

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice Habilitační a inaugurační spisy, sv. 418

ISSN 1213-418X

Martin Vrbka

**STUDIUM VLIVU
CÍLENÉ MODIFIKACE TOPOGRAFIE
NA ÚNAVOVÉ POŠKOZOVÁNÍ
TŘECÍCH POVRCHŮ**

Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Ing. Martin Vrbka, Ph.D.

**STUDIUM VLIVU CÍLENÉ MODIFIKACE TOPOGRAFIE
NA ÚNAVOVÉ POŠKOZOVÁNÍ TŘECÍCH POVRCHŮ**

**EFFECT OF SURFACE TOPOGRAPHY MODIFICATION
ON ROLLING CONTACT FATIGUE DAMAGE OF RUBBING
SURFACES**

Teze habilitační práce
v oboru Konstrukční a procesní inženýrství



Brno 2012

Klíčová slova:

Tribologie, Modifikace topografie povrchu, Elastohydrodynamické mazání,
Smíšené mazání,
Tloušťka mazacího filmu, Kontaktní tlak, Kontaktní únava

Keywords:

Tribology, Surface topography modification, Elastohydrodynamic lubrication,
Mixed lubrication, Lubricant film thickness, Contact pressure, Rolling contact
fatigue

Místo uložení práce:

Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2

© Martin Vrbka, 2012

ISBN 978-80-214-4433-1

ISSN 1213-418X

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA	4
1. ÚVOD	5
2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	6
2.1 Topografie třecích povrchů a její význam	6
2.2 Cílená modifikace topografie konformních třecích povrchů	8
2.3 Cílená modifikace topografie nekonformních třecích povrchů	12
3. VLIV MODIFIKACE TOPOGRAFIE NA ÚNAVOVÉ PORUŠENÍ TŘECÍCH POVRCHŮ	29
3.1 Vliv na tloušťku mazacího filmu	29
3.2 Vliv na kontaktní tlak	30
3.3 Vliv na kontaktní únavu	31
3.4 Soubor článků	35
4. ZÁVĚR	36
SUMMARY	37
SEZNAM LITERATURY	38

PŘEDSTAVENÍ AUTORA



Martin Urbka je odborným asistentem na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Narodil se roku 1977 v Boskovicích. Po maturitě na Střední průmyslové škole na Kotlářské v Brně studoval v letech 1995-2000 na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně magisterský studijní program Strojní inženýrství. Studium ukončil s vyznamenáním v oboru Aplikovaná mechanika obhajobou diplomové práce *Deformačně napěťová analýza tumorové endoprotézy a totální endoprotézy*. Roku 2000 byl přijat do doktorského studijního programu Aplikované vědy v inženýrství na téže fakultě v oboru Inženýrská mechanika. Po ukončení studia roku 2004 obhájil disertační práci

Deformačně napěťová analýza fyziologicky a patologicky vyvinutého kyčelního spojení a byl mu přiznán akademický titul doktor.

Roku 2004 nastoupil na Ústav konstruování Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, kde pracuje jako odborný asistent. V roce 2006 byl jmenován do funkce vedoucího odboru Konstruování strojů a v roce 2010 do funkce tajemníka ústavu pro ekonomicko-provozní činnost. Obě funkce vykonává dodnes, přičemž se podílel na organizační transformaci odboru, modernizaci koncepce výuky odboru a v neposlední řadě na zabezpečení ekonomicko-provozních činností ústavu.

Jeho vědecká a odborná činnost je zaměřena na tribologii, především na studium elasto-hydrodynamického a smíšeného mazání. V současné době se intenzivně zabývá biotribologií, zejména studiem utváření mazacích filmů v náhradách velkých kloubů člověka. Dosažené výsledky byly publikovány v 6 původních vědeckých článcích otištěných v časopisech s IF, dále v 5 původních vědeckých článcích otištěných v časopisech bez IF a ve 12 příspěvcích ve sbornících světových nebo evropských kongresů, sympózií a vědeckých konferencí. O jejich mezinárodním ohlasu svědčí 8 citací podle Science Citation Index. Od roku 2006 se aktivně účastní světových tribologických konferencí v Evropě a USA.

Pedagogické činnosti se věnuje od ukončení vysokoškolského studia. Přednáší *Konstruování strojů - strojní součásti, převody a mechanismy* v bakalářském studijním programu Strojírenství. Podílel se také na zavedení předmětů *Metoda konečných prvků* a *Výpočtové nadstavby pro CAD*, které vyučuje v oboru Konstrukční inženýrství v magisterském navazujícím studijním programu Strojní inženýrství. Podílel se na českém překladu Shigleyho knihy *Konstruování strojních součástí* jako vedoucí překladatel kapitol 10 a 11. Vede bakalářské a diplomové práce a pravidelně je členem komisí pro státní závěrečné zkoušky a obhajoby disertačních prací. Trvale uskutečňuje modernizaci výuky a zavádí její nové formy např. v podobě projektově orientované výuky a výukových laboratoří.

Do jeho vědecko-pedagogických aktivit rovněž spadá řešení celé řady projektů (GAČR, FRVŠ, MŠMT, OP VK, OP VaVpl a MPO).

1. ÚVOD

V roce 1966 ve zprávě pracovní skupiny ustanovené britským ministerstvem školství a vědy označované jako *Jost Report* [1], byl vymezen nejen význam slova *tribologie*, ale také bylo vydáno prohlášení, že britský průmysl může ročně ušetřit až 515 miliónů liber, zavedením vhodných tribologických principů do praxe. Jinými slovy, cílem výzkumu v tribologii bylo minimalizovat ztráty způsobené třením a opotřebením na všech úrovních technických produktů, kde se vyskytoval kontakt třecích povrchů. Důležitost tohoto prohlášení je aktuální i v současné době, kdy je navíc ekonomické hledisko podporováno hlediskem ekologickým [2]. V průběhu posledních dvou desítek let se začínají objevovat vědecké studie, které využívají modifikací topografie u třecích povrchů pracujících za nepříznivých mazacích podmínek ke snížení tření a opotřebením a k prodloužení jejich životnosti. Na druhou stranu se objevují některé studie, které naopak prezentují negativní přínos modifikací topografie třecích povrchů. Tato práce by tedy měla přispět k objasnění této problematiky.

Cílem habilitační práce je podat systematický výklad výsledků experimentálního a teoretického studia vlivu cílené modifikace topografie nekonformně zakřivených třecích povrchů na jejich únavové poškození. Uvedená problematika je poměrně široká a zahrnuje zejména analýzy kontaktní únavové životnosti doplněné o analýzy tloušťky mazacího filmu a kontaktního tlaku.

Předkládaná habilitační práce je obsahově členěna tak, že po úvodu následuje kapitola, která shrnuje přehled současného stavu poznání v oblasti cílené modifikace topografie konformních a nekonformních třecích povrchů, a to prostřednictvím experimentálních i teoretických studií. Po této kapitole následuje část obsahující komentář vlastních publikovaných prací, včetně jejich plných textů, které však nejsou ve zkrácené verzi habilitační práce obsaženy. Tato nejobsáhlejší část práce se věnuje analýze vlivu cílené modifikace topografie nekonformních třecích povrchů na tři tribologické veličiny, a sice na tloušťku mazacího filmu, na kontaktní tlak a na kontaktní únavu. Poté následuje závěr a seznam použité literatury.

Vlastní autorův přínos je v habilitační práci obsažen prostřednictvím šesti vědeckých článků publikovaných v impaktovaných časopisech v letech 2008-2011. Plný text těchto článků je nedílnou a podstatnou součástí habilitační práce, přičemž jednotlivé články jsou citovány kvůli přehlednosti římskými číslicemi. Formátování textů a grafické úpravy jednotlivých článků jsou rozdílné, neboť podléhaly požadavkům jednotlivých nakladatelů.

Na tomto místě bych rád poděkoval prof. Ivanovi Křupkovi, vedoucímu tribologické výzkumné skupiny Ústavu konstruování za spolupráci při výzkumné činnosti a za vytvoření příznivých podmínek pro tuto činnost a prof. Martinovi Hartlovi, řediteli Ústavu konstruování za všestrannou podporu jak v oblasti vědecko-pedagogické, a tak i v oblasti seberealizace na Ústavu konstruování.

2. PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Topografie třecích povrchů a její význam

„*God made solids, but the surfaces are the work of the devil*“. Slova citátu, který vyslovil švýcarský fyzik a nositel Nobelovy ceny za fyziku z roku 1945 Wolfgang Pauli [3], jasně vystihují složitost topografie třecích povrchů, která hraje významnou roli při řešení tribologických problémů jak v základním, tak i aplikovaném výzkumu.

Při řešení současných tribologických problémů je možné hledat inspiraci zejména v živé přírodě, neboť ta je mnohem pokrokovějším inženýrem-tribologem než by se mohlo zdát. Vědní obor, který se zabývá napodobováním přírodních materiálů a struktur se nazývá *Biomimetika* [4]-[7]. Jejím cílem je zkoumat principy živé přírody a tyto poznatky využívat při řešení technických problémů.

Například při vývoji běhounu pneumatik se tribologové nechali inspirovat poduškovitým zakončením prstů stromové žáby *Amolops sp.* (Obr. 1a), které jim umožňuje pohyb po různých površích, zejména po listech [5]. Povrch chodidel je tvořen plochými výstupky, které jsou navzájem odděleny kanálky (Obr. 1b). Při pohybu žáby je voda vytlačována z kontaktu mezi chodidlem a listem prostřednictvím kanálků, čímž vznikne dostatečná trakce pro udržení žáby na listu. Stejný efekt vzniká při odvalování běhounu pneumatiky po mokré vozovce, kdy je voda odváděna kanálky vzorku pneumatiky a tím je zajištěn bezpečný kontakt běhounu s vozovkou.

Další inspirací pro řešení tribologických problémů je využití tzv. efektu žraločí kůže [5]. Kůže žraloka je na celém těle pokryta drážkovanými šupinami (Obr. 2a), které jsou navíc vhodně orientovány vůči podélné ose těla žraloka. Přítomnost této nehladké textury na kůži žraloka způsobuje snížení odporu vody o 5-10 %. Tohoto efektu využívají rovněž návrháři sportovních plavek (Obr. 2b). Také při pohybu tuhého tělesa ve vzduchu, jehož povrch je vhodně modifikován, dochází ke snížení tření. Povrch komerčního letadla *Cathy Pacific Airbus 340* (Obr. 2c) je pokryt transparentním plastickým filmem, který tvoří vhodnou texturu podobnou žraločí kůži. Touto úpravou se snížil odpor vzduchu o 8 % a taktéž se snížila spotřeba paliva o 1,5 %.



a)



b)

Obr. 1 a) stromová žába (*Amolops sp.*) [2007 Gloster Team], b) schematické znázornění plochých výstupků zakončení prstů stromové žáby, které jsou navzájem odděleny kanálky – porovnání se vzorkem běhounu pneumatiky [5]

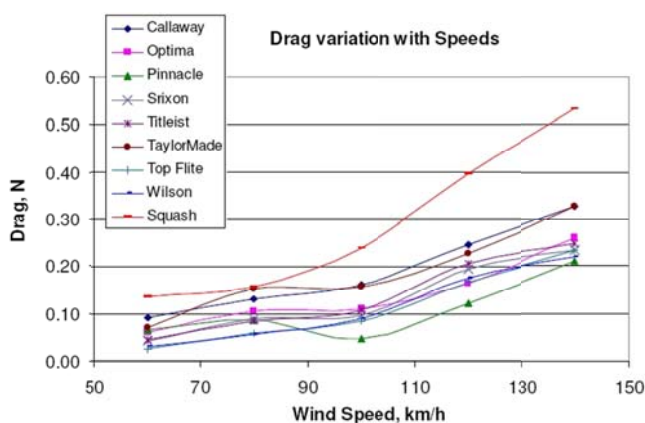
Modifikace topografie povrchu je rovněž aplikována při výrobě golfových míčků. Ve studii [8] autoři provedli u osmi golfových míčků různých značek (Obr. 3a) experimentální analýzu vlivu povrchových textur na jejich aerodynamické chování. Bylo zjištěno, že tvar, průměr a hloubka důlků, které tvoří povrchovou texturu golfového míčku, mají zásadní vliv na jeho aerodynamický odpor. Ve srovnání s hladkým povrchem squashového míčku, golfový míček vykazuje nižší aerodynamický odpor při nižších rychlostech, což vede k jeho většímu doletu. Maximální rozdíl v aerodynamickém odporu současné produkce golfových míčků se pohybuje kolem 40 %, a to v závislosti na typu povrchové textury (Obr. 3b).



Obr. 2 a) topografie povrchu kůže žraloka [5], b) plavky imitující kůži žraloka [speedo.com], c) povrch letadla *Cathy Pacific Airbus 340* je pokryt transparentním plastickým filmem imitující kůži žraloka [5]



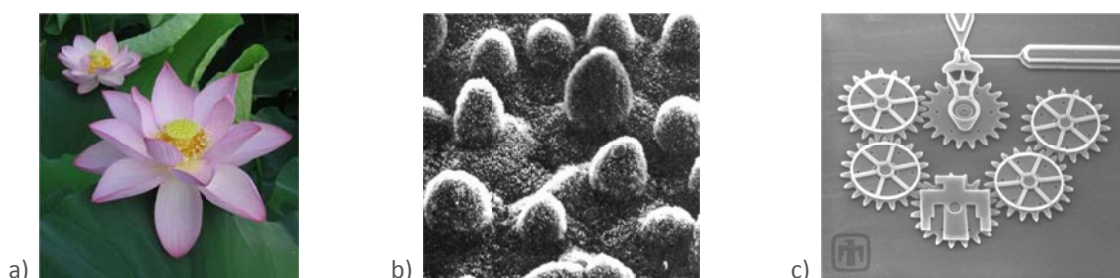
a)



b)

Obr. 3 a) topografie povrchu vybraných golfových míčků, b) velikost aerodynamického odporu současně produkce golfových míčků, [8]

Při návrhu kontaktních povrchů je možné najít inspiraci rovněž ve vodní rostlině lotos (*Nelumbo nucifera*) (Obr. 4a) [5]. Povrch listů a květů lotosu je pokryt mikroskopickými výstupky, které navíc obsahují voskové nanokrystaly (Obr. 4b). Tato povrchová úprava vede k tomu, že kapky vody snadno stékají z listů a květů, přičemž s sebou strhávají různé usazeniny a prach. Tento jev je označován jako samočistící efekt. V tribologii se vlastnosti povrchu lotosu využívají při návrhu hydrofobních kontaktních povrchů mikro/nano-elektro-mechanických systémů (Obr. 4c), kdy je zapotřebí snížit adhezi mezi třecími povrchy, které pracují v prostředí kontaminovaném vodou.



a)

b)

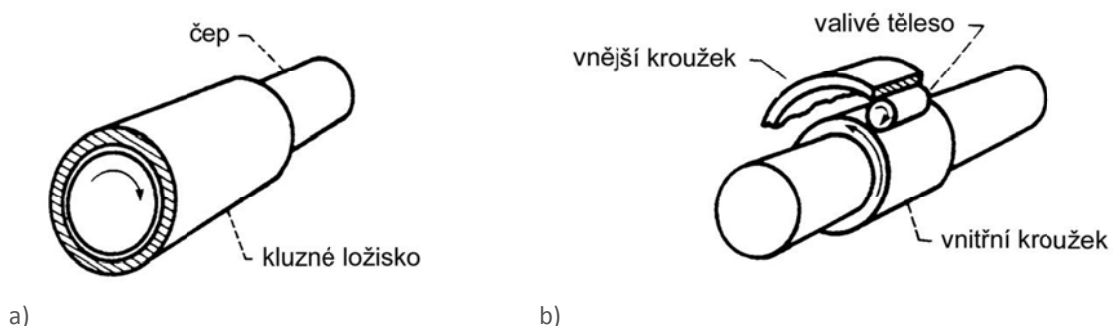
c)

Obr. 4 a) lotos (*Nelumbo nucifera*), b) topografie povrchu lotosu [7], c) mikro-elektro-mechanický systém tvořený šesti ozubenými koly [mems.sandia.gov]

Uvedené příklady jasně dokazují význam topografie třecích povrchů. Ve strojírenství hraje modifikace topografie třecích povrchů velmi důležitou roli, kde jejím hlavním úkolem je snížit tření a opotřebením mazaných strojních součástí a celků, a tím snížit jejich energetickou náročnost a zvýšit jejich životnost. V takovýchto pozitivních případech mluvíme o tzv. *cílené* modifikaci topografie třecích povrchů. Cílená modifikace topografie může být na třecích površích prováděna různými technikami např. mechanicky, leptáním, svazkem iontů nebo laserem. V některých případech, např. pokud je mazivo kontaminováno částicemi opotřebením nebo obsahuje jiné tvrdé nečistoty, může dojít po průchodu cizí částice kontaktem k rozsáhlému poškození třecího povrchu, které vede ke snížení životnosti mazaného uzlu. V tomto případě je modifikace topografie třecích povrchů nežádoucí, velice těžko definovatelná a kontrolovatelná.

Utváření mazacího filmu ve strojních uloženích závisí především na geometrii a vzájemném uspořádání třecích těles. V podstatě je možné rozlišit mezi stykem třecích povrchů, které do sebe zapadají s velkou geometrickou přesností a stykem třecích povrchů, které se dotýkají na velmi malé kontaktní ploše (Obr. 5). V prvním případě mluvíme o *styku konformně zakřivených třecích povrchů* (Obr. 5a), který je charakteristický zejména pro radiální a axiální kluzná ložiska. V místě styku konformně zakřivených těles dochází při relativním pohybu třecích povrchů k oddělení těles vlivem nárůstu tlaku v mazacím filmu, který dosahuje poměrně nízkých hodnot (jednotky megapascalů), čímž nezpůsobí elastické deformace třecích povrchů. Za těchto podmínek vzniká režim kapalinového mazání, označovaný jako *hydrodynamické mazání*. Druhý případ – *styk nekonformně zakřivených třecích povrchů* je typický pro valivá ložiska, styk zubů ozubených kol, styk vačky a zdvihátka a lineární valivá vedení. Díky velmi malé kontaktní ploše dosahuje stykový tlak velikosti několika gigapascalů, což způsobí významné lokální elastické deformace třecích povrchů, jejichž velikost je řádově srovnatelná s tloušťkou utvářeného hydrodynamického mazacího filmu. Takovýto režim kapalinového mazání nazýváme *elastohydrodynamické (EHD) mazání*.

Následující dvě kapitoly (2.2 a 2.3) mapují přehled současného stavu poznání v oblasti modifikace topografie třecích povrchů, který je zaměřen především na oblast cílené modifikace topografie, a to jak konformně, tak zejména nekonformně zakřivených třecích povrchů. Ucelený přehled aktuálních problémů v dané oblasti tak tvoří teoretický základ pro autorův vlastní vědecký přínos.



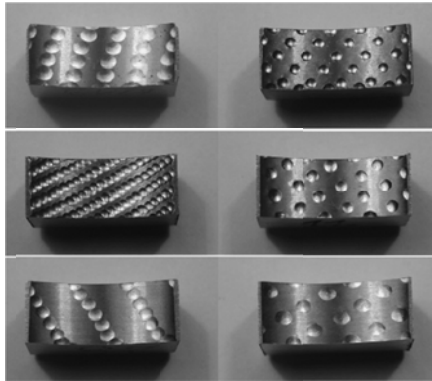
Obr. 5 a) příklad konformně zakřivených třecích povrchů, b) příklad nekonformně zakřivených třecích povrchů, [9]

2.2 Cílená modifikace topografie konformních třecích povrchů

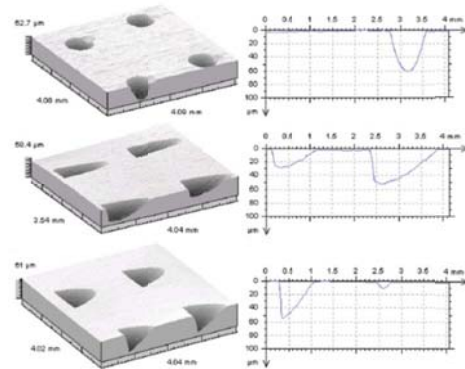
Cílená modifikace topografie konformních třecích povrchů je v současné době aplikována zejména u strojních součástí, jako jsou radiální a axiální kluzná ložiska, mechanická těsnění a pístní kroužky.

Ve studii [10] autoři provedli experimentální stanovení tření a opotřebením při smíšeném režimu mazání s využitím parciálního radiálního kluzného ložiska, jehož bronzový třecí povrch byl opatřen různě velkými kapsami (hloubka 45-115 μm , poměr hloubky k průměru 0,03-0,11). Kapsy byly vytvořeny technikou *burnishing* a byly různě uspořádány s plošnou hustotou od 10 do 90 % (Obr. 6).

Z provedených měření vyplývá, že pokud je povrch ložiska pokryt texturou kapes s plošnou hustotou v rozsahu 20-26 % dochází k nejnižšímu opotřebení ve srovnání s hladkým povrchem ložiska (pokles až o 27 %), přičemž nejnižšího opotřebení je dosaženo u kapes s největší hloubkou. Podobné výsledky prezentovali autoři ve studii [11], kde provedli experimentální analýzu vlivu různých textur (Obr. 7), vytvořených na povrchu parciálního radiálního ložiska, na tvar Stribeckovy křivky. Součinitel tření je významně redukován při aplikaci textur s kruhovitým nebo dlouhým kapkovitým tvarem a s plošnou hustotou pod 20 %, a to ve srovnání s netexturovaným broušeným povrchem.

