

APPLICATION OF SPECTROSCOPIC REFLECTOMETRY TO THE STUDY OF TRIBOLOGICAL PROCESSES IN MICROMECHANISMS

J. Medlík*, V. Čudek*

Summary: *The paper is devoted to the study of thin lubrication film formation within non-conformal contact. Spectroscopic reflectometry is used to observe not only the changes in the film thickness but also in the lubricant properties.*

1. Úvod

S rozvojem techniky a výrobních technologií dochází k postupnému snižování tloušťky mazacích filmů v strojních tribologických soustavách (Dowson 1992). Tento proces má několik příčin. Mezi nejvýznamnější patří zvyšování teplot a tlaků v kontaktech, které jsou důsledkem zlepšování vlastností materiálů. Dále používání maziv s nižší viskozitou, které si vynutil požadavek snižování tření a tím i spotřeby energie. Dalším důvodem je také zlepšování kvality povrchů třecích prvků, které je výsledkem používání nových dokončovacích postupů.

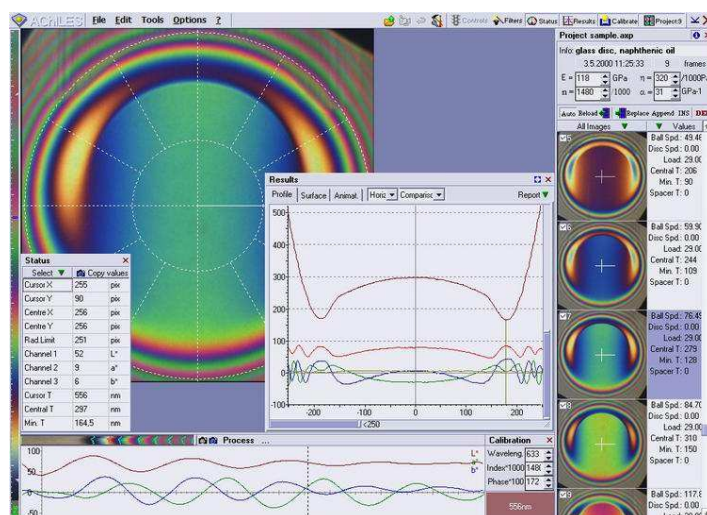
Když O. Reynolds na konci devatenáctého století publikoval svoji teorii hydrodynamického mazání (Reynolds 1886), minimální tloušťka mazacího filmu v tehdy používaných kluzných ložiscích se pohybovala kolem 10^{-4} až 10^{-5} m. Rozvoj spalovacích motorů v první polovině dvacátého století vedl ke snižování mazacího filmu u kluzných ložisek až na 10^{-6} m. Objev elastohydrodynamického mazání počátkem druhé poloviny dvacátého století pak přinesl poznání, že u vysoce zatížených strojních součástí jakými jsou např. valivá ložiska či ozubené převody dosahuje minimální tloušťka mazacího filmu hodnot 10^{-6} až 10^{-7} m. Při smíšeném mazání spojeném s plastickou deformací povrchových nerovností nebo u hydrodynamicky mazaných magnetických paměťových médií může mít mazací film tloušťku až 10^{-8} nebo dokonce 10^{-9} m. Tloušťka těchto velmi tenkých mazacích filmů je stejného řádu jako je velikost molekul maziva.

Pro studium takto tenkých mazacích filmů a jejich chování za různých provozních podmínek se s výhodou používají měřicí metody založené na interferenci světla, které umožňují studium filmů až do jednotek nanometrů (10^{-9} m).

* Ing. Jan Medlík, Ing. Vladimír Čudek: Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně; Technická 2896/2; 602 00 Brno ; tel.: +420.5 4114 3238, fax: +420.5 4114 3231; e-mail: ymedli00@stud.fme.vutbr.cz, ycudek00@stud.fme.vutbr.cz

2. Kolorimetrická interferometrie

V dnešní době je nejpoužívanější metoda k vyhodnocování mazacího filmu kolorimetrická interferometrie (Hartl 1997). Tato měřicí metoda je určena k stanovení a vizualizaci rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém elastohydrodynamickém kontaktu s podstatně vyšší přesností a prostorovou rozlišitelností, než je tomu u konvenční interferometrie. Její princip vychází z přiřazování známých tloušťek barvám, vyskytujících se v barevném interferogramu. Ten vzniká za pomoci bílého světla v kontaktní oblasti mezi třecími povrchy.



