

Vysoké učení technické v Brně

Brno University of Technology

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

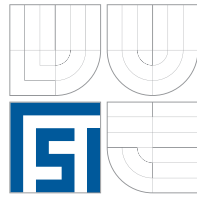
=b!g]hi`gtudium na bmihc dc[fUZ]Y`
h YVW`dcj fW`j`Y`Ughc!
\mXfcXmbUa]W_fa`_cbhU_hi

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. Petr ůdYf_U**
Author

Vysoké učení technické v Brně

Brno University of Technology



Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor konstruování strojů

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design / Department of Machine Design

**Práce vypracována v rámci řešení úkolu
č. 1/2009 v rámci projektu
\mXfcXmbUa]W_f _cbhU_hi**

[Pojednání ke státní doktorské zkoušce]
[Discourse on the Dissertation Thesis]

Autor práce: **Ing. Petr UdYf_U**
Author

Vedoucí práce: **dfcZ' Ing. A Ufh]b < Ufh, Ph.D.**
Supervisor

OBSAH

ANOTACE	2
ANNOTATION	2
OBSAH	3
1 ÚVOD	4
2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	5
3 SHRNUÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	7
3.1 Teoretické studie	7
3.2 Experimentální měření	17
3.3 Povrchy s reálnými nerovnostmi	28
4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE	32
5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	33
6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE	34
6.1 Úprava a doplnění měřicí aparatury	34
6.1.1 Měření topografie povrchu	34
6.1.2 Měření tloušťky mazacího filmu	35
6.1.3 In-situ měření	35
6.2 Zpracování	36
6.2.1 Základní schéma zpracování	36
6.3 Současné výsledky	37
7 ZÁVĚR	38
8 LITERATURA	39
9 SEZNAM OBRÁZKŮ	43
10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	45

1 ÚVOD

Pojednání ke státní doktorské zkoušce se zabývá studiem elastohydrodynamického (EHD) mazání povrchů s reálnými povrchovými nerovnostmi. Trend posledních let je přechod od statistického přístupu studia k deterministickému. V prvním případě se principiálně snažíme popsat velké množství dat topografie povrchu vhodnou statistickou veličinou (většinou jedinou hodnotou) a pomocí této veličiny popsat chování topografie v EHD kontaktu, v druhém případě vstupují veškerá data do simulací nebo experimentů a ve výsledcích se snažíme nalézt obecné zákonitosti a principy, což je mnohdy nelehký úkol. Do kategorie deterministických studií patří i studium chování harmonických složek povrchu při průchodu EHD kontaktem. Byl nalezen jednotný mechanismus, podle kterého se jednotlivé harmonické složky deformují uvnitř kontaktu. Toto pojednání je zaměřeno na přehled posledních publikací teoretických a experimentálních poznatků zabývajících se touto problematikou. Hlubší poznání chování povrchových nerovností v kontaktem pracujících při EHD režimu mazání, který je principem mazání mnoha strojních součástí (ložiska, ozubené kola, vačky a mnohé další), může být prospěšný k dokonalejšímu návrhu těchto prvků a v konečném důsledku umožnit strojům a zařízením práci s nižšími energetickými nároky a vyšší životností.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

2

Výzkum a studium elasto-hydrodynamického režimu mazání bylo v druhé polovině 20. století z velké části zaměřeno na zkoumání kontaktů ideálně hladkých součástí. Výsledkem je propracovaný teoretický popis, který byl kvalitativně i kvantitativně ověřen experimenty. V reálných součástech se však až na drobné výjimky ideálně hladké povrchy nevyskytují. Reálné povrchy mají svou drsnost.

Ve snaze zvyšovat energetickou účinnost strojů a zařízení, dochází v posledních desetiletích ke zvyšování přenášených zatížení, používání méně viskózních maziv a provozu strojů za vyšších pracovních teplot, což má za následek snižování tloušťky mazacích vrstev ve strojních prvcích. Tloušťky mazacích vrstev jsou dnes na úrovni srovnatelné s velikostí drsnosti funkčních ploch. V takových podmínkách není vliv drsnosti na mazání zanedbatelný a je nutné ho zkoumat.

Pro zjednodušení, první studie se zabývaly pouze globálním vlivem topografie třecích povrchů na mazací film. Jednalo se přitom o studium stochasticky rozmístěných nerovností [31], další studie využily řešení průměrované Reynoldsovy rovnice [32] k řešení EHD problému s drsnými povrchy. Výsledkem těchto prací bylo základní zjištění, že dochází k navýšení tloušťky mazacího filmu při změně podélně orientovaných nerovností (tj. ve směru valení) na isotropaní a dále na příčně orientované nerovnosti. Přičemž v případě hladkého kontaktu je tloušťka mazacího filmu vyšší než u podélně orientovaných nerovností, ale nižší než u nerovností isotropaních.

Pozdější práce braly v úvahu změnu topografie třecích povrchů vlivem tlaku v mazacím filmu, která má za následek zpětné ovlivnění tlaku. Hydrodynamický tlak vznikající v okolí jednotlivých povrchových nerovností způsobuje jejich elastickou deformaci. Tento jev je označován jako mikroelasto-hydrodynamické mazání (zkráceně MEHL nebo μ EHL).

Pro popis topografie se ukázaly být možné dva přístupy statistický a deterministický. Statistický přístup byl poprvé použit v sedmdesátých letech 20. století a řešil nedostatečné výpočetní a datové kapacity pro aplikaci deterministického popisu, který byl zprvu využit, k řešení liniového kontaktu [35], [36] za podmínek čistého smýkání jednoho povrchu vůči nehybné nerovnosti, na začátku 80. let.

V poslední době se nejvíce zájmu soustředilo na porozumění chování harmonických povrchových nerovností při průchodu vysoce zatíženou oblastí EHD kontaktu. Poprvé byly publikovány první řešení liniového kontaktu uvažující pohyb drsných třecích povrchů [37], [38], [39], které poukázaly na důležitost těchto přechodových podmínek.

Mohutný posun v možnostech numerických simulací byl umožněn nejen díky pokroku výpočetní techniky, ale také díky moderním vícevrstevným a vícesít'ovým metodám řešení („řešiče“) [40], [41], [42], které značně urychlily celý proces. Tyto techniky umožnily zahrnout do uvažování i povrchy s reálnými nerovnostmi. Proces výpočtu je však v těchto případech velmi časově náročný. Například pro řešení průchodu povrchu o délce 1 mm s reálnými nerovnostmi skrz bodový EHD kontakt je potřeba 5 hodin [16]. Přitom je možné brát v úvahu pouze nerovnosti s velikostí jedné osminy šířky kontaktu a větší (založeno na středně husté síti, tj. 30 bodů na vlnovou délku). Pro detailnější simulace čas výpočtu roste s třetí mocninou prostorové přesnosti. Tento čas je přijatelný pro hlubší analýzu chování jednotlivých

případů kontaktů. Ale jako obecný nástroj pro průmyslovou praxi jsou tyto časy nepřijatelné. K těmto účelům může být velmi užitečný model amplitudového útlumu poskytující rychlou predikci chování nerovností uvnitř kontaktu na základě známé nedeformované geometrie povrchu. Dle získané predikce lze u tenkých filmů daleko přesněji hodnotit výkonnost tribologických uzlů. Rozborem literatury v tomto oboru se zabývá další kapitola pojednání.

3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3

3.1 Teoretické studie

3.1

LUBRECHT A. A., VENNER C. H. „*Elastohydrodynamic lubrication of rough surfaces*“, Proceedings of the I MECH E Part J Journal of Engineering Tribology, Volume 213, Number 5, 1999, pp. 397-404(8).

VENNER C. H., LUBRECHT A. A. “*An engineering tool for the quantitative prediction of general roughness deformation in EHL contacts based on harmonic waviness attenuation.*” Proc. Instn. Mech. Engrs. Part J: J. Eng. Tribol., 2005; 219: 303-312.

VENNER C. H., MORALES-ESPEJEL G. E. „*Amplitude reduction of small-amplitude waviness in transient elastohydrodynamically lubricated line contacts*“, Proceedings of the I MECH E Part J Journal of Engineering Tribology, Volume 213, Number 5, 1999, pp. 397-404(8).

Článek se zabývá problematikou elastohydrodynamického (EHD) mazání kontaktů s povrchovými nerovnostmi, které se uvnitř kontaktu elasticky deformují. Prvním krokem pro porozumění chování povrchů s reálnými nerovnostmi je detailní znalost amplitudového útlumu harmonických složek. Jak u liniových, tak u bodových kontaktů s isotropními nerovnostmi může být amplitudový útlum popsán jedním bezrozměrným parametrem, který závisí na vlnové délce a provozních podmínkách včetně poměru kluz-valení. K teoretickému řešení bylo využito vícevrstvých a více-síťových technik řešení EHD problémů [2].

Výsledky

Liniový kontakt, čisté valení

Za podmínek čistého valení se vlnová délka povrchových nerovností uvnitř kontaktu nemění, také fluktuace tlaku a tloušťky mazacího filmu jsou ve fázi (pozdější studie ukázaly, že se mění i fáze). Původní amplituda povrchových nerovností A_i se redukuje na A_d . Deformovaná amplituda A_d je obecně funkcí A_i , λ , M_1 , L_1 a poměru kluz-valení. Závislost A_d na A_i je téměř lineární [2], proto je možné definovat relativní útlum neboli amplitudový útlum A_d/A_i , který závisí na vlnové délce a provozních podmínkách. Podmínky lze shrnout do jednoho parametru, bezrozměrné vlnové délky ∇_1

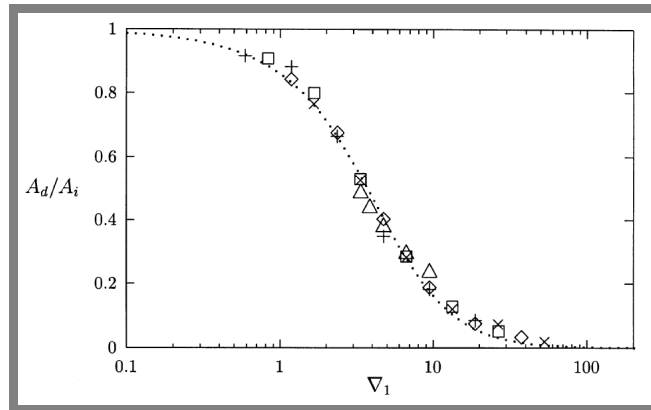
$$\nabla_1 = \frac{\lambda M_1^{3/4}}{b L_1^{1/2}}, \quad (1)$$

kde λ je vlnová délka povrchových nerovností, b je pološířka Hertzova kontaktu, M_1 Moesův bezrozměrný parametr rychlosti pro jednorozměrné problémy, L_1 Moesův bezrozměrný parametr materiálu pro jednorozměrné problémy.

Amplitudový útlum v závislosti na tomto parametru pro různé hodnoty λ , M_1 , L_1 vykazuje jednotné chování, které lze popsat jedinou křivkou (obr. 1).

$$\frac{A_d}{A_i} = \frac{1}{1 + 0.125\nabla_1 + 0.04\nabla_1^2}, \quad (2)$$

kde A_i je nedeformovaná (původní) amplituda, A_d deformovaná amplituda uvnitř kontaktu.



Obr. 1 Amplitudový útlum harmonických nerovností v liniovém kontaktu za podmínek čistého valení.

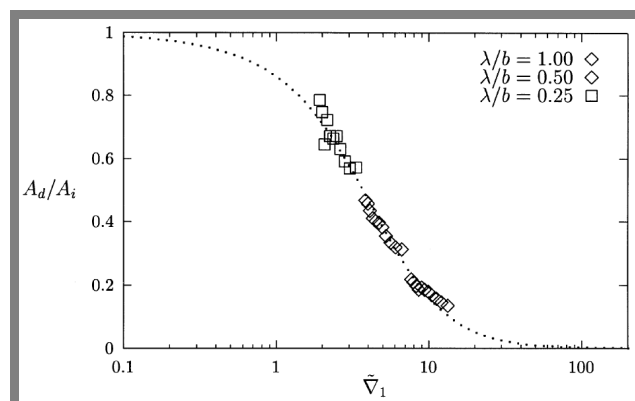
Křivku lze interpretovat tak, že dlouhé vlnové délky se utlumují více než kratší vlnové délky. Ty nejdelší se limitně utlumují úplně a nejkratší se opačně při průchodu kontaktem nemění.

Liniový kontakt, prokluz třecích povrchů

Za podmínek prokluzu se vlnová délka povrchových nerovností uvnitř kontaktu mění. V oblasti vysokého tlaku se pertubace tloušťky maziva indukované na vtoku šíří kontaktem střední rychlostí maziva. To má za následek rozdílnou vlnovou délku povrchových nerovností a tlaku.

Parametr ∇_1 je nutné modifikovat tak, aby závisel na poměru kluz-valení $\sigma = 2.u_1/(u_1+u_2)$. Lze jej začlenit do bezrozměrné vlnové délky tak, že

$$\tilde{\nabla}_1 = \frac{\nabla_1}{\sqrt{\sigma}}. \quad (3)$$



Obr. 2 Amplitudový útlum při prokluzu, pro tři různé vlnové délky.

S užitím tohoto parametru různé vlnové délky a poměry kluz-valení σ v rozsahu 0,5 až 1,5 vedou na jedinou křivku (obr. 2). Jedná se o zobecněnou křivku (1) ve tvaru

$$\frac{A_d}{A_i} = \frac{1}{1 + 0.125\tilde{\nabla}_1 + 0.04\tilde{\nabla}_1^2}. \quad (4)$$

Také v tomto případě lze amplitudový útlum popsat jediným parametrem $\tilde{\nabla}_1$.

Bodový kontakt, čisté valení

U bodového kontaktu se jedná o dvourozměrný problém, ve kterém se přidává parametr λ_y . Obecně jsou vlnové délky ve směru x a y nezávislé. V článku je studována isotropní nerovnost s identickými vlnovými délkami λ_x a λ_y .

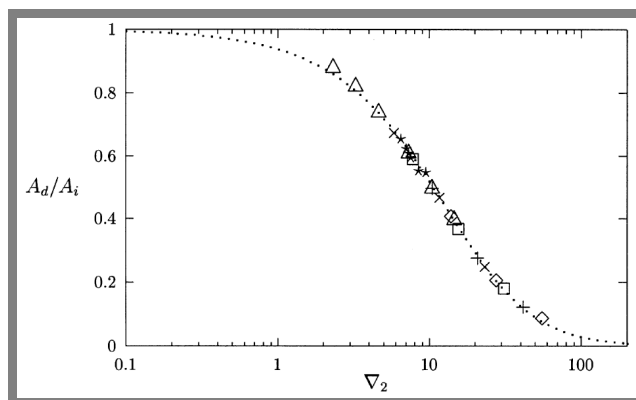
Stejně jako u liniového kontaktu, také zde je možné redukovat všechny proměnné do jediného parametru

$$\nabla_2 = \frac{\lambda}{a} \frac{M_2^{1/2}}{L_2^{1/2}}, \quad (5)$$

kde $\lambda = \lambda_x = \lambda_y$, a je poloměr Hertzova kontaktu.

Takto definovaný parametr ∇_2 vykazuje stejnou závislost na rychlosti u , jako v případě liniového kontaktu. Na obr. 3 jsou zobrazeny výsledky amplitudového útlumu pro různé rychlosti a zatížení, které lze proložit metodou nejmenších čtverců a tím získat dvou parametrickou křivku ve tvaru:

$$\frac{A_d}{A_i} = \frac{1}{1 + 0.15\tilde{\nabla}_2 + 0.015\tilde{\nabla}_2^2}. \quad (6)$$



Obr. 3 Amplitudový útlum jako funkce parametru ∇_2 za podmínek čistého valení.