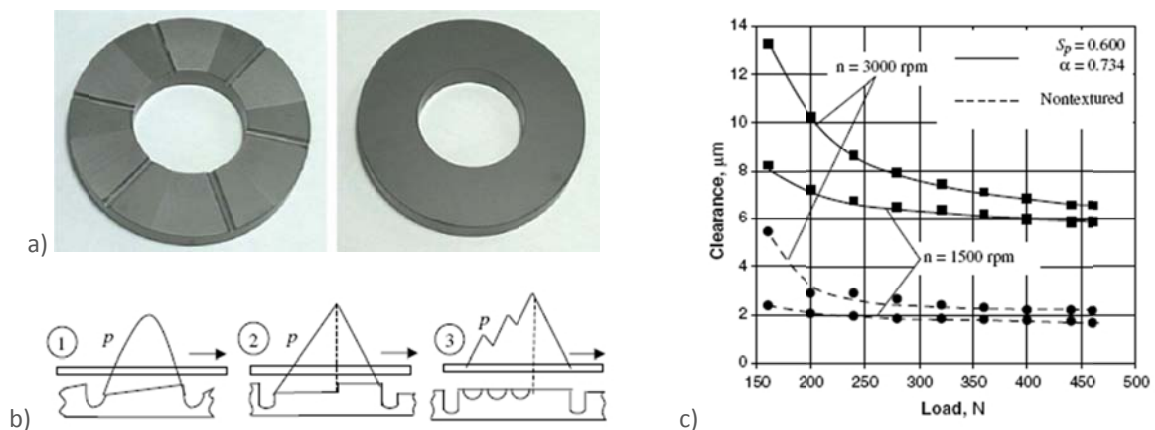


Obr. 6 Velikost a uspořádání kapes použitých ve studii [10]



Obr. 7 Tvar a velikost kapes použitých ve studii [11]

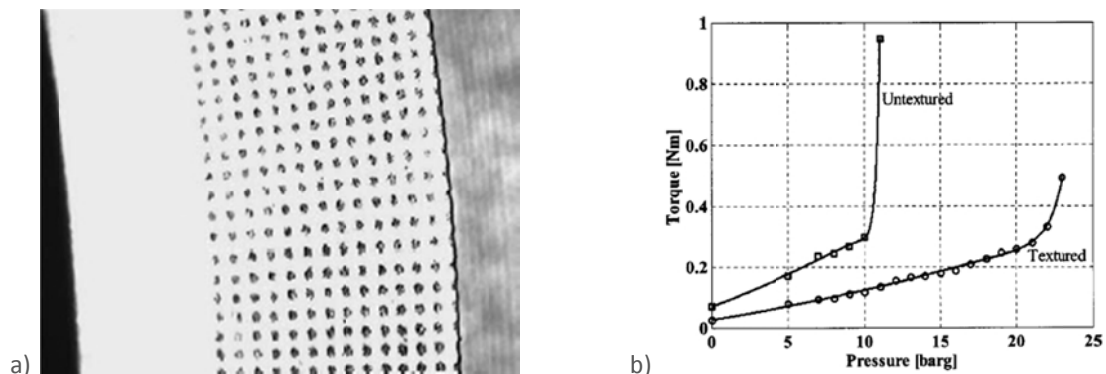
Modifikaci topografie lze použít rovněž u axiálních kluzných ložisek. Např. ve studiích [12]-[14] autoři využili metodu *Laser Surface Texturing* – LST (texturování třecích povrchů pomocí laseru) k vytvoření modifikované struktury povrchu statoru jednoduchého axiálního ložiska (Obr. 8a) za účelem navýšení jeho únosnosti a současného snížení tření. Obr. 8b srovnává princip konstrukce axiálních ložisek (1,2) s ložiskem (3), jehož stator byl částečně opatřen texturou pomocí LST. Výsledky experimentů prokázaly, že při provozu ložiska ve vodě při otáčkách 1500 a 3000 min^{-1} , texturované ložisko pracuje s 3× větší spárou mezi státorem a rotorem, přičemž součinitel tření je 3× nižší v porovnání s netexturovaným ložiskem (Obr. 8c).



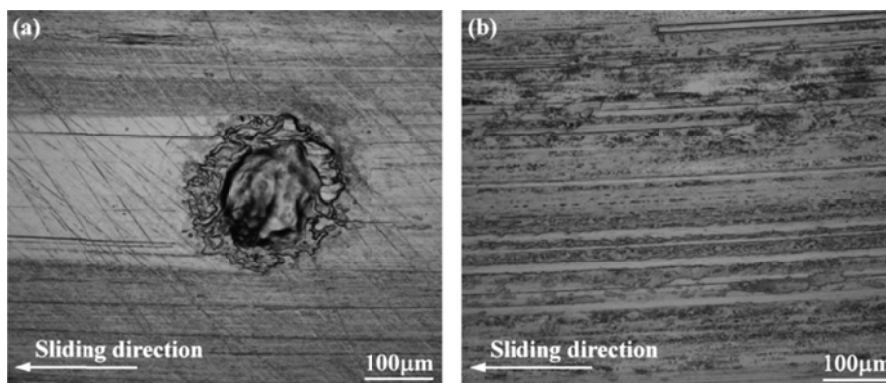
Obr. 8 a) axiální ložisko, vlevo stator – každý ze šesti segmentů je částečně texturován, vpravo rotor, b) příklady konstrukcí axiálních ložisek a jim odpovídající rozložení hydrodynamických tlaků, c) výsledky experimentů texturovaného a netexturovaného ložiska, [13]

Další aplikací, kde je možné pomocí vhodně vytvořených textur snížit tření a zvýšit únosnost, jsou mechanická těsnění. Ve studii [15] autoři nejprve provedli na teoretickém modelu těsnění optimalizaci parametrů textury tak, aby získali co největší hydrodynamický tlak. Poté na jednom kroužku těsnění vytvořili optimalizovanou texturu pomocí technologie LST (Obr. 9a) a uskutečnili experimentální měření, jehož výsledky vystihuje Obr. 9b. Třecí moment je u texturovaného těsnění daleko nižší, přičemž je těsnění schopno pracovat při daleko vyšších provozních tlacích. Při tlaku

12 bar netexturované těsnění začíná selhávat, kdežto těsnění opatřené texturou je schopno pracovat až do tlaku 23 bar. Obdobné výsledky byly prokázány rovněž ve studii [16], kde při aplikaci LST na kroužek těsnění došlo ke snížení tření a teploty funkčních ploch těsnění, přičemž texturovaný kroužek těsnění byl slinut z SiC, netexturovaný kroužek byl vyroben z uhlíku a jako mazivo byl použit olej. Zajímavé výsledky přináší také studie [17], ve které autoři diskutují význam mikro-pórů vytvořených pomocí LST na kroužku mechanického těsnění z hlediska snížení opotřebení. Obr. 10 zobrazuje detailní fotografie opotřebení funkčních ploch kroužků těsnění po dokončení experimentů, z nichž jeden byl leštěn a poté opatřen texturou mikro-pórů (Obr. 10a) a druhý byl pouze leštěn (Obr. 10b). U texturovaného kroužku dosahuje opotřebení daleko nižší úrovně než u kroužku bez textury, rozdíl je zejména v oblasti nalevo od mikro-póru, kde je vidět zřetelný proužek nepoškozeného povrchu (Obr. 10a). Tento jev jen potvrzuje fakt, že se mikro-pór nechová pouze jako mikro-hydrodynamické ložisko, ale chová se též jako zásobník maziva, kdy v případě prolomení mazacího filmu při nedostatečném mazání začne dodávat v sobě uložené mazivo mezi třecí povrchy. Zároveň se mikro-pór chová jako past, která pohlcuje částice opotřebení, a tím významně redukuje abrazivní poškození povrchů kroužků těsnění.



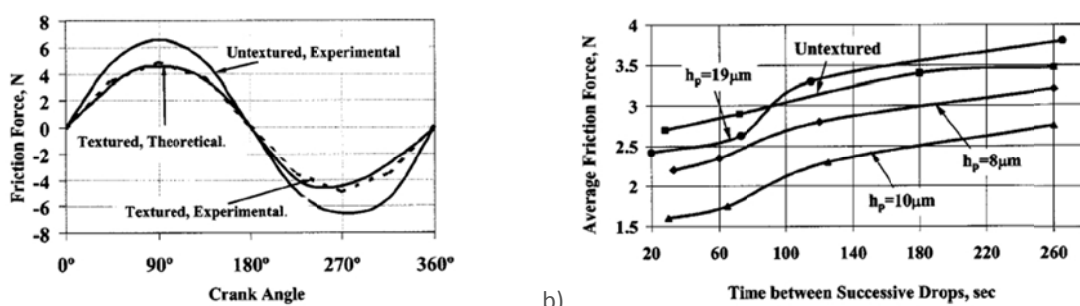
Obr. 9 a) částečně texturovaný kroužek mechanického těsnění, b) výsledky experimentů texturovaného a netexturovaného mechanického těsnění, [13]



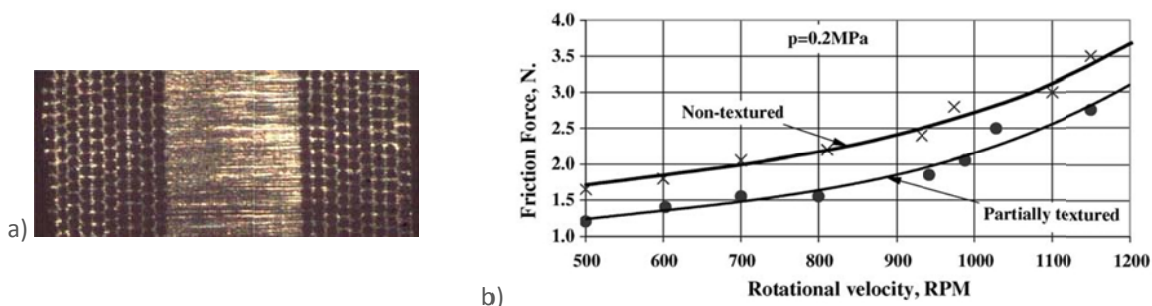
Obr. 10 a) opotřebení texturovaného kroužku těsnění, b) opotřebení kroužku těsnění bez textury, [17]

Technologie vytváření textur pomocí laseru je velice často využívána k modifikaci topografie třecích povrchů pístních kroužků, což dokazuje celá řada publikací [18]-[22]. V [18] autoři provedli teoretickou studii, která zahrnuje současné řešení Reynoldsovy a pohybové rovnice jednoduché soustavy pístní kroužek-válec. Při optimalizaci navržené textury bylo za podmínek dostatečného mazání dosaženo snížení tření o 30 % v porovnání s netexturovaným kroužkem. Teoretické výsledky jsou v dobré shodě s experimenty, které uvádí studie [19] a Obr. 11a. Rovněž bylo prokázáno, že za podmínek nedostatečného mazání (tzv. hladovění) a při správně navržené textuře, fungují jednotlivé mikro-póry jako zásobníky maziva. Obr. 11b dokumentuje výsledky experimentů, které byly provedeny za proměnných podmínek mazání, kdy přísun maziva do kontaktu byl regulován rozdílnými časovými intervaly kapání maziva. Přínos vhodně navržené textury je pak za podmínek

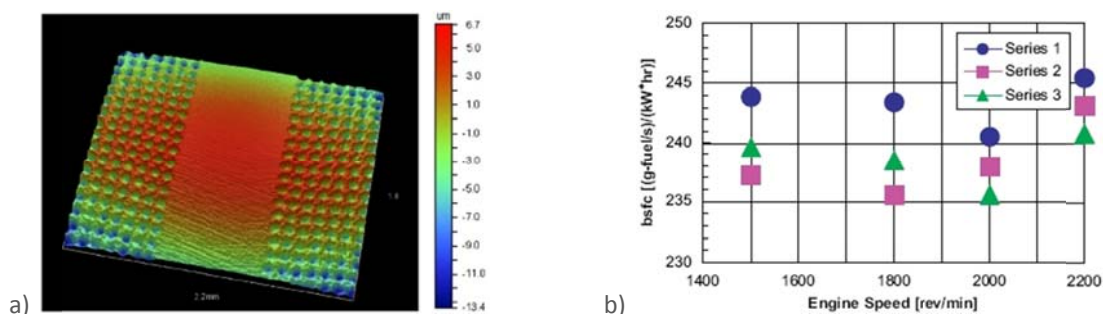
dostatečného i nedostatečného mazání jednoznačně pozitivní. V další studii [20] autoři provedli experimenty jen s částečně texturovanými pístními kroužky, což přináší další snížení tření přibližně o 25 % v porovnání s plně texturovanými pístními kroužky. Experimentální studie [21] již byla zaměřena na porovnání běžně dostupného (referenčního) soudkovitě zakřiveného pístního kroužku a segmentu válcovitého pístního kroužku částečně opatřeného texturou (Obr. 12a). Výsledky opět prokázaly, že částečně texturovaný pístní kroužek je schopen snížit velikost tření až o 25 % ve srovnání s referenčním kroužkem bez textury (Obr. 12b). Velice zajímavé výsledky přináší studie [22], ve které autoři experimentálně posuzovali, zda má použití částečně texturovaných pístních kroužků ve vznětovém motoru automobilu Ford Transit vliv na spotřebu paliva a složení výfukových plynů. Jako referenční byl použit běžně dostupný soudkovitě zakřivený pístní kroužek s povlakem chromu, který byl porovnáván se dvěma válcovitými částečně texturovanými pístními kroužky, z nichž jeden byl opatřen povlakem chromu (Obr. 13a) a druhý byl bez povlaku. Z provedených experimentů vyplývá, že použití pístních kroužků s texturou sice nemá významný vliv na složení výfukových spalin, nicméně má zásadní vliv na spotřebu paliva, kterou snižuje až o 4 % (Obr. 13b).



a) Obr. 11 a) velikost třecí síly v závislosti na úhlu pootočení klikového hřídele pro texturovaný a netexturovaný pístní kroužek při otáčkách 1000 min^{-1} – porovnání teoretických a experimentálních výsledků, b) vliv nedostatečného mazání (hladovění) na střední třecí sílu při otáčkách 900 min^{-1} pro různé hloubky textur, [19]



Obr. 12 a) fotografie částečně texturovaného pístního kroužku majícího šířku 2 mm, b) porovnání třecích sil pro referenční a texturovaný pístní kroužek v závislosti na otáčkách klikového hřídele, [21]



Obr. 13 a) pohled na částečně texturovaný pístní kroužek s povlakem chromu, b) spotřeba paliva v závislosti na otáčkách motoru pro různé pístní kroužky (Series 1 – soudkovitě zakřivený pístní kroužek s povlakem chromu, Series 2 – válcovitý částečně texturovaný pístní kroužek s povlakem chromu, Series 3 – válcovitý částečně texturovaný pístní kroužek bez povlaku chromu), [22]

Kromě výše uvedených fundamentálních příkladů a aplikací cílené modifikace topografie konformně zakřivených třecích povrchů, je možné najít ještě celou řadu publikací, které se zabývají zejména metodami vytváření textur a jejich využitím u konformně zakřivených třecích povrchů pracujících za různých provozních podmínek. Např. ve studii [23] se autoři prioritně zabývali procesem vytváření optimalizovaných textur pomocí laseru, přičemž provedli základní měření součinitele tření za podmínek mezního mazání. Také v [24] autoři vytvořili pomocí technologie LST několik typů textur, které následně podrobili testům na *pin-on-disc* experimentálním zařízení. V [25] autoři analyzovali tření a opotřebenění dvou typů laserem vytvořených textur při oscilačním pohybu třecích povrchů. V publikaci [26] autoři uskutečnili experimentální měření tloušťky mazacího filmu při vratném pohybu třecích povrchů, z nichž jeden obsahoval různé typy textur vytvořených fotochemickou metodou, a to za podmínek hydrodynamického mazání. V experimentální studii [27] autoři provedli analýzu vlivu textur vytvořených technikou *embossing* [28] na velikost tření mezi pístem a valivým segmentem hydraulického motoru. V [29] autoři využili metodu LST k modifikaci topografie vzorku z nitridové oceli, jejíž tribologické vlastnosti testovali prostřednictvím *pin-on-disc* tribometru za podmínek hydrodynamického, smíšeného a mezního mazání. Zajímavou aplikací, kde lze využít rovněž modifikaci topografie třecích povrchů je proces tváření materiálu. Ve studii [30] autoři nejprve vytvořili několik typů textur fotochemickou metodou na funkčních plochách průvlastku a poté měřili velikost síly při tažení materiálu a také analyzovali velikost součinitele tření mezi průvlastkem a taženým materiálem.

Na konci této kapitoly je možné shrnout mechanismy cílené modifikace topografie, která je využívána u konformně zakřivených třecích povrchů ke snížení tření a opotřebenění:

- mikro-pór vytváří lokální hydrodynamický efekt
- mikro-pór se chová jako zásobník maziva
- mikro-pór se chová jako past na částice opotřebenění



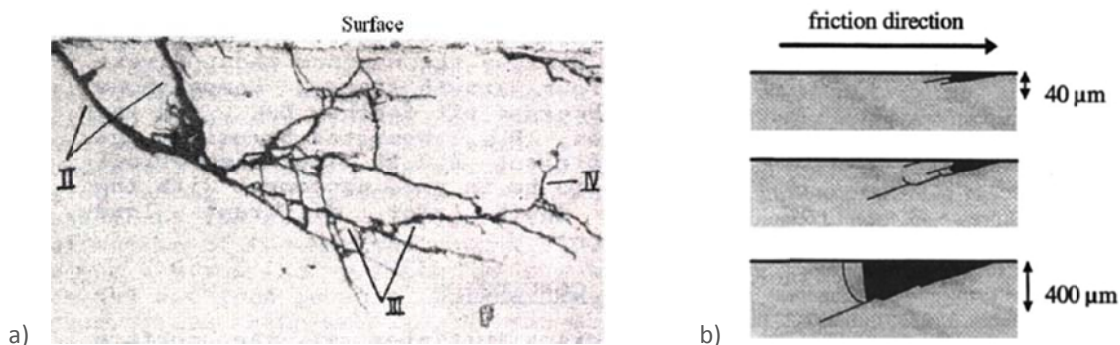
SNÍŽENÍ TŘENÍ A OPOTŘEBENÍ

Rovněž je nutné poznamenat, že vzhledem k velmi různorodé terminologii, která se vyskytuje v oblasti texturování třecích povrchů v zahraniční literatuře, je někdy velmi těžké zavést správný překlad anglického odborného výrazu do českého jazyka. Např. mikro-geometrický útvar, který vznikne modifikací topografie třecího povrchu a je základním stavebním prvkem textury, může být v anglickém jazyce označen těmito výrazy: *micro-pore* (mikro-pór, mikro-dutina), *pocket* (kapsa), *dent* (důlek, dent), *micro-dent* (mikro-důlek, mikro-dent), *pool* (jímka), *micro-pool* (mikro-jímka), *dimple* (důlek, jamka), *reservoir* (zásobník, rezervoár), *micro-reservoir* (mikro-zásobník, mikro-rezervoár), *cavity* (kavita, dutina), *micro-cavity* (mikro-kavita, mikro-dutina), *pit* (důlek), *groove* (drážka, rýha). Uvedené výrazy mohou být použity v následujícím textu.

2.3 Cílená modifikace topografie nekonformních třecích povrchů

Problematika mazaných kontaktů nekonformně zakřivených třecích povrchů je v porovnání s kontakty konformně zakřivených třecích povrchů podstatně složitější. Zatížení, která přenášejí strojní součásti (např. valivá ložiska nebo ozubená kola), dosahují velmi vysokých hodnot, což se při dané nekonformní geometrii stýkajících se třecích povrchů projeví na velikostech stykových tlaků, které mohou dosahovat několika jednotek gigapascalů. Tloušťky mazacích filmů v EHD kontaktech přitom dosahují jen několika stovek nanometrů a v případě smíšeného mazání dokonce jen několika jednotek až desítek nanometrů. Chování EHD kontaktu je ovlivněno nejen fyzikálními vlastnostmi maziva (změna hustoty a dynamické viskozity), ale i mechanickými vlastnostmi kontaktních těles a rovněž provozními podmínkami v kontaktu (změna rychlosti povrchů a zatížení). Mezní stav, který charakterizuje poškození nekonformně zakřivených, EHD mazaných třecích povrchů, je *kontaktní únava* (*Rolling Contact Fatigue – RCF*) [31]. V podstatě je možné rozlišit mezi dvěma převládajícími mechanismy kontaktní únavy [32]. První mechanismus se nazývá *spalling* (Obr. 14a) a vzniká pod

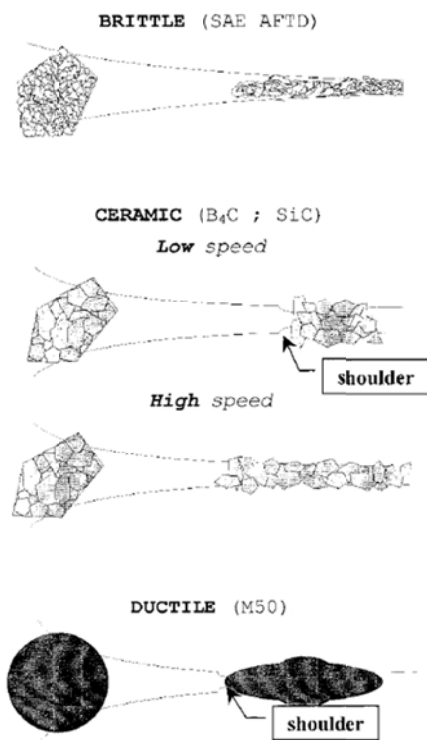
povrchem v oblastech maximálního smykového napětí, kdy se mikrotrhliny začínají objevovat v důsledku materiálových nehomogenit (např. nekovových vměstků), přičemž se mikrotrhliny šíří směrem k povrchu. Tento mechanismus kontaktní únavy je charakteristický pro valivá ložiska, která mají velmi hladké funkční plochy a pracují při EHD režimu mazání. V posledních letech se však významně zvýšila čistota ložiskových ocelí, takže výskyt vměstků byl značně minimalizován. Druhý mechanismus kontaktní únavy se nazývá *pitting* (Obr. 14b) a na rozdíl od *spallingu* vzniká vlivem přítomnosti vad na povrchu, které mají podobu důlků a rýh. Vady na povrchu jsou tedy koncentrátoři napětí, ze kterých se pak iniciují trhliny, které se šíří pod úhlem 15-30° směrem do materiálu. Pokud trhlinka dosáhne určité kritické délky nebo hloubky, tak náhle odbočí směrem k povrchu a tím dojde k uvolnění části materiálu z povrchu a vzniku jamky. Uvedený mechanismus kontaktní únavy je typický pro styk zubů ozubených kol, kde vzniká značný skluz třecích povrchů. Z pohledu modifikací topografie nekonformních třecích povrchů je významný mechanismus kontaktní únavy právě *pitting*.



