

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na popis metod pro experimentální studium mazacích filmů v kontaktu strojních součástí. Převážně však pro nekonformní povrchy pro něž je typické elastohydrodynamické a smíšené mazání. Metody zde jsou rozděleny podle měřené veličiny na metody měření tloušťky mazacího filmu, měření kontaktního tlaku a měření teploty. U jednotlivých metod je stručně uveden princip, popis zařízení, použití a vlastnosti. Na závěr je uvedeno zhodnocení současného stavu a směr dalšího vývoje.

Klíčová slova

Tribologie, elastohydrodynamické mazání, nekonformní povrchy, tloušťka mazací vrstvy, kontaktní tlak a teplota v kontaktní oblasti.

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused on the description of methods for experimental study of lubrication films in contact of machine parts, particularly for non-conformal surfaces, for which elastohydrodynamic and mixed of lubrication is typical. The methods are divided according to measured quantity into the methods for film thickness measurement, contact pressure measurement and temperature measurement. It was described the principle of these methods, the equipment, application and characteristics. Finally, evaluation of current status and further development are included.

Keywords

Tribology, elastohydrodynamic lubrication, non conformal surfaces, thickness of lubrication layer, contact pressure and temperature in contact area.

Bibliografická citace: KUČERA, O. *Experimentální studium mazacích filmů v kontaktu strojních součástí s nekonformními povrchy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 35 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Vaverka, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tuto bakalářskou práci, jsem vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Michala Vaverky Ph.D a v seznamu jsem uvedl všechny zdroje.

Ondřej Kučera

V Brně dne: 15. května 2008

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval rodině a blízkým za morální podporu a zvláště potom vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Michalovi Vavrkovi Ph.D. za odbornou pomoc, poskytnutou literaturu, věcné připomínky a dobré rady.

OBSAH

1 ÚVOD	13
2 FORMULACE PROBLÉMU A VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ	14
3 CÍL PRÁCE	17
4 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	18
4.1 Metody měření tloušťky mazacího filmu	18
4.1.1 Interferometrie	18
4.1.2 Spektroskopická reflektometrie	21
4.1.3 Přímá metoda	23
4.2 Metody měření kontaktního tlaku	24
4.2.1 Ramanova spektroskopie	25
4.2.2 Přímá metoda	26
4.2.3 Měření tlaku pomocí deformace křemíkové vrstvy	27
4.2.4 Měření tlaku pomocí ultrazvuku	28
4.3 Metody měření teploty	29
4.3.1 Pyrometry	30
4.3.2 Přímá metoda	30
5 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	31
6 ZÁVĚR	32
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	33
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	34
9 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	35

1 ÚVOD

1

Tribologie je věda zabývající se třením, mazáním a opotřebením. Tyto tři procesy probíhají ve všech strojích, zařízeních a mechanismech, kde dochází k relativnímu pohybu součástí, ať už se jedná o ložiska, ozubená kola, nebo jiné součásti. Tření jako takové je v mnoha aplikacích základním principem činnosti, asi nejznámější jsou brzdy, třecí spojky, ale i šroubové spoje by bez tření nemohly fungovat. U ostatních aplikací tření pouze snižuje účinnost, je zdrojem tepla a často i příčinou opotřebením. Proto bylo vždy snahou stavitelů a konstruktérů snížit tření na co nejmenší možnou míru. Zde se nabízejí dva způsoby jak tření snížit, tím prvním je snížit součinitel tření a druhým změnit kluzné tření na valivé. Součinitel tření snížíme zlepšením struktury povrchu, nebo použitím maziva.

Hlavním úkolem maziva je oddělení povrchů součástí, tím právě dosáhneme snížení součinitele tření. Povrchy součástí se nepohybují přímo po sobě, ale po vrstvě maziva. Tuto podmínku splňuje řada látek, avšak od maziva dále požadujeme odvod vznikajícího tepla, nečistot, případně ochrana proti korozi apod. Maziva jako taková lze rozdělit na tuhá, plastická a oleje. Oddělení povrchů také podstatně napomáhá k zabránění vzniku opotřebením.

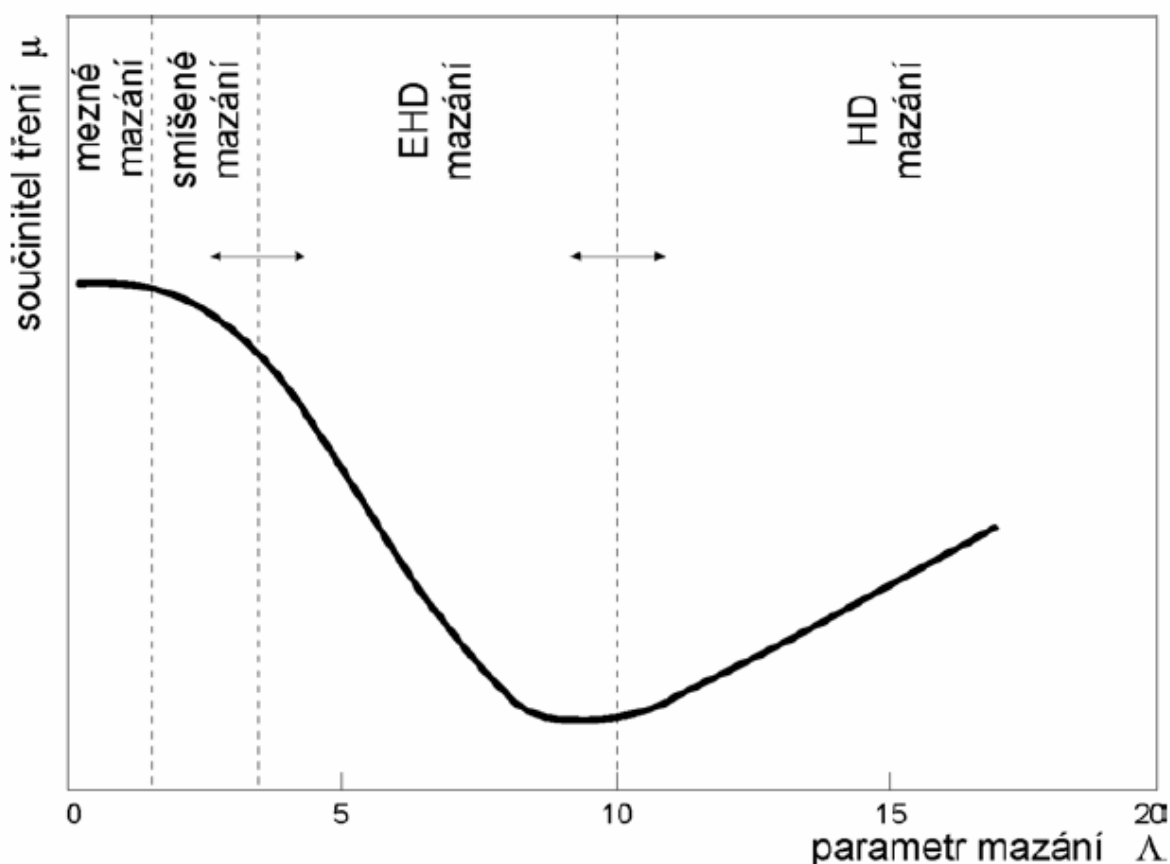
2 FORMULACE PROBLÉMU A VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

V současné době kdy stále stoupá cena energií a fosilní paliva pomalu docházejí, je snahou všech nejen výrobců a konstruktérů strojů o její hospodárné využití. To lze docílit zvýšením účinnosti strojů. Účinnost je obecně definovaná jako podíl vstupující a využitelné vystupující energie. Rozdíl mezi vystupující a využitelnou vystupující energií tvoří ztráty. V reálném světě nelze dosáhnout stavu kdy by byly ztráty nulové, můžeme je pouze snižovat. Největší podíl na ztrátách má tření mezi materiály, kdy se mechanická energie mění na tepelnou. Tímto případem se zabývá tribologie, jak již bylo uvedeno v úvodu tření lze podstatně snížit použitím vhodných maziv.