Bodový kontakt, vliv elipticity

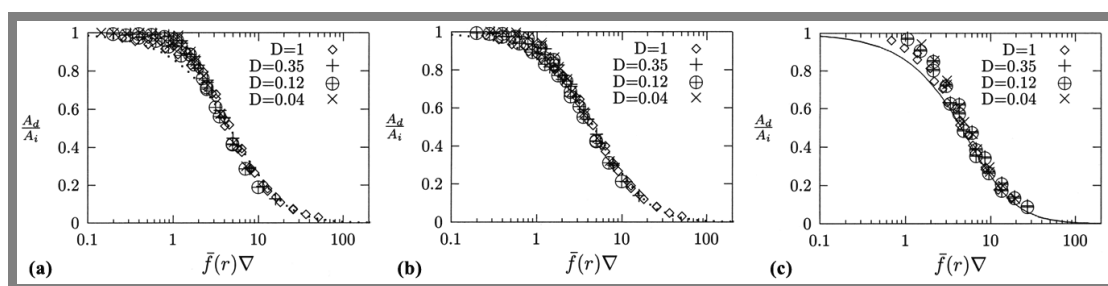
Přestože parametry ∇_1 , ∇_2 dokáží dobře vystihnout chování povrchových nerovností u liniového a bodového kontaktu (pořadí si odpovídá), nejsou tyto parametry vhodné pro popis eliptického kontaktu. Jak je prezentováno v článku [8] lze popsat chování liniových a bodových kontaktů jedním parametrem. Liniový kontakt je v podstatě limitní případ vysoce eliptického bodového kontaktu a proto je pro popis chování

liniových, bodových i bodových s libovolnou elipticitou vhodný parametr ∇ v tomto tvaru:

$$\nabla = q \frac{\lambda P^{1.5}}{b S^2}, \quad (7)$$

kde λ je vlnová délka povrchových nerovností, b je pološířka Hertzova kontaktu ve směru valení, P Greenwoodův parametr zatížení, S Greenwoodův parametr rychlosti a q parametr závislý na elipticitě D . Tento parametr q se mnoho neliší od jedné, proto pro praktické účely ho můžeme považovat za 1. Tím dostaneme podobu parametru ∇ dle vztahu (8).

Porovnání výsledků simulací pro různé elipticity prezentuje obr. 4 a potvrzuje oprávněnost použití parametru ∇ pro liniové, bodové i eliptické kontakty.



Obr. 4 Amplitudový útlum jako funkce parametru $\bar{f}(r)\nabla_2$ pro (a) příčně orientovanou nerovnost; (b) isotropní nerovnost; (c) podélně orientovanou nerovnost v eliptických kontaktech o čtyřech různých elipticitách D . Predikce (plná čára) dle vztahu (7).

Závěr

V článku bylo ukázáno, že v EHD liniovém kontaktu lze amplitudový útlum A_d/A_i harmonických povrchových nerovností popsat jediným bezrozměrným parametrem $\tilde{\nabla}_1$. Tento parametr závisí na vlnové délce, provozních podmínkách a poměru kluz-valení. Vztah (4) definuje závislost mezi amplitudovým útlumem a parametrem $\tilde{\nabla}_1$. Povrchové nerovnosti s dlouhými vlnovými délkami se při průchodu kontaktem deformují významně narozdíl od krátkých, které zůstávají téměř nezměněné.

Podobný parametr ∇_2 byl nalezen i pro bodový kontakt s isotropními nerovnostmi a dává předpoklad, že lze tento parametr zobecnit na případ anisotropních nerovností a podmínek prokluzu. Parametry ∇_1 a ∇_2 vykazují stejnou závislost na parametrech αp_h a u . Lze tedy předpokládat existenci jednotného mechanismu, kterým se řídí liniové a bodové kontakty. Existence tohoto mechanismu se potvrdila. Parametr ∇ dle vztahu (7), nebo (8) dokáže postihnout chování liniových, bodových i eliptických kontaktů.

Výsledky pro harmonické nerovnosti mohou být použity pro odhad chování složitějších povrchů použitím rozkladu pomocí Fourierovy transformace.

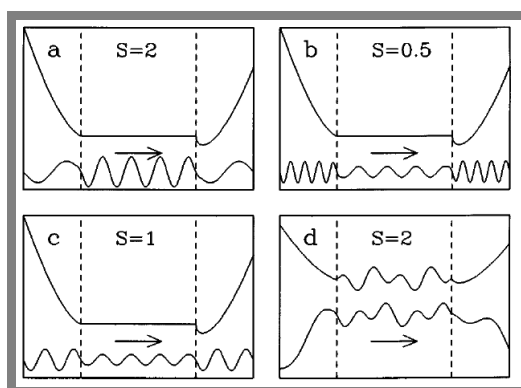
HOOKE C. J.³, „*The behaviour of low-amplitude surface roughness under line contacts*“, Proceedings of the I MECH E Part J Journal of Engineering Tribology, Volume 213, Number 4, 1999, pp. 275-285 (11).

Ve vysoce zatížených piezoviskózních kontaktech má drsnost povrchu snahu se utlumovat a to při libovolném prokluzu. Před tím než je utlumena, ovlivňuje vtok do kontaktu a způsobuje změny tloušťky. V článku je prozkoumáno toto chování a popsáno jak se mění přiblížení s vlnovou délkou harmonické nerovnosti a pracovními podmínkami. Pro popis tohoto chování byl definován bezrozměrný parametr jako poměr vstupní oblasti elasto-hydrodynamického kontaktu a vlnové délky harmonické povrchové nerovnosti. Byl sledován amplitudový útlum v závislosti na tomto parametru.

V článku byl pro vysoce zatížené kontakty odvozen zjednodušený tvar Reynoldsovy rovnice, z níž vyplývá že:

- povrchová nerovnost, pokud se nepohybuje střední rychlostí maziva u , se uvnitř kontaktu významně deformuje,
- změna přiblížení generovaná na vtoku prochází kontaktem střední rychlostí maziva u , bez ohledu na rychlost třecích povrchů.

Obr. 5 ilustruje tyto procesy; v obrázcích *a*, *b*, *c* je vrchní povrch modelován jako hladký a spodní povrch obsahující harmonické povrchové nerovnosti. Na obr. 5a je vrchní povrch nehybný a spodní povrch se smýká, proto má rychlost dvojnásobnou vůči střední rychlosti průtoku maziva kontaktem. Frekvence, s kterou nerovnosti přicházejí do kontaktu, je dána rychlostí pohybu spodního povrchu a vlnovou délkou nerovnosti. To indukuje na vstupu do kontaktu periodickou změnu přiblížení o poloviční vlnové délce, která se dále šíří kontaktem střední rychlostí maziva. V obr. 5b se povrch s nerovnostmi pohybuje poloviční rychlostí vůči střední rychlosti maziva, proto se vlnová délka dvojnásobí uvnitř kontaktu. Dále na obr. 5c se oba povrchy pohybují stejnou rychlostí. Vlnová délka povrchových nerovností se uvnitř kontaktů nemění, pouze se mění amplituda a fáze původních nerovností.



Obr. 5 Změna harmonického povrchu uvnitř kontaktů: (a) - (c) vrchní povrch je tuhý deformuje se pouze spodní povrch; (d) oba povrchy jsou elastické; (a) $\sigma = 2$; (b) $\sigma = 0,5$; (c) $\sigma = 1$; (d) $\sigma = 2$.

V obrázcích obr. 5a, b, c se veškeré efekty spojené s drsností projevují na spodním drsném povrchu. Ve skutečnosti, však drsnost ovlivňuje i hladký povrch. Tato situace je zobrazena na obr. 5d za podmínek poměru kluz-valení $\sigma = 2$.

HOOKE C. J. „*Surface roughness modification in EHL line contacts: the effect of roughness wavelength, orientation and operating conditions.*“ In Proceedings of the 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, 1998, pp. 193-202 (10).

VENNER C. H. a LUBRECHT A. A., „*Amplitude reduction of non-isotropic harmonic patterns in circular EHL contacts, under pure rolling.*“ In Proceedings of the 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, 1998, pp. 151-162(12).

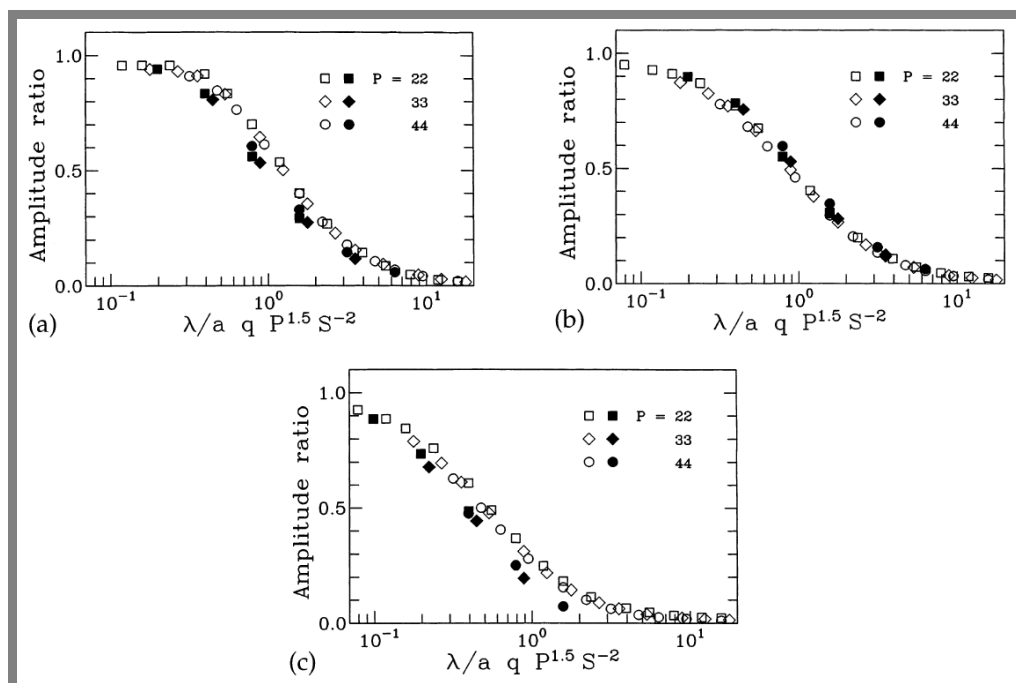
HOOKE C. J.³, VENNER C. H.², „*Surface roughness attenuation in line and point contacts*“, Proceedings of the I MECH E Part J Journal of Engineering Tribology, Volume 214, 2000, pp. 439-444(6).

Předchozí studie ukázaly obdobné chování povrchové drsnosti v liniových a bodových kontaktech. Proto existuje odůvodněný předpoklad jednotného mechanismu, kterým se řídí oba typy kontaktů. Studium a nalezením tohoto mechanismu se zabývají autoři v těchto člancích.

Výsledky

Výsledky pro bodový kontakt byly získány plným řešením použitím vícevrstvých metod, pro liniový kontakt tzv. analýzou perturbací tj. analytickým řešením vtoku do kontaktu jako lineárního ustáleného systému.

Pro bodový a liniový kontakt byly uvažovány podmínky, které dávaly stejný piezoviskózní parametr $c = 23,7$. Tato hodnota je typická pro vysoce zatížené kontakty. Výsledky porovnání bodového a liniového kontaktu (obr. 6) prokázaly soulad s maximální odchylkou menší než 0,1 pro všechny vlnové délky a orientace.



Obr. 6 Amplitudový útlum pro liniový (\diamond , \square , \circ) a bodový kontakt (\blacklozenge , \blacksquare , \bullet); (a) příčná nerovnost (b) isotropní nerovnost (c) podélná nerovnost

K největší deformaci povrchových nerovností dochází při podélné orientaci povrchových nerovností (obr. 6c). Oproti zbylým dvou orientacím se tento fakt

projevuje posunutím křivky doleva. Parametr, který sjednocuje chování obou typů kontaktu je definován takto

$$\nabla = \frac{\lambda}{a} \frac{P^{1,5}}{S^2}, \quad (8)$$

kde λ je vlnová délka povrchových nerovností, a pološířka Hertzova kontaktu ve směru valení, P Greenwoodův parametr zatížení, S Greenwoodův parametr rychlosti.

Rozdíly mezi výsledky studovaných dvou typů kontaktů lze přisoudit efektu příčného toku ve vstupní oblasti a rozdílné elastické odezvě. Z praktického hlediska lze tuto shodu považovat za dostatečnou.

Závěr

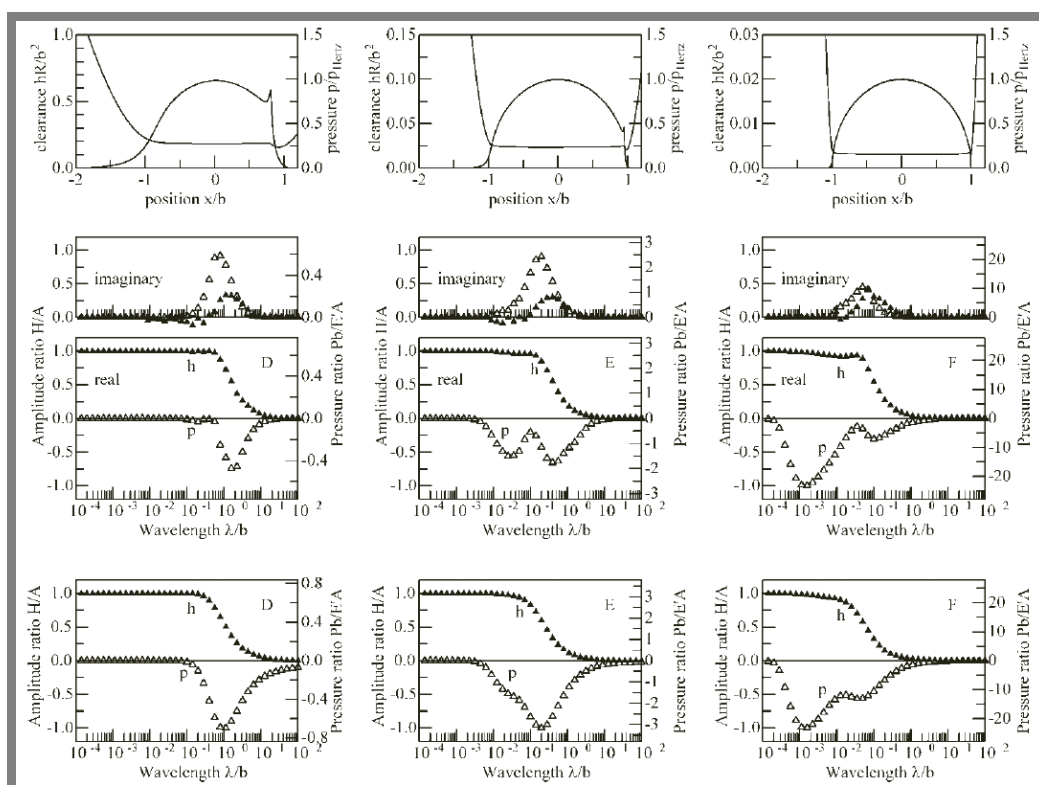
Plné numerické řešení bodových kontaktů a analýza pertubací liniového kontaktu (analytické řešení vtoku do kontaktu jako lineární ustálený systém) vykazují shodné výsledky. Lze tedy předpokládat, že chování nerovností v těchto typech kontaktů se řídí jednotným mechanismem.

HOOKE C. J., LI K. Y., „Rapid calculation of the pressures and clearances in rough, elastohydrodynamically lubricated contacts under pure rolling. Part 1: low amplitude, sinusoidal roughness“, Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science, Volume 220, Number 6, 2006 , pp. 901-913(13).

Cílem článku je rozšířit a doplnit znalosti o amplitudovém útlumu povrchových nerovností v liniiovém kontaktu. V článku byly navrženy dva stupně aproximace v oblasti krátkých vlnových délek, které umožnily získat dostatečně detailní a přesné řešení i pro hodnoty parametru ∇ v řádech 10^{-2} až 10^{-4} .

Výsledky

Za podmínek čistého valení dochází k fázovému posunu perturbací tlaku a amplitudy na vstupu do kontaktu. Tento posun lze sledovat v závislosti na parametru ∇ (obr. 7). Detailní studie ukázala, že s tím jak se zvyšuje zatížení kontaktů (obr. 7) se především chování tlakových perturbací zásadně mění. Dle obr. 7 lze pozorovat posun začátku přechodové křivky, kdy u více zatížených kontaktů je vidět pozvolný nástup daleko dříve. Dále velmi znatelně se mění průběh tlakových perturbací. Jejich maximum, případně druhé maximum se vyskytuje při nižších vlnových délkách. Toto druhotné maximum je spojeno s již zmíněným mírným poklesem křivky amplitudového útlumu a je způsobeno stlačitelností kapaliny, která se projevuje v případech, kdy pružnost kapaliny začíná být porovnatelná s pružností povrchů.

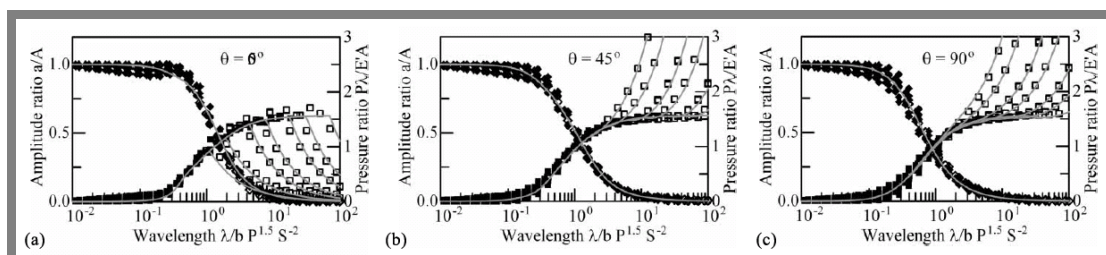


Obr. 7 Vliv vlnové délky na pertubace tlaku ve středu kontaktu a tloušťky mazací vrstvy. Směrem od vrchu dolů: rozložení tloušťky a tlaku pro hladký kontakt, diagramy pro příčně orientované nerovnosti, podélně orientované nerovnosti (ve směru valení). Zleva doprava zvyšování zatížení: $P = 10, S = 7,13; P = 20, S = 6; P = 40, S = 5,05$.

