanesených filmů závisela na délce procesu potahování a pohybovala se mezi 1 μm a 2,5 μm . Studie filmů potvrzuje velmi dobrou přilnavost povlaku na základním materiálu. Tato přilnavost je přisuzována drsnosti substrátu před povlakováním. Po nanášení povlaku bylo zjištěno, že mají hrubší povrchovou topografii a bylo to s největší pravděpodobností způsobeno rozdílem tepelné roztažnosti DLC povlaků a základním materiálem.

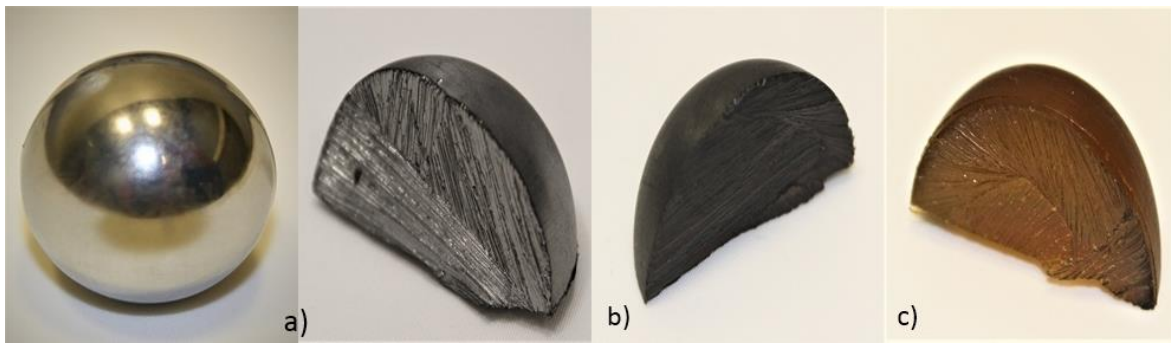
Jak už bylo zmíněno výše, tak díky dobrým tribologickým vlastnostem se DLC povlaky využívají mnohem častěji. Tyto povlaky se dají nanášet různými metodami při nízkých teplotách, a proto vykazují potenciál k nanášení na polymerní materiály. Nanesení povlaku je možné po celé ploše substrátu s konstantní tloušťkou. Další výhodou je možnost nanášení povlaku s nízkou drsností [74] a také jejich prokázaná biokompatibilita [75], což je předurčuje k využití v medicíně.

U různých metod naprašování, jako je magnetronové [76] nebo DC [77], se nanáší povlaky za stejných podmínek. Substráty jsou umístěny 5–7 cm od cíle. Teploty během nanášení se drží pod 100 °C a základní tlaky jsou nastaveny v rozmezí od 10^{-5} do 10^{-4} Pa. Povlaky dosahují vysoké tvrdosti a jejich drsnost je ovlivňována drsností základního materiálu, jako u výše zmíněných metod. Přílnavost povlaku k základnímu materiálu je závislá na nanášeném povlaku. V literatuře [76] je naznačeno, že přílnavost povlaků je závislá na průtokové rychlosti plynu v systému. Při vyšším průtoku se zlepšuje elastický modul a také přílnavost.

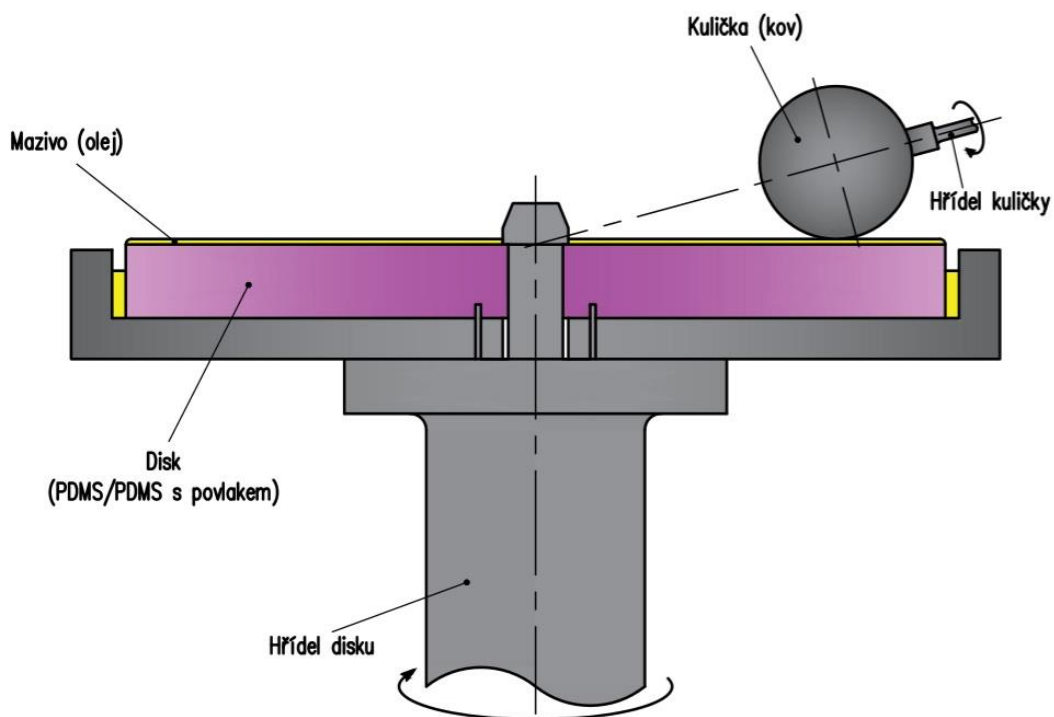
K nanášení povlaků na polymerní materiály se dají využít i méně používané metody nebo kombinace výše zmíněných metod. Např. vysokofrekvenční žárový výboj [74], CVD/PVD [75], PVD/PECVD [78] nebo kombinace mikrokontaktního tisku s CVD [79].