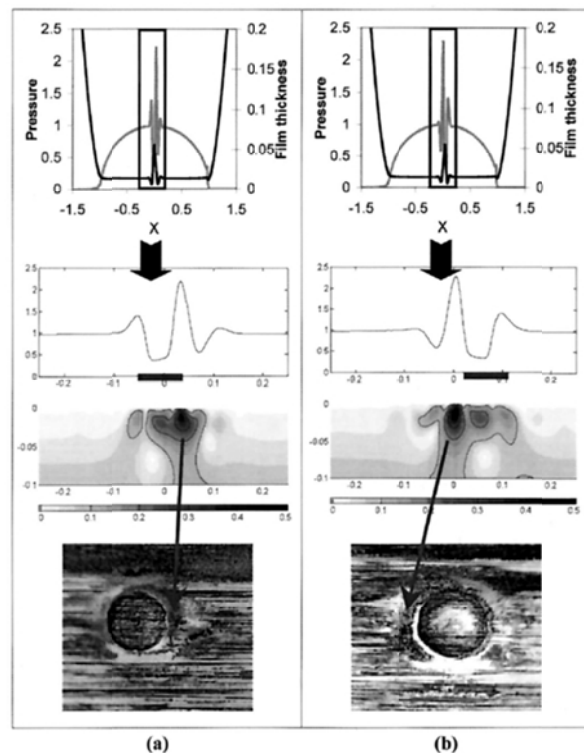
Obr. 14 mechanismy kontaktní únavy a) spalling, b) pitting, [32]

První práce, které se zabývají modifikacemi topografie nekonformních třecích povrchů, spadají převážně do oblasti kontaminace maziva, která může zásadně ovlivnit životnost kontaktní dvojice. Zejména při záběhu a provozu strojních součástí (např. ozubených kol v převodové skříní) dochází k určitému opotřebení, které kontaminuje mazivo. Mazivo může být taktéž kontaminováno z vnějšího prostředí, např. vlivem nedostatečného těsnění nebo neodborné obsluhy či údržby. Velikost částic opotřebení se běžně pohybuje kolem 50 µm a v porovnání s tloušťkou mazacího filmu, která je často menší než 1 µm, představuje značné riziko. Pokud cizí částice projde kontaktem (Obr. 15), tak na třecích površích vytvoří defekty (vtisky, denty), které pak působí jako koncentrátoři napětí a iniciátory trhlin, což vede k únavovému porušení (*pittingu*) a snížení životnosti strojních součástí [33]. V takovémto případě má modifikace topografie třecích povrchů negativní účinek a snažíme se jí předcházet. Uvedenou problematikou se zabývala celá řada studií [33]-[62]. Cusano a Wedeven [34]-[37] provedli pomocí optické interferometrie experimentální analýzu vlivu uměle vytvořených dentů a rýh na velikost a rozložení tloušťky EHD mazacího filmu za podmínek čistého valení a skluzu. Zjistili, že při skluzu vznikají vysoké špičky kontaktního tlaku na výstupní hraně dentu. Utváření vtisků na třecích površích vlivem částic opotřebení studovali numericky a experimentálně Hamer a kol. [38]-[39]. Kaneta a kol. [40]-[41] analyzovali vliv velikosti poměru skluz-valení Σ na rozložení tloušťky mazacího filmu v okolí dentu, přičemž uvažovali různé velikosti a pozice dentů v mazaném kontaktu. Zjistili, že dent emituje mazivo ve směru toku maziva resp. proti toku maziva, pokud leží na pomaleji resp. na rychleji se pohybujícím třecím povrchu. Ai a Lee [42] provedli na 3D modelu EHD bodového kontaktu výpočet pole napětí v okolí dentu za různých kinematických podmínek. Za podmínek čistého valení a dostatečného EHD mazání nebyl prokázán podstatný vliv dentu na napjatost v jeho okolí. Ovšem při skluzu dochází vlivem špiček kontaktního tlaku k extrémnímu navýšení napětí pod výstupní nebo pod vstupní hranou dentu, a to v závislosti na Σ , což má negativní vliv na únavové porušení. Dále bylo prokázáno, že se na rozdíl od hladkého povrchu přesouvá maximální hodnota redukovaného napětí blíže k povrchu. Ville a Nélías [43]-[45] nejprve provedli experimentální studium utváření dentů na třecích površích prostřednictvím kulovitých ocelových částic o velikosti 32-40 µm obsažených v mazivu a později provedli numerickou a experimentální analýzu vlivu tvaru

a velikosti dentu na kontaktní tlak a kontaktní únavu. Z numerické analýzy vyplývá, že při skluzu dochází vlivem deformací třecích povrchů zapříčiněné výtokem maziva z dentu k navýšení kontaktního tlaku a tím i k navýšení smykového napětí v okolí dentu (Obr. 16), přičemž poloha (vstupní nebo výstupní hrana dentu), kde dochází k navýšení tlaku a napětí je závislá na velikosti Σ (Obr. 16). Provedené experimenty únavového porušení prokázali shodu s výsledky numerické analýzy (Obr. 16). Rovněž publikace [46]-[62] se podrobně zabývají jednak studiem mechanismů utváření dentů vlivem cizích částic a taktéž studiem vlivu dentů na rozložení a velikost kontaktního tlaku a podpovrchových napětí a na kontaktní únavu při různých provozních podmínkách.

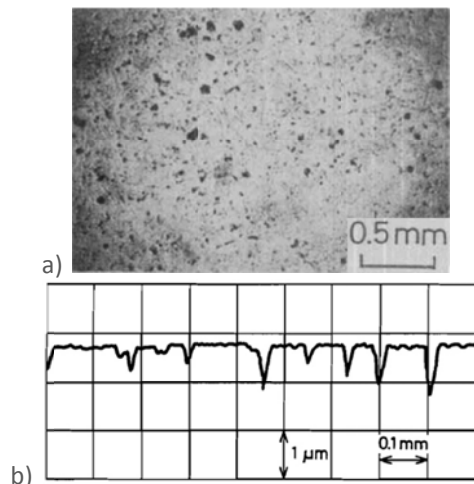


Obr. 15 průchod různých cizích částic nekonformním kontaktem a jejich vliv na utváření dentů [45]

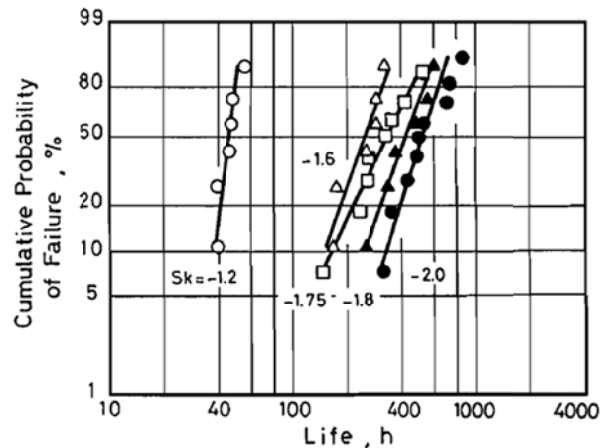


Obr. 16 vliv dentu na rozložení tloušťky a tlaku v kontaktu, na průběh smykového napětí a na únavové porušení, a) $\Sigma = +1,5 \%$, b) $\Sigma = -1,5 \%$, [45]

Poměrně velké defekty (hloubka řádově jednotky až desítky μm , šířka řádově desítky μm), které jsou přítomny na nekonformních třecích površích, pracujících nejčastěji za podmínek plného EHD mazání, jednoznačně snižují únavový život strojních součástí. V průběhu posledních dvou desítek let však některé experimentální studie ukázaly, že pokud je na třecích površích pracujících za podmínek smíšeného mazání vytvořena vhodná textura dentů, tak může dojít ke snížení styku povrchových nerovností a tím i ke snížení fluktuace kontaktního tlaku, tření a opotřebení. Akamatsu a kol. [63] studovali vliv náhodně rozmístěných malých dentů třecích povrchů na kontaktní únavu za podmínek smíšeného a mezného mazání. Pomocí abraziva a omílacího zařízení byl různě modifikován (texturován) povrch valivých elementů válečkového ložiska (Obr. 17). Pro hodnocení charakteru drsnosti povrchu použili tzv. šikmost (*skewness* – S_k). Pokud na povrchu převládají více výstupky, je šikmost kladná a pokud na povrchu převládají více prohlubně (denty), je šikmost záporná. Kontaktní únava byla měřena pro šikmosti od -1,2 do -2,0. Z provedených experimentů vyplývá, že ložiska, jejichž třecí povrchy vykazují nižší neboli zápornější hodnoty šikmosti, dosahují daleko vyšší životnosti, což dokládá Obr. 18.



Obr. 17 textura povrchu valivého elementu, a) detail povrchu – tmavé plochy představují náhodně rozmístěné denty, b) profil drsnosti povrchu, [63]

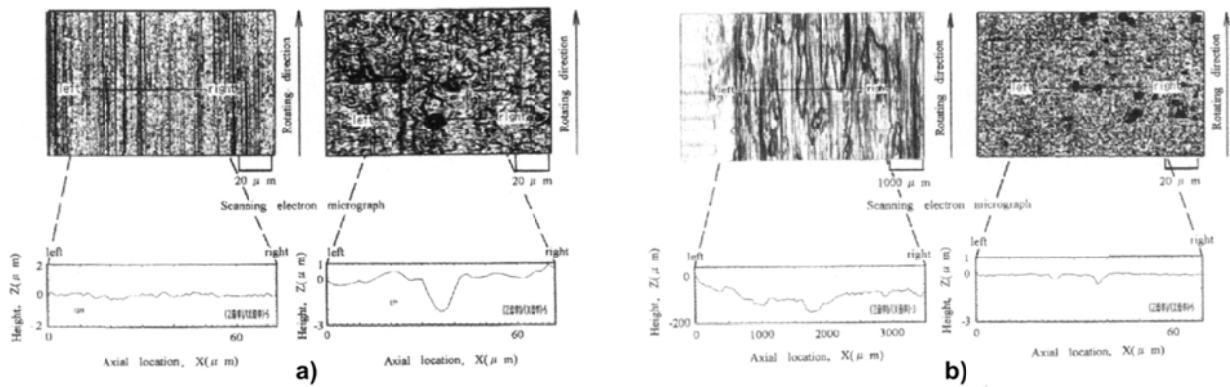


Obr. 18 výsledky experimentů kontaktní únavy pro šikmosti od -1,2 do -2,0, což představuje navýšení životnosti 10×, [63]

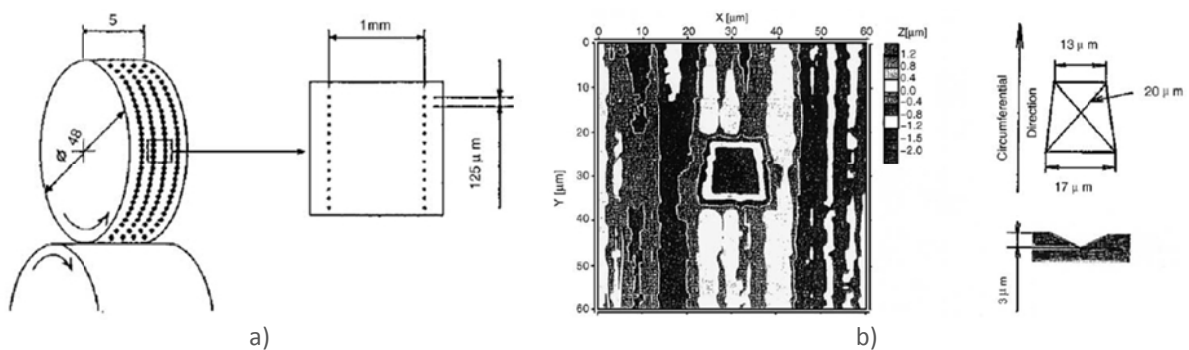
Uvedené výsledky diskutovali Zhai a kol. [64], kteří provedli numerickou analýzu vlivu dentů, vytvořených na reálných površích, na tloušťku mazacího filmu a kontaktní tlak v liniovém EHD kontaktu. Uvažovali přitom různé velikosti a uspořádání dentů, různé zatížení a kinematické podmínky v kontaktu. Z jejich závěrů vyplývá, že vliv dentů na kontaktní únavovou životnost silně závisí na režimu mazání, ve kterém kontakt pracuje. Pokud kontakt pracuje za podmínek plného EHD mazání, tak mají denty nepříznivý vliv, ovšem pokud kontakt pracuje za podmínek smíšeného nebo mezného mazání, tak přítomnost dentů pozitivně ovlivňuje kontaktní únavu. Toto pozitivní ovlivnění si autoři vysvětlují tím, že vytvořené denty fungují jako lokální zásobníky maziva, které se aktivují pouze za nepříznivých mazacích podmínek, přičemž dodávají do kontaktu potřebné mazivo, čímž významně redukuje styk mezi vrcholky nerovností třecích povrchů.

Nakatsuji a Mori [65] využili tzv. výkonné elektrolytické leštění (*vigorous electrolytic polishing*) k vytvoření textury mikro-dentů na třecích površích vyrobených z oceli se středním obsahem uhlíku, která bývá využívána zejména na výrobu rozměrných ozubených kol. Tato úprava třecích povrchů odstraňuje výstupky nerovností a současně vytváří mikro-denty. Třecí povrchy byly před úpravou elektrolytickým leštěním broušeny ($Ra = 0,1$; $Sk = -0,4$) a po úpravě povrchů došlo sice ke zvýšení drsnosti ($Ra = 0,3$), ovšem také k podstatnému snížení šikmosti ($Sk = -1$). Vytvořené mikro-denty na třecích površích zaujímají plochu přibližně kolem 30 % (Obr. 19a). Provedená úprava třecích povrchů byla podrobena testům kontaktní únavy na dvou-diskovém experimentálním zařízení za podmínek částečného skluzu ($\Sigma = -0,25$), přičemž byl navíc monitorován součinitel tření mezi disky. Výsledky experimentů prokázaly, že u povrchů upravených elektrolytickým leštěním nedochází ke vzniku pittingu nebo scuffingu na rozdíl od povrchů, které jsou pouze broušeny (Obr. 19b). Taktéž součinitel tření dosahuje nižších hodnot, což potvrzuje hypotézu, že se mikro-dent chová jako zásobník maziva, který za nepříznivých podmínek dodává do kontaktu mazivo.

Stejní autoři [66] využili k vytvoření textury mikro-dentů mikro-Vickersova tvrdoměru, jehož pracovní část je tvořena diamantovou pyramidou. Tímto způsobem vytvořili na třecím povrchu disku celkem 4800 mikro-dentů, jejichž uspořádání je zřejmé z Obr. 20a. Průměrná délka úhlopříčky mikro-dentů je kolem 20 μm a hloubka kolem 3 μm , přičemž plocha indentace zaujímá jen 0,27 % Hertzovy kontaktní plochy (Obr. 20b). Stejně jako v předešlé studii [65] autoři provedli testy kontaktní únavy, ze kterých vyplývá, že přítomnost mikro-dentů oddaluje kontaktní porušení třecích povrchů, ovšem ne tak intenzivně jako v případě použití elektrolytického leštění.

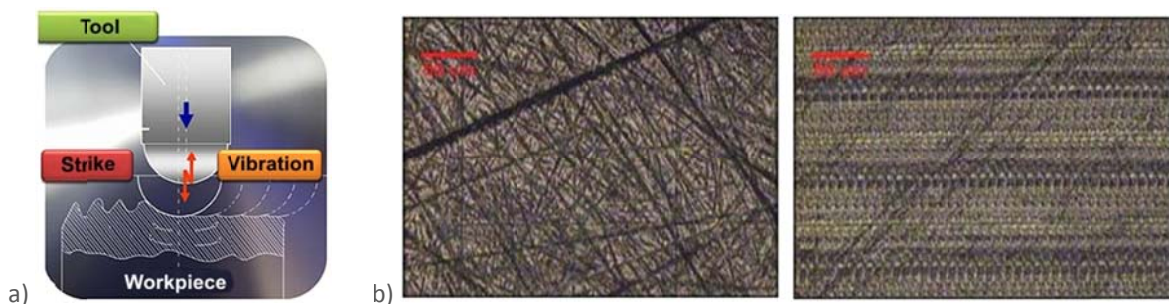


Obr. 19 úprava třecích povrchů elektrolytickým leštěním, a) povrchy před testem, vlevo – broušený, vpravo – elektrolyticky leštěný, b) povrchy po testu, vlevo – broušený (vykazuje poškození scuffingem), vpravo – elektrolyticky leštěný (bez poškození), [65]



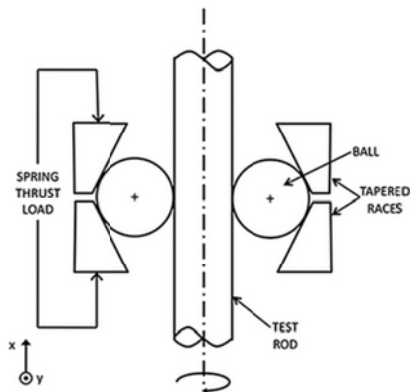
Obr. 20 a) uspořádání mikro-dentů na třecím povrchu disku, b) rozměry mikro-dentu vytvořeného pomocí mikro-Vickersova tvrdoměru, [66]

Další metodu, kterou je možné použít k modifikaci topografie nekonformních třecích povrchů, představili Pyoun a kol. [67]. Metoda se nazývá *Ultrasonic Nano Crystal Surface Modification – UNSM* a její podstata spočívá ve zpevňování třecího povrchu pomocí mikro-kuličky vyrobené z karbidu wolframu, jejíž pohyb je ovládán ultrazvukem, čímž je možné ve velice krátkém čase vytvořit až 10000 vtisků/mm² (Obr. 21a). Tento proces způsobuje změnu drsnosti povrchu, tvrdosti povrchu a vyzovuje zbytkovou tlakovou napjatost do určité hloubky pod povrchem (Obr. 21b). Autoři pomocí metody UNSM modifikovali třecí povrchy modelu jednoduchého axiálního kuličkového ložiska, na kterém provedli testy kontaktní únavy. Výsledky prokázali čtyřnásobné navýšení životnosti (v porovnání s nemodifikovaným ložiskem), které je pravděpodobně zapříčiněno zpevněním povrchu než samotným vlivem mikro-vtisků. Uvedená technologie modifikace topografie třecích povrchů je patentována [68] a rovněž je komerčně využívána zejména u valivých ložisek [69].

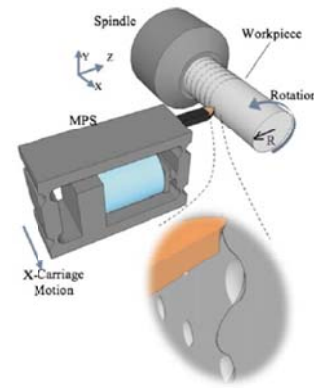


Obr. 21 a) princip metody UNSM, b) modifikace topografie povrchu metodou UNSM, [69]

Autoři Greco a kol. [70] provedli analýzu vlivu textur na kontaktní únavové porušení EHD mazaného bodového kontaktu pomocí tzv. *ball-on-rod* experimentálního zařízení (Obr. 22) za podmínek čistého valení. Pro ověření výsledků z experimentů rovněž použili numerický model EHD kontaktu, pomocí něhož určili rozložení kontaktního tlaku a podpovrchových napětí v okolí dentu. K vytvoření dvou typů textur dentů na zkušební tyči, která je součástí experimentálního zařízení (Obr. 22), použili tzv. metodu *vibromechanical texturing*, kterou podrobně představili v [71]. Princip této metody, který je schematicky znázorněn na Obr. 23, vychází z klasického soustružení, kdy se texturovaná součást (tyč) otáčí a mikrometrický řezný nástroj se pohybuje jak v ose Z, tak i v ose X. Pracovní pohyb ve směru osy Z je řízen piezoelektrickým akčním členem.

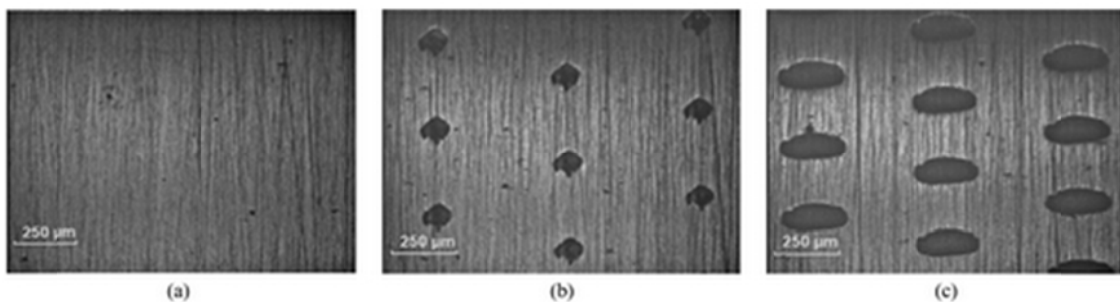


Obr. 22 ball-on-rod experimentální zařízení pro analýzu kontaktního únavového porušení, [70]

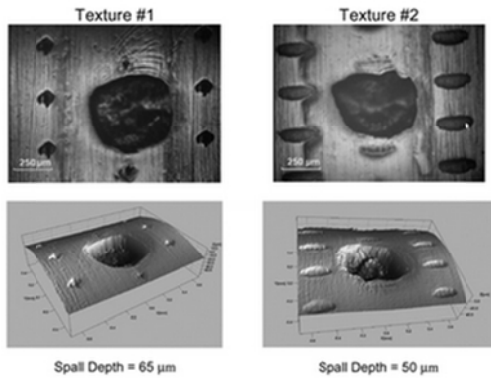


Obr. 23 princip metody vibromechanical texturing, [71]

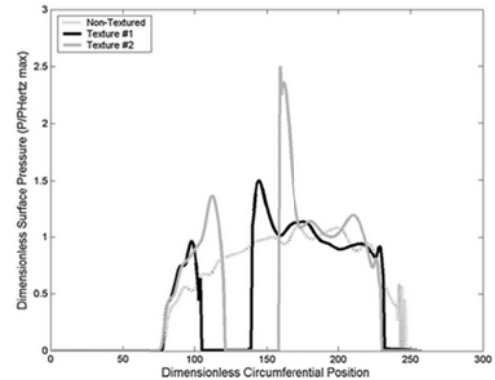
Uvedeným způsobem byly na zkušební tyči vytvořeny dva typy textur, které jsou zobrazeny na Obr. 24. Testy kontaktní únavy byly realizovány při zatížení odpovídající maximálnímu Hertzovu tlaku 5,3 GPa, styková plocha ve tvaru elipsy měla rozměry 820×460 μm, frekvence otáčení tyče byla 3600 min⁻¹ a mazivo bylo do kontaktu přiváděno ve formě kapek. Z výsledků kontaktní únavy vyplývá, že tyče, jejichž povrch byl modifikován texturami 1 resp. 2, vykazují snížení kontaktního únavového života o 50 % resp. o 80 %, v porovnání s tyčí, která nebyla opatřena texturou. Z pozorování jednotlivých porušení – pittingů (Obr. 25) je zřejmé, že pitting vzniká přímo v místě dentu, v obvodové řadě dentů, která je nejbližší místu maximálního Hertzova tlaku. Výsledky experimentů prokázaly shodu s numerickým řešením, což dokazuje rozložení kontaktního tlaku v okolí dentu, který dosahuje maximálních hodnot na výstupní hraně dentu (Obr. 26). Výsledky této studie jsou však v rozporu s výsledky prací [63] a [65]-[66], které naopak prokázaly pozitivní přínos modifikace topografie povrchů pomocí textur mikro-dentů. Rozhodujícím parametrem, který má podstatný vliv na kontaktní únavovou životnost třecích povrchů je právě velikost vytvořených mikro-dentů a jejich plošné pokrytí ve vztahu k velikosti kontaktní oblasti. Poměrně velké denty mající hloubku 6 μm, šířku 100×100 nebo 240×100 μm, vzdálené od sebe v axiálním směru 500 μm a v obvodovém směru 300 μm nemohou tedy vykazovat pozitivní vliv na kontaktní únavu.