Aby mazivo mohlo správně plnit svou funkci je důležité znát podmínky za kterých pracuje. Mazání jako takové lze rozdělit pomocí režimů mazání na hydrodynamické, elastohydrodynamické, smíšené a mezní. Režim mazání závisí na parametru mazání Λ [2].

$$\Lambda = \frac{h_{\min}}{R_{\text{red}}} = \frac{h_{\min}}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}}$$

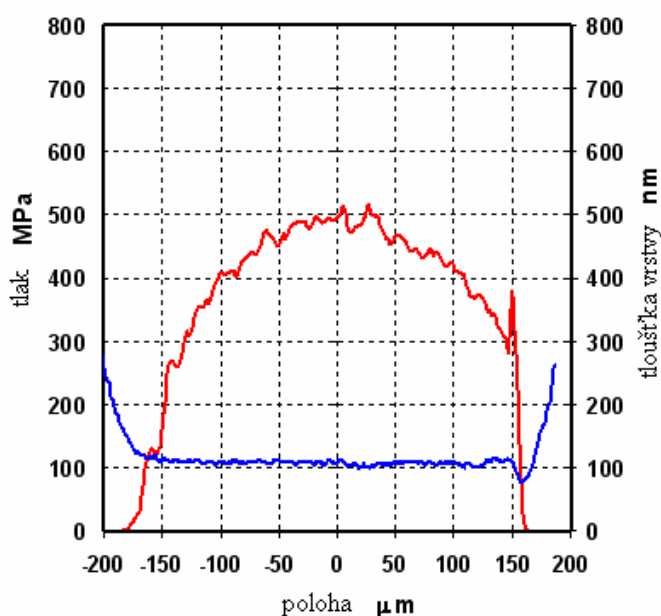
Kde $h_{\min}$ je nejmenší tloušťka mazacího filmu, R_{a1} a R_{a2} jsou střední drsnosti povrchů součástí. Na Obr. 1 je patrná závislost režimu mazání a součinitele tření na parametru mazání.



Obr. 1 Závislost režimu mazání a součinitele tření na parametru mazání [2]

Největší vrstvu maziva lze dosáhnout u hydrodynamického mazání, jsou to řádově jednotky mikrometrů. Povrchy těles se v tomto případě neovlivňují, je ho možné sledovat např. u kluzných ložisek. Při snížení vrstvy maziva na hodnotu odpovídající elastickým deformacím povrchů těles dochází k elastohydrodynamickému mazání (EHD, EHL). Tloušťka mazacího filmu se pohybuje řádově v jednotkách až desítkách nanometrů. O smíšeném mazání mluvíme pokud dojde ke styku nerovností povrchů těles, při protržení mazacího filmu nastává mezní mazání.

Při styku těles s nekonformními povrchy nastává nejčastěji EHD mazání. Tomuto režimu odpovídá rozsah parametru mazání přibližně od 3 do 10 [2]. Charakteristickým znakem je takřka paralelní vrstva maziva v kontaktu se zúžením ve výstupní oblasti. Rozložení tlaku odpovídá Hertzovu s druhým maximem ve výstupní oblasti. Toto druhé maximum se nazývá elastohydrodynamické, nebo také Petruševičovo. Oba tyto jevy jsou patrné z Obr. 2. V praxi se EHD mazání vyskytuje u ozubených kol, valivých ložisek, mezi vačkou a zdvihátkem apod. EHD mazání je označováno za největší objev tribologie.



Obr. 2 Rozložení kontaktního tlaku a tloušťky mazací vrstvy – získáno na základě experimentálních dat [3]

Tloušťka mazací vrstvy a rozložení kontaktního tlaku závisí na mnoha vlivech, mezi nejdůležitější patří zatížení a geometrie těles, relativní rychlost povrchů vůči sobě, viskozita maziva a struktura povrchů. Viskozita závisí na teplotě a tlaku. Vzhledem k tomu že všechny důležité veličiny jsou navzájem závislé je velmi problematické vytvořit matematický model.

Pokud chceme studovat vliv druhů maziv, mazivostních přísad, struktury povrchu, uměle vytvořených mikrodůlků a jiných provozních vlivů musíme to většinou provést experimentálně. Proto je tato práce zaměřena na problematiku experimentálního studia mazacích filmů.

Zvyšování účinnosti není jediný důvod pro zkoumání mazacích filmů. Neméně důležité v strojírenské praxi je určit bezpečnosti vůči mezním stavům a trvanlivosti. Mezní stavy, které souvisejí s kontaktem těles jsou spjaty s nadměrným opotřebením. To rozdělujeme na kontaktní únavu, zadírání, adhezivní a abrazivní opotřebením. Kontaktní únavě lze zabránit snížením napětí pod mez kontaktní únavy. Zadírání a adhezivní opotřebením je způsobeno příliš tenkou vrstvou maziva. Abrazivní opotřebením způsobují nečistoty vnikající do kontaktní oblasti. Filtrací maziva je lze odstranit.

3 CÍL PRÁCE

3

Cílem této práce je vytvořit přehled experimentálních metod pro studium mazacích filmů v kontaktu těles s nekonformními povrchy. Metody jsou zde rozděleny podle měřené veličiny na metody měření tloušťky mazacího filmu, měření kontaktního tlaku a měření teploty. Také viskozita maziva se měří, ale jelikož se jedná o měření základní vlastnosti maziva a nezjišťuje se přímo v kontaktu nebude v této práci uvedena.

4 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

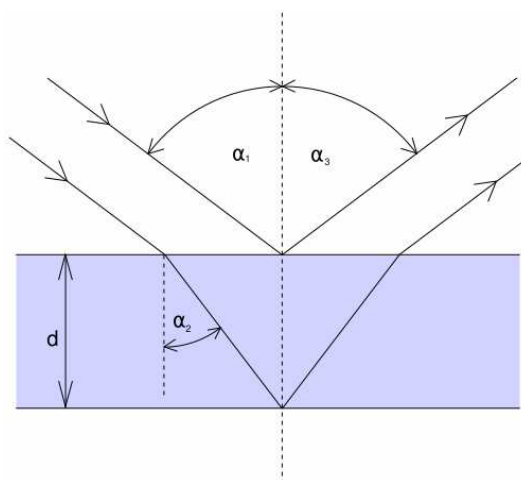
Tato kapitola podává přehled současného stavu v oblasti experimentálního studia mazacích filmů v kontaktu strojních součástí s nekonformními povrchy na základě existující literatury. Je rozdělena na měření tloušťky, tlaku a teploty

4.1 Metody měření tloušťky mazacího filmu

Patrně nejdůležitější veličina, kterou můžeme zkoumat u kontaktu dvou těles je právě tloušťka mazací vrstvy mezi nimi. Její hodnota spolu se strukturou povrchů udává režim mazání od hydrodynamického až po mezní. U součástí s nekonformním stykem povrchů je to nejčastěji elastohydrodynamické mazání. Pro tento režim mazání je charakteristická tloušťka mazací vrstvy řádově stejně velká jako velikost elastických deformací povrchů součástí tj. jednotky nanometrů. Pro zajištění správné funkce je nezbytné zajištění dostatečné vrstvy maziva mezi povrchy, tak aby kontaktní povrchy byly odděleny. V opačném případě hrozí nadměrné opotřebení, zadírávání apod. Pro měření tloušťky mazací vrstvy je možné použít jednu z následujících metod.