Obr. 8 shrnuje výsledky pro všechny pracovní podmínky do tří grafů podle orientace povrchových nerovností. Do grafu je vyneseno i bezrozměrný tlak ve tvaru

$$\frac{P\lambda}{E' A}, \quad (9)$$

kde P je Greenwoodův parametr zatížení, λ vlnová délka povrchové nerovnosti, E' redukovaný modul pružnosti a A amplituda složky povrchové nerovnosti.



Obr. 8 Závislost amplitudového útlumu a tlakového. (a) příčně orientovaná nerovnost; (b) nerovnost orientovaná pod 45° ; (c) podélně orientovaná nerovnost (ve směru valení). Výsledky byly získány analýzou perturbací. Křivky znázorněné šedou barvou jsou křivky, které vznikly proložením výsledků. A jednotlivé linky zleva doprava odpovídají hodnotám poměru $P^{1.5} \cdot S^{-2}$: 0,35; 0,62; 1,4; 2,49; 9,92; 22,4.

Závěr

Amplitudový útlum je v kontaktech doprovázen utvářením tlakových vln. Tento mechanismus je složitější než v případě amplitudového útlumu, závisí na stlačitelnosti kapalin. Tyto efekty jsou však patrné pouze u velmi malých vlnových délek, a protože ty mají také malou amplitudu, je jejich podíl na výsledném efektu rozložení tlaku zanedbatelný. Může být tedy vynechán a tím lze výrazně zjednodušit řešení.

Obecně perturbace tlakové stejně tak jako perturbace tloušťky maziva, produkované povrchovými nerovnostmi na vtoku do kontaktu, se mohou fázově lišit od originálního profilu povrchu. Proto je nutné je definovat s respektováním jejich amplitudy i fáze, například ve tvaru komplexních čísel. Změnu amplitudy a fáze v závislosti na parametru ∇ pro tři různé stupně zatížení a tři různé orientace nerovností zobrazuje obr. 7.

V článku byl definován tzv. tlakový poměr, který má být obdobou amplitudového. Závislost tohoto parametru spolu s amplitudovým útlumem na parametru ∇ je prezentován na obr. 8 pro příčně, podélně a pod úhlem 45° orientované nerovnosti.

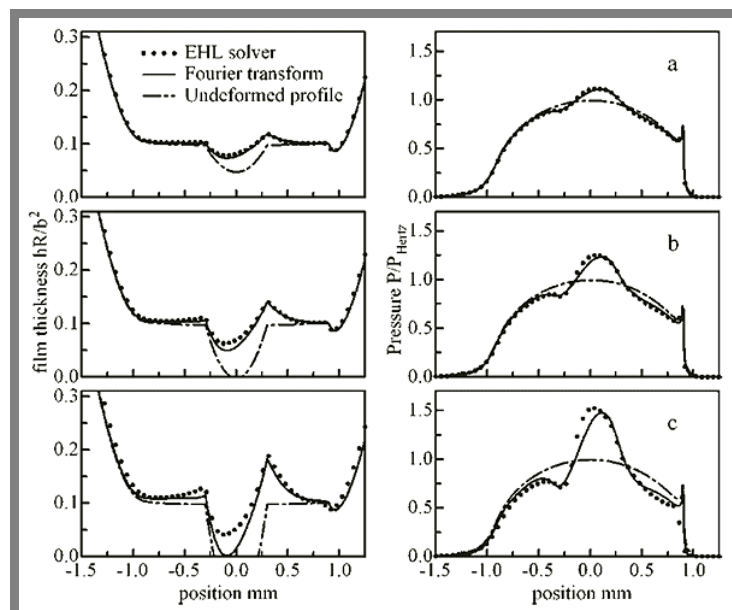
S využitím průběhů bezrozměrného tlaku v závislosti na parametru ∇ (obr. 8) lze predikovat tlakové příspěvky povrchových nerovností o daných vlnových délkách a získat tak celkový tlakový profil v kontaktu. To může být cenným nástrojem při studiu rozložení napětí pod povrchem a s tím spjatou problematikou kontaktní únavy. V konečném důsledku by to mohlo vést k praktickému nástroji pro konstrukci strojních uzlů.

HOOKE C. J., LI K. Y., „Rapid calculation of the pressures and clearances in rough, elastohydrodynamically lubricated contacts under pure rolling. Part 2: low amplitude, sinusoidal roughness“, Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science, Volume 220, Number 6, 2006 , pp. 915-925(11).

Článek se zabývá chováním povrchu s parabolickou nerovností při průchodu EHD kontaktem s cílem porovnat výsledky získané z numerického řešení s výsledky predikce dle modelové křivky amplitudového útlumu. Velikost nerovnosti byla volena tak, aby pokryla 60 % pološířky Hertzova kontaktu, maximální Hertzův tlak činil $p_h = 1$ GPa a Greenwoodovy parametry $P = 20$, $S = 10$, což přibližně odpovídá podmínkám v liniovém kontaktu běžných ozubených kol.

Výsledky

Obr. 9 zachycuje porovnání přiblížení povrchů a rozložení kontaktního tlaku pro oba způsoby řešení. Pro vrchní nerovnost, která má nejmenší výšku, je shoda velmi dobrá. Deformací povrchu se zvýšila bezrozměrná minimální tloušťka mazacího filmu v kontaktu z 0,5 na 0,75. Nerovnost také ovlivňuje tlak, jeho maximální hodnota narostla o relativně malých 20 %. Při zvětšování výšky parabolické nerovnosti, nejdříve na velikost rovnou průměrnému přiblížení povrchů a poté na její dvojnásobek, se výsledky obou metod začínají lišit.



Obr. 9 Porovnání predikce pomocí teoretického modelu (plná čára), s výsledkem plného numerického řešení (tečky) pro povrch s parabolickou nerovností (nedeformovaný profil: čerchov. čára).

Závěr

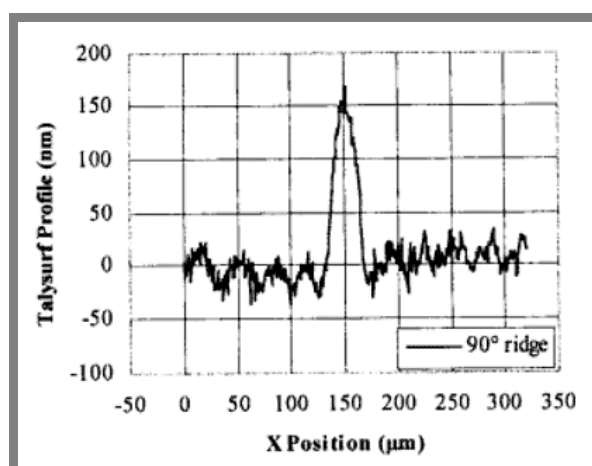
Za důvod odchylek výsledků obou metod lze považovat nelineární chování kontaktu. Zatímco výsledky získané pomocí predikce založené na Fourierově analýze se mění lineárně v závislosti na vzrůstající výšce nerovnosti, v některých případech tomu tak ve skutečnosti není. Vznikající odchylky se projevují převážně podhodnocením predikce v oblasti minimální tloušťky maziva. V ostatních místech je shoda přiblížení i predikce rozložení tlaku na dobré úrovni. Výsledky dalších různě velkých povrchových výstupků a geometrií tyto zjištění potvrzují.

3.2 Experimentální měření

GUAGTENG, G., CANN, P. M., SPIKES H. A., OLVER, A. „*Mapping of surface features in the thin lubrication regime*“, In Proceedings of the 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, 1998, pp. 175-183(9).

V článku byla popsána nová technika „spacer layer imaging method (SLIM)“ k měření tloušťky mazacího filmu uvnitř kontaktu povrchů s nerovnostmi. Tato technika je založena na „ultrathin film interferometry“ metodě, při vyhodnocování se koriguje deformace mezivrstvy. Bylo zjištěno, že měří s přesností 5 % v rozsahu 4 až 100 nm. Pro mazací filmy tenčí než 4 nm metoda vykazuje nižší přesnost a opakovatelnost.

Na studovaný povrch (kuličku) byl nanesen jeden výstupek z chromu o výšce 160 nm a šířce 55 μm (profil na obr. 10). Studována byla deformace nerovnosti orientované příčně a pod úhlem 60° vzhledem ke směru valení za podmínek čistého valení. Použito bylo mazivo SHF41, aplikováno zatížení odpovídající Hertzově maximálnímu tlaku 0,45 GPa a rychlosti v rozsahu 0,01 až 0,1 m/s.



Obr. 10 Profil studované nerovnosti změřený na přístroji Talysurf.

Výsledky

Deformace povrchové nerovnosti byla sledována v závislosti na bezrozměrném parametru ∇_2 , který je definován takto:

$$\nabla_2 = \frac{\lambda M^{1/2}}{b L^{1/6}}, \quad (10)$$

kde λ je šířka výstupku, b je pološířka Hertzova kontaktu a M , L jsou Moesovy parametry zatížení a materiálu. V experimentech činil poměr $\lambda/b = 5/14$ a vyhlazená nedeformovaná výška výstupku 140 nm. Byl porovnán poměr deformované výšky výstupku uvnitř kontaktu k hodnotě původní pro různé rychlosti (obr. 11) s teoretickým průběhem Vennerova modelu [6], který má tvar

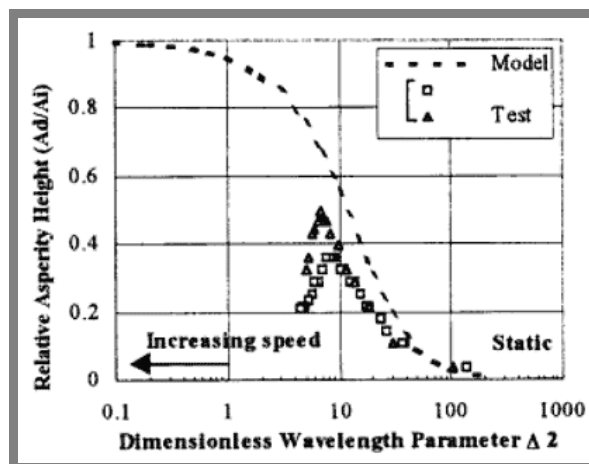
$$\frac{A_d}{A_i} = \frac{1}{1 + 0,05\nabla_2 + 0,0037\nabla_2^2}, \quad (11)$$

kde A_d , A_i jsou deformovaná a původní výška výstupku a V_2 bezrozměrná vlnová délka (10).

Výsledky porovnání (obr. 11) ukazují shodný trend v nárůstu výšky nerovnosti uvnitř kontaktu při vzrůstající rychlosti studovaných povrchů, ale experimentální výsledky jsou celkově posunuty doleva, tj. se deformují poněkud více, než predikuje teorie.

Při dalším zvyšování rychlosti valení, dosahuje poměrná deformace svého maxima a dále se vzrůstající rychlostí se deformace opět zvyšuje. Tento efekt byl teoreticky sledován Vennerem [12], ale pro případy prokluzu třecích povrchů. Experimenty byly prováděny za podmínek čistého valení, ale i tak u kontaktů s výraznými povrchovými nerovnostmi může dojít k mikro-prokluzu, a proto je možné přisoudit toto chování těmto specifickým podmínkám v blízkosti výstupku.

Ve výpočtovém modelu Vennera [6] byla uvažována harmonická nerovnost. Zatímco v tomto experimentu se jedná o jedinou kvazi-harmonickou nerovnost.



Obr. 11 Poměrná deformace povrchové nerovnosti v závislosti na bezrozměrné vlnové délce.

Závěr

U statických kontaktů dochází k téměř úplnému útlumu povrchových nerovností. Při zvyšování rychlosti dochází k obnově původní geometrie povrchových nerovností (redukci elastické deformace).

Obecný trend chování povrchových nerovností pozorovaný experimentálně souhlasí s existujícím teoretickým modelem. Pro vyšší rychlosti však nebylo pozorováno úplné odeznění deformace, tak jak předpovídá model. V článku bylo prezentováno možné vysvětlení, které je však nutno ověřit dalšími experimenty.

FÉLIX-QUIÑONEZ A., EHRET P., SUMMERS J. L., MORALES-ESPEJEL G. E., „Fourier analysis of a single transverse ridge passing through an elastohydrodynamically lubricated rolling contact: a comparison with experiment“, Proceedings of the I MECH E, Part J: Journal of Engineering Tribology, Volume 218, Number 1, 2004, pp. 33-43(11).

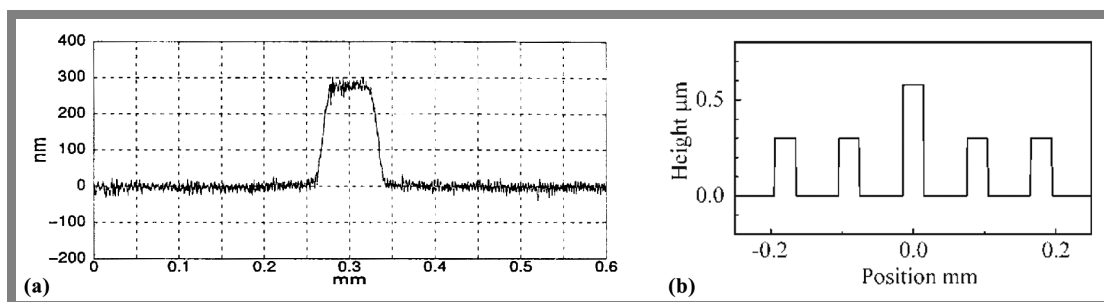
FÉLIX-QUIÑONEZ A., EHRET P., SUMMERS J. L., „On Three-Dimensional Flat-Top Defects Passing Through an EHL Point Contact: A Comparison of Modeling with Experiments“, J. Tribol., Volume 127, 2005, Issue 1, pp. 51-60 (10).

KANETA, N., TANI, N., a NISHIKAWA, H. „Optical interferometric observations of the effect of moving transverse asperities on point contact EHL films“. In Proceedings of the 29th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Tribology Series 41, 2003, pp. 101–109 (Elsevier, Amsterdam).

HOOKE C. J., LI K. Y., „Rapid calculation of the pressures and clearances in rough, elastohydrodynamically lubricated contacts under pure rolling. Part 2: low amplitude, sinusoidal roughness“, Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science, Volume 220, Number 6, 2006 , pp. 915-925(11).

Model amplitudového útlumu je založen na předpokladu, že povrchové nerovnosti jsou malé v porovnání s tloušťkou mazací vrstvy. Pokud je tato podmínka splněna, systém může být považován za lineární a výsledky by měli být přesné. Pro praktické použití je vhodný co nejširší rozsah použitelnosti. Otázkou tedy zůstává, v jakém rozsahu velikosti nerovností je lineární model použitelný. Články se zabývají studiem chování uměle vytvořené nerovnosti o velikostí blíží se 0,5 μm v EHD kontaktu.

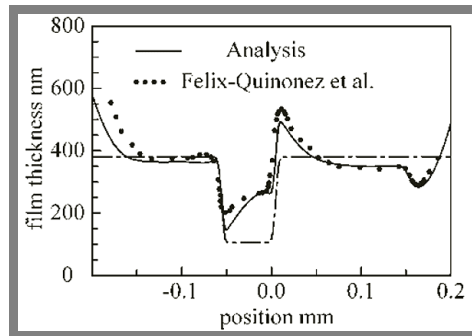
Felix-Quinonez [18], [19] studoval chování jednoho výstupku o výšce 300 nm a zužující se šířce z 80 μm na 60 μm (obr. 12a). K měření byla využita optická interferometrie využívající osvětlení bílým světlem a vyhodnocení tloušťky bylo založeno na posuzování barvy interferogramů na základě kalibrace získané pro statický kontakt.



Obr. 12 (a) Řez výstupkem naneseným na kuličce, Felix-Quinonez [18], [19]; (b) Profil soustavy výstupků uvažovaných Kanetou [20].