Obr. 24 a) povrch bez textury ($R_a = 0,3$), b) povrch s texturou 1 ($R_a = 0,3$; hl. 6 μm; velikost 100×100 μm), c) povrch s texturou 2 ($R_a = 0,3$; hl. 6 μm; velikost 240×100 μm), [70]

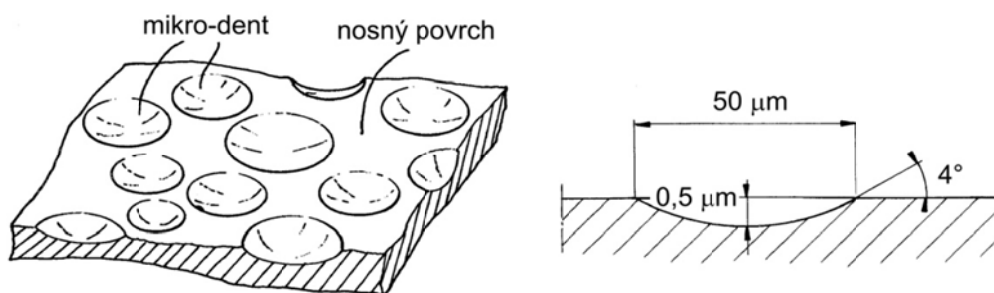


Obr. 25 kontaktní únavové porušení (pitting) třecích povrchů s texturami 1 a 2, [70]



Obr. 26 rozložení kontaktního tlaku v okolí dentů pro povrchy s texturami 1 a 2, [70]

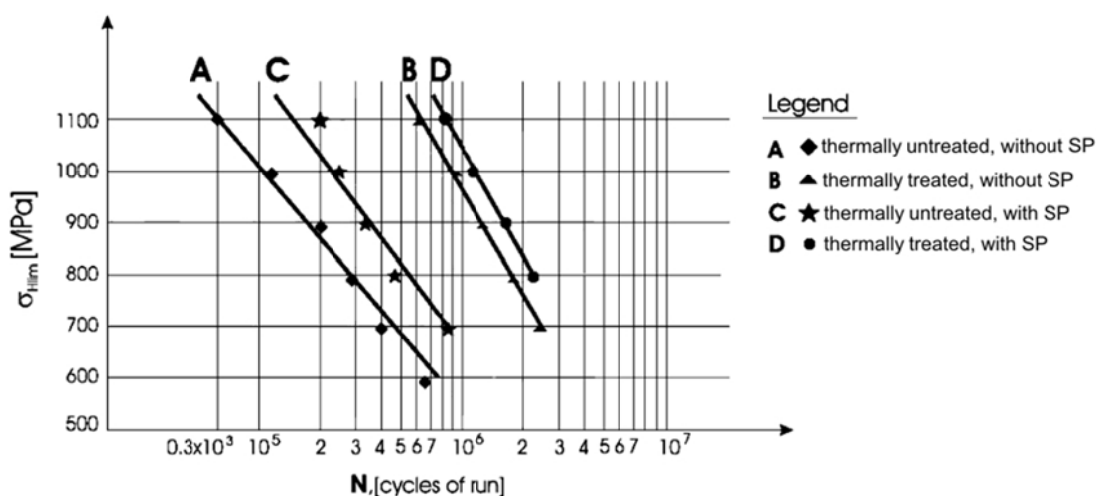
K texturování nekonformních třecích povrchů je možné použít již delší dobu v průmyslu známou metodu *balotínování* (*shot peening*). Balotínování spadá do oblasti tváření za studena a používá se zejména v automobilovém a leteckém průmyslu za účelem zvýšení únavové pevnosti strojních součástí jako jsou ozubená kola, pružiny, hřídele a části turbín, které jsou vystaveny časově proměnlivému zatížení. Podstata balotínování spočívá v ostřelování (otryskávání) kovových povrchů velice malými kuličkami, které mohou být vyrobeny z různých materiálů, nejčastěji však ze skla. Vlivem plastické deformace, kterou způsobují dopadající kuličky balotiny, se na površích součástí indukuje zbytkové tlakové napětí, které má pak pozitivní vliv na jejich únavovou pevnost. Problematikou balotínování se zabývá např. webový portál [72], který obsahuje celou řadu zajímavých studií z dané oblasti. V tribologii se nabízí využít balotínování pro velice rychlé a efektivní vytváření mikro-dentů na třecích površích, nicméně touto problematikou se zabývá jen minimální počet prací [73]-[79]. Např. výrobce ložisek SKF ve svém patentu [73] popisuje úpravu kontaktních ploch valivých elementů a valivých drah jednořadého válečkového ložiska pomocí balotínování. Při balotínování byly použity skleněné kuličky o průměru kolem 200 μm , pomocí nichž na třecích površích ložiska vznikla optimální textura mikro-dentů, jejichž rozměry jsou uvedeny na Obr. 27. Jednotlivé mikro-denty se nesmí navzájem překrývat a musí být odděleny částmi povrchu, který není zasažen balotinou (nosným povrchem). Ložisko s takto modifikovanou topografií povrchu vykazuje daleko lepší mazací schopnosti při nižších provozních otáčkách (např. rozběhu a doběhu), což je dáno funkcí mikro-dentů, které se chovají jako zásobníky maziva.



Obr. 27 textura mikro-dentů třecích povrchů válečkového ložiska navržená firmou SKF s doporučenými rozměry mikro-dentů, [73]

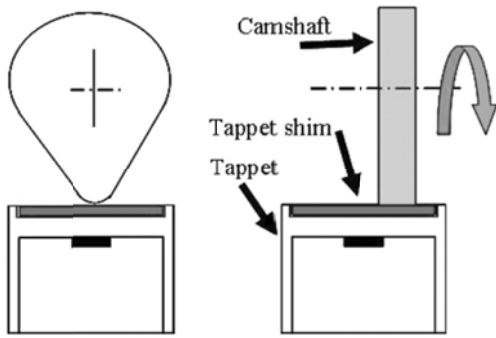
Ve studii [74] autoři provedli testy kontaktního únavového porušení dvou skupin ozubených kol vyrobených z oceli AISI 9310. Obě skupiny ozubených kol byly vyrobeny standardním broušením boků zubů po tepelném zpracování. Druhá skupina ozubených kol byla po broušení dodatečně balotínována na bocích a patách zubů. Experimenty proběhly za podmínek smíšeného mazání. Z výsledků experimentů vyplývá, že únavový život ozubených kol, která byla po broušení balotínována je asi 1,6 \times vyšší v porovnání s pouze broušenými ozubenými koly. Autoři vysvětlují nárůst životnosti vlivem zbytkových napětí, která vzniknou na povrchu boků zubů po balotínování.

Také ve studii [75] autoři provedli na dvou-diskovém experimentálním zařízení testy kontaktní únavy technologicky různě opracovaných třecích povrchů za podmínek částečného skluzu a smíšeného mazání. Nejlepší odolnost proti kontaktnímu porušení vykazoval třecí povrch, který byl tepelně zpracován, broušen a balotínován. V práci [76] autoři uskutečnili experimentální analýzu vlivu balotínování na kontaktní únavové porušení, tření a opotřebení bainitické tvárné litiny, která se pro své vynikající tlumící schopnosti používá na výrobu ozubených kol. Testy proběhly na dvou-diskovém experimentálním zařízení při různých zatíženích, za částečného skluzu a při smíšeném mazání. Autoři konstatují, že balotínování sice indukuje pozitivní zbytkové tlakové napětí na třecím povrchu, ovšem taktéž zvyšuje jeho drsnost, což zásadně ovlivňuje režim mazání a kontaktní únavovou životnost. Ve studii [77] autoři zkoumali vliv tepelného zpracování a balotínování na kontaktní únavu ozubených kol s přímými zuby, vyrobených z oceli AISI 1045, přičemž prokázali pozitivní efekt balotínování, jak u kol tepelně nezpracovaných – měkkých (Obr. 28, označení C), tak i u kol tepelně zpracovaných – mající tvrdost HRC 59 (Obr. 28, označení D).

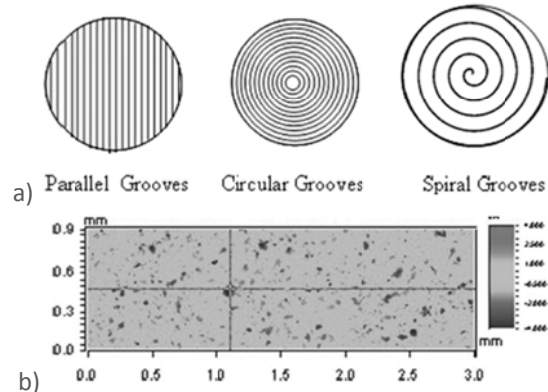


Obr. 28 vliv tepelného zpracování a balotínování na kontaktní únavu ozubených kol, [77]

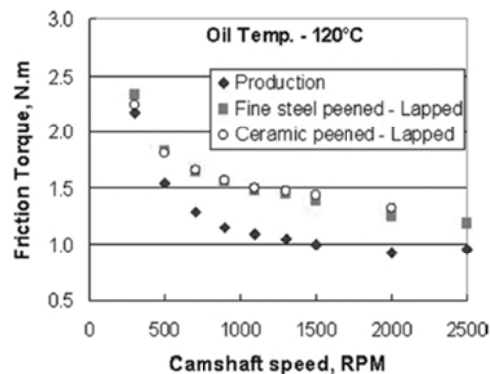
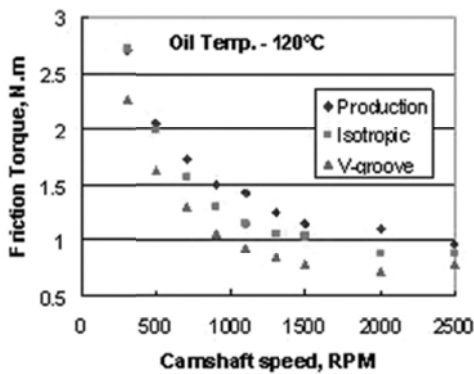
Zajímavou studii [78] provedli autoři výzkumného a inovačního centra automobilky Ford Motor Company, ve které se zaměřili na snížení třecích ztrát ventilového rozvodu, které mohou tvořit 6-10 % celkových třecích ztrát spalovacího motoru. Na stykové ploše zdvihátka (Obr. 29) vytvořili několik typů textur pomocí diamantového nástroje (Obr. 30a) a také texturu pomocí balotínování (Obr. 30b). Užitím experimentálního zařízení, jehož základní část byla tvořena hlavou motoru obsahující ventilový rozvod, uskutečnili měření třecího momentu při různých otáčkách vačkového hřídele a teplotách mazacího oleje. Z provedených experimentů vyplývá, že největší redukci tření (až o 35 %) vykazuje zdvihátko, jehož plocha je opatřena texturou s paralelními V-drážkami, a to v porovnání s broušenou plochou konvenčního zdvihátka (Obr. 31). Texturované zdvihátko spolu s vačkou rovněž nevykazují nadměrné opotřebení třecích povrchů ve srovnání s konvenčním řešením. Pokud autoři použili k modifikaci topografie povrchu zdvihátka balotínování, a to s užitím ocelových i keramických kuliček, tak došlo k navýšení drsnosti povrchu (z $Ra = 0,1-0,2$ na $Ra = 1,2$), což se projevilo nárůstem třecího momentu. Snížení třecího momentu na úroveň charakteristickou pro konvenční zdvihátko, se nepodařilo dosáhnout ani při dodatečném lapování balotínovaného povrchu (Obr. 31).



Obr. 29 kontakt mezi třecími povrchy vačky a zdvihátka, [78]

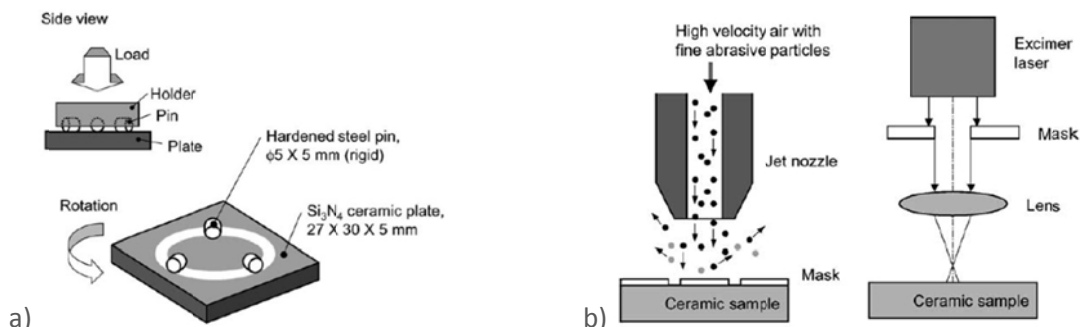


Obr. 30 a) paralelní, kruhové a spirální V-drážky, b) balotinovaný povrch, [78]

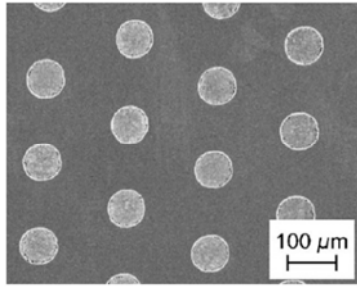


Obr. 31 porovnání průběhů třecích momentů v závislosti na otáčkách vačkového hřídele pro různé modifikace topografie povrchů zdvihátek při teplotě mazacího oleje 120°C, [78]

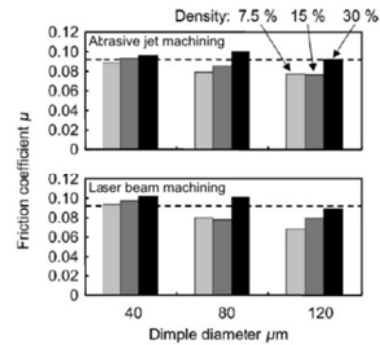
V poslední době se některé výzkumné práce zabývají použitím keramických materiálů na výrobu zdvihátek ventilů spalovacích motorů, a to díky jejich vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení. Studie [79] se zaměřila na experimentální analýzu vlivu mikro-dentů na třecí vlastnosti liniového kontaktu těles vyrobených z Si_3N_4 keramiky a kalené oceli za podmínek čistého skluzu a smíšeného mazání. Testy proběhly na pin-on-disc experimentálním zařízení (Obr. 32a). Mikro-denty byly vytvořeny na keramickém plátu, jehož lapovaný třecí povrch měl drsnost $R_a = 0,01 \mu\text{m}$, dvojím způsobem a sice balotinováním s použitím masky a laserovým paprskem (Obr. 32b). Uvedenými způsoby vznikly mikro-denty s konstantní hloubkou $5 \mu\text{m}$ a s průměry $40, 80$ a $120 \mu\text{m}$, přičemž zaujímaly plošnou hustotu 7,5; 15 a 30 % (Obr. 33). Na základě výsledků experimentů, autoři studie doporučují, že k největší redukci součinitele tření dojde při použití mikro-dentů s průměrem kolem $100 \mu\text{m}$ a pokrývající třecí povrch v rozsahu od 5 do 20 % (Obr. 34).



Obr. 32 a) experimentální zařízení, b) způsoby vytváření textur mikro-dentů, [79]



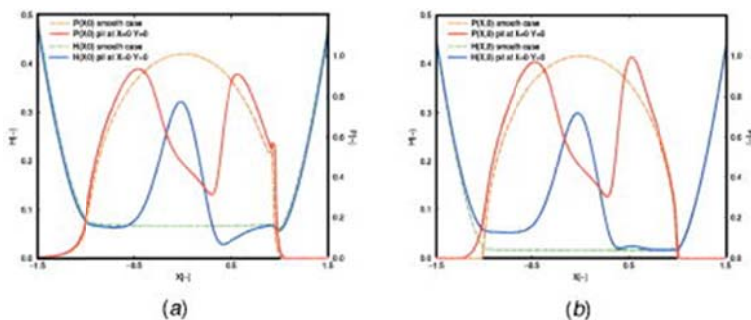
Obr. 33 textura mikro-dentů (průměr 80 μm a plošná hustota 15 %), [79]



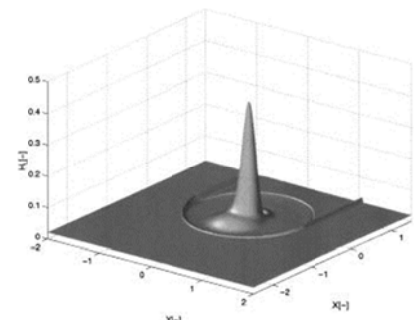
Obr. 34 výsledky experimentů (přerušovaná čára odpovídá lapovanému povrchu), [79]

Z uvedených studií, které se zabývají cílenou modifikací a jejím vlivem na únavové porušení nekonformně zakřivených třecích povrchů, vyplývá, že ne každá textura mikro-dentů vykazuje pozitivní přínos. Nezáleží pouze na rozměrech, tvaru a rozložení mikro-dentů na třecích površích, ale také na provozních podmínkách (zatížení, rychlosti třecích povrchů, čisté valení, skluz) a na režimu mazání (EHD, smíšené, mezní). Ve většině případů je pozitivní nebo negativní efekt cíleného texturování třecích povrchů posuzován globálně, na základě měřených parametrů jako je počet cyklů do vzniku poruchy (pittingu), velikost součinitele tření či velikost opotřebení. Existuje však celá řada prací [80]-[94], která se zabývá spíše studiem mechanismů, které způsobují změny tvaru mikro-dentů v kontaktu a formování tloušťky mazacího filmu případně kontaktního tlaku v jejich okolí, a to při různých provozních podmínkách a režimech mazání.

Ve studii [80] Dumont a kol. provedli numerickou analýzu vlivu mikro-dentů na mazání hladovějícího kontaktu za podmínek čistého valení. Pokud je vtok maziva do kontaktu nižší než jeho výtok, tak kontakt tzv. hladoví, což se projevuje výrazným poklesem tloušťky mazacího filmu v kontaktu. Za těchto podmínek pak může dojít ke styku vrcholů nerovností třecích povrchů. Autoři nejprve provedli numerickou simulaci s jedním mikro-dentem mající hloubku 1 μm a šířku 80 μm, přičemž uvažovali, že mikro-dent je zcela zaplněný mazivem a postupně vstupuje do hladovějícího kontaktu. Po vstupu do kontaktu se vlivem vzrůstajícího tlaku mikro-dent elasticky deformuje a na výstupní hraně z něj začíná vytékat mazivo, které pak deformuje třecí povrchy a tím zvyšuje tloušťku mazacího filmu (Obr. 35b a Obr. 36). Tloušťka mazacího filmu je pak na výstupní hraně mikro-dentu asi 3× větší než na vstupní hraně. Autoři rovněž provedli simulaci s větším počtem mikro-dentů s hloubkou 1 μm a šířkou 40 μm, které tvoří čtvercovou texturu. Výsledky pak prokázaly posílení efektu zvýšení tloušťky mazacího filmu v hladovějícím kontaktu.