4.1.1 Interferometrie

Princip: Interferometrie je založena na principu interference světla, tu lze nejčastěji pozorovat na mýdlových bublinách, vrstvě oleje na vodní hladině a obecně na tenkých vrstvách. Jedním z nejjednodušších případů je dopad světelných paprsků na planoparalelní desku, což je případ tenké rovinné vrstvy, jejíž obě strany jsou rovnoběžné [4]. Světlo dopadající na tuto desku pod určitým úhlem se částečně odráží a částečně se láme do planoparalelní vrstvy. Světlo procházející vrstvou se odráží od jejího spodního okraje a láme se zpět do původního prostředí. Jak je patrné z Obr. 3. Tyto paprsky jsou zpožděny oproti těm, které se odrazily od horního okraje vrstvy. Tím vzniká fázový rozdíl mezi odraženou a lomenou vlnou. Při přechodu zpět do původního prostředí spolu interferují tzn. některé vlnové délky se zesilují a jiné zeslabují. Při použití monochromatického zdroje světla pozorujeme černé a bílé proužky, kdežto zdroje s více vlnovými délkami např. bílé světlo, vytvářejí duhově zbarvené proužky [1].



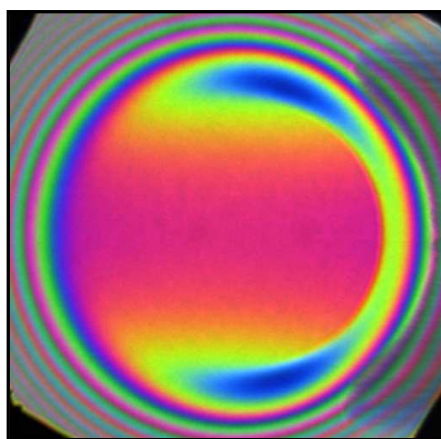
Obr. 3 Princip interference [4]

Popis metody: Interferometrie je v současnosti jedna z nejpoužívanějších metod pro výzkum tenkých mazacích filmů. Poprvé ji aplikovali W. B. Hardy a J. K. Hardy v roce 1919. Svůj výzkum zaměřili na konvexní hodinová skla. Pro výzkum EHD mazání bodového kontaktu ji použili J. F. Archard a M. T. Kirk. Svou studii publikovali v roce 1961, kde podmínky reálných tribologických soustav modelovali v kontaktu dvou válců s mimoběžnými osami. Pro osvětlení kontaktu použili zdroj bílého světla. V kontaktní oblasti pozorovali interferenční proužky stejné tloušťky, jejichž barvy se měnily v závislosti na zatížení a rychlosti třecích povrchů. Jejich studium bylo omezeno na oblast EHD mazání poddajných třecích povrchů. Rok poté popsali Gohar a Cameron aplikaci optické interferometrie na kontaktu ocelové kuličky a skla s vysokým indexem lomu. Ze získaných interferogramů se jim podařilo získat detailní mapy tloušťky mazacího filmu, tyto porovnali s numerickým řešením [1].

Základ jejich zařízení se používá dodnes. Pro dosažení vyšších tlaků se používají kuličky z chromové oceli a karbidu wolframu. Kromě kuliček se používají i soudečky. Vývojem také prošly kruhové desky. Základním materiálem je korunové sklo, nebo izotropní safír. Na spodní stranu desky se nanáší vrstva oxidu křemičitého a chromu, na horní stranu protiodrazová vrstva. Díky vrstvě oxidu křemičitého byla zmenšena minimální měřitelná tloušťka mazacího filmu. Ten má velmi podobný index lomu jako většina maziv, tzn. zvětšíme měřenou tloušťku o známou hodnotu [2]. Na osvětlení kontaktu se používá převážně halogenových a xenonových výbojek. Interferogramy jsou snímány pomocí digitálních kamer jedno až tří-čipových.

Na přesnost měření má významný vliv kalibrace měřícího zařízení. Ta se obvykle provádí na suchém a statickém kontaktu, porovnáním s výsledky Hertzovy úlohy, přiřadíme jednotlivým barvám odpovídající tloušťku mazací vrstvy.

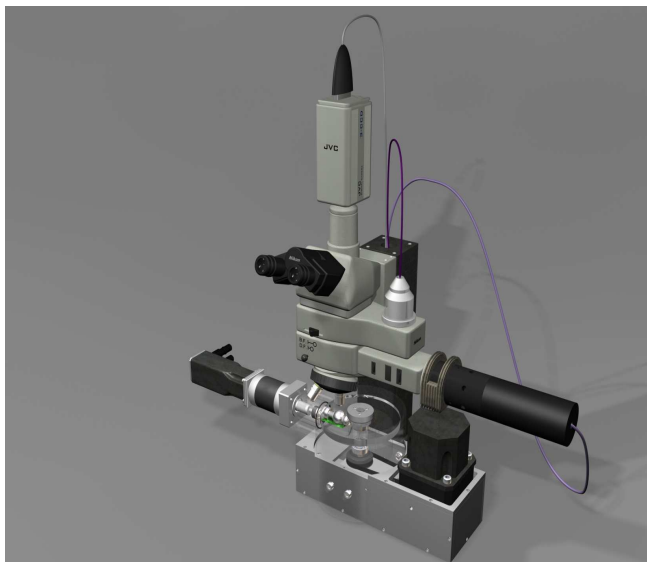
Z jednotlivých barevných proužků získaných interferogramů, je možné určit rozložení tloušťky mazací vrstvy v kontaktu. Dnes se k tomuto účelu využívají počítače, ty umožňují pracovat s výsledky jako s 3 D mapami, nebo jejich řezy.



Obr. 4 Příklad interferogramu [5]

Popis zařízení: Jedno možné typické uspořádání se nachází na fakultě strojního inženýrství, VUT v Brně. Základními částmi tohoto interferometru, mezi kterými dochází ke kontaktu, jsou ocelová kulička a skleněný disk. Obě tyto pohyblivé součásti jsou samostatně poháněny servomotory, tak aby bylo možné dosáhnout

různých relativních rychlostí a prokluzu. Kontakt je uložen v izolované komoře s mazivem, kde je možné měřit jeho teplotu, po připojení dalšího zařízení ji i regulovat. Pro osvětlení se používá halogenová nebo xenonová výbojka. Interferogramy pozorujeme mikroskopem, nebo je snímáme digitální kamerou [2]. Zde je důležitá synchronizace zdroje světla, kamery a pokud používáme kuličku s mikrodůlkem, tak i rychlosti kuličky. Při použití kamery se data ukládají do počítače a dále se zpracovávají.

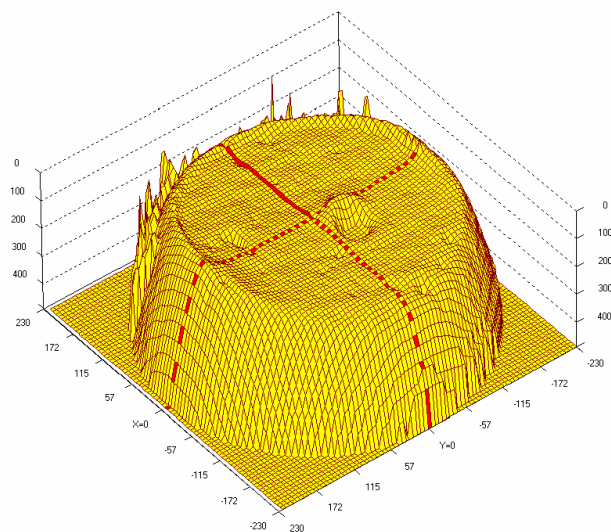


Obr. 5 Interferometr [3]

Použití: Tato metoda je v současnosti jedna z nejpoužívanějších pro měření tloušťky mazacího filmu. Je používána pro výzkum mazacích filmů při různých hodnotách prokluzu, vlivu struktury povrchu, vlivu uměle vytvořených mikrodentů a dalších.

Výhody: Celá kontaktní oblast je snímána a měřena najednou. Naměřené hodnoty jsou zpracovávány počítačem do podoby 3 D map, ze kterých se snadno odečítají hodnoty. Umožňuje zkoumat vliv provozních podmínek jako jsou: vliv struktury povrchu reálných součástí, zatížení, prokluzu, viskozity maziva, jeho teplota a přítomnost aditiv. Další výhodou je poměrně vysoká prostorová rozlišitelnost.