Výsledky

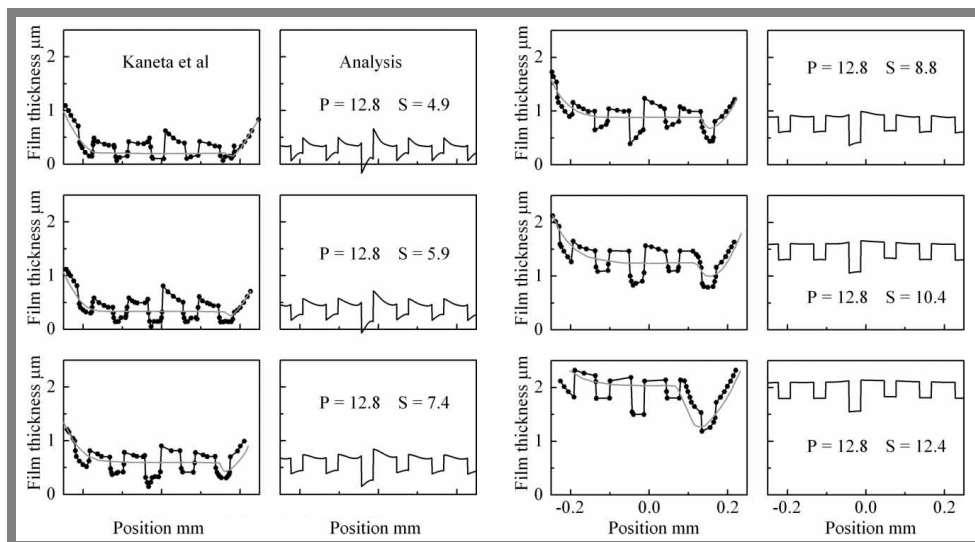
Obr. 13 zobrazuje porovnání predikovaného a změřeného profilu uvnitř kontaktu. V porovnání lze najít jisté drobné rozdíly, predikované minimální přiblížení je 170 nm oproti změřené hodnotě 200 nm, před nerovností je vypočtené přiblížení 480 nm v porovnání se změřenou hodnotou 530 nm. Celkově je shoda značná, velikost i tvar predikce odpovídá změřenému profilu.



Obr. 13 Porovnání experimentálně změřeného přiblížení, predikce pomocí FT a nedeformovaného profilu (čerchovaná čára).

Kaneta [20] se zabýval chováním soustavy skokových výstupků (obr. 12b) o výšce $0,3 \mu\text{m}$, prostřední výstupek měl výšku $0,58 \mu\text{m}$. Šířka výstupků byla $30 \mu\text{m}$ a byly rozmístěny s mezerami o velikosti $60 \mu\text{m}$. Skutečný profil byl poněkud více zaoblen než je idealizovaný profil na obr. 12b. K vyhodnocení tloušťky sloužila dvouchromatická optická interferometrie („duochromatic optical interferometry“). Měření byly provedeny pro šest rychlostí odpovídající Greenwoodovu parametru $S = 12,4; 10,4; 8,8; 7,4; 5,9$ a $4,9$. U všech měření byl Greenwoodův parametr zatížení $P = 12,8$ a pološířka Hertzova kontaktu $b = 0,185 \text{ mm}$.

Porovnání změřených profilů s predikovanými profily pomocí modelu amplitudového útlumu (predikce byla přičtena k přiblížení hladkého kontaktu) pro geometrii (obr. 12b) je znázorněno na obr. 14. Opět i tomto případě lze shodu souhrnně hodnotit jako velmi dobrou.



Obr. 14 Porovnání měření Kanety [20] s predikcí pomocí FT.

Závěr

Původní předpoklad pro to, aby odezva EHD kontaktu zůstala lineární, tj. že nerovnosti jsou řádově stejné s tloušťkou mazací vrstvy, byl podroben experimentálnímu ověření i pro případy kdy není tato podmínka splněna. Ukázalo se, že lineární model může poskytnout dobrou představu o celkovém chování nerovností i pro případy, kdy není tento předpoklad splněn.

KANETA, M., SAKAI, T., and NISHIKAWA, H., „*Effects of surface roughness on point contact EHL.*“ STLE Tribol. Trans., 1993, 36, 605–612.

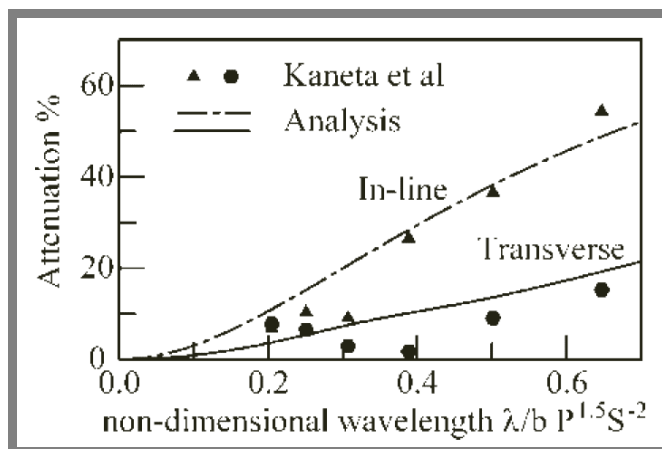
VENNER, C. H., KANETA, M., LUBRECHT, A. A., „*Surface roughness in elastohydrodynamically lubricated contacts.*“ Thinning Films and Tribological Interfaces, 38, Proceedings of the 26th Leeds-Lyon, 2000, 25–36(12).

HOOKE C. J., LI K. Y., „*Rapid calculation of the pressures and clearances in rough, elastohydrodynamically lubricated contacts under pure rolling. Part 2: low amplitude, sinusoidal roughness*“, Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science, Volume 220, Number 6, 2006 , pp. 915-925(11).

Tento článek se jako jeden z mála zabývá experimentálním studiem chování nerovností orientovaných jinak než příčně vůči směru valení. Při experimentech byl využit povrch tvořený přibližně sinusoidami orientovanými podélně nebo příčně. Oproti ideální sinusoidě se povrch lišil ostřejšími přechody v místě minim a maxim.

Výsledky

Na obr. 15 jsou vyneseny výsledky jako procentuální poměr deformované k původní výšce nerovnosti h_d/h_i v závislosti na bezrozměrné parametru ∇ dle vztahu (7). Díky použitému profilu povrchu není potřeba provádět Fourierovu analýzu a lze použít přímo výšky nerovností.



Obr. 15 Deformace příčně a podélně orientovaných povrchových nerovností v porovnání s teoretickým řešením Hooka (analýzou perturbací).

Závěr

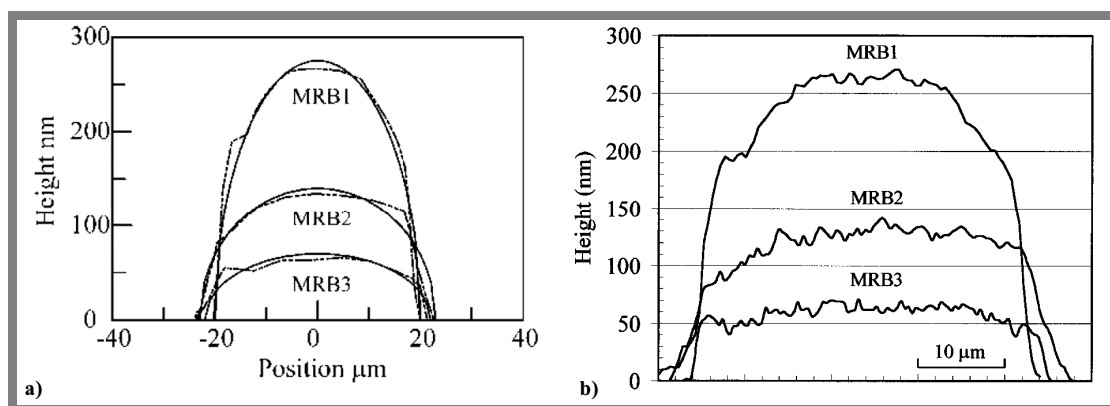
I přes rozptyl výsledků, lze z nich vyčíst určitou shodu s teoretickými predikcemi. Výsledky jednoznačně potvrdily vyšší deformaci pro nerovnosti ve směru valení oproti nerovnostem orientovaným příčně.

CHOO, J. W., GLOVNEA, R. P., OLVER, A. V., a SPIKES, H. A., „*The effects of three-dimensional surface roughness on lubricant film thickness in EHL contacts.*“ Trans. ASME, J. Tribol., 2003, 125, 533–542(10).

HOOKE C. J., LI K. Y., „*Rapid calculation of the pressures and clearances in rough, elastohydrodynamically lubricated contacts under pure rolling. Part 2: low amplitude, sinusoidal roughness*“, Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science, Volume 220, Number 6, 2006 , pp. 915-925(11).

V článku bylo studováno deformační chování a tloušťka mazací vrstvy mezi dvěma povrchy, z nichž jeden povrch byl opatřen dvourozměrnými povrchovými výstupky, tvarem blízkými se polokouli, a druhý byl hladký. Použity byly tři výšky výstupků 65, 129, 260 nm a jednotný průměr základny 40 μm . Obr. 16 zobrazuje profily v řezu (některé jemné detaily byly vynechány) v porovnání s proloženými polokoulemi. Výstupky tvořily čtvercovou matici s rozestupy 75 μm a pootočením o 22,5° vůči směru valení.

Pro měření byla využita metoda „spacer layer imaging method (SLIM)“, která umožňuje vyhodnocování celé plochy kontaktu a umožňuje měření v rozsahu 0 až 700 nm s rozlišením 3 nm. Ke kalibraci byla využita metoda měření tloušťky maziva „ultra-thin film interferometry“.

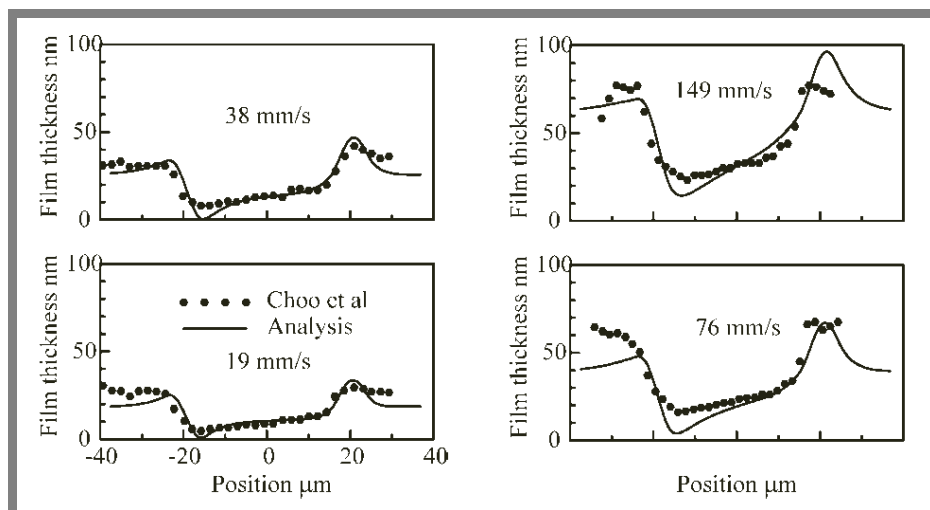


Obr. 16 Řez geometrií studovaných povrchových nerovností; a) Hooke, v porovnání s proloženou polokouli; b) Choo.

Výsledky

Výsledky byly získány pro sedm rychlostí, dvě maziva a tři případy nerovností. Na obr. 17 jsou porovnány změřené profily s numerickými predikcemi pro čtyři rychlosti povrchu MRB2 s výškou nerovnosti 129 nm a pro mazivo s nejnižší viskozitou. Plné čáry jsou numerické predikce založené na aplikaci teoreticky odvozených amplitudových křivek na Fourierovská spektra. Predikce deformace byla získána tímto postupem:

- rozložení původní geometrie (obr. 16) pomocí Fourierovy analýzy,
- aplikace amplitudové deformace (vztah 6) na jednotlivé komponenty spektra podle jejich bezrozměrné vlnové délky,
- zpětná transformace modifikovaného spektra.



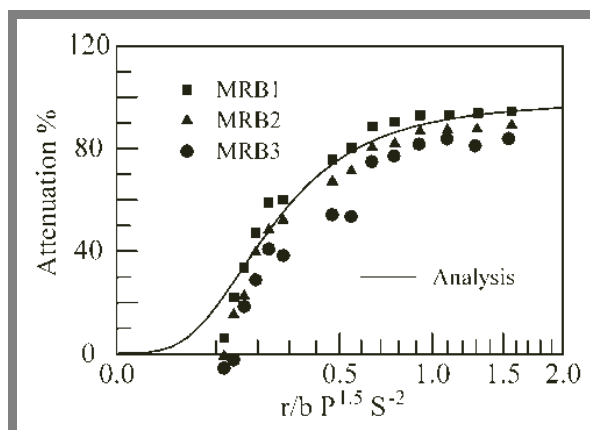
Obr. 17 Porovnání měřených profilů (tečky) s predikcí pomocí Fourierovy analýzy (plná čára).

Výsledky predikce byly přičteny k střední tloušťce maziva pro hladký kontakt za daných podmínek a také byly vyhlazeny v intervalech $4 \mu\text{m}$, aby se přiblížily podmínkám v experimentu. Shoda predikce s měřením je vysoká pro všechny pracovní podmínky. Avšak v predikci se projevuje trend již dříve publikovaný pro příčně orientované nerovnosti, kde minimální hodnota přiblížení povrchů je podhodnocená, což je patrné i v tomto případě.

Obr. 18 shrnuje všechny experimentální výsledky v porovnání s teoretickou predikcí. Deformace uvažovaných nerovností je vynesena jako poměrná změna výšky vzhledem k bezrozměrnému parametru poloměru nerovnosti ∇' ve tvaru:

$$\nabla' = \frac{r}{b} \frac{P^{1.5}}{S^2}, \quad (12)$$

kde r je poloměr nerovnosti, b pološířka Hertzova kontaktu a P , S Greenwoodovy parametry zatížení a rychlosti. Výška nerovností byla stanovena jako rozdíl mezi výškou ve středu vrcholu nerovnosti a výškou sedla mezi nerovnostmi. Z výsledků plyne dobrá shoda mezi teoretickou predikcí (plná čára) a experimentálním měřením (body) ve většině míst celého rozsahu. Rozdíly jsou patrné při nejvyšších rychlostech, kde výsledky jsou nižší než teoretická predikce.



Obr. 18 Poměrná změna výšky nerovností v závislosti na bezrozměrném parametru ∇' dle (6), Hooke.

Menší odchylky jsou patrné v rozdílech mezi poměrnou změnou výšek pro různě vysoké nerovnosti, kdy ty největší se poměrově deformují nejvíce. Jedním z možných vysvětlení je nelineární chování kontaktu, to by však předpokládalo zmenšující se rozptyl v rozdílech, při snižující se výšce nerovnosti. To není tento případ a pravděpodobnější je systematická chyba měřicí metody, chyby v teoretickém řešení kvůli zanedbání stlačitelnosti maziva, nebo použití výsledků řešení liniového kontaktu pro bodový případ. Každopádně jsou rozdíly pod 10 % a lze je považovat za malé.

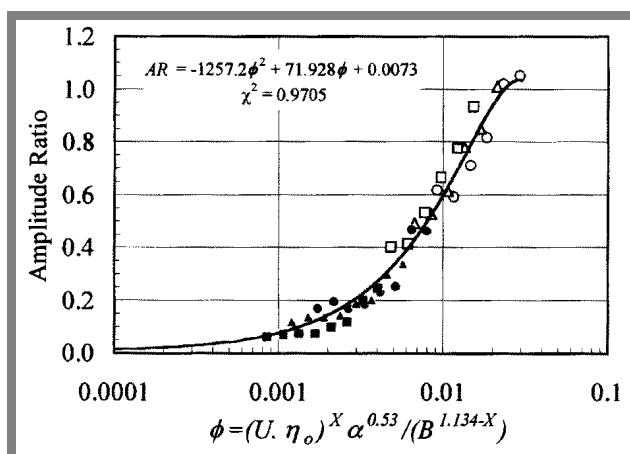
Obr. 19 prezentuje totožné výsledky poměrné deformace výšky nerovností v závislosti na Chooem nově navrženém parametru ϕ definovaném jako:

$$\phi = \frac{(U\eta_0)^X \alpha^{0,53}}{B^{1,134-X}}, \quad (13)$$

kde U střední rychlost průtoku maziva kontaktem, η_0 viskozita při okolní teplotě, α tlakově viskózní koeficient maziva, B nedeformovaná výška nerovnosti a X exponent parametru rychlosti. V závislosti na tomto parametru lze všemi výsledky proložit polynom druhého řádu ve tvaru:

$$AR = 0,0073 + 71,928\phi - 1257,2\phi^2, \quad (14)$$

kde AR je poměrný útlum výšky nerovnosti.



Obr. 19 Poměrný útlum výšky nerovnosti v závislosti na parametru ϕ , Choo.