4.1 Studie proveditelnosti

Z výše uvedených informací vyplývá, že se povlaky dají nanášet za nízkých teplot. Nízká teplota je důležitá, jelikož polymerní materiály nejsou odolné proti vysokým teplotám. Na základě těchto informací byla pro nanášení testovacích povlaků využita kombinace metod PVD/PECVD. Realizace studie proveditelnosti proběhla ve spolupráci s Univerzitou Friedricha-Alexandra v Erlangenu u Norimberku. Na základě literární rešerše a diskuse se zahraničním partnerem byly zvoleny následující parametry: Tloušťka povlaku = 2 μm , výkon na chromový cíl $p(\text{Cr}) = 5 \text{ kW}$, argonový tok $\phi(\text{Ar}) = 180 \text{ sccm}$, předpětí $U_{\text{bias}} = 150 \text{ V}$ a teplota v pokovovací komoře $T = 15\text{--}16 \text{ }^\circ\text{C}$. Byly nanášeny 3 různé povlaky, které jsou znázorněny na Obr. 4-1. Na základě posouzení kvality povlaku byl pro další fázi zvolen čistý Cr povlak. Povlak byl nanášen jednak na PDMS kouli o průměru 25 mm za účelem možnosti pozorování na optickém tribometru a PDMS disk o průměru 46 mm pro možnost posouzení vlivu povlaku na součinitel tření. Na základě optických pozorování se ukázalo, že povlak sice vykazuje dostatečnou odrazivost, deformace PDMS kuličky však byla i při malých zatíženích velmi významná, což ve výsledku znemožnilo provést měření tloušťky filmu v kontaktu, protože nebylo možné provést kalibraci. Dále byla tedy pozornost věnována posouzení vlivu povlaku na součinitel tření s využitím zařízení Mini Traction Machine (Obr. 4-2).



Obr. 4-1 Vzorky s povlaky a) čistý chromový povlak b) povlak a-C-H-W (amorfní uhlík hydrogenovaný s wolframem) c) povlak a-C-H (amorfní uhlík hydrogenovaný)



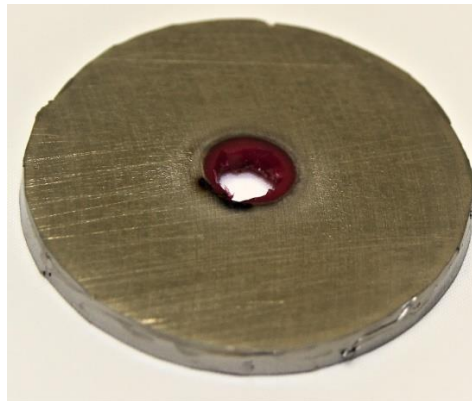
Obr. 4-2 Schéma zařízení MTM

Drsnosti na vzorku s povlakem a bez povlaku byly měřeny na 3D optickém profilometru s řízenou změnou fáze, přičemž se měřilo na pěti různých místech originálního a povlakovaného vzorku. Změna drsnosti povrchu po nanesení povlaku je uvedena v Tab. 4-1. Tato změna drsnosti může být kromě jiného způsobena, rozdílnou tepelnou roztažností povlaku a polymerního vzorku, jak je uvedeno v literatuře [73]. Během ochlazování se vzorek rychleji smršťuje a v povlaku vzniká napětí, které může způsobit popraskání.

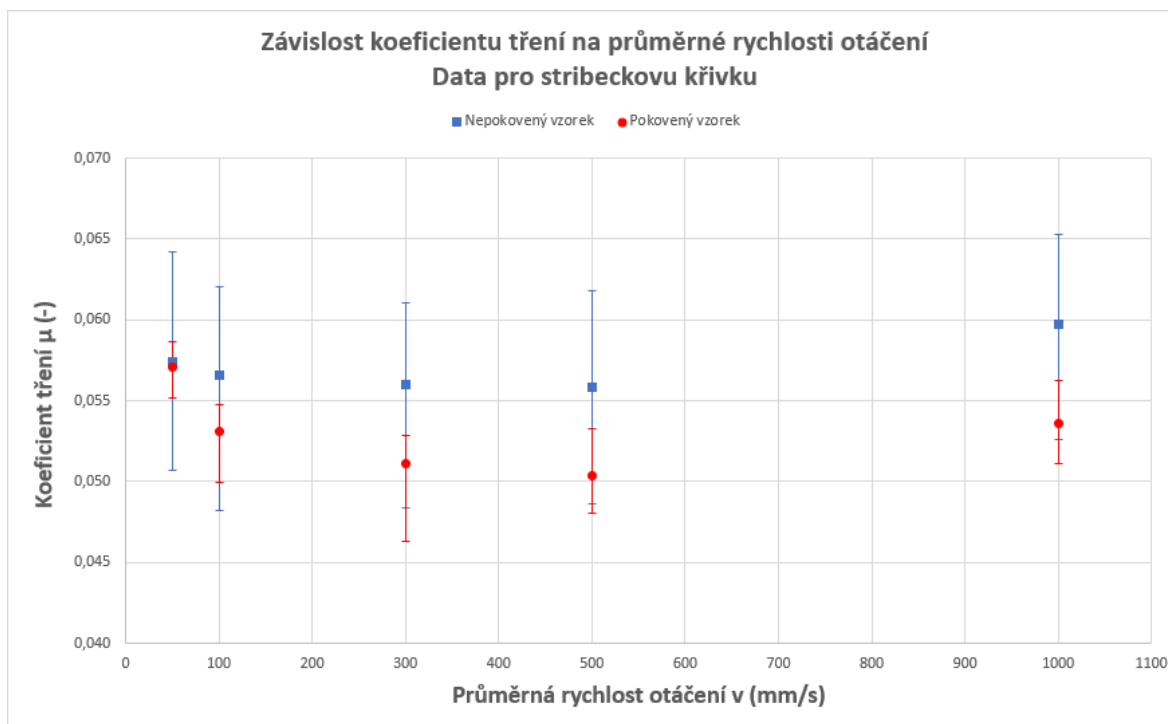
Tab. 4-1 Drsnosti vzorku bez povlaku a s povlakem

Místo měření	Drsnost Ra	
	Bez povlaku	S povlakem
1	0,206	1,126
2	0,219	0,979
3	0,206	1,163
4	0,284	1,191
5	0,269	1,022

Experiment byl proveden v konfiguraci kulička-disk. Byla využita standardní kulička z ložiskové oceli v kontaktu s originálním a povlakovaným PDMS diskem (Obr. 4-3). Měření probíhalo za laboratorních podmínek při zatížení 15 N, prokluz mezi kuličkou a diskem byl nastaven na 10 % a průměrné rychlosti otáčení se pohybovaly v rozmezí 50–1000 mm/s. Měření při nižších rychlostech nebylo možné, protože zařízení nedokázalo stabilizovat zatížení. Jako mazivo byl využit minerální olej s označením R834/80 s dynamickou viskozitou $\eta = 0,18 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Pro každý ze vzorků byla provedena celkem tři měření. Z těchto hodnot byly vypočteny průměrné hodnoty a směrodatné odchylky součinitele tření při dané rychlosti. Výsledky jsou znázorněny na Obr. 4-4.