Nevýhody: Tloušťka je měřena nepřímo, z toho plyne závislost přesnosti měření na kalibraci. Na výrobu disku je nutné použít průhledný materiál, nelze zkoumat styk dvou ocelových těles. Nelze ani použít reálné strojní součásti. Nelze zkoumat vrstvy silnější než 700 až 800 nm. Výsledky měření mohou být zkresleny např. kavitací, jak je vidět na obr. 6. Kde na výstupní oblasti můžeme pozorovat výrazné špičky, které způsobila kavitace.

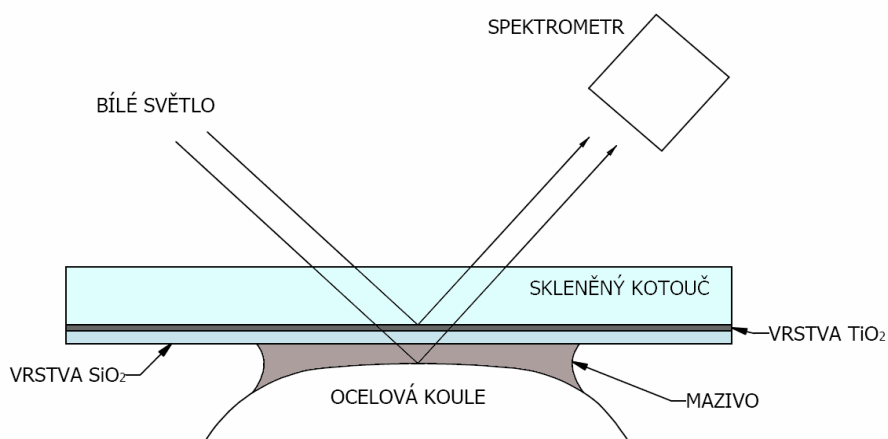


Obr. 6 Rozložení tloušťky mazacího filmu ve formě 3 D mapy [3]

4.1.2 Spektroskopická reflektometrie

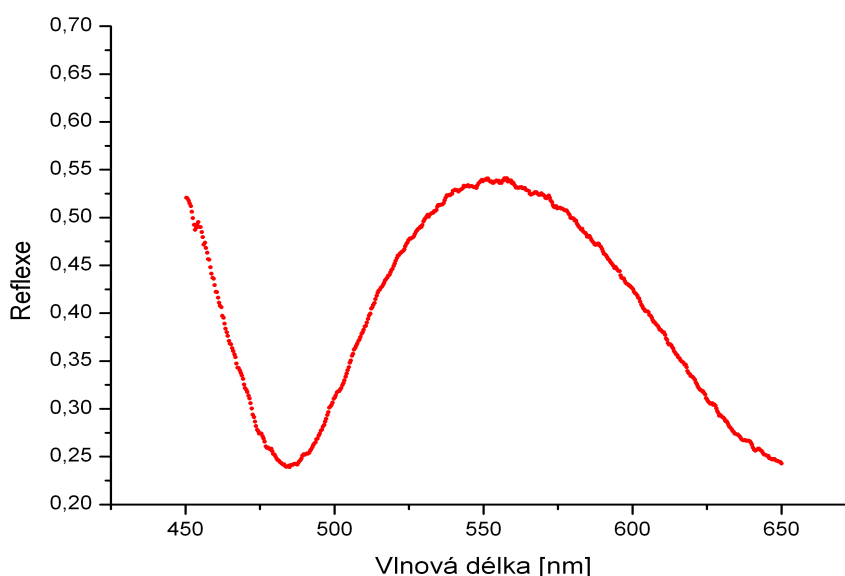
4.1.2

Princip: Spektroskopická reflektometrie je založena, podobně jako interferometrie, na principu interference světla. Jedním z nejjednodušších případů je dopad světelných paprsků na planoparalelní desku, což je případ tenké rovinné vrstvy, jejíž obě strany jsou rovnoběžné. Světlo dopadající na tuto desku pod určitým úhlem se částečně odráží a částečně se láme do planoparalelní vrstvy. Světlo procházející vrstvou se odráží od jejího spodního okraje a láme se zpět do původního prostředí. Tyto paprsky jsou zpožděny oproti těm, které se odrazily od horního okraje vrstvy Obr. 7. Tím vzniká fázový rozdíl mezi odraženou a lomenou vlnou. Při přechodu zpět do původního prostředí spolu interferují tzn. některé vlnové délky se zesilují a jiné zeslabují [4]. Rozdíl mezi interferometrií a reflektometrií je ve využití tohoto jevu a bude popsán dále.



Obr. 7 Schéma spektrometrem měřeného kontaktu [5]

Popis metody: Měřený kontakt je osvětlován bílým světlem, které se odráží do spektrometru. Ten se skládá ze soustavy zrcadel, difrakční mřížky a snímačů intenzity. Paprsek dopadající na difrakční mřížku je rozdělen podle vlnových délek, poté dopadá na snímače intenzity. Díky tomu získáváme křivku popisující intenzitu světla v závislosti na vlnové délce. Použitím referenčního vzorku, používá se monokrystal křemíku, získáme druhou závislost. Podělením obou dostaneme absolutní odrazivost. Absolutní odrazivost je závislá na odrazivosti, absorpci a tloušťce dané vrstvy [5]. To znamená, že díky ní vyloučíme vliv použitého zdroje. První dvě veličiny (odrazivost a absorpci) obvykle známe a tloušťku chceme změřit. Závislost absolutní odrazivosti na těchto veličinách popisují Fresnelovy rovnice, v nichž uvedené veličiny vystupují. Dosazováním do rovnic se snažíme získanou křivkou co nejvíce přiblížit naměřené absolutní odrazivosti. K tomuto procesu slouží optimalizační software, principem často podobný metodě nejmenších čtverců. Po nalezení vhodných konstant odečteme tloušťku mazací vrstvy. Pro zmenšení výpočtové náročnosti, lze použít kolmý dopad světla k povrchu. Fresnelovy rovnice obsahují funkce kosinus, které jsou při kolmém dopadu rovny jedné. Díky tomu lze použít maticový zápis a výpočet se značně zjednoduší. Toto zjednodušení je využito i prezentaci [5]. Pro dosažení co možná nejpřesnějších výsledků je nutné dodržet tyto podmínky, stabilní světelný zdroj bez časových fluktuací a opticky neměnná soustava.



Obr. 8 Příklad křivky absolutní odrazivosti [5]

Popis zařízení: Jedna z možností využití je použití měřícího zařízení podobného jako u interferometru. Základními částmi tohoto přístroje, mezi kterými dochází ke kontaktu, mohou být ocelová kulička a skleněný disk. Disk je na horní straně opatřen protiodrazovou vrstvou a na straně spodní vrstvami zvyšujícími kontrast. Obě tyto pohyblivé součásti jsou samostatně poháněny servomotory, tak aby bylo možné

dosáhnout různých relativních rychlostí a prokluzu. Kontakt je uložen v izolované komoře s mazivem, kde je možné měřit jeho teplotu a po připojení dalšího zařízení ji i regulovat [2]. Pro osvětlení se obvykle používá halogenová žárovka, zde je důležité splnit podmínku časově stabilního osvětlení. Pro snímání odraženého spektra je možné použít vláknový spektrofotometr OceanOptics s lineárním CCD čipem. Celý přístroj je uložen na pneumaticky odpruženém stole, pro omezení vlivu otřesů. Jako optimalizační software jsou na fakultě strojního inženýrství VUT v Brně využívány NKDMatl a NKDStack [5].

Použití: Této metody lze využít pro relativně přesné měření tloušťky mazacího filmu v určitém bodě kontaktu. Je možné studovat tloušťku mazací vrstvy v závislosti na rychlostech kontaktních povrchů, teplotě, druhu maziva a jeho přísad.