Závěr

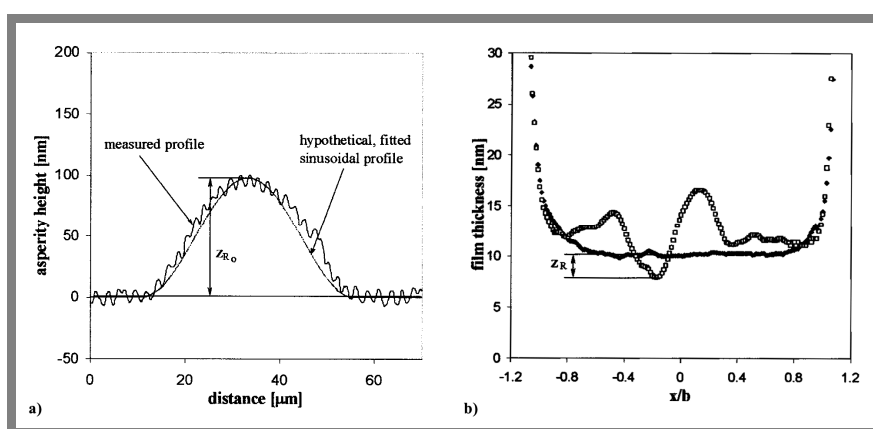
Teoretický model predikce útlumu povrchových nerovností (definován jako změna přiblížení stýkajících se povrchů v kontaktu k amplitudě původních nerovností) se pro nulovou střední rychlost blíží nule. Což pro drsné povrchy neodpovídá skutečnosti, kdy u statického kontaktu nedochází k úplnému vyhlazení povrchu.

Složitý model vysvětlení chování útlumu nerovnosti v kontaktu navržený Chooem nevystihuje výsledky lépe než ten dříve používaný viz. Obr. 18. Studované povrchové nerovnosti lze považovat za další drsné povrchy a není potřeba o nich uvažovat jako o speciálním případě.

Experimentální výsledky mazání povrchů s modelovými nerovnostmi ve tvaru polokoulí v bodovém kontaktu za podmínek čistého valení prokázali dobrou shodu s teorií.

GLOVNEA, R. P., CHOO, J. W., OLVER, A. V., and SPIKES H. A., „*Compression of a Single Transverse Ridge in a Circular Elastohydrodynamic Contact*“, J. Tribol. 125, 275 (2003), DOI:10.1115/1.1506325.

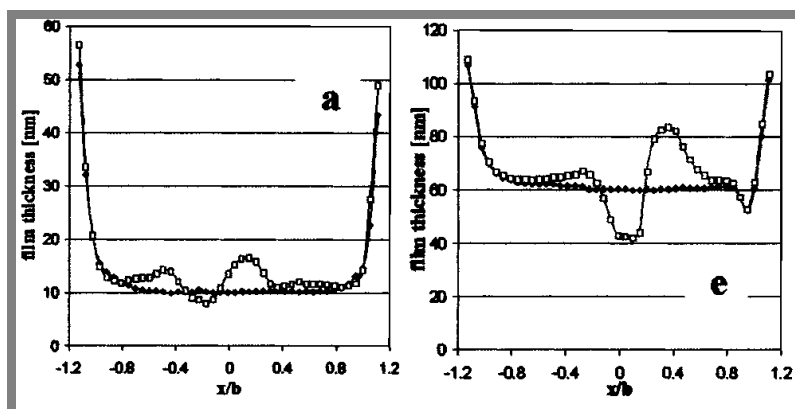
V tomto článku bylo detailněji pozorováno chování uměle vytvořené nerovnosti v podobě příčně orientovaného výstupku s profilem blízkým kvazi-sinusoidě (obr. 20) při průchodu EHD mazaným kontaktem. Výška nerovnosti činí $z_{R0} = 100$ nm, šířka přibližně $40 \mu\text{m}$ a délka 2 mm. Ke studiu byla použita vysokorychlostní měřicí technika „ultrathin film interferometry“, která vyhodnocuje tloušťku maziva na základě sledování spektrálního maxima každého bodu interferogramu při osvětlení bílým světlem. Toto maximum vypovídá o vlnové délce s maximální konstruktivní interferencí a souvisí s tloušťkou maziva. Metoda umožňuje měření v jednom řezu s přesností do 1 nm.



Obr. 20 a) řez původní povrchovou nerovností ve směru valení; b) způsob vyhodnocení deformované výšky nerovnosti.

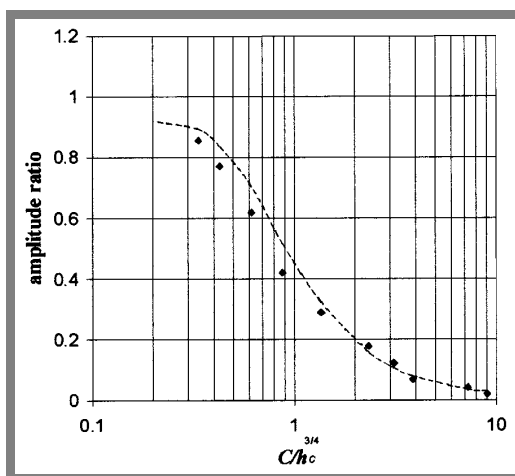
Výsledky

Experimenty byly provedeny za podmínek čistého valení, rychlost $0,025$ m/s, zatížení odpovídající maximálnímu Hertzově tlaku $0,5$ GPa a průměru kontaktu $0,260 \mu\text{m}$. Měření byly tři různé viskózní syntetické oleje PAO.



Obr. 21 Rozložení tloušťky maziva při průchodu nerovnosti kontaktem pro dvě různé kombinace maziva a teploty.

Obr. 21 zachycuje rozložení tloušťky maziva uvnitř kontaktu při průchodu nerovnosti přibližně uprostřed kontaktu pro dvě různé kombinace teploty a maziva, což odpovídá různým středním tloušťkám maziva. Před a především za nerovností dochází k lokálnímu zvýšení tloušťky maziva. Tento efekt byl již dříve pozorován a je označován jako zachycení maziva („fluid entrapment“). Např. v obr. 20b činí deformovaná výška výstupku z_r 2 % z původní, zatímco výška lokálního navýšení tloušťky maziva na sestupné hraně kontaktu tvoří 9 % výšky původní nerovnosti. Měřená deformovaná amplituda z_r (viz obr. 20b) je definována jako vzdálenost mezi tloušťkou maziva hladkého kontaktu a minimální tloušťkou maziva v případě kontaktu s nerovností, za účelem vynechání efektu zachycení maziva na obou hranách výstupku povrchu.



Obr. 22 Útlum výšky povrchové nerovnosti v závislosti na bezrozměrné vlnové délce.

Na Obr. 22 je vynesena deformace povrchového výstupku v závislosti v závislosti na bezrozměrné vlnové délce ∇_2 [8], ta může být upravena do podoby $C/h_c^{3/4}$, kde h je původní výška výstupku, C je konstanta, která obsahuje elastické vlastnosti povrchů, zatížení a tlakově-viskózní vlastnosti maziva. Shoda s teoretickým průběh je vzhledem ke zjednodušením dobrá.

Závěr

V článku byla využita nová metoda pro měření tloušťky mazací vrstvy uvnitř kontaktu s prokazatelně vyšší přesností, než vykazují dřívější metody. Zkoumána byla deformace výstupku při průchodu EHD kontaktem za odlišných podmínek (různá maziva a teploty). Pozorované chování prokázalo dobrou kvalitativní shodu s teoretickými predikcemi útlumu povrchových nerovností. Oproti předchozím studiím se podařilo získat výsledky, kde deformovaná výška v kontaktu činí 90 % původní hodnoty. Tedy nerovnost se za takovýchto podmínek téměř nedeformuje. Podmínky v experimentech však byly „měkčí“ než v technické praxi bývá obvyklé.

CHOO J. W., OLVER A. V., SPIKES H. A., „*The influence of transverse roughness in thin film, mixed elastohydrodynamic lubrication*“, Tribology international, vol. 40, no 2, 2007, pp. 220-232 (13).

Článek navazuje na předchozí práci, kde tvar nerovností relaxoval do původní podoby mimo kontakt. Cílem bylo rozšířit předchozí studium o měření při tlustších filmech a pozorovat další vývoj deformace v kontaktu.

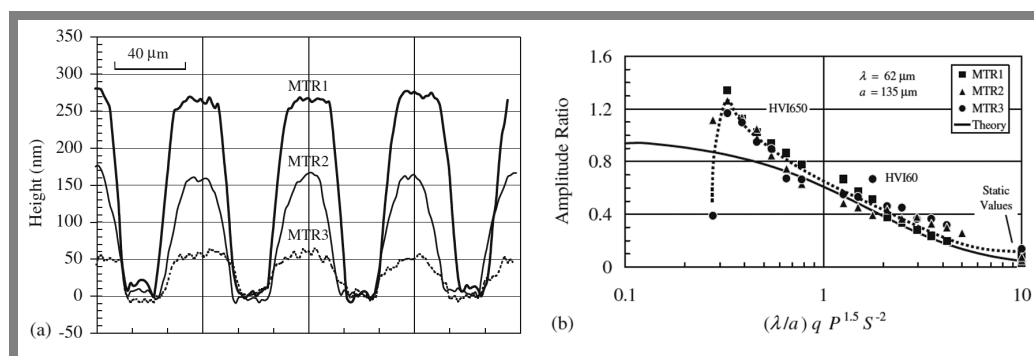
K měření byla uplatněna metoda měření tloušťky maziva SLIM („spacer layer imaging method“), která umožňuje měřit tloušťky maziva do 1 nm s přesností ± 1 nm a měřicí rozsah byl rozšířen na 720 nm.

Zkoumáno bylo chování soustavy několika příčných výstupků o výškách 60, 165, 270 nm (obr. 23a) v EHD kontaktu. Profil nedeformované geometrie byl změřen optickým profilometrem Wyko. Experimenty byly provedeny pro rychlosti třecích povrchů v rozsahu 19-210 mm.s⁻¹, při zatížení odpovídající Hertzově tlaku 0,527 GPa a podmínky čistého valení.

Výsledky

Na výsledcích rozložení tloušťky maziva v kontaktu je znatelný efekt zachycení maziva („lubricant entrapment“) před výstupkem a efekt vtlačeného filmu („squeeze film“), který se projevuje lokálním navýšením tloušťky a byl pozorován také v několika předchozích pracích.

Deformovaná výška výstupku je definována jako rozdíl výšky mezi vrcholem a sedlem. Výsledky v pravé části útlumové křivky (obr. 23b) jsou blízko teoretickým predikcím a deformace povrchových výstupků při nejnižších rychlostech a viskozitách dosáhla hodnoty 20 %. V levé části křivky se výsledky více liší od teoretických předpokladů, amplitudový útlum vzrostl na hodnotu 130 % a poté náhle poklesl na 40 %.



Obr. 23 (a) Profil povrchových nerovností ve směru valení; (b) Amplitudový útlum povrchových nerovností v závislosti na parametru ∇ dle (6).

Závěr

Podle výsledků se zdá, že amplitudový útlum je nezávislý na hodnotě nedeformované výšky nerovností. Při nárůstu rychlosti valení a tloušťky mazací vrstvy se všechny výstupky obnovují do původní podoby. Bylo zjištěno, že k plné obnově dochází při přibližně shodné hodnotě parametru tloušťky maziva $\theta = (U\eta_0)^X \alpha^{0.53} = 8 \cdot 10^{-6}$. Výsledky jsou však v rozporu s teoretickým průběhem, pro vyšší rychlosti, kde neočekávaně amplitudový útlum roste na 130 % a poté náhle klesá na 40 %.

3.3 Povrchy s reálnými nerovnostmi

HOOKE C. J., LI K. Y., „*Rapid calculation of the pressures and clearances in rough, elastohydrodynamically lubricated contacts under pure rolling. Part 2: low amplitude, sinusoidal roughness*“, Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science, Volume 220, Number 6, 2006, pp. 915-925 (11).

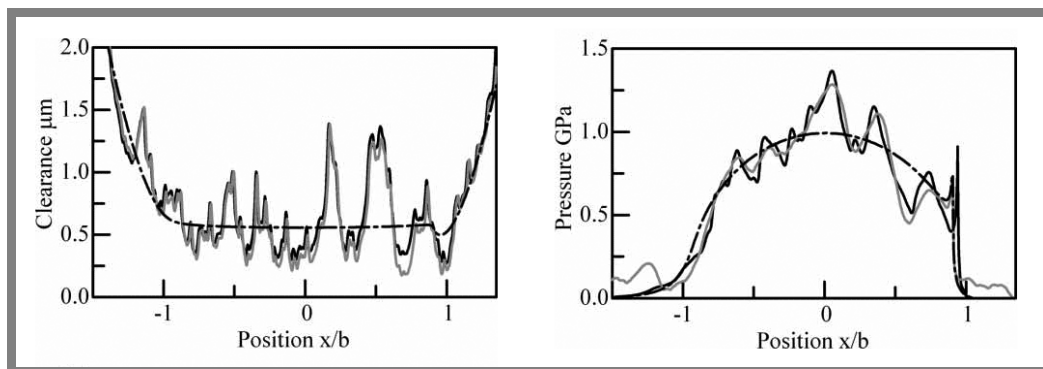
HOOKE C. J., „*Roughness Attenuation and Pressure Rippling in EHL Contacts*“, Book IUTAM Symposium on Elastohydrodynamics and Microelastohydrodynamics, Volume 134, ISBN 978-1-4020-4533-2, 2006, pp. 411-422 (12).

TAO J., HUGHES T. G., EVANS H. P., a SNIDLE R. W. „*Elastohydrodynamic response of transverse ground gear teeth*“. In Proceedings of 28th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, September 2001, 2002, pp. 447–458 (Elsevier, Amsterdam).

V článku se autoři zabývají porovnáním výsledků plného numerického EHD řešení s výsledky predikce na základě křivky amplitudového útlumu pro reálný povrch již zaběhlého ozubeného kola pro běžné podmínky u ozubených kol, což je maximální Hertzův tlak $p_h = 1$ GPa a hodnoty Greenwoodových parametrů $P = 20$, $S = 10$.

Výsledky

Obr. 24 ukazuje porovnání rozložení tloušťky maziva a tlaku v kontaktu z obou metod řešení. Plná černá linie je výsledek EHD řešiče, zatímco šedá čára je výsledek z predikce získané za pomoci Fourierovy analýzy (připočten k výsledkům hladkého kontaktu). Povrch pro EHD „řešič“ byl diskretizován na 1024 dílků, proto bylo možné získat přesné výsledky pro vlnové délky až do velikosti 1/8 pološířky Hertzova kontaktu. Přítomnost kratších vlnových délek vedla při řešení k chybám. Z porovnání plyne dobrá shoda mezi metodami ve všech místech, kromě oblasti okolo hodnoty $x/b = 0,7$, kde predikce podhodnotila minimální tloušťku maziva.

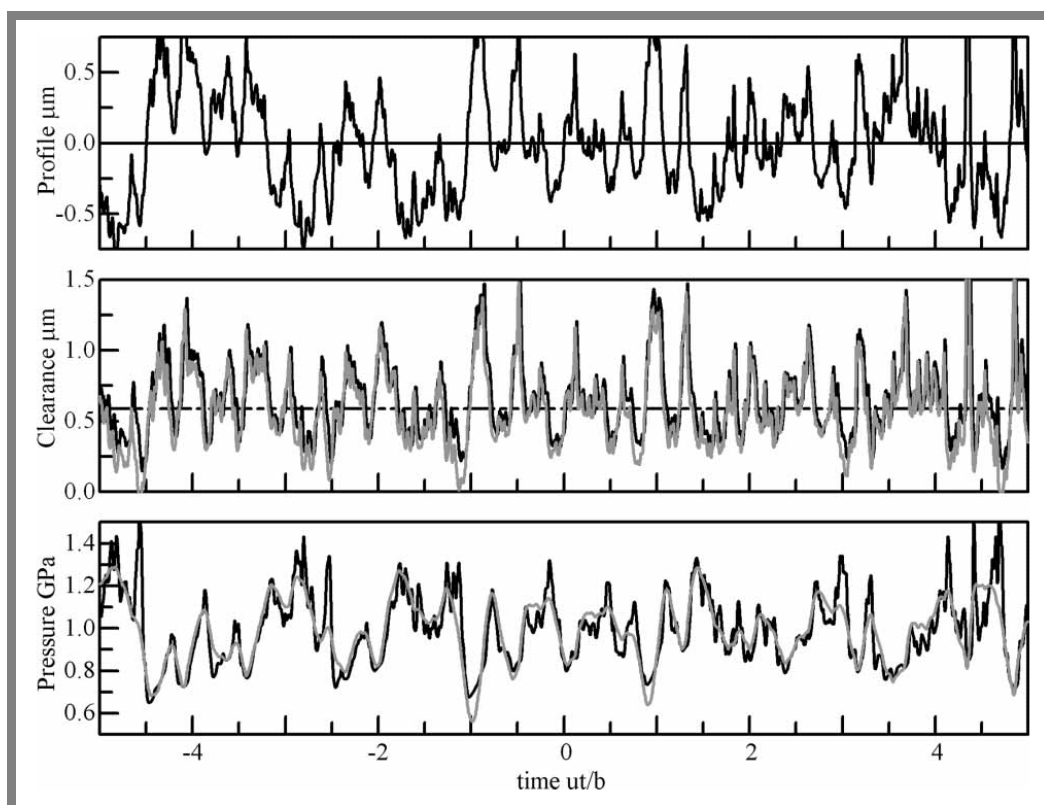


Obr. 24 Porovnání predikce rozložení tloušťky a tlaku získané dle teoretického modelu útlumové křivky (šedá plná čára) a z plného numerického řešení (černá plná čára).