Obr. 1 Vyhodnocovací software Achilles.

3. Metoda spektroskopické reflektometrie

Spektroskopická reflektometrie (Tompkins 1999) je obecně metoda založená na měření spektrální závislosti světla odraženého z měřené oblasti. V praxi se používá především pro studium optických vlastností tenkých vrstev a jejich tloušťky a umožňuje měřit jak systémy tvořené pouze jednou tenkou vrstvou, tak i vícevrstvé. Výhoda této metody je její přesnost, která se pohybuje v jednotkách nanometrů a velký rozsah měřitelných tloušťek (od jednotek nanometrů až po jednotky mikrometrů). Největší slabinou spektroskopické reflektometrie je možnost měřit vlastnosti vrstev pouze v jednom bodě, případně v řezu, což je dáno možnostmi měření spektrální závislosti.

Spektroskopická reflektometrie vychází z měření tzv. absolutní odrazivosti, která je definována jako poměr intenzity světla odraženého ku dopadajícímu. Tuto absolutní odrazivost lze popsat fresnelovými rovnicemi, které jsou základem matematického modelu, pomocí něhož lze inverzní úlohou získat hledané parametry. Těmito parametry může být tloušťka tenké vrstvy, stejně jako i optické vlastnosti studovaných vrstev (index lomu, index absorpce).

Princip měření tenkých mazacích filmů:

- Naměření spektra odraženého světla ze středu kontaktu, tvořeného mazivem, skleněným kotoučem s napařenou mezivrstvou (pro zvýšení kontrastu) a ocelovou koulí.
- Za úplně stejných podmínek, jako v první fázi, naměření spektra známého etalonu. V praxi se jako etalon vžilo používání monokrystalu křemíku, u kterého je jeho odrazivost velice dobře známá a zároveň se jedná o vzorek, u nějž je odrazivost v čase konstantní (na jeho povrchu nevznikají žádné oxidické vrstvy, které mají za následek změnu odrazivosti).
- Výpočet relativní odrazivosti

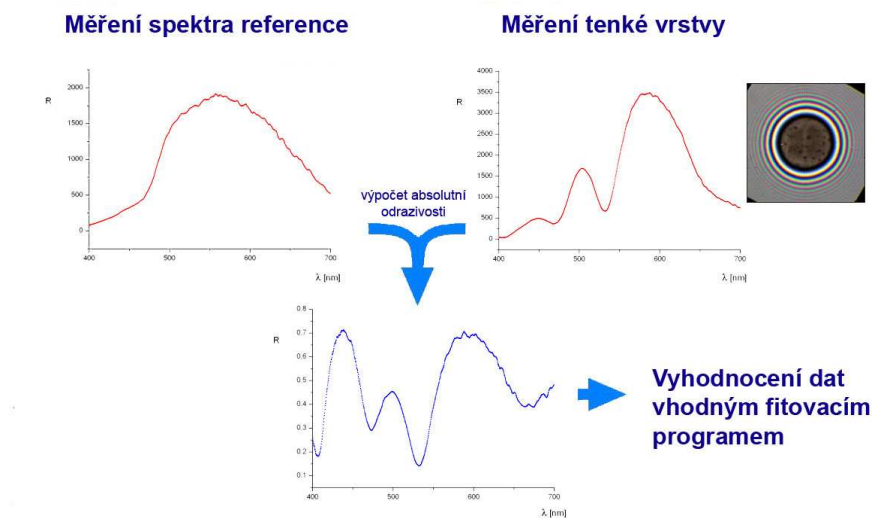
$$R_{rel} = \frac{R_{kontaktu}}{R_{etalonu}}, \quad (1)$$

kde $R_{kontaktu}$ je odrazivost kontaktu, $R_{etalonu}$ odrazivost etalonu a R_{rel} relativní odrazivost. Absolutní odrazivost R_{abs} je následně vypočítána ze vztahu

$$R_{abs} = R_{rel} \cdot R_{tab}, \quad (2)$$

kde R_{tab} je tabulková hodnota známé absolutní odrazivosti etalonu.

- V poslední fázi nalezení vhodných konstant, tedy tloušťky filmu a indexu lomu, kterým odpovídá průběh absolutní odrazivosti ze studovaného kontaktu tvořeného mazacím filmem, ocelovou koulí a skleněným diskem s vrstvami.



Obr. 2 Schéma měření spektroskopickou reflektometrií.