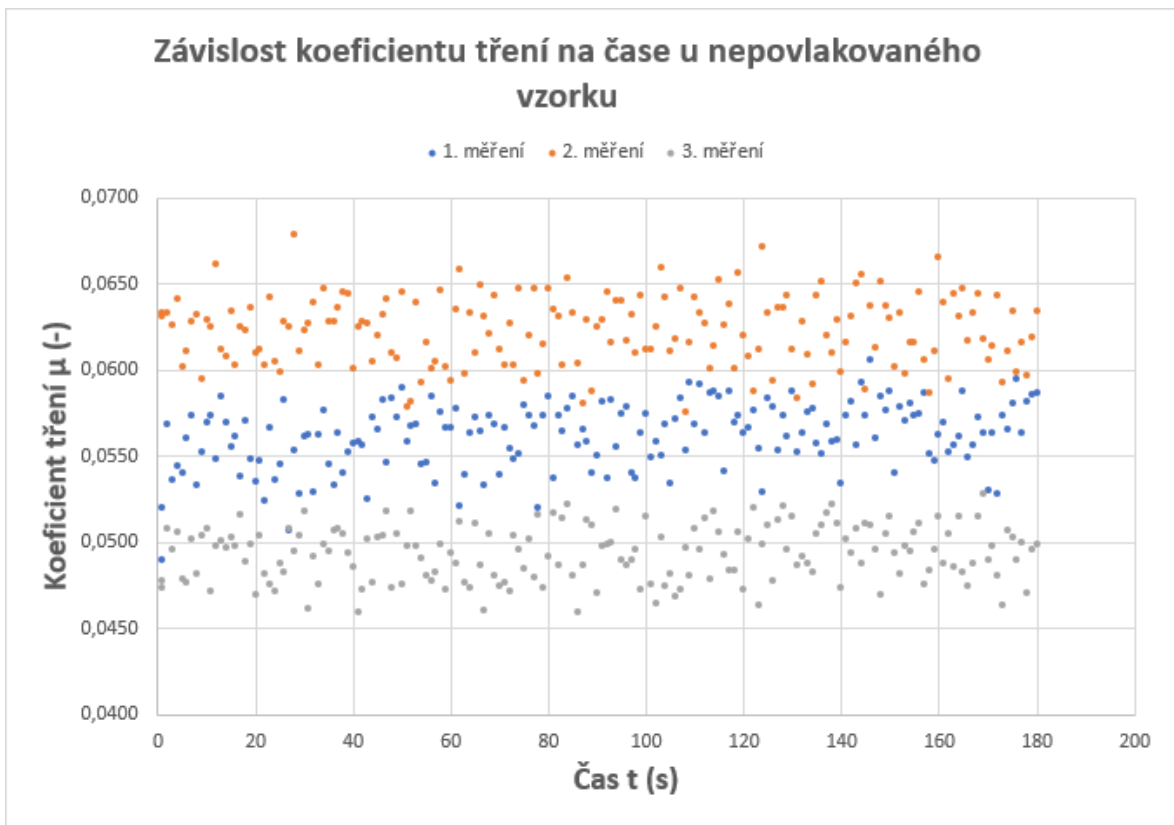
Obr. 4-3 PDMS vzorek s chromovým povlakem použitý při měření



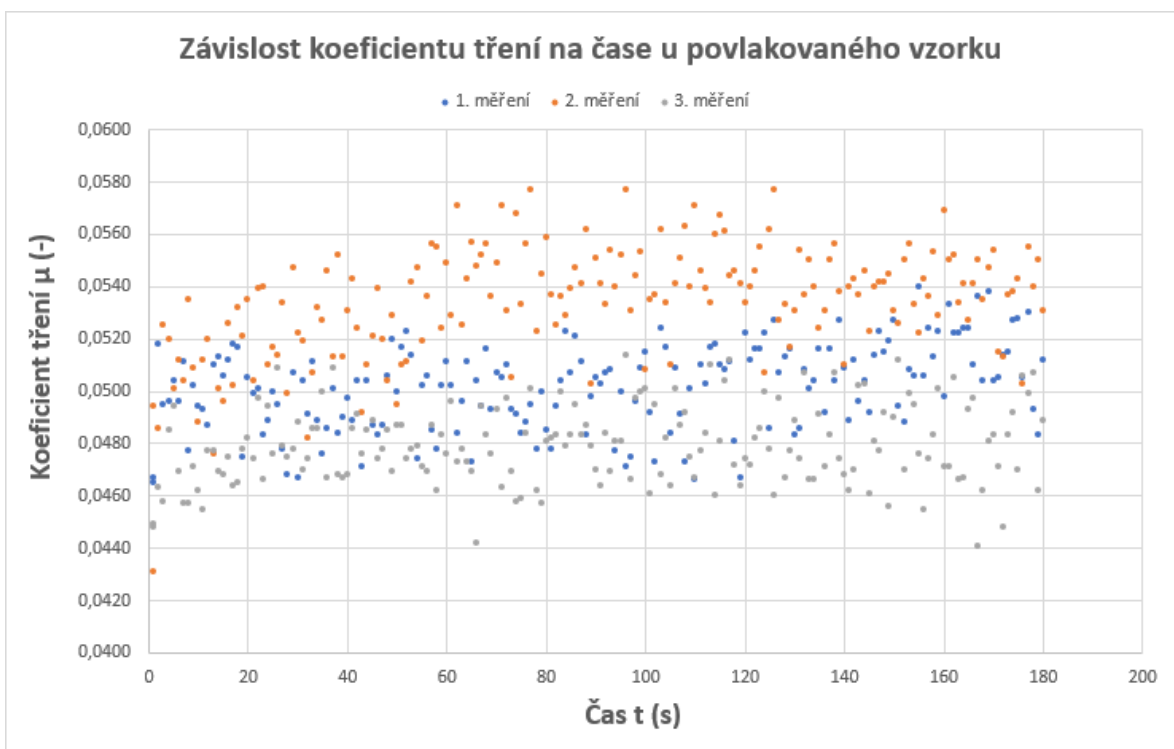
Obr. 4-4 Závislost koeficientu tření na průměrné rychlosti otáčení

Z grafu je vidět, že vzorek s povlakem vykazuje nižší hodnoty koeficientu tření a také menší rozptyl v jakém se tyto hodnoty pohybují. U rychlosti otáčení 50 mm/s je koeficient tření jen nepatrně nižší, avšak při zvětšující se rychlosti je změna viditelnější.