Na obr. 25 je detailní porovnání nedeformovaného profilu, rozložení tloušťky maziva a tlaku v kontaktu určené dvěma uvažovanými způsoby (černá čára-EHD „řešič“, šedá linka-predikce, čerchované čára určuje hladký kontakt). Opět je vidět velmi dobrá shoda mezi výsledky obou metod. I když v místech, kde změna tloušťky

je negativní a větší než 50 % vůči střední hodnotě, predikce dává nižší hodnoty než EHD „řešič“.

U nejkratších vlnových délek mají dnešní EHD řešiče stále problém, který lze sice vyřešit odfiltrováním nejkratších vlnových délek, to však deformuje jak přiblížení tak tlak nepřijatelnou měrou. Jediným přijatelným řešením u liniových kontaktu je zvýšení hustoty diskretních bodů (30 bodů na vlnovou délku), pro případ bodových je navýšení hustoty výpočetně nezvladatelné a tím i řešení nesnadné.



Obr. 25 Porovnání predikce rozložení tloušťky a tlaku u reálného povrchu získané dle teoretického modelu útlumové křivky (šedá plná čára) a z plného numerického řešení (černá plná čára). V pořadí od vrchu dolů je zobrazen: změřený nedeformovaný profil, rozložení tloušťky mazacího filmu a rozložení tlaku v kontaktu pro uvedený profil.

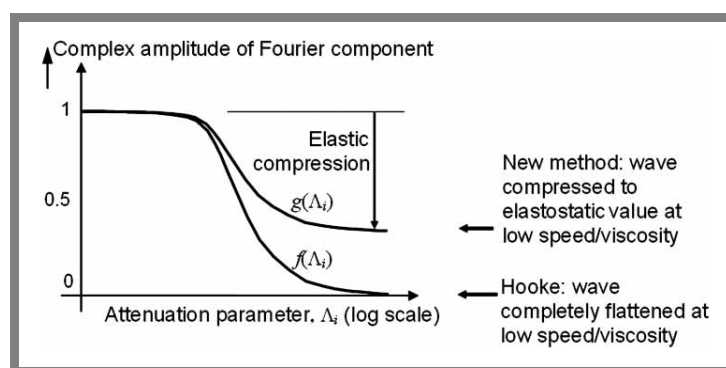
Závěr

Detailní porovnání plného EHD řešení s predikcí na základě křivky amplitudového útlumu reálného povrchu běžného ozubeného kola poskytlo velmi dobrou shodu v místech malých změn rozložení tloušťky (do 50 % hodnoty střední tloušťky). Pro větší změny lineární Fourierova transformace tihne k podhodnocení přiblížení. Tlak je tímto efektem téměř nedotčen a poskytuje dobrý odhad za všech podmínek. „Scuffing“ je hlavním porušujícím procesem u valivých kontaktů a proto může být cenné určení rozložení tlaku a s tím spjaté podpovrchové napjatosti.

OLVER A. V., DINI, D., „*Roughness in lubricated rolling contact: the dry contact limit*“, Proceedings of the I MECH E Part J Journal of Engineering Tribology, Volume 221, Number 7, 2007, pp. 787-791(5).

Standardní model aplikace amplitudového útlumu s využitím FFT (fast Fourier transform) pro predikci chování EHD mazaných kontaktů s povrchovými nerovnostmi správně nevystihuje případy při malých rychlostech, viskozitách a limitně také případ elasto-statický. Při snižování rychlosti, klasický přístup predikuje úplné vyhlazení povrchu, k čemuž u reálných strojních povrchů dochází zřídka. Většina reálných povrchů se ve statickém kontaktu úplně nedeformuje.

Navržena byla jednoduchá modifikace v podobě lineární transformace původního modelu, která bere v potaz případ elasto-statický (obr. 26). To znamená, že predikce deformací a rozložení tlaku může být snadno provedena pro libovolný parametr mazání Λ (tj. poměr střední tloušťky maziva a velikosti drsnosti povrchů).



Obr. 26 Schéma modelu klasického amplitudového útlumu v porovnání s nově navrženým limitem při minimální tloušťce maziva odvozeného od elasto-statického řešení.

Uvažován byl případ liniového kontaktu s příčně orientovanými nerovnostmi. Modifikovaný model je dán vztahem:

$$g(\nabla_i) = \frac{A_i^L}{A_i^0} = \frac{A_i^E}{A_i^0} + \left(1 - \frac{A_i^E}{A_i^0}\right) f(\nabla_i), \quad (15)$$

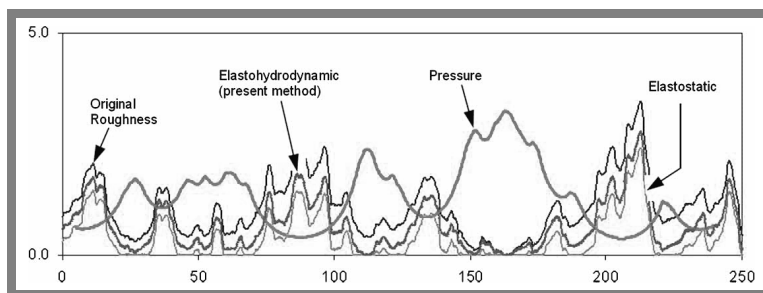
kde ∇_i je bezrozměrná vlnová délka, $f(\nabla_i)$ funkce standardního amplitudového útlumu (obr. 26), A_i^0 je komplexní amplituda i -té komponenty FT původního (nedeformovaného) povrchu, A_i^E komplexní amplituda i -té komponenty FT deformovaného povrchu v elasto-statickém případě, A_i^L komplexní amplituda i -té komponenty FT deformovaného povrchu v mazaném kontaktu. Poměr A_i^E/A_i^0 lze interpretovat jako limit deformace při minimální tloušťce maziva.

Amplitudy A_i^E jsou získány z Fourierovy transformace profilu, kdy nerovnosti povrchu jsou deformovány staticky. Dle navrženého modelu, kontakt automaticky přechází do tohoto stavu, s tím jak se snižuje rychlost povrchů.

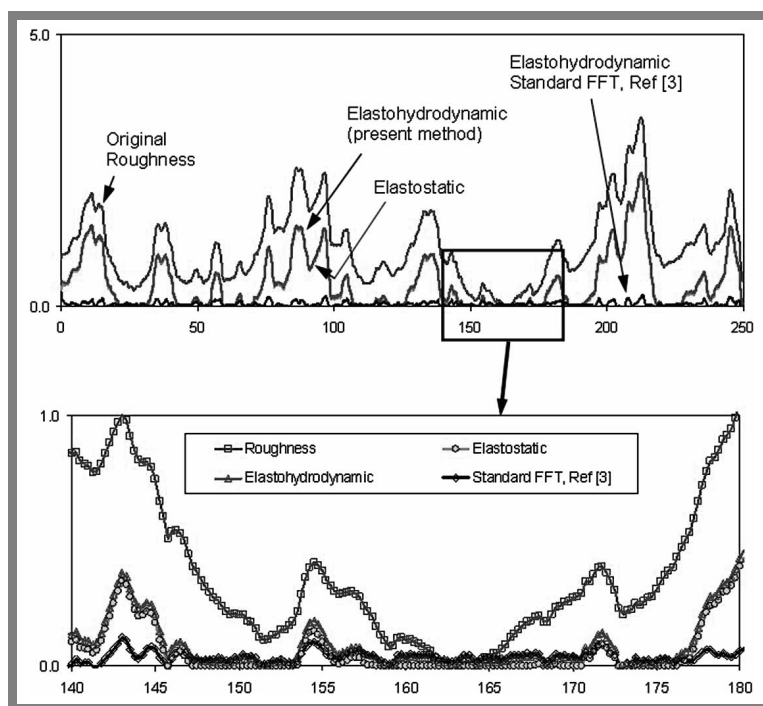
Výsledky

Testovaný povrch byl sejmuto kontaktním skenerem, použito bylo 1024 bodů a rozestupy 0,25 μm .

Obr. 27 prezentuje typické výsledky získané z experimentu za podmínek čistého velení. Popis aparatury naleznete v článku [29].



Obr. 27 Porovnání původního nedeformovaného, elastohydrodynamicky deformovaného a elastostaticky deformovaného povrchu; $p_0 = 1,69$ GPa, redukovaný poloměr křivosti $R_c = 4,91$ mm, $\eta_0 = 0.005465$ Pa.s, $\alpha = 12,25$ GPa⁻¹, $E^* = 110$ GPa. Horizontální osa v μm, vertikální osa v μm a GPa



Obr. 28 Porovnání původního nedeformovaného, EHD deformovaného (rychlost 10 mm/s), elastostaticky deformovaného povrchu a výsledky standardního modelu amplitudového útlumu.

Na obr. 28 jsou zobrazeny výsledky pro velmi malou rychlost třecích povrchů. Změřený profil mazaného kontaktu je velmi blízko elasto-statickému. Pro porovnání je zakreslen i profil získaný pomocí standardního amplitudového útlumu.

Závěr

Byla použita Fourierova transformace elasto-staticky deformovaného kontaktu s povrchovými nerovnostmi k návrhu upraveného modelu, který koresponduje s výsledky standardního modelu amplitudového útlumu a zavádí limit deformace pro tenké mazací filmy. To umožňuje konsistentní predikci v širším spektru provozních podmínek zahrnující plný EHD režim, smíšené a mezní mazání. Náročný úkol je ověření metody především v režimu smíšeného mazání, kde opotřebení a poškození povrchu komplikují experimenty. Také důsledné numerické modelování za těchto podmínek není snadné. Může nastat kavitace, efekty maziva, ke kterým dochází blízko povrchů („slip“, viskózní mezivrstva) a také problémy se samotným formováním mezního mazacího filmu.

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE

Studie zabývající se chováním drsnosti povrchových nerovností v elasto-hydrodynamickém (EHD) kontaktu lze rozdělit do dvou větví, to na teoretické simulace a experimentální měření. Další dělení je možné podle charakteru uvažovaných nerovností na studie zabývající se uměle vytvořenými nerovnostmi a na práce uvažující povrch s reálnými nerovnostmi.

Mezi teoretickými simulacemi se ukázaly být přínosné dvě metody řešení problému a ukázalo se, že oba přístupy poskytují obdobné výsledky. První je tzv. analýza pertubací, která umožňuje převést problém vysoce zatíženého liniového kontaktu na lineární řešení ustáleného stavu [1], [13], [14]. Výhodou je hlubší pohled do mechanismů probíhajících v kontaktech. Druhou metou je plně numerické řešení kontaktu jako přechodový problém s využitím moderních vícevrstvých a více síťových metod. Výhodou je možnost řešit bodový kontakt [40], [41], [42].

Z teoretických simulací lze vyvodit několik obecných závěrů:

- Chování harmonických povrchových nerovností lze popsat v závislosti na jednom bezrozměrném parametru ∇ , který je obecně funkcí vlnové délky, pracovních podmínek, prokluzu a elipticity.
- Toto chování je definováno jako amplitudový útlum, to je poměr mezi amplitudou deformované nerovnosti vůči amplitudě původní. Pro liniové i bodové kontakty byl zjištěn jednotný mechanismus útlumu tzv. „S“ křivka.
- Křivku amplitudového útlumu lze interpretovat tak, že povrchové nerovnosti s dlouhými vlnovými délkami se při průchodu kontaktem deformují více než nerovnosti s kratšími vlnovými délkami. Limitní případy jsou úplná, nebo žádná deformace.
- Pro nerovnosti o velikosti srovnatelné se střední tloušťkou mazací vrstvy je závislost parametru ∇ na vlnové délce lineární.
- Za předpokladu lineárního chování systému lze predikovat deformaci libovolného povrchu tímto způsobem. Na původní povrch aplikovat Fourierovu analýzu (FT), získané jednotlivé komponenty deformovat podle křivky útlumu v závislosti na parametru ∇ a výsledné spektrum opětovně složit inverzní FT.
- Pro liniový kontakt byl definován parametr ∇_1 , pro bodový parametr ∇_2 a souhrnně liniové, bodové a eliptické kontakty nejlépe vystihuje parametr ∇ .

Experimentální studie co se týče dosažených výsledků, výrazně zaostávají za teorií a jsou stále aktuálním tématem. Z analýzy experimentálních studií lze vyvodit několik závěrů:

- Většina experimentů se zabývá studiem uměle vytvořených nerovností.
- Na modelových nerovnostech byl amplitudový útlum kvalitativně i kvantitativně ověřen experimenty.
- Pokud připustíme o něco vyšší nepřesnost, je predikce použitelná i za podmínek kdy povrchové nerovnosti jsou řádově větší než střední tloušťka mazací vrstvy.
- Průběhy za podmínek prokluzu byly ověřeny pouze kvalitativně, kvantitativní ověření nebylo dosud provedeno ani na modelových nerovnostech.
- Pro povrchy s reálnými nerovnostmi „nebylo“ dosud prezentováno žádné kvalitativní nebo kvantitativní experimentální ověření ani nepřímé ověření porovnáním experimentu s predikcí.

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Cílem disertační práce je experimentální ověření teoreticky navrženého modelu chování povrchových nerovností v EHD kontaktu (model amplitudového útlumu) na površích s reálnými nerovnostmi. Použitelnost modelu na povrchy s reálnými nerovnostmi je zatím pouze předpokládána a nebyla dosud ověřena experimentem. Pro redukci možných negativních vlivů využít in-situ způsob měření na totožném místě kontaktu. Z tohoto důvodu je nezbytné doplnění současné metody měření tloušťky mazací vrstvy o metodu měření topografie povrchu na optickém bezkontaktním principu.

Realizace cíle disertační práce předpokládá splnění následujících dílčích cílů:

Část experimentální

- úprava a doplnění měřicí aparatury,
- implementace metody pro optické měření topografie povrchu,
- ověření přesnosti měření topografie povrchu,
- provedení měření topografie na vhodných površích,
- provedení in-situ měření tloušťky mazací vrstvy za různých experimentálních podmínek.

Část vyhodnocování

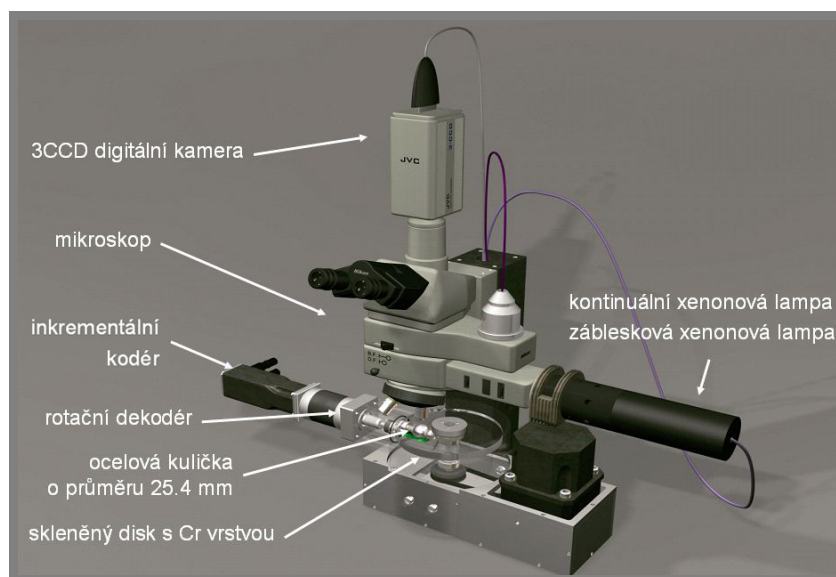
- navrhnout vhodný způsob zpracování a vyhodnocení amplitudového útlumu z naměřených dat,
- zaměřit se na vliv reálných zdrojů chyb na výsledky měření a přizpůsobit vyhodnocení tak, aby se negativní vlivy redukovaly,
- porovnání výsledků s teoretickými modely, popřípadě nalezení nových obecných pravidel a zákonitostí.