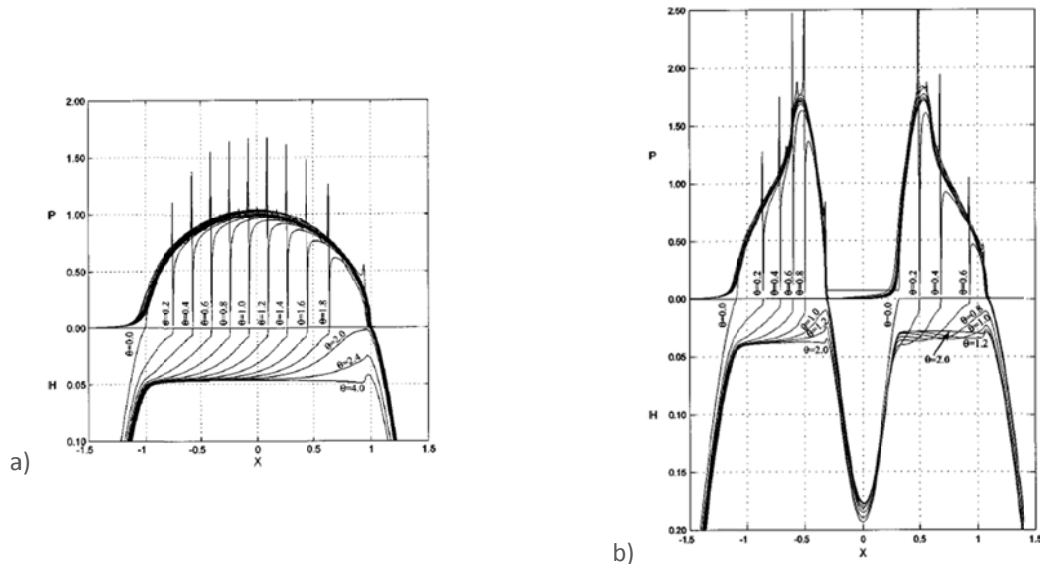
Obr. 35 průběh tloušťky mazacího filmu (modrá barva) a kontaktního tlaku (červená barva), a) plně zaplavený kontakt, b) hladovějící kontakt, [80]



Obr. 36 navýšení tloušťky mazacího filmu za mikro-dentem, [80]

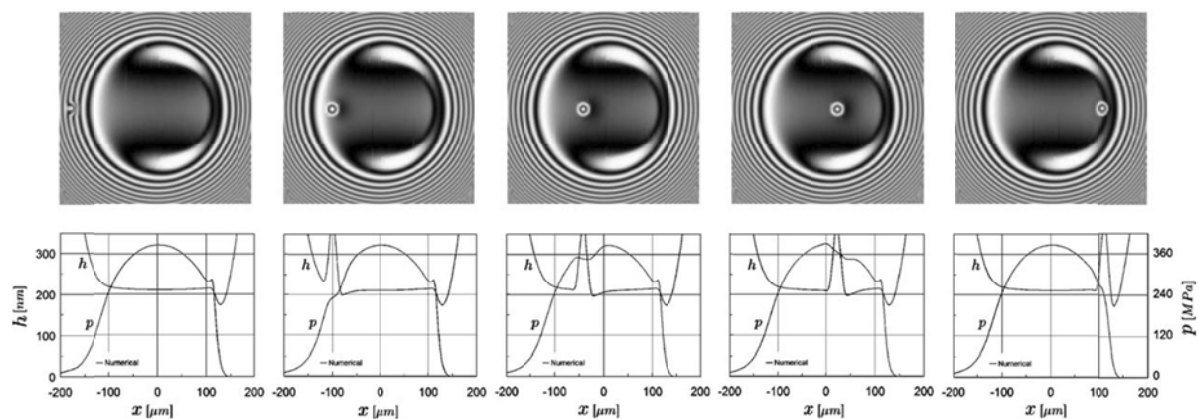
Ve studii [81] Zhao a Sadeghi provedli numerickou analýzu vlivu mikro-dentu na mazání liniového kontaktu při rozběhu za podmínek čistého skluzu. Rozběh strojních součástí patří mezi kritické okamžiky, neboť ve většině případů nejsou třecí povrchy odděleny vrstvou maziva. Z výsledků jejich analýzy vyplývá, že pokud je mikro-dent dostatečně zaplaven mazivem, tak dojde

k současnému nárůstu tloušťky mazacího filmu jak ve vstupní, tak i ve výstupní oblasti kontaktu (Obr. 37b). Rovněž nárůst tloušťky mazacího filmu a následné oddělení třecích povrchů nastane daleko rychleji v porovnání s hladkým kontaktem (bez mikro-dentu), což je možné vypočítat z jednotlivých průběhů tlouštěk mazacího filmu v různých časových okamžicích θ zobrazených na Obr. 37.



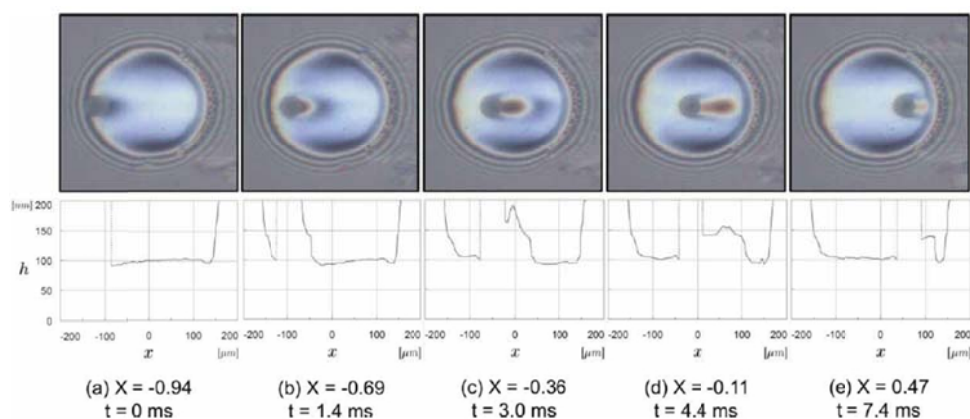
Obr. 37 formování průběhu tloušťky mazacího filmu (H) a kontaktního tlaku (P) při rozběhu, a) hladký kontakt (bez mikro-dentu), b) kontakt s mikro-dentem, [81]

Velice zajímavé výsledky přinášejí studie Mouriera a kol. [82] a [83], které se zabývají základním chováním mikro-dentu v bodovém EHD kontaktu, přičemž uvažují vliv jeho velikosti a vliv provozních podmínek. Chování mikro-dentu zkoumali autoři jak experimentálně pomocí optické interferometrie, tak numericky s využitím 2D více-síťového řešiče. Tloušťka mazacího filmu byla měřena na EHD tribometru, mezi ocelovou kuličkou a skleněným diskem. Hertzův tlak byl 385 MPa a poloměr kontaktní oblasti 136,5 μm . Na velmi hladkém povrchu kuličky byl vždy vytvořen různě velký mikro-dent pomocí metody LST (laser surface texturing). První analýzy byly provedeny za podmínek čistého valení, kdy $\Sigma = 0$. Na Obr. 38 jsou zobrazeny výsledky numerického řešení, které mapují průchod mikro-dentu, s průměrem 31 μm a hloubkou 175 nm, kontaktem při rychlosti maziva $u = 0,09 \text{ ms}^{-1}$. Při průchodu mikro-dentu kontaktem, dochází k mírnému poklesu tloušťky mazacího filmu na vstupní hraně mikro-dentu, který však vzhledem k malé hloubce mikro-dentu nezpůsobí extrémní pokles tlaku. Za podmínek čistého valení, přítomnost mikro-dentu na třecím povrchu, tedy nepřináší pozitivní ani negativní vliv na tloušťku mazacího filmu.

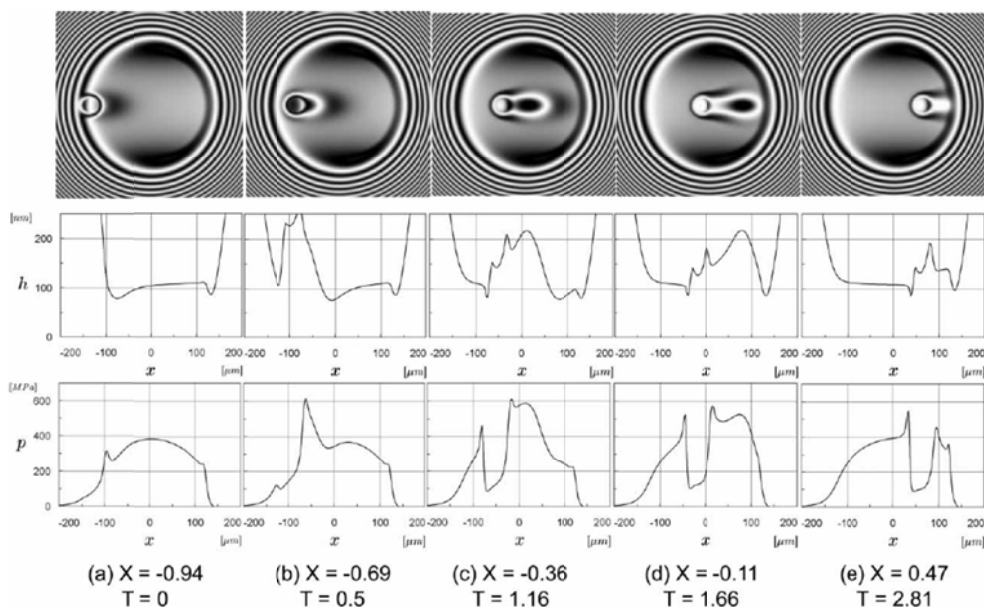


Obr. 38 numerická analýza tloušťky mazacího filmu (h) a kontaktního tlaku (p) za podmínek čistého valení ($\Sigma = 0$) pro mikro-dent s hloubkou 175 nm a průměrem 31 μm , [82]

Další analýzy již autoři provedli za podmínek s částečným skluzem, kdy $\Sigma = -1$, což odpovídá stavu, kdy je kulička s mikro-dentem asi třikrát pomalejší než disk. Na Obr. 39 jsou zobrazeny výsledky experimentů, které mapují tloušťku mazacího filmu při průchodu mikro-dentu, majícího průměr 56 μm a hloubku 180 nm, kontaktem při střední rychlosti maziva $u = 0,05 \text{ ms}^{-1}$. Obr. 40 pak zobrazuje výsledky numerického řešení za stejných podmínek jako u experimentů. Při vstupu mikro-dentu do kontaktu dochází nejprve k mírnému snížení tloušťky filmu na jeho vstupní hraně. Jakmile mikro-dent postupuje dále do oblasti s vyšším tlakem, dochází k nárůstu viskozity maziva uvnitř mikro-dentu, který způsobí výtok maziva ze vstupní hrany mikro-dentu, čímž dojde k navýšení tloušťky mazacího filmu doprovázené poklesem tlaku uvnitř mikro-dentu. Tento pozitivní efekt nastává pouze u mělkých mikro-dentů s hloubkou v rozsahu 200-800 nm. Pokud mikro-dent dosahuje větších hloubek (jednotky mikrometrů), pak nastává kolaps mazacího filmu a styk nerovností třecích povrchů.



Obr. 39 experimentální analýza tloušťky mazacího filmu (h) za podmínek částečného skluzu ($\Sigma = -1$) pro mikro-dent s hloubkou 180 nm a průměrem 56 μm , [83]

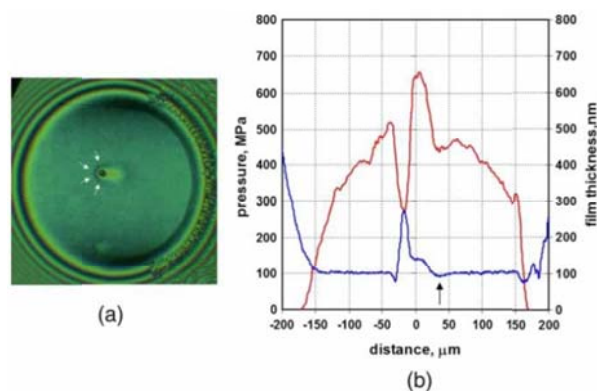


Obr. 40 numerická analýza tloušťky mazacího filmu (h) a kontaktního tlaku (p) za podmínek částečného skluzu ($\Sigma = -1$) pro mikro-dent s hloubkou 180 nm a průměrem 56 μm , [83]

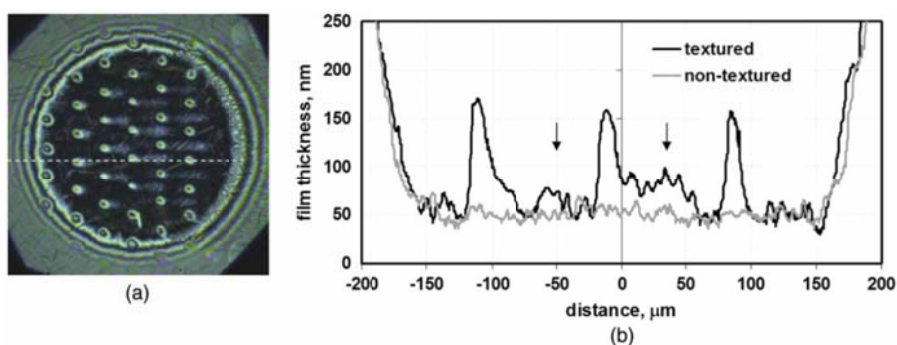
Na uvedené studii Mouriera navázal výzkum Křupky a kol. [84]-[91], který se zabýval experimentálním studiem vlivu mikro-dentů (popř. textur mikro-dentů) na tloušťku mazacího filmu v kontaktu, pracujícího v režimu EHD a smíšeného mazání za ustálených nebo přechodových provozních podmínek (rozběh a reverzace pohybu). Publikace [84] přináší souhrnný přehled výzkumu dané problematiky od roku 2006 do současnosti. Veškeré experimenty byly prováděny na optickém

tribometru, ve kterém byl kontakt realizován mezi ocelovou kuličkou a skleněným diskem. K určení rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu byla použita optická (kolorimetrická) interferometrie. Experimenty probíhaly při maximálním Hertzově tlaku 0,505 GPa s poloměrem kontaktní oblasti 162 μm . Pro dosažení potřebného konstantního poměru skluz-valení Σ , byla rychlost kuličky a disku řízena pomocí servomotorů. Na třecím povrchu kuličky byly vytvářeny mikro-denty různých velikostí mechanicky – pomocí Rockwellova indentoru.

Obr. 41 přináší výsledky chování mělkého, 230 nm hlubokého mikro-dentu, vytvořeného na třecím povrchu kuličky s velmi jemným povrchem ($Ra = 5 \text{ nm}$), za prokluzu ($\Sigma = 0,55$). Mazivo emitované z mělkého mikro-dentu zvětšuje tloušťku mazacího filmu, v tomto případě v oblasti před mikro-dentem, což je pozitivní efekt. Ovšem vlivem elastických deformací třecích povrchů, které způsobuje vytékající mazivo z mikro-dentu, dochází k významnému navýšení tlaku a tím i podpovrchových napětí. Tlak v kontaktu byl určen inverzním výpočtem z elastických deformací třecích povrchů odvozených právě z experimentálně určené tloušťky mazacího filmu [85]. Vlivem bočního výtoku maziva a poklesu hydrodynamického tlaku dochází ke snížení tloušťky mazacího filmu v místech označených černou šipkou (Obr. 41b) a bílými šipkami (Obr. 41a). Toto negativní snížení tloušťky mazacího filmu je výraznější s rostoucí hloubkou mikro-dentu a také při pohybu mikro-dentu v blízkosti okraje kontaktu. Ukázalo se, že tento nepříznivý stav byl potlačen lehkým zvýšením drsnosti třecího povrchu kuličky na $Ra = 15 \text{ nm}$, která byla opatřena texturou mělkých mikro-dentů s hloubkou kolem 250 nm (Obr. 42). Lokální snížení tloušťky mazacího filmu v podstatě zaniknou vlivem povrchových mikro-nerovností kuličky (Obr. 42b), což je příznivé, neboť třecí povrchy strojních součástí jsou vždy tvořeny reálnou topografií. Nicméně navýšení tlaku v okolí mikro-dentu je stále důležitým faktorem, který může mít zásadní vliv na únavové porušení třecích povrchů. Vlivem texturování na tloušťku mazacího filmu se podrobně zabývají studie [86]-[88].

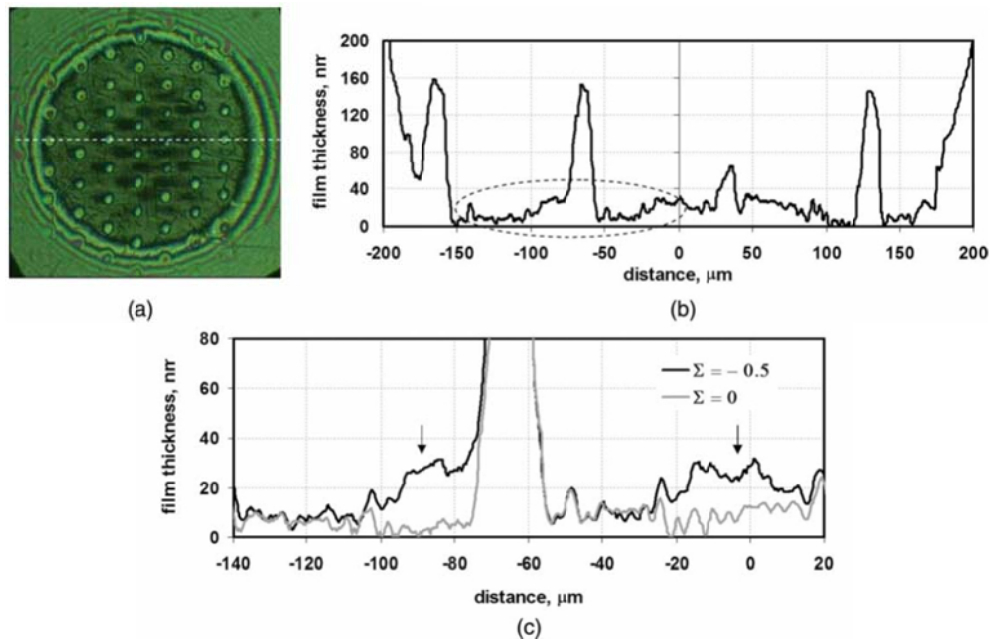


Obr. 41 Vliv mělkého mikro-dentu na rozložení tloušťky mazacího filmu a kontaktního tlaku (hloubka mikro-dentu 230 nm, střední rychlost maziva $u = 0,027 \text{ ms}^{-1}$), a) chromatický interferogram, b) průběhy tloušťky mazacího filmu a kontaktního tlaku, [84]



Obr. 42 Vliv texturování na rozložení tloušťky mazacího filmu při použití kuličky s vyšší drsností (hloubka mikro-dentů 250 nm, vzdálenost mezi jednotlivými mikro-denty 50 μm , střední rychlost maziva $u = 0,00175 \text{ ms}^{-1}$, poměr skluz-valení $\Sigma = 0,5$), a) chromatický interferogram, b) průběh tloušťky mazacího filmu, [84]

Jestliže mazací film není schopen zajistit úplné oddělení třecích povrchů, tak dochází k interakci mikro-nerovností třecích povrchů a nekonformní kontakt začne pracovat v režimu smíšeného mazání. Tím dojde k významné změně v rozložení stykového tlaku, která může vést ke snížení únavového života třecích povrchů, ale i ke zvýšení tření a opotřebení. V takovémto případě by mohlo texturování třecích povrchů vést k omezení vzájemných interakcí mikro-nerovností. Na Obr. 43 je možné vidět přínos textury mikro-dentů na rozložení tloušťky mazacího filmu při smíšeném mazání. Tentokrát se pohybuje disk pomaleji než kulička s texturou mikro-dentů ($\Sigma = -0,5$), takže mazivo je emitováno za jednotlivými mikro-denty. Podrobně se problematikou vlivu texturování třecích povrchů za podmínek smíšeného mazání zabývá studie [89].

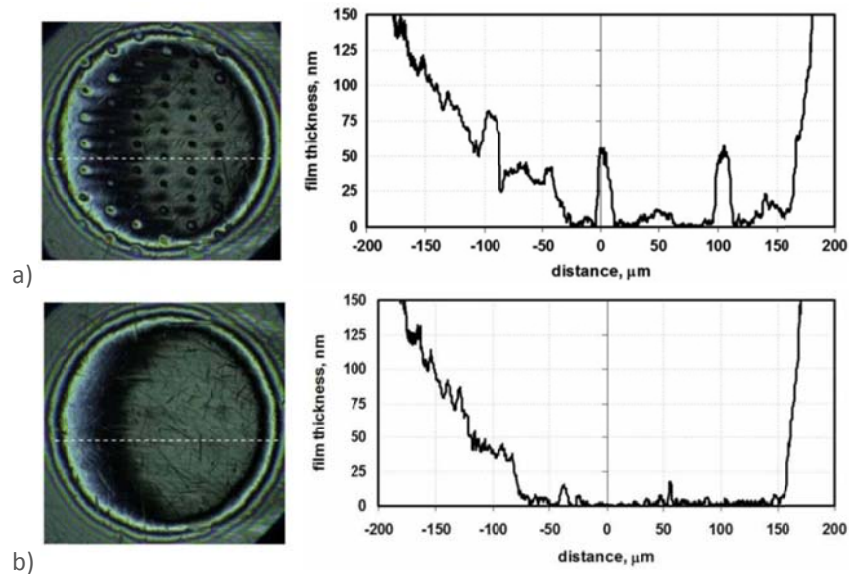


Obr. 43 Vliv texturování na rozložení tloušťky mazacího filmu při smíšeném mazání (hloubka mikro-dentů 250 nm, vzdálenost mezi jednotlivými mikro-denty 50 μm , střední rychlost maziva $u = 0,0013 \text{ ms}^{-1}$, poměr skluz-valení $\Sigma = -0,5$), a) chromatický interferogram, b) průběh tloušťky mazacího filmu, c) porovnání s čistým valením, [84]

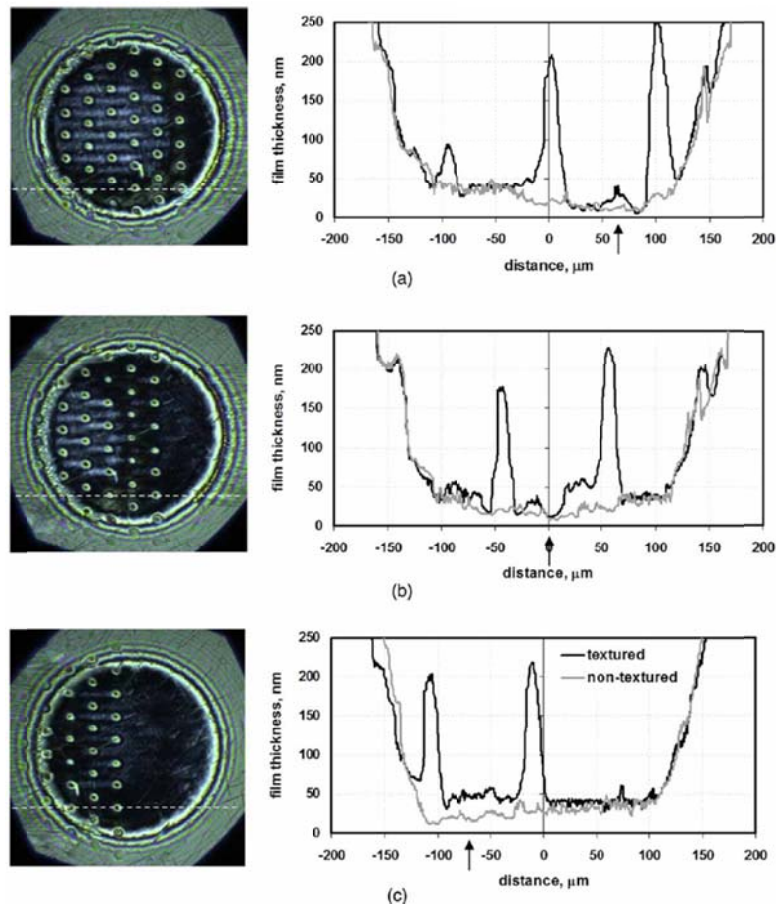
Pozitivní přínos textury mikro-dentů na rozložení tloušťky mazacího filmu se potvrdil i za podmínek rozběhu nekonformních třecích povrchů, podobně jako v [81] a také v [90]. Obr. 44 zobrazuje chromatické interferogramy a jim odpovídající průběhy tlouštěk mazacího filmu při použití texturované a netexturované kuličky. Rozběh trval 0,2 s, přičemž koncové rychlosti kuličky resp. disku byly 0,00177 resp. 0,0132 ms^{-1} . Poměr skluz-valení byl po celou dobu rozběhu konstantní ($\Sigma = 1,53$) a interferogramy byly zaznamenány v čase 46,7 ms od začátku rozběhu. Prospěšný efekt je zřejmý jak z interferogramu, tak z průběhu tloušťky mazacího filmu (Obr. 44a). Oba jasně ukazují, že mazivo nashromážděné uvnitř mikro-dentů je emitováno ve směru toku maziva, čímž lokálně navyšuje tloušťku mazacího filmu v té části kontaktu, který ještě není zaplaven mazivem.