4. Experimentální zařízení

Konstrukce experimentálního zařízení simulujícího chování elastohydrodynamického bodového kontaktu je tvořeno tribologickým simulátorem vyvinutým na Ústavu konstruování, Fakulty strojního inženýrství, Vysokého učení technického v Brně, mikroskopu NIKON OPTIPHOT 150 a spektrometru OceanOptics.

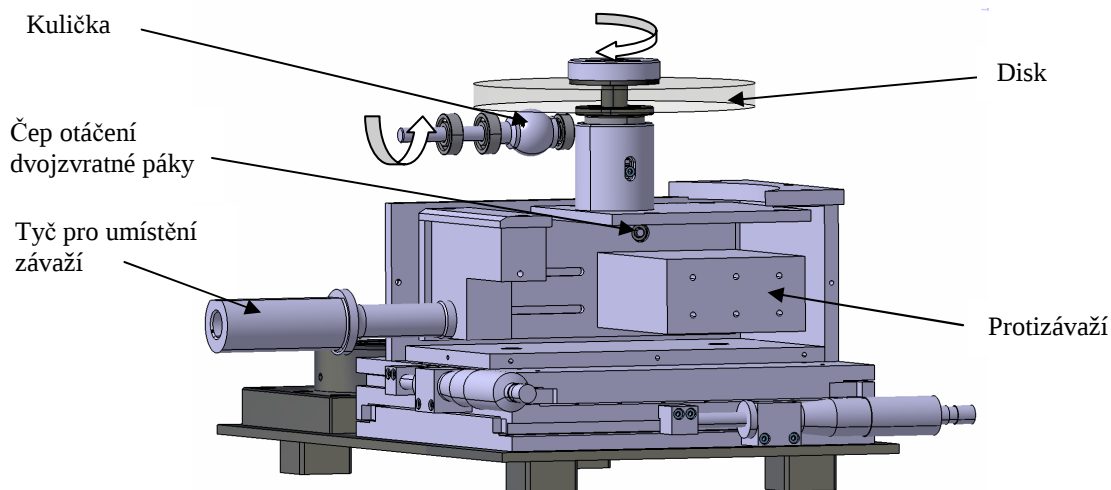


Obr. 3 Experimentální měřicí stanice.

Tribologický simulátor je tvořen dvěmi základními elementy, podílejícími se na vzniku bodového kontaktu. Kuličkou o průměru 25,4 mm a skleněným diskem o průměru $100 \div 150$ mm vyrobeného ze skla BK7, případně safírovým diskem. Zařízení je koncipováno pro vytváření podmínek čistého valení, což je dosaženo volným unášením disku kuličkou, která je poháněna servomotorem. Skleněný resp. safírový disk je z jedné strany opatřen antireflexní vrstvou, potlačující odraz na optickém rozhraní vzduch-sklo. Na straně druhé je na disk nanášena tenká vrstva pro zvýšení kontrastu, která je běžně tvořena chromem, případně vrstvou TiO_2 .

Pro zobrazení kontaktní oblasti je použit standardní průmyslový mikroskop Nikon Optiphot 150 s telecentrickým mikroskopovým objektivem s prodlouženou pracovní vzdáleností. Osvětlovací soustava je tvořena Köhlerovým osvětlovačem s halogenovou žárovkou (100 W), napájenou stejnosměrným zdrojem napětí. Tento zdroj zajišťuje časovou stabilitu intenzity světelného zdroje a zabraňuje vzniku intenzitních fluktuací vznikajících při používání běžných zdrojů.

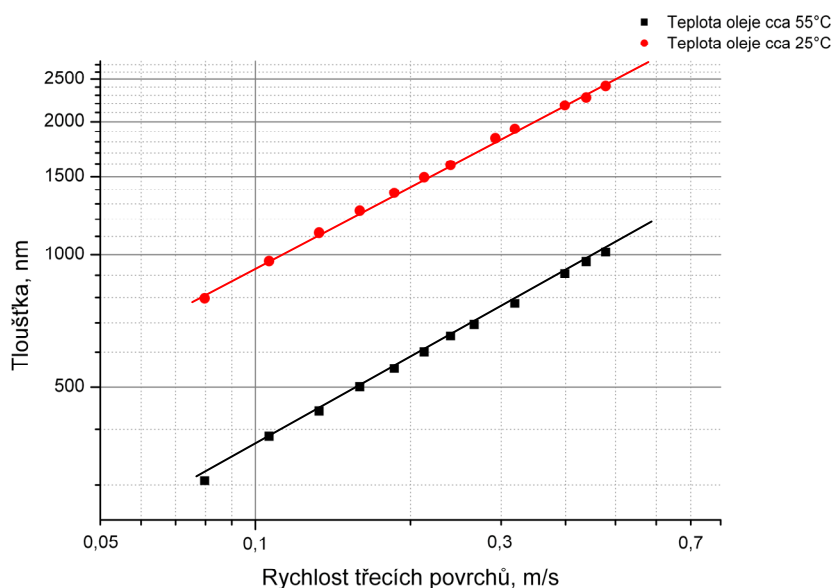
Spektrometr je instalován přímo na těle mikroskopu pomocí optického vlákna a speciální redukce, zajišťující optickou stabilitu. Jedná se o kompaktní spektrometr OceanOptics s lineárním CCD čipem.