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

6.1 Úprava a doplnění měřicí aparatury

Použitá měřicí aparatura se skládá ze tří základních částí: simulátoru, mikroskopového zobrazovacího systému, řídicí a vyhodnocovací jednotky.

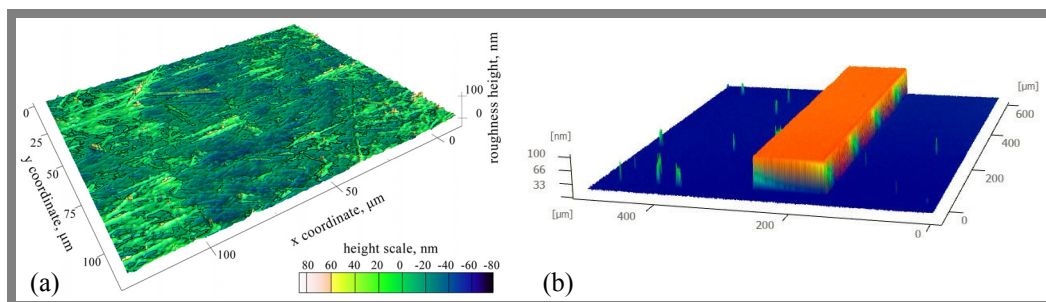
Princip tribologického simulátoru vychází z koncepce navržené Goharem [44]. Slouží k modelování podmínek EHD mazaného kontaktu, ve kterém je tenký mazací film vytvářen ve styku mezi rotujícím skleněným kotoučem a otáčející se ocelovou kuličkou o průměru 25,4 mm. Oba třecí povrchy mohou být nezávisle poháněny servomotory, a tedy může být řízen poměr kluz-valení mezi povrchy. Mikroskopový zobrazovací systém tvořený standardním průmyslovým mikroskopem s episkopickým osvětlovačem a telecentrickým chodem paprsků. Zdrojem světla je kontinuální nebo záblesková xenonová lampa, která je synchronizována s pohybem kuličky tak, že veškerá měření jsou prováděna na stejném místě jejího povrchu. Řídicí a vyhodnocovací jednotka se skládá z osobního počítače, elektroniky pro napájení krokových motorů a řady vstupně/výstupních karet umožňujících oboustrannou komunikaci mezi počítačem a simulátorem, kamerou a dalšími zařízeními.



Obr. 29 Schéma měřicí aparatury.

6.1.1 Měření topografie povrchu

Použitá metoda pro zjištění topografie reálných povrchových nerovností v nezátíženém stavu je interferometrie s řízenou změnou fáze („Phase shifting interferometry“) [47], [48]. K měření se využívá monochromatický svazek světla, který prochází soustavou čoček a clon, odráží se od polopropustného zrcadla k děliči svazku. Zde se paprsek rozděluje, jedna jeho část se odráží k referenčnímu zrcadlu a druhá k měřenému povrchu. Odražené paprsky vytvářejí výsledný interferogram, který je snímán digitální CCD kamerou a zpracováván počítačem. Za tímto účelem je mikroskopový zobrazovací systém doplněn o Mirauv interferenční objektiv s referenčním zrcadlem namontovaný na piezoelektrickém posuvu.



Obr. 30 (a) příklad změřeného povrchu s reálnými povrchovými nerovnostmi; (b) výsledky kalibrace na standardu SHS 880 QC VLSI.

Tato měřící metoda umožňuje stanovit topografii povrchu ze sady interferogramů získaných pro různý fázový posuv. Změny fáze je dosaženo změnou vzdálenosti mezi referenčním zrcadlem a měřeným povrchem, což je realizováno pomocí piezoelektrického posuvu. Ten je ovládán prostřednictvím řídicí jednotky piezoelektrického posuvu z osobního počítače. Ke zpracování se využívá speciálně vyvinutý software [48], který byl upraven k in-situ měření topografie. Rozlišitelnost interferometrie s řízenou změnou fáze se pohybuje řádově v desetinách nm a kalibrace se provádí na standardu SHS 880 QC VLSI (obr. 30b).

6.1.2 Měření tloušťky mazacího filmu

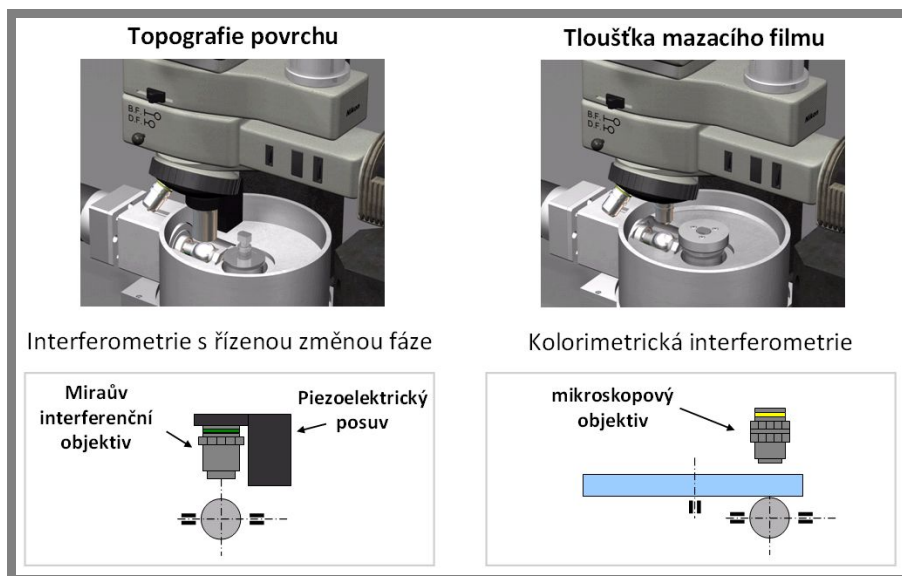
6.1.2

Při zkoumání rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém EHD kontaktu se využívá kolorimetrické interferometrie („Thin film colorimetric interferometry“) [45], [46]. Rozložení tloušťky mazacího filmu do značné míry vypovídá o topografii povrchu při zatížení uvnitř kontaktu. Princip metody je následující. Světlo ze světelného zdroje dopadá kolmo na kontaktní oblast, kde se odráží na rozhraní mezi sklem a vrstvou chrómu a na rozhraní mezi mazacím filmem a deformovaným povrchem kuličky. Odražené paprsky spolu interferují, výsledné interferenční barvy jsou snímány kamerou. Získaný obraz je převeden do barevného prostoru CIELAB. V tomto systému jsou pomocí diferenční rovnice kvantitativně porovnány barvy mezi vyhodnocovaným interferogramem a etalonem. Etalon je získán z monochromatického a chromatického interferogramu zaplaveného statického kontaktu. Tato metoda je implementována do počítačového programu. Rozlišitelnost kolorimetrické interferometrie je 1 nm.

6.1.3 In-situ měření

6.1.3

Cílem in-situ měření je minimalizovat zdroje chyb při měření integrováním obou metod do jednoho zařízení, které společně využívá velkou část zařízení (mikroskop mimo objektiv, kamera atd.). Měření se provádí ve dvou krocích v těsném sledu (obr. 31), nejprve se vyjme disk ze simulátoru a kulička se důkladně chemicky očistí. Provede se měření topografie povrchu, poté se simulátor naplní nezbytným množstvím maziva a změří se rozložení tloušťky maziva za předem daných podmínek, přitom jednotná poloha kuličky je zajištěna systémem synchronizace.



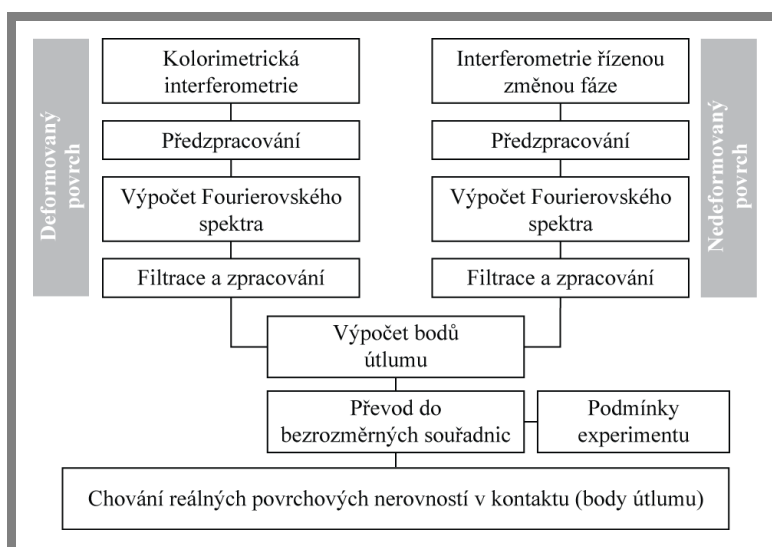
Obr. 31 Schéma in-situ měření.

6.2 Zpracování

6.2.1 Základní schéma zpracování

Podstata zpracování (obr. 32) je založena na rozkladu změřených dat pomocí Fourierovy transformace totožného nedeformovaného, deformovaného místa na kuličce s reálnými povrchovými nerovnostmi a následné porovnání získaných spekter. Jako poslední krok je potřeba uplatnit podmínky experimentu a převést výsledky do bezrozměrných souřadnic.

Dalším krokem bude detailní rozbor vlivů možných zdrojů chyb na přesnost získaných výsledků popsaným zpracováním. Pokud to bude nutné, tak navrhnout vhodný způsob předzpracování zdrojových dat nebo filtraci a zpracování dat ve spektrální oblasti k minimalizaci negativních vlivů chyb.

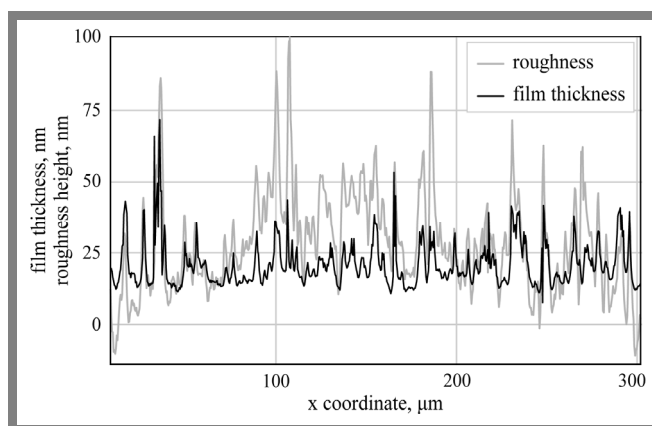


Obr. 32 Základní schéma zpracování dat.

6.3 Současné výsledky

Jako experimentální materiál byla použita ocelová kulička z materiálu AISI 52100 a isotropními povrchovými nerovnostmi s drsností $R_a = 12,4$ nm, $R_q = 16,9$ nm. Použito bylo LSB/S mazivo s dynamickou viskozitou $\eta = 0,75$ Pa.s, aplikováno bylo zatížení 47,7 N, které odpovídalo 0,607 GPa maximálnímu Hertzově tlaku, pološířce kontaktu 195,7 μm a rychlost činila 0,00044 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Experiment byl proveden za podmínek čistého valení.

Na Obr. 33 je zobrazeno porovnání profilu jednoho řezu nedeformované topografie povrchu a tloušťky mazacího filmu v kontaktu. Ve výsledcích lze nalézt oblasti, které evidentně naznačují tendenci se utlumovat tak, jak predikuje princip amplitudového útlumu. Místa, které jsou reprezentovány dlouhými vlnovými délkami, se utlumují mnohem více, než ty které jsou tvořeny krátkými vlnovými délkami. Uvedené výsledky získané pomocí navržené metodiky in-situ měření poskytují dobré vstupní data pro následné zpracování, které bude předmětem dalšího řešení disertační práce.



Obr. 33 Porovnání profilu řezu nedeformované topografie a tloušťky mazacího filmu.

7 ZÁVĚR

Toto pojednání ke státní doktorské zkoušce shrnuje přehled studia chování změn povrchových nerovností při průchodu elastohydrodynamickým kontaktem. Zaměřuje se především na nejaktuálnější a obecný model popisu chování, nazývaný jako amplitudový útlum povrchových nerovností, který byl na základě teoretických simulací poprvé navržen na konci 90. let 20. století. Přestože tento model může být použit jako obecný nástroj k predikci chování povrchů s libovolnými nerovnostmi, tedy i na reálné povrchy vyskytující se u strojních prvků, nebyl dosud na reálných površích žádným způsobem ověřen. To je také hlavním cílem disertační práce. Pro dosažení úspěšného řešení již byly splněny některé dílčí cíle, čímž byl dán reálný základ pro splnění cíle disertační práce.

8 LITERATURA

- [1] HOOKE, C. J. „*Surface roughness modification in elastohydrodynamic line contacts operating in the elastic piezoviscous regime.*“ Proc. Instn Mech Engrs, Part J, Journal of Engineering Tribology, 1998, 212(J2), 145±162.
- [2] VENNER, C. H., COUHIER, F., LUBRECHT, A. A. and GREENWOOD, J. A. „*Amplitude reduction of waviness in transient EHL line contacts.*“ In Proceedings of 1996 Leeds±Lyon Symposium on Tribology, 1996, pp. 103±111(9).
- [3] GREENWOOD, J. A. and JOHNSON, K. L. „*The behaviour of transverse roughness in sliding elastohydrodynamically lubricated contacts.*“ Wear, 1992, 153, 107–117(11).
- [4] GREENWOOD, J. A. and MORALES-ESPEJEL, G. E. „*The behaviour of transverse roughness in EHL contacts.*“ Proc. InstnMech. Engrs, Part J, Journal of Engineering Tribology, 1994, Trans. ASME, 208(J2), 121–132(12).
- [5] GREENWOOD, J. A. and MORALES-ESPEJEL, G. E. „*The amplitude of the complementary function for wavy EHL contacts.*“ In Proceedings of Leeds–Lyon Symposium on Tribology, Leeds, 1996.
- [6] VENNER, C. H. a LUBRECHT, A. A., „*Amplitude reduction of non-isotropic harmonics patterns in circulars EHL contacts, under pure rolling.*“, Proc. 25th Leeds-Lyon Symp., Sept. 1998.
- [7] VENNER, C. H. a LUBRECHT, A. A. „*Elastohydrodynamic lubrication of rough surfaces.*“, I. Mech. E. Part. J, J. of Eng. Tribology, Special Issue (1998).
- [8] HOOKE, C. J., a VENNER, C. H., 2000, „*Surface Roughness Attenuation in Line and Point Contacts.*“ Proc. Inst. Mech. Eng., Part J: J. Eng. Tribol., 214, pp. 439–444.
- [9] CHOO, J. W., GLOVNEA, R. P., OLVER, A. V., a SPIKES, H. A., „*The effects of three-dimensional surface roughness on lubricant film thickness in EHL contacts.*“ Trans. ASME, J. Tribol., 2003, 125, 533–542(10).
- [10] HOOKE C. J., LI K. Y., „*Rapid calculation of the pressures and clearances in rough, elastohydrodynamically lubricated contacts under pure rolling. Part 2: low amplitude, sinusoidal roughness.*“, Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science, Volume 220, Number 6, 2006 , pp. 915-925(11).
- [11] LUBRECHT A. A., VENNER C. H. „*Elastohydrodynamic lubrication of rough surfaces.*“, Proceedings of the I MECH E Part J Journal of Engineering Tribology, Volume 213, Number 5, 1999, pp. 397-404(8).
- [12] VENNER C. H. , MORALES-ESPEJEL G. E. „*Amplitude reduction of small-amplitude waviness in transient elastohydrodynamically lubricated line contacts.*“, Proceedings of the I MECH E Part J Journal of Engineering Tribology, Volume 213, Number 5, 1999, pp. 397-404(8).
- [13] HOOKE C. J., „*The behaviour of low-amplitude surface roughness under line contacts.*“, Proceedings of the I MECH E Part J Journal of Engineering Tribology, Volume 213, Number 4, 1999, pp. 275-285 (11).
- [14] HOOKE C. J. „*Surface roughness modification in EHL line contacts the effect of roughness wavelength, orientation and operating conditions.*“ In Proceedings of the 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, 1998, pp. 193-202 (10).
- [15] VENNER C. H. a LUBRECHT A. A., „*Amplitude reduction of non-isotropic harmonic patterns in circular EHL contacts, under pure rolling.*“ In Proceedings of the 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, 1998, pp. 151-162(12).