Výhody: Mezi hlavní výhody patří skutečnost, že se jedná o přímou metodu. Tzn. naměřené veličiny neporovnáváme s kalibrací získanými hodnotami. Kalibrační vzorek slouží pouze k omezení vlivu použitého zdroje světla. Stejný tvar křivky absolutní odrazivosti je možné dosáhnout jedinečně pro určité nastavení měřicí soustavy. Dalšími výhodami jsou velké rozmezí měřitelných vrstev, od jednotek nanometrů až po stovky micrometrů, to je omezeno citlivostí zařízení. Velká přesnost měření.

Nevýhody: Měření provádíme pouze v určitém bodě kontaktu, nemáme informace o okolí tohoto bodu. Velikost tohoto bodu je přibližně jeden mikrometr. Na výrobu disku je nutné použít průhledný materiál, nelze zkoumat styk dvou ocelových těles. Nelze ani použít reálné strojní součásti.

4.1.3 Přímá metoda

4.1.3

Princip: Tato metoda měření tloušťky mazací vrstvy využívá změny elektrické kapacity. Elektrická kapacita je schopnost vodiče uchovat elektrický náboj. Tuto schopnost mají obecně všechny vodiče, využívá se především u kondenzátorů. Pro ty je definována jako množství náboje na deskách kondenzátoru, je-li mezi deskami jednotkové napětí 1V. To lze matematicky zapsat také takto:

$$C := \frac{Q}{U}$$

kde C je elektrická kapacita, Q množství náboje a U rozdíl potenciálů.

Nejednodušším typem kondenzátoru je deskový, skládá se ze dvou vodivých desek mezi, kterými je velmi malá vrstva dielektrika. Pro tento kondenzátor je možno odvodit vztah:

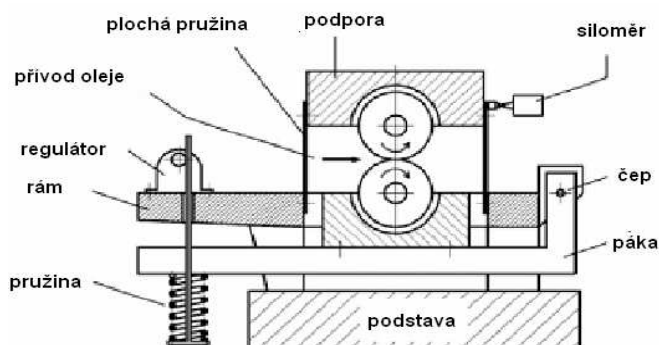
$$C := \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d}$$

kde ε_0 je permitivita vakua, ε_r relativní permitivita prostředí, S plocha desek a d jejich vzdálenost. Tento vztah platí i pro kulový a válcový kondenzátor. Je z něj patrné, že elektrická kapacita přímo úměrně závisí na permitivitě, ploše desek a nepřímo na jejich vzdálenosti. Permitivita vyjadřuje vliv prostředí na elektrické pole.

Popis metody: Této metody využívá Höhn k výzkumu vlivu struktury povrchu a jeho textury na tloušťku mazací vrstvy. Kontakt je tvořen stykem dvou válců to

znamená, že kontakt je přímkový. Jeden z válců je vyleštěn a druhý má povrch se známou geometrií. Kontaktní oblast je považována za deskový kondenzátor s olejem jako dielektrikem [6]. Jak již bylo zmíněno elektrická kapacita závisí nepřímo úměrně na vzdálenosti desek. Ta je zde dána vrstvou mazacího filmu. K měření použili LC-oscilátor, jehož vlastní frekvence závisí na indukčnosti cívky a kapacitě kondenzátoru. Parametry cívky jsou známy a kapacitu určíme. Ze známé kapacity lze stanovit tloušťku mazací vrstvy.

Popis zařízení: Ke kontaktu dochází mezi ocelovými válci, nebo mezi ozubenými koly. Jeden disk o šířce 20 mm je vyleštěn na průměrnou aritmetickou drsnost $R_a = 0,03 \mu\text{m}$. Druhý disk o šířce 5 mm má broušený povrch [6]. U broušeného povrchu se zkoumá vliv drsnosti povrchu a způsob broušení: podélné, příčné, nebo šikmé. Pohon válců je zajištěn odděleně, to umožňuje plynulou změnu rychlosti a prokluzu. Válce jsou k sobě přitlačovány prostřednictvím jednoramenné páky a pružiny, jak je vidět na obr. 1. Normálová síla je měřena siloměrem. Do kontaktu je přiváděno mazivo u, kterého můžeme volit teplotu.



Obr. 9 Schéma zařízení [6]

Použití: Tato metoda je využívána ke zkoumání vlivu struktury povrchu na tloušťku mazacího filmu.

Výhody: Jedná se o přímé měření s velkým rozsahem měřitelných tloušťek mazacího filmu. Oba válce jsou ocelové, tak jako většina strojních součástí. Lze současně měřit rozložení tlaku.

Nevýhody: Při současném měření tlaku neumožňuje zkoumat vliv prokluzu. Malá rozlišitelnost.

4.2 Metody měření kontaktního tlaku

Další neméně důležitou veličinou je tlak mezi součástmi. Podstatně ovlivňuje viskozitu maziva a tloušťku mazací vrstvy. Jeho hodnoty u elastohydrodynamického mazání většinou dosahují velikosti stovek MPa. Příliš velký tlak může způsobit pitting, nebo protržení mazací vrstvy. V současné době se poměrně často používají pro určení kontaktního tlaku numerické metody, které ho počítají z tloušťky mazací vrstvy. Zde jsou některé experimentální metody měření.

4.2.1 Ramanova spektroskopie

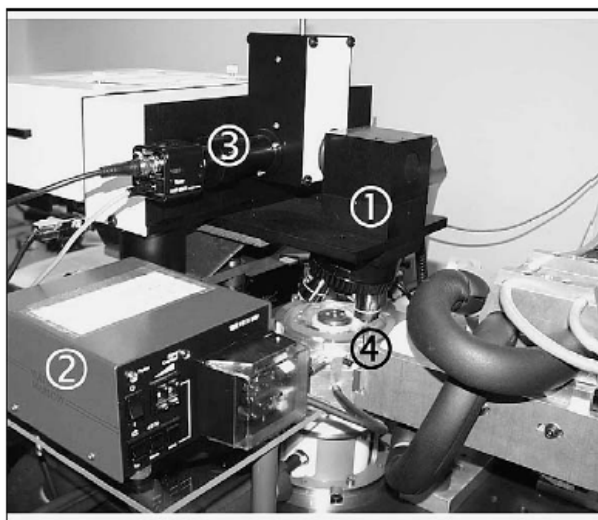
Princip: Indický fyzik Raman, jehož práce měla velký vliv na rozvoj vědy v Indii. Objevil, že při průchodu světla průhledným materiálem se jeho část odchýlí od původního směru a tato odchýlená část změní svou vlnovou délku. Tento jev se nazývá Ramanův rozptyl a je důsledkem Ramanova efektu. Za výzkumy obdržel v roce 1930 Nobelovu cenu[8].

Ramanův jev nebo též Ramanův rozptyl je jev vznikající při interakci mezi fotony a částicemi určité látky, kdy rozptýlené záření má jinou vlnovou délku (resp. energii fotonů) než dopadající záření.

Je-li dopadající energie fotonů rovna E_0 , pak záření rozptýlené prostřednictvím Ramanova rozptylu má energii fotonů rovnou $E_0 \pm \varepsilon$ kde ε odpovídá energetickému rozdílu kvantových hladin dané látky. Znaménko + přitom odpovídá ztrátě energie v látce (tzv. Stokesův rozptyl); naopak, znaménko odpovídá předání kvanta energie látce (tzv. anti-Stokesův rozptyl). Podle hodnot ε lze pak usuzovat na fyzikální vlastnosti dané [9]. Ramanův jev je využíván v řadě odvětvích vědy i průmyslu. Mezi nejznámější využití patří například analýza chemického složení látek, vedení tepla v kotlích a spalínách, další příklady využití lze nalézt např. na [9], [11] nebo [12].