Obr. 4 Tribologický simulátor.

5. Experiment

Následující graf ukazuje naměřenou závislost centrální tloušťky oleje na rychlosti při dvou různých teplotách popisovanou metodou. Jedná se o základní minerální olej s označením LSBS. Při měření byly použity pro simulaci kontaktu soudeček o průměru 25,4 mm a safírový kotouč. Vzhledem k tomu, že tlaky se při simulaci elastohydrodynamického mazání pohybují kolem 0,5 GPa, ukazuje se, že jakékoliv vrstvy nanesené na disku jsou díky takovýmto vysokým tlakům deformovány a mění se jejich optické vlastnosti, což negativně ovlivňuje matematický model pro vyhodnocování mazacího filmu spektroskopickou reflektometrií. Z toho důvodu byl při experimentu použitý safírový disk bez vrstvy chromu. Díky vyššímu indexu lomu safíru bylo možné dosáhnout přijatelného kontrastu pro vyhodnocení tloušťky maziva v kontaktu popisovanou metodou.



Obr. 4 Závislost centrální tloušťky maziva na rychlosti třecích povrchů.

Rozsah tloušťek maziva v kontaktu při experimentu se pohyboval od cca 300 nm až do 2,5 μm . Křivka odpovídající vyšším tloušťkám byla naměřena za okolní teploty přibližně 25 °C, křivka s nižšími hodnotami závislosti tloušťky na rychlosti třecích povrchů je pro teplotu cca 55° C. Při měření mazacích filmů pod hranici přibližně 100 nm se ale ukazuje, že naměřená spektra jsou pro vyhodnocování složitější a při získávání neznámých parametrů (tloušťka maziva, index lomu) může docházet ke korelacím, což někdy vede k úplné degradaci vypočtených hodnot.

6. Závěr

Spektroskopická reflektometrie je v dnešní době jedna z nejpoužívanějších metod studia tenkých vrstev, a to v širokém rozmezí tloušťek od jednotek nanometrů až po mikrometry. Výhodou této metody je možnost měřit nejen tloušťku filmu, ale také index lomu a to absolutně. Nedochozí tedy k žádnému porovnávání naměřených hodnot se známou geometrií, jak je tomu u dnes nejpoužívanější metody pro studium tloušťky maziva, kolorimetrické interferometrie. Aplikace spektroskopické reflektometrie v oblasti tribologických procesů může přinést nové možnosti, jako je např. měření tlaku v kontaktní oblasti pomocí změny indexu lomu. I přesto, že popisovaná metoda umožňuje měřit tenké vrstvy o tloušťkách až jednotek nanometrů, v dosavadním výzkumu se nám nepodařilo nalézt takové experimentální uspořádání, abychom mohli s jistotou měřit tloušťku maziva v desítkách až jednotkách nanometrů. To je dáno především optickým designem, který určuje index lomu použitého skleněného resp. safírového disku a tenké vrstvy zvyšující kontrast interferogramu. I přesto současné měření dokazují, že tuto metodu lze aplikovat v oblasti studia tribologických procesů.

7. Poděkování

Výsledky byly získány za podpory projektu FRVŠ č. 1784.

8. Literatura

- Dowson, D. (1992) Journal of Applied Physics D. 25, s. A334-A339.
- Hartl, M., Křupka, I., Liška, M. (1997) Optical Engineering. 36, 1997, s. 2384-2391.
- Reynolds, O. (1886) Philosophical Transactions of the Royal Society of London. 177, s. 157-234.
- Tompkins, H. G., McGahan, W. A. (1999) Spectroscopic ellipsometry and reflectometry: a user's guide. John Willey & Sons, New York.