Poškození třecích povrchů může nastat také při reverzaci pohybu a při vratném pohybu, kdy rychlost třecích povrchů dosáhne na okamžik nulové hodnoty. Obr. 45 popisuje vliv texturování třecího povrchu kuličky na formování tloušťky mazacího filmu při reverzaci pohybu. Reverzace pohybu proběhla v časovém okamžiku 0,006 s, kdy se rychlost kuličky resp. disku změnila z hodnot 0,00177 resp. 0,0053 ms^{-1} na hodnoty -0,00177 resp. -0,0053 ms^{-1} , což odpovídá $\Sigma = 1$, který byl během reverzace konstantní. Jednotlivé interferogramy na Obr. 45a-c byly zachyceny v časech 0,061; 0,097 a 0,115 s po změně směru pohybu. Před změnou směru pohybu procházelo mazivo kontaktem zleva doprava a kavitační oblast se nacházela na pravé straně kontaktu. Na Obr. 45a je možné vidět dvě kavitační oblasti, původní (nyní vstupní oblast) napravo a nově vznikající nalevo. Z interferogramů a průběhů tlouštěk na Obr. 45 je možné vyzorovat oblast ve tvaru laloku

(označeno šipkami), ve které dochází ke snížení tloušťky mazacího filmu a která postupně prochází celým kontaktem. Pokud je povrch kuličky opatřen texturou mikro-dentů, tak je efekt snížení tloušťky mazacího filmu potlačen, protože je z mikro-dentů do kontaktu uvolňováno mazivo. Uvedenou problematikou se podrobně zabývá např. studie [91].

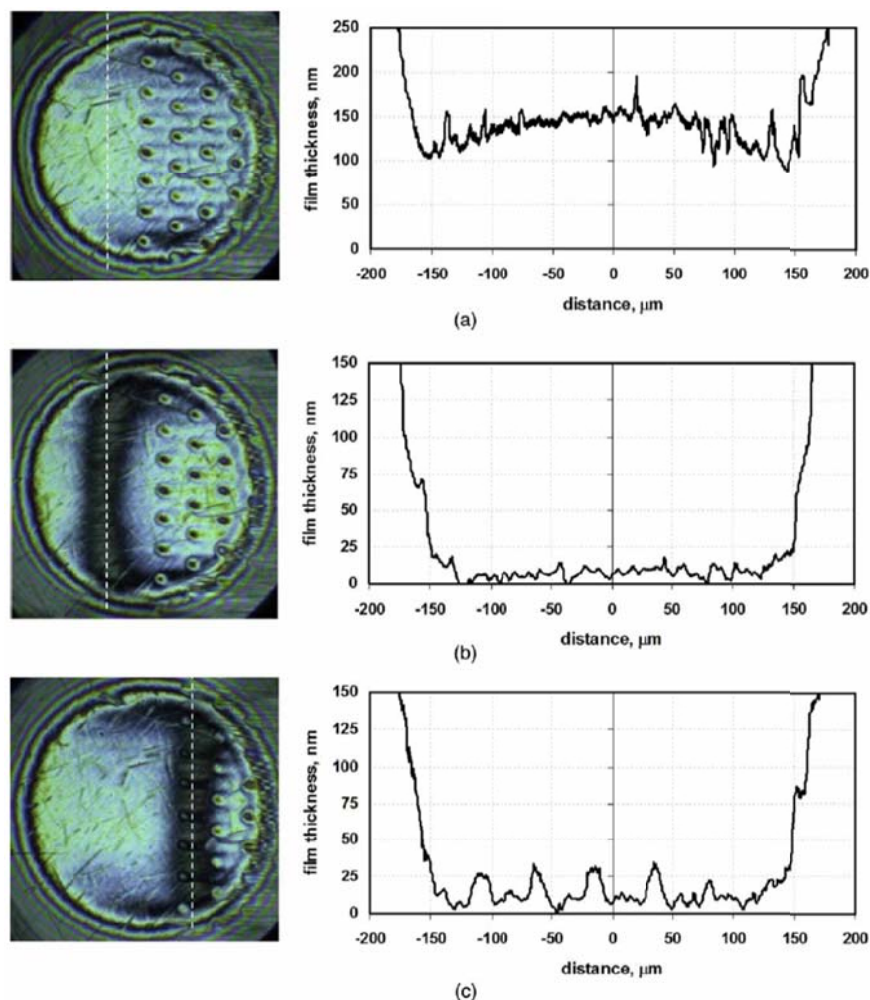


Obr. 44 Vliv texturování na rozložení tloušťky mazacího filmu během rozběhu, a) texturovaný povrch kuličky, b) povrch kuličky bez textury, [84]

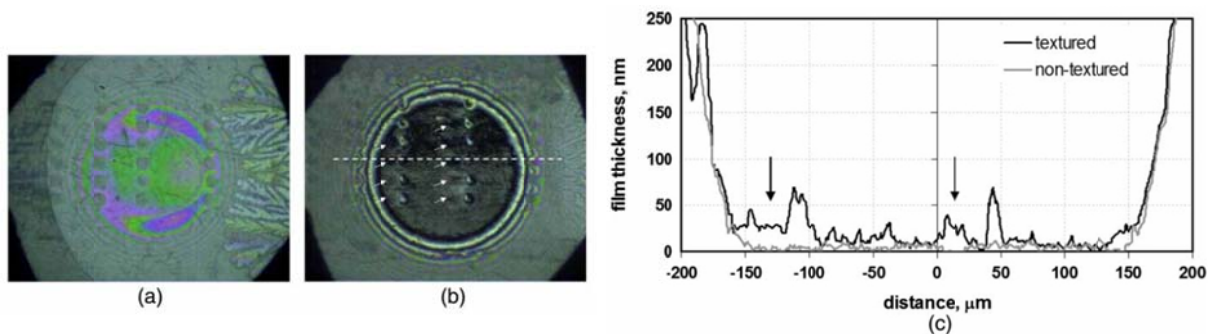


Obr. 45 Vliv texturování na rozložení tloušťky mazacího filmu během reverzace pohybu – chromatické interferogramy byly zachyceny v časech a) 0,061 s, b) 0,097 s a c) 0,115 s po změně směru pohybu, [84]

Jak již bylo popsáno výše, při nedostatečném zásobení kontaktu mazivem může dojít k jeho hladovění a následnému kolapsu mazacího filmu. Obr. 46 znázorňuje přínos textury mikro-dentů na formování tloušťky mazacího filmu při částečně hladovějícím kontaktu, pracujícího za podmínek částečného skluzu ($\Sigma = 1$). Při experimentu nepokrývalo mazivo celou kontaktní dráhu, takže v určitém okamžiku se do kontaktu dostala část třecích povrchů bez maziva, čímž došlo k významnému poklesu tloušťky mazacího filmu. Obr. 46a popisuje situaci těsně před začátkem hladovění, kde tloušťka mazacího filmu dosahovala hodnoty kolem 150 nm. O 16 ms později, vlivem částečného hladovění, významně klesá tloušťka mazacího filmu pouze na několik nanometrů (Obr. 46b). Nicméně za dalších 11 ms, hladovějící oblast zasahuje texturovanou část povrchu kuličky a emitované mazivo z mikro-dentů lokálně navyšuje tloušťku mazacího filmu a tím odděluje třecí povrchy (Obr. 46c). Jednotlivé mikro-denty tak fungují za podmínek částečného skluzu jako rezervoáry maziva, stejně jako v předešlých případech. Další provedené experimenty prokázaly, že rovněž při hladovění za podmínek čistého valení a při větších hloubkách mikro-dentů kolem 900 nm, přináší texturování pozitivní výsledky, podobně jako v numerické studii Dumonta a kol. [80]. Obr. 47a znázorňuje chromatický interferogram v okamžiku před začátkem hladovění, kdy se do kontaktu z levé části blíží oblast bez maziva. Oblast bez maziva pak vstoupí do kontaktu a postupně jím prochází, čímž kontakt hladoví (Obr. 47b). Z Obr. 47b,c je možné vyzorovat (označeno šipkami), že z výstupních stran mikro-dentů je emitováno mazivo, které pak lokálně navyšuje tloušťku mazacího filmu.



Obr. 46 Vliv texturování na částečně hladovějící kontakt při částečném skluzu, a) chromatický interferogram a průběh tloušťky mazacího filmu při plně zaplaveném kontaktu, b) částečně hladovějící kontakt – oblast bez textury, c) částečně hladovějící kontakt – oblast s texturou, [84]



Obr. 47 Vliv hlubokých mikro-dentů na hladovějící kontakt při čistém valení ($u = 0,13 \text{ ms}^{-1}$), [84]

V neposlední řadě se problematikou texturování nekonformních třecích povrchů zabývali, spolu se svými spolupracovníky, autoři Nanbu [92] a Zhu [93], kteří numericky generovali různé skladby povrchových textur, jež byly tvořeny různými tvary a velikostmi mikro-dentů a poté numericky simulovali jejich vliv na rozložení tloušťky mazacího filmu a kontaktního tlaku v EHD kontaktu. Texturování třecích povrchů se však neomezuje pouze na strojní součásti, ale v poslední době se začíná rozšiřovat také do oblasti medicíny a biomechaniky. Gao a kol. [94] provedli numerickou analýzu texturovaného kontaktu mezi kovovou jamkou a hlavicí endoprotézy kyčelního kloubu při smíšeném mazání a při zatížení odpovídající stoje a chůzi člověka. Z jejich výsledků vyplývá, že texturování může mít příznivý vliv na mazání kovových komponent kyčelních endoprotéz, obzvláště pokud převládá režim mezného mazání. Naopak při režimu EHD mazání, může přítomnost mikro-dentů snižovat tloušťku mazacího filmu.

Problematika cílené modifikace topografie nekonformně zakřivených třecích povrchů pomocí texturování je velice složitá a ne vždy přináší pozitivní výsledky v oblastech kontaktní únavové životnosti, opotřebení a tření. Při návrhu textury mikro-dentů hraje významnou roli nejen jejich tvar a velikost, ale také jejich uspořádání v kontaktní oblasti, dále režim mazání a provozní podmínky za kterých kontaktní povrchy pracují. Ukázalo se, že vhodně navržená textura tvořená mělkými mikro-denty, může pozitivně ovlivnit utváření tloušťky mazacího filmu nekonformních kontaktů, pracujících za podmínek smíšeného nebo mezného mazání a zároveň při částečném skluzu, což se projeví na zvýšení kontaktní únavové životnosti. Tento pozitivní efekt je přisuzován právě mikro-dentům, které za nepříznivých mazacích podmínek např. při hladovění, rozběhu a reverzaci pohybu slouží jako zásobníky maziva, které uvolňují do kontaktu dodatečné mazivo a tím oddělují třecí povrchy a minimalizují styk vrcholů mikro-nerovností třecích povrchů. Uvedený příznivý efekt však může být negativně vyvážen navýšením tlaku a podpovrchových napětí v okolí mikro-dentu, což má nepříznivý vliv na únavové porušení třecích povrchů.

Následující kapitola se zabývá vlastním přínosem autora, jehož snahou je prostřednictvím šesti vědeckých publikací (článků) přispět k objasnění uvedené problematiky. Jednotlivé publikace se zabývají analýzou vlivu textur na tloušťku mazacího filmu, na kontaktní tlak a zejména na únavové porušení nekonformních třecích povrchů pracujících při EHD nebo smíšeném režimu mazání a za podmínek čistého valení nebo částečného skluzu.

3. VLIV MODIFIKACE TOPOGRAFIE NA ÚNAVOVÉ PORUŠENÍ TŘECÍCH POVRCHŮ

3.1 Vliv na tloušťku mazacího filmu

Experimentálním studiem tloušťky mazacího filmu se na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně zabývá od devadesátých let minulého století tribologická skupina pod vedením I. Křupky a M. Hartla, kteří vyvinuli měřicí metodu tzv. *kolorimetrickou interferometrii*. Pomocí ní je možné stanovit a vizualizovat rozložení tloušťky mazacího filmu v bodovém EHD kontaktu s přesností několik jednotek nanometrů [95], [96].

I když stanovení tloušťky mazacího filmu není hlavním přínosem autora, tak její znalost je nezbytná pro výpočet kontaktního tlaku (články [I], [III]) a také pro návrh a ověření vhodné textury mikro-dentů při analýzách kontaktního únavového porušení (články [II], [IV]-[VI]).

Měření tloušťky mazacího filmu probíhalo na optickém experimentálním zařízení (tzv. tribometru), které je zobrazeno v článcích [I] a [II] na Obr. 1 a v článku [VI] na Obr. 2. Kruhový kontakt je realizován mezi ocelovou kuličkou (AISI 52100) o průměru 25,4 mm a skleněným diskem o vnějším průměru 150 mm. Spodní (kontaktní) plocha disku je pokryta velmi tenkou polopropustnou chromovou vrstvou a horní plocha disku je opatřena antireflexní vrstvou. Skleněný disk je opticky hladký a povrch kuličky může být vyroben s různou topografií povrchu (hladký – leštěný, broušený, s texturu mikro-dentů). Kulička i disk jsou nezávisle řízeny pomocí servomotorů pro dosažení požadovaného poměru skluz-valení. Kontaktní oblast je osvětlena halogenovou lampou nebo xenonovou výbojkou. Jednotlivé chromatické interferogramy jsou zaznamenávány vysokorychlostní digitální kamerou ve vysokém rozlišení, které jsou následně zpracovávány pomocí kolorimetrické interferometrie tenkých filmů. Výsledkem je rozložení tloušťky mazacího filmu v EHD kontaktu při daných provozních podmínkách.

V článku [I] byla provedena experimentální analýza tloušťky mazacího filmu, která je východiskem pro výpočet kontaktního tlaku v hladkém EHD kontaktu (kap. 3.2). Ocelová kulička byla vysoce leštěna, takže její povrch byl téměř hladký. Zatížení kontaktu odpovídalo maximálnímu Hertzovu tlaku 0,51 GPa. Jako mazivo byl použit základový ropný olej (N500), který měl při teplotě měření 25 °C dynamickou viskozitu 0,32 Pas a viskozitně-tlakový koeficient 31 GPa⁻¹. Experimenty byly realizovány za podmínek čistého valení při rychlosti 0,0342 ms⁻¹. Obr. 3 zobrazuje 3D rozložení tloušťky mazacího filmu hladkého EHD kontaktu, které odpovídá chromatickému interferogramu zobrazeném na Obr. 2. Obr. 4 resp. Obr. 5 pak zobrazuje centrální průběh tloušťky mazacího filmu ve směru valení resp. ve směru kolmém na směr valení.

Také v článku [III] byla experimentálně měřena tloušťka mazacího filmu za účelem výpočtu kontaktního tlaku (kap. 3.2), ovšem v tomto případě obsahoval hladký povrch kuličky vždy jeden mikro-dent o různých hloubkách, který byl vyražen pomocí Rockwellova indentoru. První série experimentů byla provedena s mělkým mikro-dentem, majícím hloubku 360 nm, za podmínek částečného skluzu ($\Sigma = 0,45$) a při střední rychlosti třecích povrchů 0,027 ms⁻¹. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 1 a 2 a také na Obr. 3 pro záporný poměr skluz-valení ($\Sigma = -0,5$). Z výsledků je zřejmé, že za přítomnosti skluzu dochází k výtoku maziva před nebo za mikro-dent, což má za následek fluktuaci kontaktního tlaku (kap. 3.2). Pokud je hloubka mikro-dentu větší (kolem 1 μm), je velice obtížné získat rozložení tloušťky mazacího filmu uvnitř samotného mikro-dentu, protože dochází ke ztrátě kontrastu chromatického interferogramu. Uvedený problém dokumentuje Obr. 4, na kterém je zobrazen chromatický interferogram a průběh tloušťky mazacího filmu ve směru valení pro mikro-dent hluboký 1020 nm. Aby bylo možné provést výpočet kontaktního tlaku (kap. 3.2), musí být chybějící průběh tloušťky mazacího filmu uvnitř mikro-dentu nahrazen jeho nedeformovaným tvarem. To je možné, neboť se předpokládá, že uvnitř hlubokého mikro-dentu je tlak v porovnání s tlakem v okolí mikro-dentu velice nízký [82].

Články [II] a [V] se již zabývají vlivem textur mikro-dentů na rozložení tloušťky mazacího filmu za podmínek EHD a smíšeného mazání. Výsledky provedených experimentů byly východiskem pro návrh

textur mikro-dentů, které byly následně testovány na kontaktní únavové porušení (kap. 3.3). První série experimentů byla zaměřena na měření tenkých EHD filmů, kde na velice hladkém (leštěném) povrchu kuličky byly vytvořeny textury mikro-dentů hluboké 200-300 nm. Z Obr. 3 a 4 v článku [II] je zřejmé, že se mikro-denty chovají jako zásobníky maziva, ze kterých je emitováno mazivo ve směru nebo proti směru toku maziva v závislosti na velikosti poměru skluz-valení, přičemž při kladném poměru skluz-valení dochází k lokálnímu snížení tloušťky mazacího filmu na vstupní straně mikro-dentů. Druhá série experimentů již byla zaměřena na smíšený režim mazání. Stejná konfigurace textur mikro-dentů (jako u první série experimentů) byla vytvořena na komerčně dostupné ocelové kuličce s drsností $Ra = 15$ nm. Z Obr. 6-8 v článku [II] a také z Obr. 5 v článku [V] je patrné, že tloušťka mazacího filmu je velice nízká a v některých částech kontaktu dochází ke styku mikro-nerovností (parametr mazání λ dosahuje hodnoty kolem 0,6). V okolí mikro-dentů však dochází k navýšení tloušťky mazacího filmu, a to vlivem výtoku maziva v závislosti na velikosti poměru skluz-valení. Dokonce lokální pokles tloušťky mazacího filmu na vstupní straně mikro-dentů při kladné hodnotě poměru skluz-valení není zřetelný. Z provedených experimentů tedy jasně vyplývá pozitivní přínos texturování nekonformních třecích povrchů, které pracují za podmínek smíšeného mazání a při částečném skluzu.

V článku [VI] bylo k modifikaci topografie třecího povrchu kuličky použito balotínování, které je na rozdíl od konvenčního vytváření mikro-dentů pomocí Rockwellova indentoru daleko rychlejší. Pokud je povrch kuličky bez dalších úprav pouze balotínován, tak dojde ke zvýšení jeho drsnosti na $Ra = 0,19$ μm a při experimentech pak dochází ke kontaktu mezi vrcholky mikro-nerovností balotínované kuličky a hladkým povrchem disku (Obr. 15a), který jej poškozují (Obr. 15b). Daleko příznivější výsledky přináší dodatečné přešetření balotínovaného povrchu pomocí diamantových brusných past, kdy jsou odstraněny vrcholky mikro-nerovností, čímž dojde k mírnému snížení drsnosti povrchu, ale podstatné změně šikmosti Sk z $-0,2$ na $-1,3$ (Obr. 15c). První experimenty, s takto upraveným třecím povrchem kuličky, byly provedeny za částečného prokluzu ($\Sigma = 1,5$). Z Obr. 16 je zřejmé jak jednotlivé mikro-kavity emitují mazivo a tím lokálně navyšují tloušťku mazacího filmu v porovnání s pouze leštěným povrchem kuličky. Další experimenty byly zaměřeny na problematiku rozběhu třecích povrchů, kdy v důsledku nulové rychlosti třecích povrchů dojde k vytlačení maziva z kontaktu a při následném rozběhu dochází k jejich nadměrnému opotřebením vlivem styku mikro-nerovností. Výsledky experimentů jsou zobrazeny na Obr. 17, přičemž chromatické interferogramy byly zaznamenány v čase 65 ms od začátku rozběhu. Poměr skluz-valení byl po celou dobu rozběhu konstantní a dosahoval hodnoty 1,68. Z průběhů tlouštěk mazacího filmu ve směru valení (Obr. 17d) a také ve směru kolmém na směr valení (Obr. 17c) je vidět, že vytékající mazivo z mikro-kavit navyšuje tloušťku mazacího filmu a tím pomáhá redukovat styk mikro-nerovností třecích povrchů při rozběhu. Popsaná modifikace topografie třecích povrchů byla analyzována také při zkouškách kontaktní únavy (kap. 3.3).