- [16] HOOKE C. J., LI K. Y., „*Rapid calculation of the pressures and clearances in rough, elastohydrodynamically lubricated contacts under pure rolling. Part 1: low amplitude, sinusoidal roughness*“, Proceedings of the I MECH E Part C Journal of Mechanical Engineering Science, Volume 220, Number 6, 2006, pp. 901-913(13).
- [17] GUAGTENG, G., CANN, P. M., SPIKES H. A., OLVER, A., „*Mapping of surface features in the thin lubrication regime*“, In Proceedings of the 25th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Lyon, 1998, pp. 175-183(9).
- [18] FÉLIX-QUIÑONEZ A., EHRET P., SUMMERS J. L., MORALES-ESPEJEL G. E., „*Fourier analysis of a single transverse ridge passing through an elastohydrodynamically lubricated rolling contact: a comparison with experiment*“, Proceedings of the I MECH E, Part J: Journal of Engineering Tribology, Volume 218, Number 1, 2004, pp. 33-43(11).
- [19] FÉLIX-QUIÑONEZ A., EHRET P., SUMMERS J. L., „*On Three-Dimensional Flat-Top Defects Passing Through an EHL Point Contact: A Comparison of Modeling with Experiments*“, J. Tribol., Volume 127, 2005, Issue 1, pp. 51-60 (10).
- [20] KANETA, N., TANI, N., a NISHIKAWA, H., „*Optical interferometric observations of the effect of moving transverse asperities on point contact EHL films*“. In Proceedings of the 29th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Tribology Series 41, 2003, pp. 101–109 (Elsevier, Amsterdam).
- [21] CHOO, J. W., GLOVNEA, R. P., OLVER, A. V., a SPIKES, H. A., „*The effects of three-dimensional surface roughness on lubricant film thickness in EHL contacts*.“ Trans. ASME, J. Tribol., 2003, 125, 533–542(10).
- [22] GLOVNEA, R. P., CHOO, J. W., OLVER, A. V., and SPIKES H. A., „*Compression of a Single Transverse Ridge in a Circular Elastohydrodynamic Contact*“, J. Tribol. 125, 275 (2003), DOI:10.1115/1.1506325.
- [23] CHOO J. W., OLVER A. V., SPIKES H. A., „*The influence of transverse roughness in thin film, mixed elastohydrodynamic lubrication*“, Tribology international, vol. 40, no 2, 2007, pp. 220-232 (13).
- [24] MASEN M. A., VENNER C. H., LUGT P. M., TRIPP J. H., „*Effects of surface micro-geometry on the lift-off speed of an EHL contact*“, Tribology transactions, vol. 45, 2002, pp. 21-30 (10).
- [25] HOOKE C. J., „*Roughness Attenuation and Pressure Rippling in EHL Contacts*“, Book IUTAM Symposium on Elastohydrodynamics and Microelastohydro-dynamics, Volume 134, ISBN 978-1-4020-4533-2, 2006, pp. 411-422 (12).
- [26] OLVER A. V., DINI, D., „*Roughness in lubricated rolling contact: the dry contact limit*“, Proceedings of the I MECH E Part J Journal of Engineering Tribology, Volume 221, Number 7, 2007, pp. 787-791(5).
- [27] TAO J., HUGHES T. G., EVANS H. P., a SNIDLE R. W. „*Elastohydrodynamic response of transverse ground gear teeth*“. In Proceedings of 28th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, September 2001, 2002, pp. 447–458 (Elsevier, Amsterdam).
- [28] VENNER C. H., LUBRECHT A.A. „*An engineering tool for the quantitative prediction of general roughness deformation in EHL contacts based on harmonic waviness attenuation.*“ Proc. Instn. Mech. Engrs. Part J: J. Eng. Tribol., 2005; 219: 303-312.
- [29] OLVER, A. V., LAINÉ, E., HILL, J., and DINI, D. „*Application of FFT harmonic surface roughness model to the development of micropitting damage in elastohydrodynamic contacts.*“ Paper submitted to Trans. Am. Soc. Mech. Eng., J. Tribology, June 2007.

- [30] KANETA, M., SAKAI, T., and NISHIKAWA, H., „*Effects of surface roughness on point contact EHL.*“ STLE Tribol. Trans., 1993, 36, 605–612.
- [31] CHENG, H. S. and DYSON, A. *Elastohydrodynamic lubrication of circumferentially-ground rough disks.* ASLE Trans., 1978, 21, 25.
- [32] PATIR, N. and CHENG, H. S. *Effect of surface orientation on the central film thickness in EHD contacts.* In Proceedings of 5th Leeds-Lyon Symposium, Leeds (Eds D. Dowson, C. M. Taylor, M. Godet and D. Berthe), 1978, pp. 15-21.
- [33] MAJUMBAR, B. C. and HAMROCK, B. J. *Effect of surface roughness on elastohydrodynamics line contact.* Trans. ASME, J. Lubric. Technol., 1982, 104(3), 401-409.
- [34] PRAKASH, J. and CZICHOS, H. *Influence of surface roughness and its orientation on partial elastohydrodynamic lubrication of rollers.* Trans. ASME, J. Lubric. Tech., 1983, 105, 591-597.
- [35] GOGLIA, P. R., CONRY, T. F. and CUSANO, C. *The effect of surface irregularities on the elastohydrodynamic lubrication sliding line contacts. Part I: single irregularities.* Trans. ASME F, J. Lubric. Technol., 1981, 106, 104-112.
- [36] GOGLIA, P. R., CONRY, T. F. and CUSANO, C. *The effect of surface irregularities on the elastohydrodynamic lubrication sliding line contacts. Part II: wavy surfaces.* Trans. ASME F, J. Lubric. Technol., 1981, 106, 113-119.
- [37] VENNER, C. H., LUBRECHT, A. A. and ten NAPEL, W. E. *Numerical simulation of the overrolling of a surface feature in an EHL line contact.* Trans. ASME F, J. Tribology, 1991, 113, 777-783.
- [38] CHANG, L. and WEBSTER, M. N. *A study of elastohydrodynamic lubrication of rough surfaces.* Trans. ASME F, J. Tribology, 1991, 113, 110-115.
- [39] CHANG, L., WEBSTER, M. N. and JACKSON, A. *On the pressure rippling and roughness deformation in elastohydrodynamic lubrication of rough surfaces.* Trans. ASME F, J. Tribology, 1993, 115, 439-444.
- [40] LUBRECHT, A. A. *Numerical solution of the EHL line and point contact problem using multigrid techniques.* PhD thesis, Twente University, The Netherlands, 1987.
- [41] VENNER, C. H. *Multilevel solution of the EHL line and point contact problems.* PhD thesis, Twente University, The Netherlands, 1991.
- [42] VENNER, C. H. and LUBRECHT, A. A. *Multi-level methods in lubrication*, 2000 (Elsevier, Amsterdam).
- [43] VENNER, C. H., KANETA, M., LUBRECHT, A. A., „*Surface roughness in elastohydrodynamically lubricated contacts.*“ *Thinning Films and Tribological Interfaces*, 38, Proceedings of the 26th Leeds-Lyon, 2000, 25–36(12).
- [44] GOHAR, R.: A „*Ball-Plate Machine for Measuring Elastohydrodynamic Oil Films*“. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part 3G, 182, 1967-1968, s. 43-45.
- [45] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-LIŠKA, M.: „*Differential Colorimetry: Tool for Evaluation of Chromatic Interference Patterns.*“ *Optical Engineering*, 36, 1997, s. 2384-2391.
- [46] HARTL, M.-KŘUPKA, I.-POLIŠČUK R.-LIŠKA, M.-MOLIMARD J.-QUERRY M.-VERGNE P.: „*Thin Film Colorimetric Interferometry.*“ *Tribology Transactions*, 44, 2001, s. 270-276.

- [47] WYANT J. C., KOLIOPOULOS C. L., BHUSHAN B., BASILA D., „*Development of a three-dimensional noncontact digital optical profiler*“, Journal of Tribology, Transactions of the ASME, 108, 1986, s. 1-8.
- [48] ŠPERKA P., HARTL M., „*3D optický profilometr pro mapování inženýrských povrchů*“, Konference diplomových prací 2007, Ústav konstruování, ISBN 978-80-214-3406-6, 2007, s.1-5.

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Amplitudový útlum harmonických nerovností v liniovém kontaktu za podmínek čistého valení.	8
Obr. 2	Amplitudový útlum při prokluzu, pro tři různé vlnové délky.	8
Obr. 3	Amplitudový útlum jako funkce parametru ∇_2 za podmínek čistého valení.	9
Obr. 4	Amplitudový útlum jako funkce parametru $\bar{f}(r)\nabla_2$ pro (a) příčně orientovanou nerovnost; (b) isotropní nerovnost; (c) podélně orientovanou nerovnost v eliptických kontaktech o čtyřech různých elipticitách D . Predikce (plná čára) dle vztahu (7).	10
Obr. 5	Změna harmonického povrchu uvnitř kontaktů: (a) - (c) vrchní povrch je tuhý deformuje se pouze spodní povrch; (d) oba povrchy jsou elastické; (a) $\sigma = 2$; (b) $\sigma = 0,5$; (c) $\sigma = 1$; (d) $\sigma = 2$.	11
Obr. 6	Amplitudový útlum pro liniový (\diamond , \square , \circ) a bodový kontakt (\blacklozenge , \blacksquare , \bullet); (a) příčná nerovnost (b) isotropní nerovnost (c) podélná nerovnost	12
Obr. 7	Vliv vlnové délky na perturbace tlak ve středu kontaktu a tloušťky mazací vrstvy. Směrem od vrchu dolů: rozložení tloušťky a tlaku pro hladký kontakt, diagramy pro příčně orientované nerovnosti, podélně orientované nerovnosti (ve směru valení). Zleva doprava zvyšování zatížení: $P = 10, S = 7,13$; $P = 20, S = 6$; $P = 40, S = 5,05$.	14
Obr. 8	Závislost amplitudového útlumu a tlakového. (a) příčně orientovaná nerovnost; (b) nerovnost orientovaná pod 45° ; (c) podélně orientovaná nerovnost (ve směru valení). Výsledky byly získány analýzou perturbací. Křivky znázorněné šedou barvou jsou křivky, které vznikly proložení výsledků. A jednotlivé linky zleva doprava odpovídají hodnotám poměru $P^{1,5} \cdot S^{-2}$: 0,35; 0,62; 1,4; 2,49; 9,92; 22,4.	15
Obr. 9	Porovnání predikce pomocí teoretického modelu (plná čára), s výsledkem plného numerického řešení (tečky) pro povrch s parabolickou nerovností (nedeformovaný profil: čerchov. čára).	16
Obr. 10	Profil studované nerovnosti změřený na přístroji Talysurf.	17
Obr. 11	Poměrná deformace povrchové nerovnosti v závislosti na bezrozměrné vlnové délce.	18
Obr. 12	(a) Řez výstupkem naneseným na kuličce, Felix-Quinonez [18], [19]; (b) Profil soustavy výstupků uvažovaných Kanetou [20].	19
Obr. 13	Porovnání experimentálně změřeného přiblížení, predikce pomocí FT a nedeformovaného profilu (čerchovaná čára).	20
Obr. 14	Porovnání měření Kanety [20] s predikcí pomocí FT.	20
Obr. 15	Deformace příčně a podélně orientovaných povrchových nerovností v porovnání s teoretickým řešením Hooke (analýzou perturbací).	21
Obr. 16	Řez geometrií studovaných povrchových nerovností; a) Hooke, v porovnání s proloženou polokoulí; b) Choo.	22
Obr. 17	Porovnání měřených profilů (tečky) s predikcí pomocí Fourierovy analýzy (plná čára).	23
Obr. 18	Poměrný změna výšky nerovnosti v závislosti na bezrozměrném parametru ∇ dle (6), Hooke.	23
Obr. 19	Poměrný útlum výšky nerovnosti v závislosti na parametru ϕ , Choo.	24
Obr. 20	a) řez původní povrchovou nerovností ve směru valení; b) způsob vyhodnocení deformované výšky nerovnosti.	25
Obr. 21	Rozložení tloušťky maziva při průchodu nerovnosti kontaktem pro dvě různé kombinace maziva a teploty.	25
Obr. 22	Útlum výšky povrchové nerovnosti v závislosti na bezrozměrné vlnové délce.	26
Obr. 23	(a) Profil povrchových nerovností ve směru valení; (b) Amplitudový útlum povrchových nerovností v závislosti na parametru ∇ dle (6).	27
Obr. 24	Porovnání predikce rozložení tloušťky a tlaku získané dle teoretického modelu útlumové křivky (šedá plná čára) a z plného numerického řešení (černá plná čára).	28
Obr. 25	Porovnání predikce rozložení tloušťky a tlaku u reálného povrchu získané dle teoretického modelu útlumové křivky (šedá plná čára) a z plného numerického řešení (černá plná čára). V pořadí od vrchu dolů je zobrazen: změřený nedeformovaný	

	profil, rozložení tloušťky mazacího filmu a rozložení tlaku v kontaktu pro uvedený profil. _____	29
Obr. 26	Schéma modelu klasického amplitudového útlumu v porovnání s nově navrženým limitem při minimální tloušťce maziva odvozeného od elasto-statického řešení. _____	30
Obr. 27	Porovnání původního nedeformovaného, elasto-hydrodynamicky deformovaného a elasto-staticky deformovaného povrchu; $p_0 = 1,69$ GPa, redukovaný poloměr křivosti $R_c = 4,91$ mm, $\eta_0 = 0.005465$ Pa.s, $\alpha = 12,25$ GPa ⁻¹ , $E^* = 110$ GPa. Horizontální osa v μm , vertikální osa v μm a GPa _____	31
Obr. 28	Porovnání původního nedeformovaného, EHD deformovaného (rychlost 10 mm/s), elasto-staticky deformovaného povrchu a výsledky standardního modelu amplitudového útlumu. _____	31
Obr. 29	Schéma měřicí aparatury. _____	34
Obr. 30	(a)Příklad změřeného povrchu s reálnými povrchovými nerovnostmi; (b) výsledky kalibrace na standardu SHS 880 QC VLSI. _____	35
Obr. 31	Schéma in-situ měření. _____	36
Obr. 32	Základní schéma zpracování dat. _____	36
Obr. 33	Porovnání profilu řezu nedeformované topografie a tloušťky mazacího filmu. _____	37

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A_d [-]	<i>deformovaná amplituda povrchových nerovností;</i>
A_i [-]	<i>nedeformovaná (původní) amplituda povrchových nerovností;</i>
b [μm]	<i>pološírka Hertzova kontaktu;</i>
a [μm]	<i>poloměr Hertzova kontaktu;</i>
p_h [Pa]	<i>maximální Hertzův tlak;</i>
λ [μm]	<i>vlnová délka povrchových nerovností;</i>
λ_x, λ_y [μm]	<i>vlnová délka povrchových nerovností ve směru os x, y;</i>
M_1 [-]	<i>Moesův bezrozměrný parametr rychlosti pro jednorozměrné problémy;</i>
M_2 [-]	<i>Moesův bezrozměrný parametr rychlosti pro dvourozměrné problémy;</i>
L_1 [-]	<i>Moesův bezrozměrný parametr materiálu pro jednorozměrné problémy;</i>
L_2 [-]	<i>Moesův bezrozměrný parametr materiálu pro dvourozměrné problémy;</i>
σ [-]	<i>poměr kluz-valení definovaný jako $\sigma = 2 \cdot u_1 / (u_1 + u_2)$</i>
u_1, u_2 [m/s]	<i>rychlost třecích povrchů 1 a 2;</i>
∇_1 [-]	<i>bezrozměrná vlnová délka pro jednorozměrné problémy definovaná vztahem (1);</i>
∇_2 [-]	<i>bezrozměrná vlnová délka pro jednorozměrné problémy definovaná vztahem (5);</i>
∇ [-]	<i>bezrozměrná vlnová délka použitelná pro liniové a bodové kontakty s obecnou elipticitou (7);</i>
P [-]	<i>Greenwoodův bezrozměrný parametr zatížení;</i>
S [-]	<i>Greenwoodův bezrozměrný parametr rychlosti;</i>
U [-]	<i>bezrozměrný parametr rychlosti;</i>
q [-]	<i>parametr závislý na elipticitě D;</i>
α [Pa^{-1}]	<i>viskózně tlakový koeficient;</i>
E' [-]	<i>redukovaný modul pružnosti;</i>
B [μm]	<i>nedeformovaná výška nerovnosti ve vztahu (13);</i>
X [-]	<i>exponent parametru rychlosti ve vztahu (13);</i>
A_i^0 [μm]	<i>komplexní amplituda i-té komponenty FT původního (nedeformovaného) povrchu;</i>
A_i^E [μm]	<i>komplexní amplituda i-té komponenty FT deformovaného povrchu v elasto-statickém případě;</i>
A_i^L [μm]	<i>komplexní amplituda i-té komponenty FT deformovaného povrchu v mazaném kontaktu;</i>