Popis metody: Měřený kontakt může tvořit skleněná deska a ocelová kulička, tak je tomu u interferometrie a reflektometrie. Na měřený kontakt dopadá monochromatické světlo, které se z části odráží a částečně je pohlceno materiálem. Odražené světlo je tvořeno převážně světlem o stejné vlnové délce jako dopadající světlo a světlem o vlnové délce obecně λ . Tato vlnová délka závisí na materiálu od kterého se paprsek odráží a to především na chemickém složení, meziatomové vzdálenosti atd. Právě změny meziatomové vzdálenosti se zde využívá [10]. Při zátížení dochází k deformaci zkoumaného tělesa, změně meziatomové vzdálenosti a tím i změně Ramanova spektra. Tohoto jevu se využívá při měření kontaktního tlaku. Nejprve změříme odražené spektrum u suchého statického kontaktu, porovnáme ho s výsledky Herztovy úlohy [10]. Díky tomu určitému odraženému spektru můžeme přiřadit odpovídající tlak.

Popis zařízení: Pro měření pomocí Ramanovy spektroskopie lze použít zařízení podobné tomu které se používá u reflektometrie. Hlavním rozdílem je umístění spektrometru. Ramanovo spektrum lze měřit pouze těsně nad kontaktem, ve větší vzdálenosti zaniká, proto musíme spektrometr umístit co možná nejbližší povrchu [10]. Dalším rozdílem je použitý zdroj světla, zatímco u reflektometre se využívá halogenová žárovka, zde to obvykle bývá HeNe laser.



Obr. 10 Měřící zařízení využívající Ramanovy spektroskopie [10]; 1. Ramanův mikroskop 2. peristaltické čerpadlo 3. optický kabel 4. kontakt

Použití: Tato metoda je využívána pro výzkum vlivu mikrodůlků na kontaktní tlak o čemž je psáno v [10]. Dále je možné sledovat vliv rychlosti valení, prokluzu a dalších provozních podmínek.

Výhody: Možnost měřit tlak i u velmi tlusté mazací vrstvy. Lze zkoumat i vliv poměrně hlubokých dentů.

Nevýhody: Spektrum velmi rychle slábne, proto je od určité výšky neměřitelné. Olej musí dobře rozptylovat a odrážet světlo. Množství odraženého světla je lineárně závislé na tloušťce mazací vrstvy, čím je vrstva silnější tím více světla se odráží.

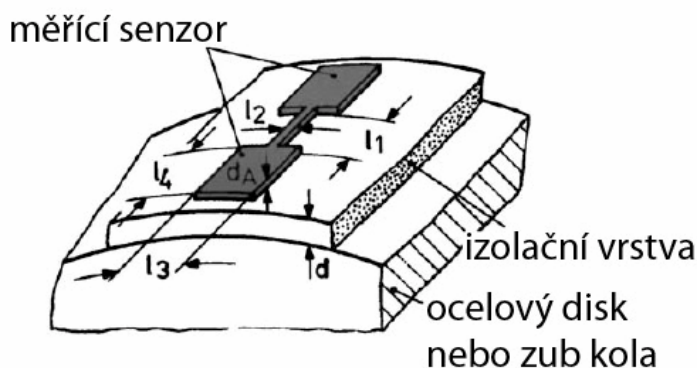
4.2.2 Přímá metoda

Princip: Metoda je založena na změně elektrického odporu, měřícího čidla. Elektrický odpor je jako vlastnost daného materiálu závislá na teplotě a tlaku, který na materiál působí.

Popis metody: Kontakt je tvořen stykem dvou válců to znamená, že kontakt je přímkový. Jeden z válců je vyleštěn a druhý má povrch se známou geometrií. Na vyleštěném válci je vytvořen tlakový senzor, ten se skládá z izolační vrstvy a samotného rezistoru. Izolační vrstva je obvykle vyrobena z oxidu křemíku (Al_2O_3) a rezistor z Manganinu ($\text{CuMn}_{12}\text{Ni}$) [7]. Změna elektrického odporu je měřena pomocí Wheastonova můstku, kdy tři odpory známe a čtvrtý určujeme. Pokud známe odpor senzoru v nezatíženém stavu a změříme rozdíl odporů při zatížení, můžeme určit změnu tlaku v kontaktu [6]. K tomu je ještě nutná kalibrace, obvykle pomocí Hertzovy úlohy.

Popis zařízení: Zařízení se používá totožné, jako u přímé metody měření tloušťky mazacího filmu. Ke kontaktu dochází mezi ocelovými válci, nebo mezi ozubenými koly. Jeden disk o šířce 20 mm je vyleštěn na průměrnou aritmetickou drsnost $R_a = 0,03 \mu\text{m}$. Druhý disk o šířce 5 mm má broušený povrch [6]. U broušeného povrchu

se zkoumá vliv drsnosti povrchu a způsob broušení: podélné, příčné, nebo šikmé. Pohon válců je zajištěn odděleně, to umožňuje plynulou změnu rychlosti a prokluzu. Válce jsou k sobě přitlačovány prostřednictvím jednoramenné páky a pružiny, jak je vidět na obr. 10. Normálová síla je měřena siloměrem. Do kontaktu je přiváděno mazivo u, kterého můžeme volit teplotu.



Obr. 11 Měřící senzor [6]

Použití: Tato metoda je využívána ke zkoumání vlivu struktury povrchu na tloušťku mazacího filmu. Dále je možné zkoumat vliv použitého maziva a jeho přísad.

Výhody: Jedná se o přímé měření s velkým rozsahem měřitelných tlaků. Oba válce jsou ocelové, tak jako většina strojních součástí. Lze současně měřit tloušťku mazacího filmu.

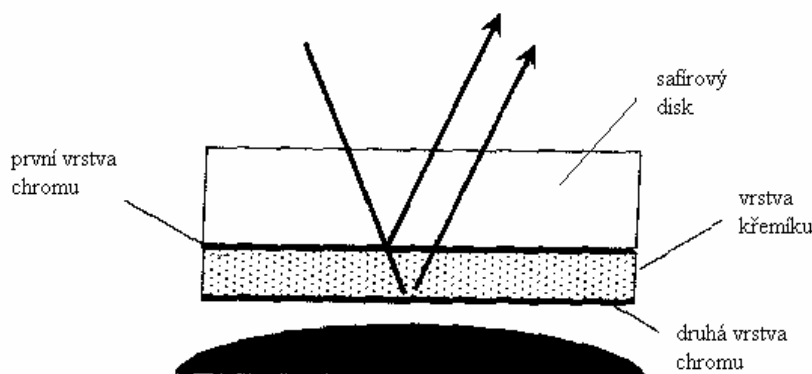
Nevýhody: Neumožňuje zkoumat vliv prokluzu. Malá rozlišitelnost. Vnášení cizího tělesa do kontaktu.

4.2.3 Měření tlaku pomocí deformace křemíkové vrstvy

4.2.3

Princip: Tato metoda vychází ze stejného principu jako interferometrie, která je popsána výše. Rozdílem je potom zpracování dat.

Popis metody: K měření je možné využít kuličku ocelovou, nebo ze slinutého karbidu, tak jako u interferometrie. Skleněný disk je na spodní straně opatřen vrstvami chrómu, křemíku a další vrstvou chrómu jak je patrné z obr 12. Toto uspořádání umožňuje měřit tloušťku pouze křemíkové vrstvy v celém kontaktu. Měření se provádí stejně jako u interferometrie. Jelikož deformace je závislá na kontaktním tlaku, je možné získat i rozložení tlaku. To se provádí pomocí kalibrace. Výsledky měření porovnáme s Hertzovou úlohou a jednotlivým tloušťkám přiřadíme odpovídající tlak.



Obr. 12 Princip měření deformace křemíkové vrstvy [13]

Popis zařízení: Pro měření je možné použít stejné zařízení jako u interferometrie, pouze skleněný kotouč je opatřen vrstvami chrómu, křemíku a další vrstvou chrómu.

Použití: Takto lze studovat vliv mikrodůlků a struktury povrchu na rozložení kontaktního tlaku. Další použití je např. v [13].