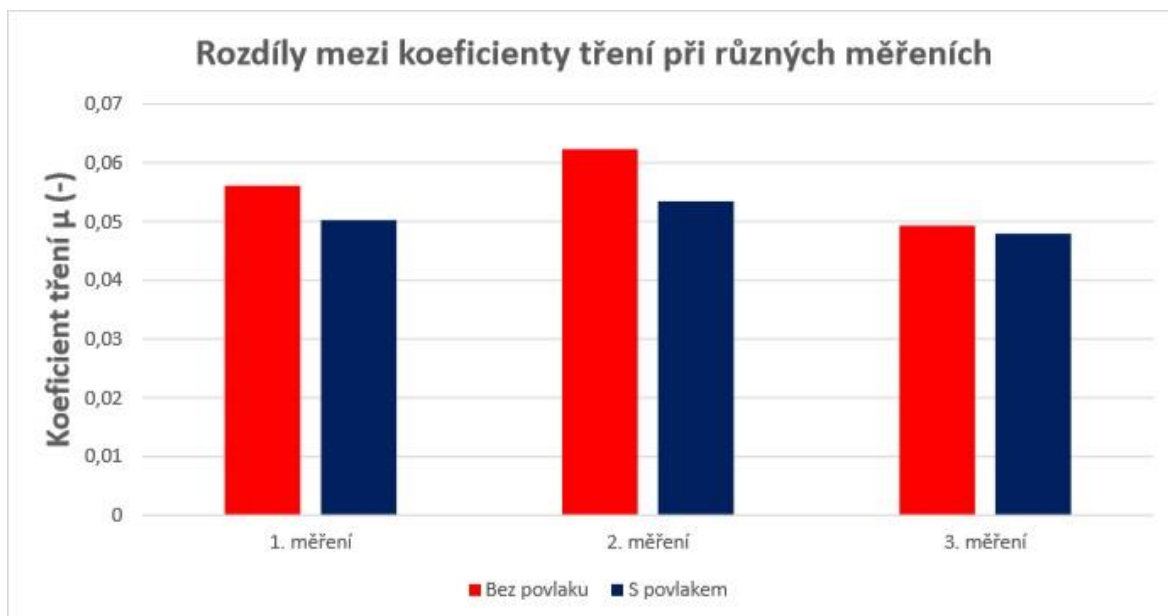
Následně byl proveden časový test v délce trvání tří minut. Zatížení s prokluzem bylo nastaveno na stejnou hodnotu, jako u předchozích měření a rychlost otáčení byla nastavena na 500 mm/s. Znovu byly provedeny tři měření, jak pro vzorek bez povlaku (Obr. 4-5), tak s povlakem (Obr. 4-6). Na Obr. 4-7 je zobrazena střední hodnota koeficientu tření z jednotlivých měření a také porovnání mezi originálním a povlakovaným PDMS. Během měření nebylo zaznamenáno opotřebení či strhávání povlaku, což naznačuje dobrou adhezi s polymerním materiálem PDMS.



Obr. 4-5 Závislost koeficientu tření na čase u nepovlakovaného vzorku



Obr. 4-6 Závislost koeficientu tření na čase u povlakovaného vzorku



Obr. 4-7 Rozdíly mezi koeficienty tření při různých měřeních

Grafy jasně ukazují, že vzorek s povlakem vykazuje nižší koeficient tření než vzorek bez povlaku. U měření číslo 3 je tato změna nepatrná, avšak u dalších dvou měření je rozdíl viditelnější. Data tedy poukazují na pozitivní vliv povlaku na snížení koeficientu tření.

5 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala nalezením vhodné metody nanášení tenkých kovových povlaků na polymerní materiály. Byla provedena charakteristika poddajného kontaktu a popsání konvenčních metod, které se využívají ke studii těchto kontaktů. Dále byla shrnuta rešerše aktuálně používaných metod k nanášení tenkých kovových povlaků na polymerní materiály a zhodnocení tribologických i mechanických vlastností těchto povlaků. A také byly rozebrány vědecké studie zabývající se podmínkami nanášení povlaků a jejich dopad na morfologii a vlastnosti povlaků.

Na PDMS vzorek byly nanášeny různé povlaky. Byl zkoumán vliv chromového povlaku na drsnost a koeficient tření vzorku. Zvýšení drsnosti, jak je uvedeno výše, může být způsobeno rozdílnou tepelnou roztažností. Vzorek s povlakem vykazuje nepatrně nižší hodnoty koeficientu tření a také menší odchylky od střední hodnoty.

Z dat uvedených výše vyplývá, že vzorek s chromovým povlakem vykazuje nižší koeficient tření. Experimentem bylo také zjištěno, že u povlakovaného vzorku hodnoty koeficientu tření tolik nekolísají a nemění se v široké škále hodnot. Data tedy naznačují, že povlak zjevně vede ke stabilizaci chování. Jelikož změny v součiniteli tření rozhodně nejsou zanedbatelné, je třeba vnímat tuto studii jako určité varování, že nanášení povlaku na poddajný materiál částečně změní jeho chování. Toto je třeba brát v úvahu v případě dalších studií zaměřených na pozorování formování mazacího filmu na optickém tribometru.

Pro budoucí studie by mělo nanášení kovových vrstev na polymerní materiály usnadnit použití konvenčních metod, jako je optická interferometrie nebo metoda elektrického odporu. A také pomoci s popisem chování polymerních materiálů v kontaktu, který se nachází v izoviskozním elasto-hydrodynamickém mazacím režimu.