3.2 Vliv na kontaktní tlak

Třecí povrchy strojních součástí obsahují mikro-nerovnosti různých tvarů a velikostí, které významně ovlivňují nejen tloušťku mazacího filmu, ale také kontaktní tlak. Fluktuace tlaku v kontaktu má přímý vliv na rozložení a velikost podpovrchových napětí, které pak mohou mít negativní vliv na kontaktní únavovou životnost. V současné době je možné určit průběh tlaku v nehladkém EHD kontaktu pomocí numerického řešení. Nicméně stanovení kontaktního tlaku pomocí experimentálních metod není doposud úspěšně vyřešeno. Velice dobře zvládnutá, rychlá a dostupná technika měření tloušťky mazacího filmu pomocí kolorimetrické interferometrie (kap. 3.1) se přímo nabízí k nasazení pro výpočet průběhu tlaku v EHD kontaktu z experimentálně stanovené tloušťky mazacího filmu. Touto problematikou se zabývají články [I] a [III].

Článek [I] je zaměřen na metodiku výpočtu tlaku z experimentálně stanovené tloušťky mazacího filmu pomocí inverzní úlohy založené na teorii pružnosti a pevnosti. Existuje totiž závislost mezi elastickými deformacemi kontaktních ploch U a kontaktním tlakem P . Elastické deformace obou ploch v kontaktu jsou jednou ze složek naměřené tloušťky mazacího filmu, proto se musí nejprve

vyjádřit. Naměřená tloušťka mazacího filmu však kromě elastických deformací třecích povrchů obsahuje rovněž přiblížení stýkajících se těles a nedeformovanou geometrii kontaktních ploch. Elastické deformace je tedy možné určit tak, že je od naměřené tloušťky mazacího filmu odečtena geometrie kontaktních ploch a přičteno přiblížení stýkajících se zatížených těles. Velikost elastických deformací U , je pak podle teorie pružnosti a pevnosti vyjádřena jako lineární kombinace vlivových koeficientů K a tlaku P ($U = KP$). V každém místě řešené oblasti je tedy celková elastická deformace dána jako součet všech příspěvků od jednotlivých tlaků na řešené oblasti. Výpočet kontaktního tlaku P z elastických deformací U je tedy řešením inverzní úlohy ($P = K^{-1}U$), na které je možné nasadit různé numerické metody lineární algebry. Uvedený proces je schematicky znázorněn v levé části Obr. 6. Problém však nastává, pokud matice deformací U obsahuje větší počet dat (např. při vyšších rozlišeních), tím matice vlivových koeficientů (neboli matice poddajnosti) K extrémně narůstá a její inverze je problematická. Za účelem výrazného zrychlení výpočtu lze využít tzv. *konvolučního algoritmu*, který je schematicky znázorněn v pravé části Obr. 6. Nevýhodou konvolučního algoritmu je jeho zvýšená citlivost na vstupní data, jimiž jsou elastické deformace určené na základě experimentálně naměřené tloušťky mazacího filmu. Popsaná metoda výpočtu kontaktního tlaku byla nejprve ověřena na výsledcích vzešlých z plně numerického řešení tloušťky a tlaku v hladkém EHD kontaktu (Obr. 7). Poté byl proveden výpočet kontaktního tlaku přímo na základě experimentálně naměřených tlouštěk mazacího filmu zobrazených na Obr. 2-5, a to při rozlišení 128×128 pixelů. Výsledky rozložení kontaktního tlaku hladkého EHD kontaktu pracujícího za podmínek čistého valení jsou pak zobrazeny na Obr. 8-9.

Popsaná metoda výpočtu kontaktního tlaku byla následně aplikována v článku [III], kdy třecí povrch kuličky obsahoval jeden mikro-dent s různou hloubkou. Při hloubce mikro-dentu kolem 360 nm je možné experimentálně získat tloušťku mazacího filmu i uvnitř mikro-dentu (kap. 3.1), takže výpočet tlaku je bezproblémový. Průběh kontaktního tlaku při střední rychlosti třecích povrchů $0,027 \text{ ms}^{-1}$ a při $\Sigma = 0,45$ je zobrazen na Obr. 1c a na Obr. 2b a při $\Sigma = -0,5$ na Obr. 3b. Z průběhů je patrné, že mazivo emitované před nebo za mikro-dent elasticky deformuje třecí povrchy. Elastické deformace pak způsobují zvýšení kontaktního tlaku, a to o 40 %, což je u poměrně mělkého mikro-dentu významná hodnota. Lokální navýšení tlaku pak ovlivňuje velikost podpovrchových napětí a tím i kontaktní únavovou životnost třecích povrchů. Pokud je mikro-dent hlubší (kolem $1 \mu\text{m}$), tak nastává problém s měřením tloušťky mazacího filmu (Obr. 4) a je zapotřebí provést doplnění chybějící tloušťky mazacího filmu uvnitř mikro-dentu pomocí jeho nedeformovaného tvaru (kap. 3.1). Uvedený postup byl nejprve úspěšně ověřen na základě výsledků z numerického řešení studie [97] (Obr. 5-11) a poté byl aplikován na naměřenou tloušťku mazacího filmu s mikro-dentem mající hloubku 1020 nm při střední rychlosti třecích povrchů $0,027 \text{ ms}^{-1}$ a při $\Sigma = 0,5$ (Obr. 4). Obr. 12 pak zobrazuje průběh tloušťky mazacího filmu, která je doplněna o nedeformovaný tvar mikro-dentu a z ní vypočtený průběh kontaktního tlaku. V tomto případě geometrie mikro-dentu zahrnuje rovněž okraj vytlačeného materiálu na obvodu (Obr. 13), který vznikne při vytváření mikro-dentu pomocí Rockwellova indentoru. Z průběhu tlaku (Obr. 12) je evidentní, že tento vytlačený okraj materiálu významně zvyšuje tlak na výstupní hraně mikro-dentu. Další výpočet tlaku byl proveden pro mikro-dent hluboký přibližně 700 nm a pro velmi tenký mazací film, který vzniká při zatížení 0,49 GPa, střední rychlosti třecích povrchů $0,0018 \text{ ms}^{-1}$ a $\Sigma = 0,5$. Průběh tloušťky mazacího filmu a vypočtený průběh tlaku je zobrazen na Obr. 14. Průběh tlaku je velice blízký rozložení Hertzova tlaku, nicméně k výraznému zvýšení dochází v oblasti na vstupní hraně mikro-dentu vlivem elastických deformací emitovaného maziva.

3.3 Vliv na kontaktní únavu

Kontaktní únavové porušení nekonformních třecích povrchů je možné považovat za hodnotící kritérium životnosti strojních součástí, zejména u valivých ložisek a ozubených kol. Modifikací topografie nekonformních třecích povrchů pomocí textur mělkých mikro-dentů je za určitých provozních podmínek možné docílit navýšení tloušťky mazacího filmu (kap. 3.1). Tento pozitivní efekt je však negativně vyvažován navýšením tlaku v okolí mikro-dentu (kap. 3.2), což může mít nepříznivý

vliv na únavové porušení třecích povrchů. Tato kapitola se prostřednictvím článků [II] a [IV]-[VI] zabývá vlivem texturování nekonformních třecích povrchů na jejich kontaktní únavovou životnost, a to při smíšeném režimu mazání.

Analýza kontaktní únavy byla prováděna pomocí experimentálního zařízení, které je zobrazeno na Obr. 2 v článku [II] a na Obr. 1 v článcích [IV]-[VI]. Historie a konstrukce zkušebního zařízení, označovaného jako R-MAT (radiální materiálové zkoušky), je detailně popsána v [98]. Pro realizaci současných experimentů bylo zkušební zařízení podstatně zrekonstruováno zejména v oblasti nastavení částečného skluzu a ovládní pomocí PC. Mezi dvěma disky o průměru 145 mm se odvaluje nebo částečně prokluzuje válcový zkušební vzorek o průměru 9,6 mm. Geometrie kontaktních ploch disků a vzorku je volena tak, aby bylo dosaženo kruhové kontaktní plochy (disky mají poloměr zaoblení 4,5 mm v rovině kolmé na směr obvodové rychlosti). Vzorek je mezi diskem pevného a pohyblivého vřetena stlačován určitým zatížením a celá soustava se chová jako třecí převod. Vzorek je uložen ve výkyvné vidlici se snímačem vibrací a je zatížen přes disk pohyblivého vřetena závažím pomocí lankového převodu. Jakmile se na třecím povrchu vzorku objeví kontaktní únavové porušení – pitting, snímač vibrací vydá signál k zastavení zkušebního zařízení. Testovaný vzorek je možné vůči diskům posouvat v axiálním směru, čímž je umožněno na jednom vzorku provést 12-16 měření. Oba disky a vzorek byly vyrobeny z ložiskové oceli AISI 52100 a po zakalení vykazovaly tvrdost 60 HRC. Součástí zkušebního zařízení je oběhový mazací systém, který zajišťuje mazání nejen analyzovaného kontaktu mezi disky a vzorkem, ale také ložisek pevného a pohyblivého vřetena disků. Jako mazivo byl při všech experimentech použit minerální základový olej RENOLIN MA s dynamickou viskozitou 0,021 Pas při 40 °C a s viskozitně-tlakovým koeficientem 15 GPa⁻¹. Ustálená teplota maziva se při experimentech pohybovala od 30 do 33 °C. Pohon disku pevného vřetena zajišťuje elektromotor prostřednictvím řemenového převodu. Při realizaci experimentů za podmínek částečného skluzu je pevné a pohyblivé vřeteno spojeno modifikovatelným synchronním převodem, který zajišťuje požadovanou hodnotu poměru skluz-valení.

V článku [II] byly uskutečněny experimenty, které byly prioritně zaměřeny na možný negativní vliv mikro-dentů na kontaktní únavu. Drsnost R_a vzorku resp. disků byla 0,1 resp. 0,2 a parametr mazání λ se pohyboval mezi hodnotami 0,4-0,6. Nejdříve však byly provedeny referenční experimenty bez dentů při zatížení odpovídající maximálnímu Hertzovu tlaku 4,9 GPa a při čistém valení. K porušení třecího povrchu (vzniku pittingu) vzorku došlo při 9×10^7 - 4×10^8 cyklech (Obr. 10a). Na povrchu vzorku pak byly vytvořeny mikro-denty hluboké 20 a 4 μm pomocí Rockwellova indentoru (úhel kužele 120° a poloměr diamantové špičky 0,2 mm), a to tak, že testovaná stopa vždy obsahovala pouze jeden mikro-dent. Přítomnost relativně hlubokého mikro-dentu (20 μm) zapříčiní poškození povrchu v blízkosti mikro-dentu (Obr. 10b,c), což je ve shodě např. se studií [31] a také se sníží počet cyklů do porušení na 3×10^6 . Nicméně k žádnému snížení kontaktní únavy nedošlo při testech s mikro-dentem mající hloubku 4 μm . Navíc pitting vznikal v různých místech testované stopy vzorku, ale ne v blízkosti samotného mikro-dentu. Podobné výsledky byly obdrženy i za podmínek, kdy kontakt pracoval za částečného skluzu ($\Sigma = 0,2$) a při zatížení 3,7 GPa, kde sice došlo k výraznému snížení kontaktní únavy na 3×10^6 cyklů, ovšem pitting se nevyskytoval v blízkosti mikro-dentu.

Obdobné výsledky za srovnatelných podmínek uvádí také článek [V] prostřednictvím Obr. 6-9. Z výsledků je zřejmé, že relativně mělké mikro-denty mající hloubku 4 a 2 μm nemají negativní vliv na kontaktní únavové porušení, proto byly na broušeném třecím povrchu vzorku vytvořeny dvě textury mělkých mikro-dentů lišící se od sebe svou hustotou, které jsou zobrazeny na Obr. 4. Hloubka jednotlivých mikro-dentů je 0,6 μm a jejich průměr je 35 μm . Šířka obou textur je 700 μm a plně pokrývá kruhovou kontaktní oblast mezi vzorkem a disky, která má při maximálním Hertzovu tlaku 5 GPa průměr 600 μm . Textury byly vytvořeny pomocí indentačního zařízení, které je ovládáno přes PC a jeho princip je zobrazen na Obr. 2 a také na Obr. 2 v článku [IV]. Vertikální pohyb Rockwellova indentoru je realizován pomocí krokového motoru, přičemž požadované zatížení je kontrolováno pomocí tlakového snímače síly. Otáčivý pohyb válcového vzorku je zajištěn taktéž krokovým motorem přes vlnovcovou spojku. Uvedeným způsobem je možné vytvořit různé konfigurace textur mikro-dentů. Přestože je celý proces vytváření textur automatizován, je velice časově náročný a vytvoření jedné textury zobrazené na Obr. 4b může trvat až 130 hodin. Experimenty proběhly při

maximálním Hertzovu tlaku 5 GPa a za podmínek částečného skluzu při velikosti poměru skluz-valení 0,05. Opět byly nejprve realizovány referenční experimenty na vzorku bez textury, kdy k porušení povrchu došlo při $8,2 \times 10^5$ cyklech. Oproti případu čistého valení, kdy počet cyklů do porušení byl $1,4 \times 10^8$, došlo tedy k podstatnému snížení únavového života. Ovšem při experimentech s texturami označenými R1 resp. R2 (Obr. 4) došlo k prodloužení kontaktního únavového života na $2,3 \times 10^6$ resp. $1,1 \times 10^7$ cyklů (Obr. 10-11). Tyto výsledky potvrzují hypotézu, že k navýšení únavového života může docházet vlivem přítomnosti mikro-dentů, které lokálně navyšují tloušťku mazacího filmu při smíšeném režimu mazání a částečném skluzu (kap. 3.1).

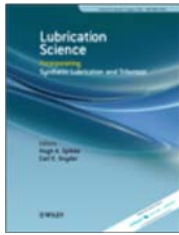
V článku [IV] byla provedena rozsáhlá analýza vlivu čtyř typů textur na kontaktní únavové porušení třecích povrchů pracujících za smíšeného režimu mazání a při částečném skluzu ($\Sigma = 0,05$), a to včetně statistického zpracování některých měření. Textury byly vytvořeny na broušených vzorcích pomocí indentačního zařízení (Obr. 2) popsaného v předchozím odstavci. Obr. 3 detailně zobrazuje čtyři typy vytvořených textur. Textury označené T1, T3 a T4 jsou tvořeny různě uspořádanými mikro-denty s hloubkou 0,6 μm a s průměrem 35 μm . Textura označená T2 má stejné uspořádání mikro-dentů jako textura T1, ale hloubka a průměr mikro-dentů je 1,45 μm a 65 μm . Textury T1, T2 a T3 mají trojúhelníkové uspořádání mikro-dentů, kdežto textura T4 má uspořádání čtvercové. Textury jsou vždy tvořeny deseti obvodovými řadami mikro-dentů, přičemž celková šířka textury nepřesahuje 700 μm . Obr. 4-6 znázorňují topografie třecích povrchů, které byly získány užitím optické měřicí metody založené na interferometrii s řízenou změnou fáze, která poskytuje data s přesností kolem jednoho nanometru. Z profilů na Obr. 5b a 6b je patrné, že vytlačení materiálu na okraji jednotlivých mikro-dentů způsobené při jejich vytváření zaniká v okolní drsnosti broušeného povrchu vzorku. Veškeré experimenty byly provedeny při maximálním Hertzově tlaku o velikosti 5 GPa, čemuž odpovídá kontaktní oblast o průměru 600 μm . Vzorek s danou texturou byl vůči diskům umístěn tak, aby šířka textury plně obsáhla šířku kontaktní oblasti (Obr. 14a). Výsledky referenčních experimentů realizovaných za čistého valení a při částečném skluzu jsou shodné s výsledky uvedenými v článku [V]. Výsledky experimentů provedených na jednotlivých texturách T1-T4 zobrazuje Obr. 11 a shrnuje graf na Obr. 12, ze kterého je evidentní, že textury T1 a T2 obsahující menší počet (2010) mikro-dentů nemají výrazný vliv na zvýšení kontaktní únavy. Textura T2 navíc obsahuje hlubší a širší mikro-denty, takže její přínos je prakticky zanedbatelný. Naopak textury T3 a T4 obsahující dvojnásobný počet (4020) mikro-dentů mají znatelný vliv na zvýšení kontaktní únavy. Z uvedených výsledků je tedy zřejmé, že podstatným faktorem, který má vliv na kontaktní únavovou životnost texturovaných třecích povrchů je velikost jednotlivých mikro-dentů (zejména jejich hloubka) a hustota, se kterou mikro-denty pokrývají třecí povrch. Naopak nepodstatným faktorem se zdá být uspořádání mikro-dentů v textuře, což dokazuje minimální rozdíl ve výsledcích mezi trojúhelníkovým uspořádáním textury T3 a čtvercovým uspořádáním textury T4 při stejné hustotě. Vzhledem k časově náročnému postupu vytváření textur bylo měření kontaktní únavy provedeno vždy jen jednou pro daný typ textury T1-T4, což nemusí nutně zajistit opakovatelnost výsledků. V případě textury T4 byly realizovány další experimenty zahrnující větší počet měření, které je možné statisticky zpracovat. Počet měření (pět), byl stejný pro obě porovnávané skupiny třecích povrchů, tedy s texturou T4 a bez textury. Základní popisné statistiky obou souborů měření jsou uvedeny v Tab. 1, o rozložení naměřených dat informuje krabicový graf na Obr. 15 a odhady parametrů Weibullova rozdělení uvádí Tab. 2. Ze statistické analýzy vyplývá, že texturovaný povrch vzorku ve srovnání s netexturovaným přispívá k navýšení počtu cyklů do porušení, ovšem rozdíl není statisticky významný. Texturovaný povrch rovněž vykazuje větší variabilitu počtu cyklů do porušení než povrch bez textury (Obr. 15). Nicméně ze statistické analýzy vyplývá, že i přes malý počet provedených měření může texturování prodloužit kontaktní únavový život.

Vytváření textur pomocí jednoho Rockwellova indentoru je velice časově náročné a pro průmyslové aplikace prakticky nepoužitelné. Proto byla k modifikaci topografie třecího povrchu válcového vzorku využita daleko rychlejší metoda a sice balotínování, jejímž cílem je vytvořit na třecím povrchu vhodnou strukturu mělkých mikro-kavit, které by plnily funkci zásobníků maziva. Vliv balotínování na kontaktní únavové porušení třecích povrchů při smíšeném mazání a za částečného skluzu popisuje článek [VI]. Zkoušky kontaktní únavy proběhly na vzorku, jehož jedna

polovina byla broušena s $Ra = 0,08$ a $Sk = -0,15$ (Obr. 3a, 4) a druhá polovina byla po broušení balotínována (Obr. 3b, 5). Po balotínování třecího povrchu válečku skleněnými kuličkami s průměrem 0,07-0,11 mm došlo k významné změně struktury povrchu, tvořené náhodně rozmístěnými výstupky a prohlubněmi a k významnému navýšení drsnosti na $Ra = 0,19$ a současně k mírnému snížení šikmosti na $Sk = -0,2$ (Obr. 5). Rychle dopadající kuličky balotiny mikro-plasticky deformují třecí povrch, čímž dochází k jeho zpevnění do určité hloubky, což může do jisté míry ovlivnit výsledky kontaktních únavových zkoušek. Proto byla provedena měření tvrdosti povrchu pomocí nano a mikro-indentčních metod, která dávají lepší představu o zpevnění povrchu. Grafy na Obr. 9 a Tab. 1 vystihují rozdíl v tvrdostech broušeného a balotínovaného třecího povrchu. Balotínovaný povrch vykazuje vyšší tvrdost povrchu, zejména v oblasti 300-700 nm pod povrchem. Rozdíl v tvrdostech se pak snižuje a při hloubce kolem 1 μm jsou tvrdosti obou povrchů téměř srovnatelné. Experimenty kontaktní únavy proběhly při zatížení třecích povrchů disků a vzorku silou 502,8 N, což odpovídá maximálnímu Hertzovu tlaku 4 GPa a kontaktní oblasti o průměru 490 μm . Velikost poměru skluz-valení byla 0,025. Oba povrchy disků vykazovaly drsnost $Ra = 0,14$ a šikmost $Sk = -0,1$ (Obr. 7). Typické porušení broušeného a balotínovaného třecího povrchu vzorku pittingem zobrazují Obr. 10 a 11. Výsledky měření v podobě počtu cyklů do porušení byly statisticky zpracovány ve formě popisných statistik uvedených v Tab. 2 pomocí metod pro malé soubory naměřených dat (Hornova a Bootstrapova). Jasnější představu o rozložení naměřených dat dává krabicový graf zobrazený na Obr. 12 a odhady statistických parametrů Weibullova rozdělení uvádí Tab. 3 a Obr. 13. Z výsledků vyplývá, že balotínování třecího povrchu vzorku snižuje počet cyklů do porušení v porovnání s broušeným povrchem, přičemž rozdíl je statisticky významný. Broušený povrch má ovšem větší variabilitu počtu cyklů do porušení než balotínovaný povrch. Výsledky experimentů jednoznačně prokázaly, že na snížení únavové životnosti má vliv nárůst drsnosti povrchu po balotínování, kdy v kontaktu dochází k častějšímu styku vrcholků mikro-nerovností, a to i když balotínovaný třecí povrch vykazuje určitou míru zpevnění. Další úpravou balotínovaného povrchu, která spočívala v přešetění třecího povrchu diamantovou brusnou pastou, došlo k odstranění vrcholků mikro-nerovností a tím k mírnému snížení drsnosti povrchu, ale podstatné změně šikmosti Sk z $-0,2$ na $-1,3$ (Obr. 6, 14a). Tímto třecí povrch obsahuje pouze mikro-kavity, které mohou za nepříznivých mazacích podmínek dodávat do kontaktu mazivo (podobně jako v [63] a [73]). Na takto upraveném povrchu byly realizovány čtyři zkoušky kontaktní únavy, které prokázaly podstatné prodloužení únavového života. Při testech totiž nedošlo k porušení třecích povrchů ani při 2×10^8 cyklech (Obr. 14b), kdy byly testy záměrně ukončeny. Uvedený pozitivní přínos modifikace topografie třecích povrchů byl rovněž úspěšně ověřen pomocí experimentů zaměřených na analýzu tloušťky mazacího filmu (kap. 3.1).