Vlastnosti: Deformace křemíkové vrstvy je pouze elastická, což umožňuje přesné a opakované měření. Tato vrstva neovlivňuje rozložení tlaku. Měření je časově náročné a je omezeno pouze na suchý a statický kontakt.

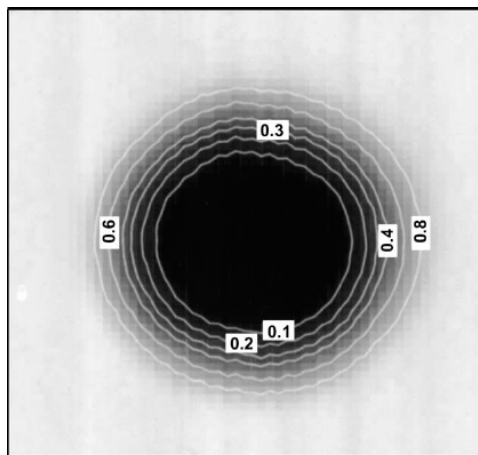
4.2.4 Měření tlaku pomocí ultrazvuku

Princip: Jako ultrazvuk označujeme mechanické vlnění s frekvencí větší než 20 kHz. Při měření se vyšle signál o známé frekvenci a amplitudě, poté se snímá odražený signál. Na tomto principu pracují lékařské ultrazvuky, echolokátory (sonary) a další.

Popis metody: Při měření tlaku vyšleme signál o známé frekvenci a amplitudě, zpátky se odrazí signál se stejnou frekvencí, ale jinou amplitudou. Pokud signál narazí na rozhraní kov a vzduch, odrazí se zpět s takřka stejnou amplitudou, pokud ovšem narazí na rozhraní kov a kov s dokonalým stykem povrchů neodrazí se žádný signál [14]. Toto lze vyjádřit poměrem:

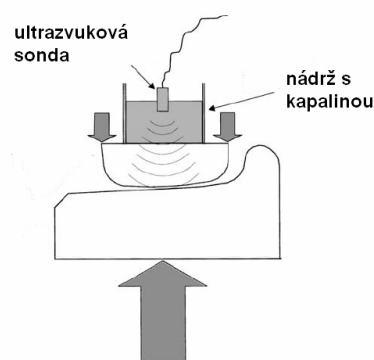
$$R = \frac{H_i}{H_0}$$

Kde H_i je amplituda odraženého signálu a H_0 amplituda vyslaného signálu. Při hodnotě $R=0$ jde o rozhraní kov – kov a pokud $R=1$ jde o rozhraní kov – vzduch, resp. dokonalý a nulový kontakt. Po rozdělení kontaktu na jednotlivé body a změření odražené amplitudy na každém bodě oblasti zjistíme rozložení poměru R v kontaktu. Rozložení tlaku získáme obdobně jako u metody využívající deformace křemíkové vrstvy, porovnáním s Hertzovou úlohou. Pro porovnání výsledků lze využít MKP jako v [14].



Obr. 13 Rozložení koeficientu R na Hertzově kontaktu [14]

Popis zařízení: Základ tvoří zdroj ultrazvuku a jeho snímač, dále vyhodnocovací technika. Další speciální zařízení není nutné, protože se k měření využívá reálných součástí, nebo jejich částí. Je pouze nutné ponořit sondu a jednu měřenou součást do kapaliny.



Obr. 14 Příklad použití ultrazvuku k měření kontaktního tlaku mezi kolem a kolejnicí [14]

Použití: Studium rozložení kontaktního tlaku mezi reálnými součástmi a vliv struktury povrchu. Například rozložení kontaktního tlaku mezi železničním kolem a kolejnicí jako v [14].

Vlastnosti: K měření nepotřebujeme speciální vzorky. Do kontaktu nevnašíme žádné cizí tělesa, která by měření ovlivnila. Jde o kontakt dvou reálných součástí.

4.3 Metody měření teploty

Další velmi důležitou veličinou při studiu mazacích filmů je teplota. Významně ovlivňuje společně s tlakem viskozitu maziva. Její nadměrné zvýšení může podstatně změnit vlastnosti dotýkajících se součástí. Především u často používaných kalených

ocelí dochází ke změnám struktury, ty mohou vést k poklesu tvrdosti. Pro správné navržení stroje je proto důležité zajistit dostatečný odvod tepla, což není možné bez znalosti jeho vzniku a šíření. Hlavním důvodem vzniku tepla v kontaktu je tření mezi molekulami maziva a povrchy součástí. U podmínek čistého valení, což v praxi takřka nenastává, je nárůst teploty v kontaktu řádově v jednotkách až stupňů, zatímco u kluzu je tento nárůst v desítkách až stovkách stupňů, podrobněji v [15]. Pokud chceme zkoumat teplotu maziva v kontaktu včetně jejího rozložení můžeme použít např. některou z těchto metod.

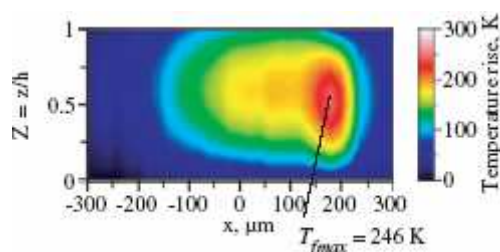
4.3.1 Pyrometry

jsou bezdotykové teploměry, které určují teplotu měřeného tělesa z teplotního záření. Měří se jimi převážně teploty v rozsahu -50°C až $+3500^{\circ}\text{C}$. Pyrometr byl vynalezen Pietrem van Muschenbroeckem (1692-1761). Nauka o bezkontaktním měření teploty se pak nazývá pyrometrie. Název pyrometr je odvozen z řeckých slov pyr (oheň) a metrein (měřit) [17].

Všechny formy hmoty vyzařují při teplotách vyšších než je absolutní nula tepelné záření ve viditelném i neviditelném pásmu spektra. Intenzita tohoto záření odpovídá teplotě hmoty. Příčinou tohoto záření je vnitřní mechanický pohyb molekul, jehož intenzita závisí právě na teplotě objektu. Protože pohyb molekul představuje přemísťování náboje, je vyzařováno elektromagnetické záření (fotonové částice) [17].

Jedna z možností jak využít pyrometry k měření teploty maziva v kontaktu je použití stejného zařízení jako u interferometrie, kde je kontakt snímán termovizní kamerou. Při měření se používají převážně safírové kotouče, ty lépe propouští infračervené záření než skleněné. Popis tohoto způsobu měření je možné nalézt v [15].

Vlastnosti: Měření poskytuje informace o rozložení teplot v celém kontaktu.



Obr. 15 Příklad teplotního pole za podmínek čistého kluzu [15]

4.3.2 Přímá metoda

Měřicí zařízení je stejné jako u přímých metod měření tloušťky mazacího filmu a kontaktního tlaku. Na měřícím válci je nanášena vrstva Al_2O_3 , na této je platinový senzor. Při změně teploty a tlaku mění senzor svůj elektrický odpor. Ten je měřen pomocí Wheatstonova můstku. Pro odstranění vlivu tlaku při měření, se zjišťuje závislost elektrického odporu na tlaku a teplotě [16].

Vlastnosti: Měření je přesné v rozsahu teplot od 25 do 100°C a tlacích do cca 1GPa . Lze jí použít i při velkých prokluzech. Získané výsledky popisují rozložení teplot pouze v podélném směru, v příčném ne [16]. Do kontaktu vnášíme cizí těleso.

5 ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

5

V současné době máme k dispozici řadu metod, které lze použít pro studium EHD mazacích filmů. Princip většiny vychází z interference světla na tenké vrstvě. Tyto metody jsou poměrně rychlé a přesné. Umožňují zkoumat vliv maziva, mazivostních přísad, struktury povrchů, cílené modifikace třecích povrchů (např. mikrodůlků) a dalších provozních podmínek. Neumožňují používat reálné součásti a jedna ze součástí musí být průhledná.