6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MARX, Nigel, Johan GUEGAN a Hugh A. SPIKES. Elastohydrodynamic film thickness of soft EHL contacts using optical interferometry. *Tribology International* [online]. 2016, **99**, 267–277. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2016.03.020
- [2] STACHOWIAK, Gwidon a Andrew BATCHELOR. *Engineering Tribology* [online]. 2006. ISBN 9780750678360. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-7506-7836-0.X5000-7
- [3] JAROŠ, T. Utváření mazacího filmu v poddajném kontaktu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Nečas, Ph.D.
- [4] MYANT, C., H. A. SPIKES a J. R. STOKES. Influence of load and elastic properties on the rolling and sliding friction of lubricated compliant contacts. *Tribology International* [online]. 2010, **43**(1–2), 55–63. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2009.04.034
- [5] SADOWSKI, Przemysław a Stanisław STUPKIEWICZ. Friction in lubricated soft-on-hard, hard-on-soft and soft-on-soft sliding contacts. *Tribology International* [online]. 2019, **129**(June 2018), 246–256. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2018.08.025
- [6] NEČAS, D. Analýza utváření mazacího filmu v náhradách kyčelního kloubu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. Vedoucí práce: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
- [7] EUROPEAN CENTRE FOR ECOTOXICOLOGY AND TOXICOLOGY OF CHEMICALS. Linear Polydimethylsiloxanes. *Linear Polydimethylsiloxanes CAS No. 63148-62-9 (second edition)* [online]. 2011, **9**(63148), 3–8. Dostupné z: doi:ISSN-2079-1496-55
- [8] MARK, James E, Harry R ALLCOCK a Robert WEST. *Inorganic Polymers , Second Edition* [online]. 2005. ISBN 9780195131192. Dostupné z: doi:10.1002/adma.19930050116
- [9] CUTRONEO, M., V. HAVRANEK, P. MALINSKY, A. MACKOVA, A. TORRISI, J. FLAKS, P. SLEPICKA a L. TORRISI. Micro ion beam used to optimize the quality of microstructures based on polydimethylsiloxane. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* [online]. 2019, **459**(August), 137–142. ISSN 0168583X. Dostupné z: doi:10.1016/j.nimb.2019.08.033
- [10] COURTNEY, Thomas H. *Mechanical Behavior of Materials*. New Delhi: McGraw Hill Education (India), 2013. ISBN 1259027511 9781259027512.
- [11] ROGERS, John A. a Ralph G. NUZZO. Recent progress in soft lithography. *Materials Today* [online]. 2005, **8**(2), 50–56. ISSN 13697021. Dostupné z: doi:10.1016/S1369-7021(05)00702-9
- [12] MCDONALD, J. Cooper. *Fabrication of microfluidic systems in polydimethylsiloxane*. 2000

- [13] DI CICCIO, Francesca, F. OOSTERLINCK, Hans TROMP a A. SEIN. Comparative study of whey protein isolate gel and polydimethylsiloxane as tribological surfaces to differentiate friction properties of commercial yogurts. *Food Hydrocolloids* [online]. 2019, **97**(September 2017), 105204. ISSN 0268005X. Dostupné z: doi:10.1016/j.foodhyd.2019.105204
- [14] HÖFER, Rainer, Franz JOST, Milan J. SCHWUGER, Rolf SCHARF, Jürgen GEKE, Josef KRESSE, Herbert LINGMANN, Rudolf VEITENHANSL a Werner ERWIED. Foams and Foam Control. In: *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* [online]. 2000. Dostupné z: doi:10.1002/14356007.a11_465
- [15] DUTT, Sunil, Prem Felix SIRIL a Samy REMITA. Swollen liquid crystals (SLCs): A versatile template for the synthesis of nano structured materials. *RSC Advances* [online]. 2017, **7**(10), 5733–5750. ISSN 20462069. Dostupné z: doi:10.1039/c6ra26390a
- [16] PRENTICE, William E. a Michael L. VOIGHT. *Techniques in musculoskeletal rehabilitation* [online]. 2001. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=zwdtAAAAMAAJ&q=isbn:9780071354981&dq=isbn:9780071354981&hl=cs&sa=X&ved=0ahUKEwjwodPp4LXoAhVtwcQBHUBOBaMQ6AEIKDAA>
- [17] HUNT, Richard H. a G.N.J. TYTGAT. *Helicobacter pylori: Basic Mechanisms to Clinical Cure* [online]. 1998. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=Xhe2wLrSz58C&pg=PA447&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [18] RATNER, Buddy D., Allan S. HOFFMAN, Frederick J. SCHOEN a Jack E. LEMONS. Biomaterials science: an introduction to materials in medicine. *Chemical Engineering*. 2004, 26.
- [19] ALBAHRANI, S. M.B., D. PHILIPPON, P. VERGNE a J. M. BLUET. A review of in situ methodologies for studying elastohydrodynamic lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* [online]. 2016, **230**(1), 86–110. ISSN 2041305X. Dostupné z: doi:10.1177/1350650115590428
- [20] TIBIRIÇÁ, Cristiano Bigonha, Francisco Júlio DO NASCIMENTO a Gherhardt RIBATSKI. Film thickness measurement techniques applied to micro-scale two-phase flow systems. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2010, **34**(4), 463–473. ISSN 08941777. Dostupné z: doi:10.1016/j.expthermflusci.2009.03.009
- [21] SHEDD, T A, T A NEWELL a Air CONDITIONING. An Automated Optical Liquid Film Thickness Measurement Method Amana Refrigeration , Inc . Carrier Corporation Caterpillar , Inc . Copeland Corporation Dayton Thermal Products Delphi Harrison Thermal Systems Eaton Corporation Ford Motor Company Frigidaire. 1997, **61801**(December).
- [22] KALOGIANNIS, Konstantinos, Cristinel MARES, Romeo P. GLOVNEA a Stathis IOANNIDES. Elastohydrodynamic film thickness response to harmonic vibrations. *IMETI 2008 - International Multi-Conference on Engineering and Technological Innovation, Proceedings*. 2008, **1**(April), 44–49.

- [23] MYANT, Connor, Mark FOWELL, Hugh A. SPIKES a Jason R. STOKES. An investigation of lubricant film thickness in sliding compliant contacts. *Tribology Transactions* [online]. 2010, **53**(5), 684–694. ISSN 10402004. Dostupné z: doi:10.1080/10402001003693109
- [24] HAMROCK, Bernard J a Duncan DOWSON. Elastohydrodynamic Lubrication of Elliptical Contacts for Materials of Low Elastic Modulus I—Fully Flooded Conjunction. *Journal of Lubrication Technology* [online]. 1978, **100**(2), 236–245. ISSN 0022-2305. Dostupné z: doi:10.1115/1.3453152
- [25] PUTIGNANO, Carmine a Daniele DINI. Soft Matter Lubrication: Does Solid Viscoelasticity Matter? *ACS Applied Materials and Interfaces* [online]. 2017, **9**(48), 42287–42295. ISSN 19448252. Dostupné z: doi:10.1021/acsami.7b09381
- [26] DOČKAL, K. Analýza mazaného kontaktu poddajných těles. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 68 s. Vedoucí diplomové práce Ing. David Nečas.
- [27] REDDYHOFF, T., J. H. CHOO, H. A. SPIKES a R. P. GLOVNEA. Lubricant flow in an elastohydrodynamic contact using fluorescence. *Tribology Letters* [online]. 2010, **38**(3), 207–215. ISSN 10238883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-010-9592-6
- [28] MYANT, C., T. REDDYHOFF a H. A. SPIKES. Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts. *Tribology International* [online]. 2010, **43**(11), 1960–1969. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:10.1016/j.triboint.2010.03.013
- [29] BONGAERTS, J. H.H., J. P.R. DAY, C. MARRIOTT, P. D.A. PUDNEY a A. M. WILLIAMSON. In situ confocal Raman spectroscopy of lubricants in a soft elastohydrodynamic tribological contact. *Journal of Applied Physics* [online]. 2008, **104**(1). ISSN 00218979. Dostupné z: doi:10.1063/1.2952054
- [30] COURTNEY-PRATT, J. S. a G. K. TUDOR. An Analysis of the Lubrication between the Piston Rings and Cylinder Wall of a Running Engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers* [online]. 1946. ISSN 0020-3483. Dostupné z: doi:10.1243/pime_proc_1946_155_048_02
- [31] LANE, T. B. a J. R. HUGHES. A study of the oil-film formation in gears by electrical resistance measurements. *British Journal of Applied Physics* [online]. 1952, **3**(10), 315–318. ISSN 05083443. Dostupné z: doi:10.1088/0508-3443/3/10/305
- [32] GUANGTENG, G, A. OLVER a H. SPIKES. Contact resistance measurements in mixed lubrication. *The advanced frontier of engineering tribology, Proc. 1999 STLE/ASME H.S. Cheng Tribology Surveillance*. 1999, 64–71.
- [33] CUI, Ziqiang, Chengyi YANG, Benyuan SUN a Huaxiang WANG. Liquid film thickness estimation using electrical capacitance tomography. *Measurement Science Review* [online]. 2014, **14**(1), 8–15. ISSN 13358871. Dostupné z: doi:10.2478/msr-2014-0002
- [34] YU, Yongxin, Ling MA, Hongyu YE, Yizhong ZHENG a Yuzhen MA. Design of instantaneous liquid film thickness measurement system for conductive or non-conductive fluid with high viscosity. *AIP Advances* [online]. 2017, **7**(6). ISSN 21583226. Dostupné z: doi:10.1063/1.4985721

- [35] SAITO, Y., K. MISHIMA, Y. TOBITA, T. SUZUKI a M. MATSUBAYASHI. Measurements of liquid-metal two-phase flow by using neutron radiography and electrical conductivity probe. *Experimental Thermal and Fluid Science* [online]. 2005, **29**(3), 323–330. ISSN 08941777. Dostupné z: doi:10.1016/j.expthermflusci.2004.05.009
- [36] POLL, G. a A. GABELLI. Formation of lubricant film in rotary sealing contacts: Part II-A new measuring principle for lubricant film thickness. *Journal of Tribology* [online]. 1992, **114**(2), 290–296. ISSN 15288897. Dostupné z: doi:10.1115/1.2920886
- [37] SEDLÁČEK, Vladimír. *Povrchy a povlaky kovů*. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1992, 176 s.: il. ISBN 80-01-00799-5. Dostupné z: https://primo.lib.vutbr.cz/primoexplore/fulldisplay?vid=420BUT&search_scope=Everything&tab=default_tab&docid=420BUT_Aleph000009783&lang=cs_CZ&context=L&adaptor=LocalSearchEngine&query=any,contains,uprava_povrchu_kovu&offset=0
- [38] OF, Esign a Roducts T O BE. Design guide. *Fire Prevention and Fire Engineers Journals* [online]. 2007, (MAR.). ISSN 14783576. Dostupné z: doi:10.1680/dofrcs.64447.205
- [39] MACHETANZ, Marek. Vybrané vlastnosti bimetalu Ti-CrNi [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <<https://theses.cz/id/ur0aj7/>>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Vedoucí práce Eva Mazancová.
- [40] CVD [online]. Dostupné z: <https://www.ionbond.com/cz/technologie/cvd/>
- [41] ZHANG, Qi, Daniel SANDO a Valanoor NAGARAJAN. Chemical route derived bismuth ferrite thin films and nanomaterials. *Journal of Materials Chemistry C* [online]. 2016, **4**(19), 4092–4124. ISSN 20507526. Dostupné z: doi:10.1039/c6tc00243a
- [42] PVD [online]. Dostupné z: <https://www.pvd.cz/pvd.html>
- [43] FARAJI, Ghader, Hyoung Seop KIM a Hessam Torabzadeh KASHI. *Severe plastic deformation: Methods, processing and properties* [online]. 2018. ISBN 9780128135181. Dostupné z: doi:10.1016/C2016-0-05256-7
- [44] RUML, Vladimír; SOUKUP, Miloslav. *Galvanické pokovování*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1981. 324 s. Dostupné z: <https://www.spalena53.cz/galvanicke-pokovovani/>
- [45] YEOH, Lai Seng, Kok Cheng CHONG a Susan LI. Failure analysis for probe mark induced galvanic corrosion and bond degradation during HAST. *Proceedings of the International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits, IPFA* [online]. 2013, 303–306. Dostupné z: doi:10.1109/IPFA.2013.6599172
- [46] *Žárové stříkání* [online]. Dostupné z: <https://www.plasmametal.cz/zarove-strikani#zarove-strikani>
- [47] OHMORI, Akira. Thermal spray technology. *Japanese Journal of Tribology*. 1996, **41**(11), 1192–1203. ISSN 10457828.
- [48] *Povrchové upravy* [online]. Dostupné z: <https://www.plasmametal.cz/povrchove-upravy>