Vedle interference světla je možné využít změny amplitudy ultrazvukového signálu. Zde, kromě výše jmenovaných výhod, můžeme použít reálné součásti.

Dalším využívaným principem je změna elektrických vlastností v závislosti na změně podmínek v kontaktu. K měření slouží dva kovové válce kde jeden má reálnou drsnost povrchu a na druhý bývá nanesen měřicí senzor. To ovšem znamená vnesení cizího tělesa do kontaktní oblasti.

Kromě měření každé z těchto veličin (tloušťka mazací vrstvy, tlak a teplota) samostatně, bývají měřicí metody kombinované s numerickými. Často se měří tloušťka mazací vrstvy a kontaktní tlak se dopočítává. Využívá se při tom teorie pružnosti, kde ze známé deformace počítáme napětí v kontaktu. Dle zadání je úkolem zaměřit se na experimentální studium mazacích vrstev, proto v této práci nejsou zmiňovány numerické metody a metody využívající kombinace experimentálního a numerického přístupu. Přehled některých těchto metod je možné nalézt v [18].

6 ZÁVĚR

Tribologie za poměrně krátkou dobu své existence prošla významným vývojem. Vývojem prošli i metody používané pro výzkum mazacích filmů. Je možné relativně přesně měřit potřebné veličiny, případně je porovnávat s výpočty. Stále se ovšem jedná o měření v laboratorních podmínkách, kde i přes veškerou snahu není možné zcela přesně modelovat podmínky, které nastávají ve skutečných strojích.

Dle mého názoru je zde jedna z cest dalšího vývoje. Vyrobit měřicí zařízení, které je možné použít například přímo v kontaktu dvou ozubených kol, nebo ve valivém ložisku. Díky tomu bychom mohli přesněji určit životnost konkrétní součásti, případně zabránit hrozící havárii. Další zlepšení by mohly přinést metody kombinované s numerickými. Vzhledem ke stále se zdokonalující výpočetní technice a hledání nových možností modelování dějů v kontaktu, můžeme podstatně zkrátit čas potřebný k měření.

V oblasti strojních součástí je zkoumán vliv uměle vytvořených mikrodůlek na tloušťku mazací vrstvy a rozložení kontaktního tlaku. Tyto mikrodůlky slouží jako zásoba maziva při rozběhu strojů a ve fázích nedostatku maziva (tzv. hladovění), na druhé straně je to vrub který způsobuje koncentraci napětí. Pokud se ovšem podaří nalézt vhodnou geometrii mikrodůlek a jejich rozmístění na povrchu součásti, tak aby byly nevýhody vyváženy výhodami, je možné výrazně prodloužit životnost. Použití přímo na povrchu strojních součástí je podmíněno také cenou. V současnosti jsou náklady na výrobu mikrodůlek v povrchu tak vysoké, že jejich přínos nevyváží cenu. Výjimkou je Formule 1, kde se takto upravuje povrch pístních kroužků. Zde se ovšem jedná o konformní povrchy a cena není tak důležitým faktorem. V okamžiku kdy bude výroba mikrodůlek finančně dostupnější a bude navržena jejich vhodná geometrie, budeme je moci používat i u běžných strojních součástí. V dalším kroku by bylo možné vyrobit součásti s topografií povrchu navrženou přímo podle potřeb dané aplikace.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

7

λ	- parametr mazání
h [m]	- tloušťka mazacího filmu
Ra [m]	- střední drsnost povrchu
C [F]	- elektrická kapacita
Q [C]	- elektrický náboj
U [V]	- elektrické napětí
ε_0 [F.m ⁻¹]	- permitivita vakua
ε_r [F.m ⁻¹]	- relativní permitivita
S [m ²]	- plocha desek kondenzátoru
d [m]	- vzdálenost elektrod
h [m]	- tloušťka mazacího filmu
E_0 [J]	- počáteční energie
ε [J]	- energetický rozdíl kvantových hladin dané látky
R	- koeficient odrazivosti
H_0 [m]	- amplituda vyslaného ultrazvukového signálu
H_i [m]	- amplituda odraženého ultrazvukového signálu

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] M. Hartl, *Velmi tenké elastohydrodynamické mazací filmy*, Brno, 2005
- [2] M. Hartl, *Měření a studium velmi tenkých mazacích filmů*, Brno, 2002
- [3] M. Vrbka, M. Vaverka, R. Poliščuk, I. Křupka, M. Hartl, *Pressure Calculation from experimentally lubricant thickness within EHL contacts*, Brno, 2007, dostupné na: www.uk.fme.vutbr.cz, [databáze online]
- [4] *Interference světla*, Otevřená encyklopedie Wikipedia dostupné na: www.wikipedia.cz, [databáze online]
- [5] Vladimír Čudek, *Aplikace spektroskopické reflektometrie při studiu elastohydrodynamického mazání*, Brno 2007, dostupné na: www.uk.fme.vutbr.cz, [databáze online]
- [6] B.-R. Höhn, K. Michaelis, O. Kreil, *Influence of surface roughness on pressure distribution and film thickness in EHL-contacts*, Germany, 2006
- [7] B.-R. Höhn, K. Michaelis, O. Kreil, *Measurement of Elastohydrodynamic Parameters in Rough Contacts*, Germany, 2005
- [8] *Raman*, Sir Chandrasekhara Venkata, článek dostupný na: www.aldebaran.cz/famous/people/Raman_Ch_V.html, [databáze online]
- [9] *Ramanův jev*, Otevřená encyklopedie Wikipedia dostupné na: www.wikipedia.cz, [databáze online]
- [10] S. Coulon, I. Jubault, A.A. Lubrecht, F. Ville, P. Vergne, *Pressure profiles measured within lubricated contacts in presence of dented surfaces. Comparison with numerical models*, Francie 2004
- [11] *Raman effect*, The free encyklopedia Wikipedia dostupné na: www.wikipedia.com, [databáze online]
- [12] *Raman Spectroscopy Application Notes*, článek dostupný na: www.jobinyvon.com, [databáze online]
- [13] P. M. Cann, H. A. Spikes, *Measurement of pressure distribution in EHL-development of method and application to dry static contacts*, United Kingdom, 2005
- [14] M. Pau, F. Aymerich, F. Ginesu, *Distribution of contact pressure in wheel-rail contact area*, Italy, 2002
- [15] Tsunamitsu Nakahara, Kazuyuki Yagi, *Influence of temperature distributions in EHL film on its thickness under high slip ratio conditions*, Tokio 2006
- [16] Shinji Miyata, Bernd-Robert Höhn, Klaus Michaelis, Oliver Kreil, *Experimental investigation of temperature rise in elliptical EHL contacts*, München 2008
- [17] *Pyrometr*, Otevřená encyklopedie Wikipedia dostupné na: www.wikipedia.cz, [databáze online]
- [18] L. Kozel, *Přehled současných metod zjišťování tlaku v mazaném kontaktu třecích povrchů*, Brno, 2007

9 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

9

- obr. 1 závislost režimu mazání a součinitele tření na parametru mazání [2].
- obr. 2 Rozložení kontaktního tlaku a tloušťky mazací vrstvy – získáno na základě experimentálních dat [3]
- obr. 3 princip interference [4]
- obr. 4 příklad interferogramu [5]
- obr. 5 interferometr [3]
- obr. 6 rozložení tloušťky mazacího filmu ve formě 3 D mapy [3]
- obr. 7 Schéma spektrometrem měřeného kontaktu [5]
- obr. 8 příklad křivky absolutní odrazivosti [5]
- obr. 9 schéma zařízení [6]
- obr. 10 Měřicí zařízení využívající Ramanovy spektroskopie [10]
- obr. 11 měřicí senzor [6]
- obr. 12 princip měření deformace křemíkové vrstvy [13]
- obr. 13 Rozložení koeficientu R na Hertzově kontaktu [14]
- obr. 14 Příklad použití ultrazvuku k měření kontaktního tlaku mezi kolem a kolejnicí [14]
- obr. 15 Příklad teplotního pole za podmínek čistého kluzu [15]