- [49] LAN, Pixiang, Emerson E. NUNEZ a Andreas A. POLYCARPOU. Advanced Polymeric Coatings and Their Applications: Green Tribology. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials* [online]. 2020, (January), 345–358. Dostupné z: doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.11466-3
- [50] HIDBER, Pirmin C., Wolfgang HELBIG, Enoch KIM a George M. WHITESIDES. Microcontact Printing of Palladium Colloids: Micron-Scale Patterning by Electroless Deposition of Copper. *Langmuir* [online]. 1996, **12**(5), 1375–1380. ISSN 0743-7463. Dostupné z: doi:10.1021/la9507500
- [51] HSU, Chih Hao, Ming Chih YEH, Kung Lung LO a Li Jen CHEN. Application of microcontact printing to electroless plating for the fabrication of microscale silver patterns on glass. *Langmuir* [online]. 2007, **23**(24), 12111–12118. ISSN 07437463. Dostupné z: doi:10.1021/la7023988
- [52] XU, D., E. T. KANG, K. G. NEOH, Yan ZHANG, A. A.O. TAY, S. S. ANG, M. C.Y. LO a K. VAIDYANATHAN. Selective electroless plating of copper on (100)-oriented single crystal silicon surface modified by UV-induced coupling of 4-vinylpyridine with the H-Terminated silicon. *Journal of Physical Chemistry B* [online]. 2002, **106**(48), 12508–12516. ISSN 10895647. Dostupné z: doi:10.1021/jp026308p
- [53] SAWADA, Susumu, Yoshitake MASUDA, Peixin ZHU a Kunihiro KOUMOTO. Micropatterning of copper on a poly(ethylene terephthalate) substrate modified with a self-assembled monolayer. *Langmuir* [online]. 2006, **22**(1), 332–337. ISSN 07437463. Dostupné z: doi:10.1021/la051538r
- [54] FU, Yongqing, Nee LAM LOH, Andrew W. BATCHELOR, Xiaodong ZHU, Kewei XU a Jaiwen HE. Preparation and fretting wear behavior of ion-beam-enhanced-deposition CrN films. *Materials Science and Engineering A* [online]. 1999, **265**(1–2), 224–232. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/S0921-5093(98)01148-4
- [55] ABELA, S. *Physical vapour deposition of magnesium alloys* [online]. 2010. ISBN 9781845695378. Dostupné z: doi:10.1533/9781845699451.2.294
- [56] DEMAREE, J. D., C. G. FOUNTZOULAS a J. K. HIRVONEN. Chromium nitride coatings produced by ion beam assisted deposition. *Surface and Coatings Technology* [online]. 1996, **86–87**(PART 1), 309–315. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/S0257-8972(96)03035-6
- [57] VOEVODIN, A. A., M. S. DONLEY a J. S. ZABINSKI. Pulsed laser deposition of diamond-like carbon wear protective coatings: A review. *Surface and Coatings Technology* [online]. 1997, **92**(1–2), 42–49. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/S0257-8972(97)00007-8
- [58] LIU, Y., A. ERDEMIR a E. I. MELETIS. A study of the wear mechanism of diamond-like carbon films. *Surface and Coatings Technology* [online]. 1996, **82**(1–2), 48–56. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/0257-8972(95)02623-1
- [59] DOUBRAVA, Marek. *STRUKTURA A VLASTNOSTI POVLAKŮ PŘIPRAVOVANÝCH PVD TECHNOLOGIÍ STRUCTURE AND PROPERTIES OF COATINGS PRODUCED BY PVD TECHNOLOGY BAKALÁŘSKÁ PRÁCE BACHELOR ' S THESIS AUTHOR SUPERVISOR BRNO 2016 Marek Doubrava doc . Ing . Ladislav Čelko , Ph . D .* 2016. ISBN 9780815520375.

- [60] AISENBERG, Sol a Ronald CHABOT. Ion-beam deposition of thin films of diamondlike carbon. *Journal of Applied Physics* [online]. 1971, **42**(7), 2953–2958. ISSN 00218979. Dostupné z: doi:10.1063/1.1660654
- [61] BOXMAN, R. L. a V. N. ZHITOMIRSKY. Vacuum arc deposition devices. *Review of Scientific Instruments* [online]. 2006, **77**(2). ISSN 00346748. Dostupné z: doi:10.1063/1.2169539
- [62] CHUN, Sung Yong a Akiyoshi CHAYAHARA. Pulsed vacuum arc deposition of multilayers in the nanometer range. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2000, **132**(2–3), 217–221. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/S0257-8972(00)00850-1
- [63] ANDERS, Simone, André ANDERS a Ian BROWN. Macroparticle-free thin films produced by an efficient vacuum arc deposition technique. *Journal of Applied Physics* [online]. 1993, **74**(6), 4239–4241. ISSN 00218979. Dostupné z: doi:10.1063/1.354431
- [64] SOONMIN, Ho, S. A. VANALAKAR, Ahmed GALAL a Vidya Nand SINGH. A review of nanostructured thin films for gas sensing and corrosion protection. *Mediterranean Journal of Chemistry* [online]. 2018, **7**(6), 433–451. ISSN 20283997. Dostupné z: doi:10.13171/MJC7618111916HS
- [65] PACVD [online]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/povlakovani-nastroju-metodou-pacvd.html>
- [66] PECVD [online]. Dostupné z: <http://www.plasma-therm.com/pecvd.html>
- [67] GÜNZEL, Martin. Metody depozice tenkých vrstev pomocí nízkoteplotního plazmatu [online]. České Budějovice, 2013 [cit. 2020-06-03]. Dostupné z: <<https://theses.cz/id/dywyo1/>>. Diplomová práce. Jihočeská Univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta. Vedoucí práce doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.
- [68] MAI, Y., S. KLEIN, R. CARIUS, J. WOLFF, A. LAMBERTZ, F. FINGER a X. GENG. Microcrystalline silicon solar cells deposited at high rates. *Journal of Applied Physics* [online]. 2005, **97**(11), 1–12. ISSN 00218979. Dostupné z: doi:10.1063/1.1927689
- [69] JUHASZ, J A a S M BEST. 6 - Surface modification of biomaterials by calcium phosphate deposition. In: Rachel B T - Surface Modification of Biomaterials WILLIAMS, ed. *Woodhead Publishing Series in Biomaterials* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, 2011, s. 143–169. ISBN 978-1-84569-640-5. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1533/9780857090768.1.143>
- [70] HASSAN, Mohammad M. *Antimicrobial coatings for textiles* [online]. B.m.: Elsevier Inc., 2017. ISBN 9780128119822. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-811982-2.00016-0
- [71] SILVA-BERMUDEZ, P, G RAMIREZ a S E RODIL. 11 - Corrosion resistant coatings for dental implants. In: Yu B T - Bio-Tribocorrosion in Biomaterials and Medical Implants YAN, ed. *Woodhead Publishing Series in Biomaterials* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, 2013, s. 250–308. ISBN 978-0-85709-540-4. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1533/9780857098603.3.250>
- [72] ALEKSANYAN, M. Magnetron Sputtering Techniques and Their Applications at Gas Sensors Manufacturing. *Armenian Journal of Physics*. 2019, **12**(1), 62–77. ISSN 1829-1171.

- [73] REISEL, Guido a Annett DORNER-REISEL. Hydrogen containing DLC coatings on UHMW-PE deposited by r.f.-PECVD. *Diamond and Related Materials* [online]. 2007, **16**(4-7 SPEC. ISS.), 1370–1373. ISSN 09259635. Dostupné z: doi:10.1016/j.diamond.2006.11.095
- [74] PENG, X. L., Z. H. BARBER a T. W. CLYNE. Surface rough of diamond-like carbon films prepared using various techniques. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2001. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/S0257-8972(00)01139-7
- [75] TIMAN IDRIS GASAB, Musab, Masahiro UCHIYAMA, Tatsuyuki NAKATANI, Alireza VALANEZHAD, Ikuya WATANABE a Hiroshi FUJIYAMA. Advanced DLC coating technique on silicone-based tubular medical devices. *Surface and Coatings Technology* [online]. 2016, **307**, 1084–1087. ISSN 02578972. Dostupné z: doi:10.1016/j.surfcoat.2016.06.067
- [76] TAVARES, C. J., S. M. MARQUES, L. REBOUTA, S. LANCEROS-MÉNDEZ, V. SENCADAS, C. M. COSTA, E. ALVES a A. J. FERNANDES. PVD-Grown photocatalytic TiO₂ thin films on PVDF substrates for sensors and actuators applications. *Thin Solid Films* [online]. 2008, **517**(3), 1161–1166. ISSN 00406090. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2008.06.024
- [77] YOU, Y. Z., Y. S. KIM, D. H. CHOI, H. S. JANG, J. H. LEE a Daeil KIM. Electrical and optical study of ITO films on glass and polymer substrates prepared by DC magnetron sputtering type negative metal ion beam deposition. *Materials Chemistry and Physics* [online]. 2008, **107**(2–3), 444–448. ISSN 02540584. Dostupné z: doi:10.1016/j.matchemphys.2007.08.015
- [78] MARIAN, Max, Tim WEIKERT a Stephan TREMMEL. On Friction Reduction by Surface Modifications in the TEHL Cam/Tappet-Contact-Experimental and Numerical Studies. *Coatings* [online]. 2019, **9**(12), 843. ISSN 2079-6412. Dostupné z: doi:10.3390/coatings9120843
- [79] JEON, Noo Li, Ralph G. NUZZO, Younan XIA, Milan MRKSICH a George M. WHITESIDES. Patterned Self-Assembled Monolayers Formed by Microcontact Printing Direct Selective Metalization by Chemical Vapor Deposition on Planar and Nonplanar Substrates. *Langmuir* [online]. 1995, **11**(8), 3024–3026. ISSN 15205827. Dostupné z: doi:10.1021/la00008a029

7 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 3-1	Povrchově aktivní látka, převzato a upraveno z [15].....	18
Obr. 3-2	Schéma optické metody interferometrie, převzato a upraveno z [22].....	20
Obr. 3-3	Schéma kontaktu, převzato a upraveno z [25].....	21
Obr. 3-4	Schéma metody fluorescenční mikroskopie, převzato a upraveno z [3]	22
Obr. 3-5	Schéma kontaktu mezi vzorkem a diskem, převzato a upraveno z [28].....	23
Obr. 3-6	Schéma metody Ramanovy spektroskopie, převzato a upraveno z [29]	24
Obr. 3-7	Schéma metody elektrického odporu, převzato a upraveno z [32]	26
Obr. 3-8	Schéma akustické metody, převzato a upraveno z [19]	27
Obr. 3-9	Schéma nukleonické metody, převzato a upraveno z [35]	28
Obr. 3-10	Schéma magnetické metody, převzato a upraveno z [36]	28
Obr. 3-11	Schéma metody CVD, převzato a upraveno z [41]	30
Obr. 3-12	Schéma metody PVD, převzato a upraveno z [43].....	31
Obr. 3-13	Schéma metody galvanického pokovování, převzato a upraveno z [45].....	32
Obr. 3-14	Schéma metody žárového stříkání, převzato a upraveno z [49]	32
Obr. 3-15	Schéma metody PSL, převzato a upraveno z [51].....	33
Obr. 3-16	Schéma metody PML, převzato a upraveno z [51]	34
Obr. 3-17	Schéma metody leptání kyselinou, převzato a upraveno z [52]	35
Obr. 3-18	Schéma metody depozice iontovým paprskem, převzato a upraveno z [54]	36
Obr. 3-19	Schéma metody depozice iontovým paprskem u DLC povlaků, převzato a upraveno z [60].....	37
Obr. 3-20	Schéma metody vakuového obloukového nanášení, převzato a upraveno z [62].....	38
Obr. 3-21	Schéma metody pulzní laserové depozice, převzato a upraveno z [64]	39
Obr. 3-22	Schéma metody PECVD, převzato a upraveno z [68]	40
Obr. 3-23	Schéma metody magnetronového naprašování, převzato a upraveno z [72]	40
Obr. 4-1	Vzorky s povlaky a) čistý chromový povlak b) povlak a-C-H-W (amorfní uhlík hydrogenovaný s wolframem) c) povlak a-C-H (amorfní uhlík hydrogenovaný)....	46
Obr. 4-2	Schéma zařízení MTM.....	46
Obr. 4-3	PDMS vzorek s chromovým povlakem použitý při měření.....	47

Obr. 4-4	Závislost koeficientu tření na průměrné rychlosti otáčení	48
Obr. 4-5	Závislost koeficientu tření na čase u nepovlakovaného vzorku	49
Obr. 4-6	Závislost koeficientu tření na čase u povlakovaného vzorku.....	49
Obr. 4-7	Rozdíly mezi koeficienty tření při různých měřeních	50

8 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1	Drsnosti vzorku bez povlaku a s povlakem.....	47
-----------------	---	----