3.4 Soubor článků

Soubor článků je řazen podle data vydání od nejstaršího po nejnovější.



- [I] VAVERKA, M.; VRBKA, M.; POLIŠČUK, R.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Numerical evaluation of pressure from experimentally measured film thickness in EHL point contact. *Lubrication Science*. Jan-Mar 2008, vol. 20, no. 1, p. 47-59. (IF2008 NE; IF2010 0,588)



- [II] KŘUPKA, I.; VRBKA, M.; HARTL, M. Effect of surface texturing on mixed lubricated non-conformal contacts. *Tribology International*. Nov 2008, vol. 41, no. 11, p. 1063-1073. (IF2008 1,423; IF2010 1,577)



- [III] KŘUPKA, I.; VRBKA, M.; VAVERKA, M.; POLIŠČUK, R.; HARTL, M. Effect of surface dents on contact pressure in elasto-hydrodynamic contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology*. Apr 2009, vol. 223, no. 4, p. 683-693. (IF2009 0,630; IF2010 0,721)



- [IV] VRBKA, M.; ŠAMÁNEK, O.; ŠPERKA, P.; NÁVRAT, T.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Effect of surface texturing on rolling contact fatigue within mixed lubricated non-conformal rolling/sliding contacts. *Tribology International*. Aug 2010, vol. 43, no. 8, p. 1457-1465. (IF2010 1,557)



- [V] VRBKA, M.; KŘUPKA, I.; ŠAMÁNEK, O.; SVOBODA, P.; VAVERKA, M.; HARTL, M. Effect of surface texturing on lubrication film formation and rolling contact fatigue within mixed lubricated non-conformal contacts. *Meccanica*. Jun 2011, vol. 46, no. 3, p. 491-498. (IF2010 1,056)



- [VI] VRBKA, M.; KŘUPKA, I.; SVOBODA, P.; ŠPERKA, P.; NÁVRAT, T.; HARTL, M.; NOHAVA, J. Effect of shot peening on rolling contact fatigue and lubricant film thickness within mixed lubricated non-conformal rolling/sliding contacts. *Tribology International*. Nov 2011, vol. 44, no. 12, p. 1726-1735. (IF2010 1,557)

ZÁVĚR

Tato práce shrnuje výsledky dosažené při studiu problematiky cílené modifikace topografie nekonformně zakřivených třecích povrchů, které pracují za podmínek EHD nebo smíšeného režimu mazání a současně při čistém valení nebo při částečném skluzu.

V průběhu tohoto studia autor dospěl mimo jiné k následujícím poznatkům:

A) z experimentální analýzy tloušťky mazacího filmu pomocí kolorimetrické interferometrie jednoznačně vyplývá, že za podmínek smíšeného mazání a současně při částečném skluzu má texturování třecích povrchů tvořené mělkými mikro-denty nebo mikro-kavitami největší přínos. Modifikace topografie třecích povrchů se pak uplatňuje zejména při nedostatečném mazání (hladovění) nebo při rozběhu a reverzaci třecích povrchů, kdy mikro-denty plní funkci rezervoárů maziva, které za nepříznivých mazacích podmínek dodávají do kontaktu a tím lokálně navyšují tloušťku mazacího filmu, přičemž redukují styk vrcholků mikro-nerovností stýkajících se třecích povrchů.

B) z jednotlivých výpočtů kontaktního tlaku vyplývá, že za podmínek částečného skluzu, kdy je mazivo emitováno před nebo za mikro-dent a elasticky deformuje třecí povrchy, dochází k výraznému navýšení tlaku, který může následně ovlivnit velikost podpovrchových napětí a tím i kontaktní únavovou životnost třecích povrchů. U větších mikro-dentů, které jsou vytvářeny pomocí Rockwellova indentoru, dochází k nárůstu tlaku v důsledku vytlačeného materiálu na obvodu okraje mikro-dentu. Veškeré provedené výpočty tlaku byly uskutečněny pouze za podmínek, kdy je mikro-dent vyražen do velmi hladkého povrchu kuličky, případ s reálným třecím povrchem však může vykazovat odlišné výsledky. Nicméně pozitivní přínos texturování, který byl prokázán při určitých provozních podmínkách navýšením tloušťky mazacího filmu, je negativně vyvažován výrazným nárůstem kontaktního tlaku v okolí mikro-dentu. Pro výpočet kontaktního tlaku z experimentálně stanovené tloušťky mazacího filmu byla použita inverzní úloha založená na teorii pružnosti a pevnosti, kdy je tlak počítán z inverzní matice poddajnosti a z matice elastických deformací třecích povrchů. Za účelem výrazného zrychlení výpočtu bylo využito konvolučního algoritmu.

C) na základě úvodních experimentů kontaktní únavy bylo prokázáno, že velmi hluboké mikro-denty (20 μm) zapříčiní poškození třecího povrchu v jeho blízkosti, čímž dojde k podstatnému zkrácení kontaktního únavového života. Naopak mikro-denty s relativně malou hloubkou (2-4 μm) nezpůsobují poškození třecího povrchu v blízkosti samotného mikro-dentu, ale poškození vzniká v jiných místech testované stopy vzorku. Dále bylo zjištěno, že obecně přítomnost skluzu mezi třecími povrchy způsobuje snížení únavového života. Z výsledků experimentů, které již byly provedeny s texturou mělkých mikro-dentů s hloubkou 0,6 μm a za podmínek smíšeného mazání a částečného skluzu vyplývá, že podstatným faktorem, který má vliv na kontaktní únavovou životnost je velikost (hloubka) jednotlivých mikro-dentů a hustota, se kterou pokrývají třecí povrch. Vhodně navržená textura, složená z mělkých mikro-dentů tak může významně přispět k prodloužení únavového života třecích povrchů. Uvedené závěry potvrdily i další provedené experimenty s texturou mikro-kavit, která byla vytvořena pomocí balotínování a následného přeleštění povrchu pomocí brusné pasty. Tento způsob modifikace topografie třecího povrchu pak způsobí zahlazení vrcholků mikro-nerovností, což se projeví velmi nízkou hodnotou šikmosti. Tato úprava třecího povrchu je díky své rychlosti vhodná pro průmyslové nasazení, je však zapotřebí odladit technologii vlastního procesu balotínování a následného obrábění (broušení nebo leštění).

SUMMARY

Over the past two decades, scientific studies can be traced that use topography modifications of rubbing surfaces working under severe lubricating conditions; the aim is to reduce their friction and wear to achieve a longer contact fatigue life. On the other hand, there are studies that in turn show a negative influence of surface topography modifications. The present study should therefore contribute to clarification of the above-mentioned issues.

The aim of the present habilitation thesis is to provide a systematic interpretation of results related to experimental and theoretical study of effects of targeted topography modification of non-conformal rubbing surfaces on their rolling contact fatigue failure. The above-described issues are relatively broad and cover mainly the analyses of rolling contact fatigue life supplemented with the analyses of lubricating film thickness and contact pressure.

The submitted habilitation thesis is divided in terms of content into the introduction followed by the chapter summarising an overview of the current state of knowledge in the targeted area of topography modification of non-conformal rubbing surfaces; this is achieved by both experimental and theoretical studies. This chapter is followed by the section containing the commentary on the author's published works including their full versions. This most extensive part of the thesis is devoted to the analysis of the effects of targeted topography modification of non-conformal rubbing surfaces on the three tribological quantities, i.e. lubricating film thickness, contact pressure, and rolling contact fatigue. This part is followed by a conclusion and a list of literature references.

The author's own contribution to the habilitation thesis is represented by six scientific articles published in impact journals within the period of 2008-2011. Full versions of these articles are an integral and essential part of the presented habilitation thesis.

The results of the habilitation thesis showed that an appropriately designed surface texture consisting of shallow micro-dents or micro-cavities could positively influence the development of lubricating film thickness of non-conformal rubbing surfaces working under the conditions of mixed lubrication, and also under rolling-sliding conditions, which brings about the increase in rolling contact fatigue life. This positive effect is mainly attributed to micro-dents that under severe lubricating conditions, e.g. starvation, start-up, and reversal motion, serve as lubricant reservoirs, which released lubricant into the contact and thus separate the rubbing surfaces and minimise the contact between the peaks of rubbing surfaces asperities. This beneficial effect may be however negatively offset by the increase of contact pressure in the vicinity of the individual micro-dents.

SEZNAM LITERATURY

- [1] Jost, H.P. Tribology: How a word was coined 40 years ago. *TRIBOLOGY & LUBRICATION TECHNOLOGY*. 2006, p. 24-29, www.stle.org.
- [2] Sasaki, S. Environmentally friendly tribology (Eco-tribology). *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2010, vol. 24, no. 1, p. 67-71.
- [3] Cardon, M. The Devil and the Surfaces. *The Shot Peener*. 2006, vol. 20, no. 3, www.shotpeener.com.
- [4] Sedlák, M.; Kašparová, P. Biomimetika a biominerály, Jak přírodní materiály inspirují člověka. *Vesmír 82*. 2003, www.vesmir.cz.
- [5] Singh R.A.; Yoon E-S.; Jackson R.L. Biomimetics: The science of imitating nature. *TRIBOLOGY & LUBRICATION TECHNOLOGY*. 2009, p. 40-47, www.stle.org.
- [6] Abbott, S.J.; Gaskell, P.H. Mass production of bio-inspired structured surfaces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2007, vol. 221, no. 10, p. 1181-1191.
- [7] Bechert, D.W.; Bruse, M.; Hage, W.; Meyer, R. Fluid Mechanics of Biological Surfaces and their Technological Application. *Naturwissenschaften*. 2000, vol. 87, p. 157-171
- [8] Alam, F.; Chowdhury, H.; Moria, H.; Brooy, R.L.; Subic, A. A comparative study golf ball aerodynamics. *17th Australasian Fluid Mechanics Conference*. Auckland, New Zealand. 2010.
- [9] Hamrock, B.J. *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. New York, McGraw-Hill, Inc. 1994, p. 2.
- [10] Koszela, W.; Pawlus, P.; Galda, L. The effect of oil pockets size and distribution on wear in lubricated sliding. *Wear*. 2007, vol. 263, p. 1585-1592.
- [11] Galda, L.; Pawlus, P.; Sep, J. Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve. *Tribology International*. 2009, vol. 42, no. 10, p. 1505-1512.
- [12] Etsion, I.; Halperin, G.; Brizmer, V.; Kligerman Y. Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings. *Tribology Letters*. 2004, vol. 17, no. 2, p. 295-300.
- [13] Etsion, I. Improving tribological performance of mechanical components by laser surface texturing. *Tribology Letters*. 2004, vol. 17, no. 4, p. 733-737.
- [14] Etsion, I. State of the Art in Laser Surface Texturing. *Journal of Tribology*. 2005, vol. 127, no. 1, p. 248-253.
- [15] Etsion, I.; Halperin, G. A Laser Surface Textured Hydrostatic Mechanical Seal. *Tribology Transaction*. 2002, vol. 45, no. 3, p. 430-434.
- [16] Yu, X.Q.; He, S.; Cai, R.L. Frictional characteristics of mechanical seals with a laser-textured seal face. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, vol. 129, no. 1-3, p. 463-466.
- [17] Wan, Y.; Xiong, D-S. The effect of laser surface texturing on frictional performance of face seal. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008, vol. 197, no. 1-3, p. 96-100.
- [18] Ronen, A.; Etsion, I.; Kligerman, Y. Friction-Reducing Surface-Texturing in Reciprocating Automotive Components. *Tribology Transactions*. 2001, vol. 44, no. 3, p. 359-366.
- [19] Ryk, G.; Kligerman, Y.; Etsion, I. Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components. *Tribology Transactions*. 2002, vol. 45, no. 4, p. 444-449.
- [20] Ryk, G.; Kligerman, Y.; Etsion, I.; Shinkarenko, A. Experimental Investigation of Partial Laser Surface Texturing for Piston-Ring Friction Reduction. *Tribology Transactions*. 2005, vol. 48, no. 4, p. 583-588.
- [21] Ryk, G.; Etsion, I. Testing piston rings with partial laser surface texturing for friction reduction. *Wear*. 2006, vol. 261, no. 7-8, p. 792-796.
- [22] Etsion, I.; Sher, E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings. *Tribology International*. 2009, vol. 42, no. 4, p. 542-547.
- [23] Vilhena, L.M.; Sedláček, M.; Podgornik, B.; Vižintin, J.; Babnik, A.; Možina, J. Surface texturing by pulsed Nd:YAG laser. *Tribology International*. 2009, vol. 42, no. 10, p. 1496-1504.

- [24] Kovalchenko, A.; Ajayi, O.; Erdemir, A.; Fenske, G.; Etsion, I. The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact. *Tribology International*. 2005, vol. 38, no. 3, p. 219-225.
- [25] Andersson, P.; Koskinen, J.; Varjus, S.; Gerbig, Y.; Haefke, H.; Georgiou, S.; Zhmud, B.; Buss, W. Microlubrication effect by laser-textured steel surfaces. *Wear*. 2007, vol. 262, no. 3-4, p. 369-379.
- [26] Costa, H.L.; Hutchings, I.M. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribology International*. 2007, vol. 40, no. 8, p. 1227-1238.
- [27] Petterson, U.; Jacobson, S. Textured surfaces for improved lubrication at high pressure and low sliding speed of roller/piston in hydraulic motors. *Tribology International*. 2007, vol. 40, no. 2, p. 355-359.
- [28] Petterson, U.; Jacobson, S. Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique. *Tribology International*. 2006, vol. 39, no. 7, p. 695-700.
- [29] Borghi, A.; Gualtieri, E.; Marchetto, D.; Moretti, L.; Valeri, S. Tribological effects of surface texturing on nitriding steel for high-performance engine applications. *Wear*. 2008, vol. 265, no. 7-8, p. 1046-1051.
- [30] Costa, H.L.; Hutchings, I.M. Effects of die surface patterning on lubrication in strip drawing. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009, vol. 209, no. 3, p. 1175-1180.
- [31] Olver, A.V. The mechanism of rolling contact fatigue: an update. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2005, vol. 219, no. 5, p. 313-330.
- [32] Sadeghi, F.; Jalalahmadi, B.; Slack, T.S.; Raje, N.; Arakere, N.K. A Review of Rolling Contact Fatigue. *Journal of Tribology*. 2009, vol. 131, no. 4, p. 1-15.
- [33] Ai, X. Effect of debris contamination on the fatigue life of roller bearings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2001, vol. 215, no. 6, p. 563-575.
- [34] Cusano, C.; Wedeven, L.D. The effects of artificially-produced defects on the film thickness distribution in sliding EHD point contacts. *Journal of Lubrication Technology, Transactions of the ASME*. 1982, vol. 104, p. 365-375.
- [35] Wedeven, L.D.; Cusano, C. Elastohydrodynamic film thickness measurements of artificially produced surface dents and grooves. *ASLE Transactions*. 1979, vol. 22, no.4, 369-381.
- [36] Cusano, C.; Wedeven, L.D. Elastohydrodynamic film thickness measurements of artificially produced nonsmooth surfaces. *ASLE Transactions*. 1981, vol. 24, no. 1, p. 1-14.
- [37] Wedeven, L.D. Influence of debris dent on EHD lubrication. *ASLE Transactions*. 1977, vol. 21, no. 1, p. 41-52.
- [38] Hamer, J.C.; Sayles, R.S.; Ioannides, E. Deformation mechanisms and stresses created by third body debris contacts and their effects on rolling bearing fatigue. *Tribology Series*. 1987, vol. 12, p. 201-208.
- [39] Hamer, J.C.; Sayles, R.S.; Ioannides, E. Particle deformation and counter-face damage when relatively soft particles are squashed between hard anvils. *Tribology Transactions*. 1989, vol. 32, p. 281-288.
- [40] Kaneta, M.; Nishikawa, H. Experimental study on microelastohydrodynamic lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 1999, vol. 213, no. 5, p. 371-381.
- [41] Kaneta, M.; Kanada, T.; Nishikawa, H. Optical interferometric observations of the effects of a moving dent on point contact EHL. *Tribology Series*. 1997, vol. 32, p. 69-79.
- [42] Ai, X.; Lee, S.C. Effect of slide-to-roll ratio on interior stresses around a dent in EHL contacts. *Tribology Transactions*. 1996, vol. 39, no. 4, p. 881-889.
- [43] Ville, F.; Nélias, D. An experimental study on the concentration and shape of dents caused by spherical metallic particles in EHL contacts. *Tribology Transactions*. 1999, vol. 42, no. 1, p. 231-240.

- [44] Ville, F.; Nélias, D. Early fatigue failure due to dents in EHL contacts. *Tribology Transactions*. 1999, vol. 42, no. 4, p. 795-800.
- [45] Nélias, D.; Ville, F. Detrimental effects of debris dents on rolling contact fatigue. *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*. 2000, vol. 122, p. 55-64.
- [46] Ai, X.; Cheng, H.S. The Influence of Moving Dent on Point EHL Contacts. *Tribology Transactions*. 1994, vol. 37, no. 2, p. 323-335.
- [47] Cheng, W.; Cheng, H.S.; Keer, L.M. Experimental Investigation on Rolling/Sliding Contact Fatigue Crack Initiation with Artificial Defects. *Tribology Transactions*. 1994, vol. 37, no. 1, p. 1-12.
- [48] Xu, G.; Sadeghi, F.; Hoepflich, M.R. Dent Initiated Spall Formation in EHL Rolling/Sliding Contact. *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*. 1998, vol. 120, no. 3, p. 453-462.
- [49] Ai, X.; Nixon, H.P. Fatigue Life Reduction of Roller Bearings Due to Debris Denting: Part I – Theoretical Modeling. *Tribology Transactions*. 2000, vol. 43, no. 2, p. 197-204.
- [50] Ai, X.; Nixon, H.P. Fatigue Life Reduction of Roller Bearings Due to Debris Denting: Part II – Experimental Validation. *Tribology Transactions*. 2000, vol. 43, no. 2, p. 311-317.
- [51] Gao, N.; Dwyer-Joyce, R.S.; Beynon, J.H. Effects of surface defects on rolling contact fatigue of 60/40 brass. *Wear*. 1999, vol. 225-229, p. 983-994.
- [52] Dommarco, R.C.; Bastias, P.C.; Hahn, G.T.; Rubin, C.A. The use of artificial defects in the 5-ball-rod rolling contact fatigue experiments. *Wear*. 2002, vol. 252, p. 430-437.
- [53] Coulon, S.; Jubault, I.; Lubrecht, A.A.; Ville, F.; Vergne, P. Pressure profiles measured within lubricated contacts in presence of dented surfaces. Comparison with numerical models. *Tribology International*. 2004, vol. 37, no. 2, p. 111-117.
- [54] Kang, Y.S.; Sadeghi, F.; Hoepflich, M.R. A Finite Element Model for Spherical Debris Denting in Heavily Loaded Contacts. *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*. 2004, vol. 126, no. 1, p. 71-80.
- [55] Nélias, D.; Jacq, C.; Lormand, G.; Dudragne G.; Vincent, A. New Methodology to Evaluate the Rolling Contact Fatigue Performance of Bearing Steels with Surface Dents: Application to 32CrMoV13 Nitrided and M50 Steels. *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*. 2005, vol. 127, no. 3, p. 611-622.
- [56] Ville, F.; Coulon, S.; Lubrecht, A.A. Influence of solid contaminants on the fatigue life of lubricated machine elements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2006, vol. 220, no. 5, p. 441-445.
- [57] Nikas, G.K. A mechanistic model of spherical particle entrapment in elliptical contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2006, vol. 220, no. 6, p. 507-522.
- [58] Querlioz, E.; Ville, F.; Lenon, H.; Lubrecht, T. Experimental investigations on the contact fatigue life under starved conditions. *Tribology International*. 2007, vol. 40, no. 10-12, p. 1619-1626.
- [59] da Mota, V.M.M.B.; Moreira, P.M.G.P.; Ferreira, L.A.A. A study on the effects of dented surfaces on rolling contact fatigue. *International Journal of Fatigue*. 2008, vol. 30, no. 10-11, p. 1997-2008.
- [60] Ueda, T.; Mitamura, N. Mechanism of dent initiated flaking and bearing life enhancement technology under contaminated lubrication condition: Part I: Effect of tangential force on dent initiated flaking. *Tribology International*. 2008, vol. 41, no. 11, p. 965-974.
- [61] Ueda, T.; Mitamura, N. Mechanism of dent initiated flaking and bearing life enhancement technology under contaminated lubrication condition. Part II: Effect of rolling element surface roughness on flaking resulting from dents, and life enhancement technology of rolling bearings under contaminated lubrication condition. *Tribology International*. 2009, vol. 42, no. 11-12, p. 1832-1837.
- [62] Morales-Espejel, G.E.; Gabelli, A. The Behaviour of Indentation Marks in Rolling - Sliding Elastohydrodynamically Lubricated Contacts. *Tribology Transactions*. 2011, DOI:10.1080/10402004.2011.582571.

- [63] Akamatsu, Y.; Tsushima, N.; Goto, T.; Hibi, K. Influence of Surface Roughness Skewness on Rolling Contact Fatigue Life. *Tribology Transactions*. 1992, vol. 35, no. 4, p. 745-750.
- [64] Zhai, X.; Chang, L.; Hoeprich, M.R.; Nixon, H.P. On Mechanisms of Fatigue Life Enhancement by Surface Dents in Heavily Loaded Rolling Line Contacts. *Tribology Transactions*. 1997, vol. 40, no. 4, p. 708-714.
- [65] Nakatsuji, T.; Mori, A. The Tribological Effect of Electrolytically Produced Micro-pools and Phosphoric Compounds on Medium Carbon Steel Surfaces in Rolling - Sliding Contact. *Tribology Transactions*. 2001, vol. 44, no. 2, p. 173-178.
- [66] Nakatsuji, T.; Mori, A. The Tribological Effect of Mechanically Produced Micro-dents by a Micro Diamond Pyramid on Medium Carbon Steel Surfaces in Rolling-sliding Contact. *Meccanica*. 2001, vol. 36, no. 6, p. 663-674.
- [67] Pyoun, Y.S.; Cho, I.H.; Kim, Ch.S.; Park, J.H.; Lee, Ch-S.; Park, I.G.; Cho, I.S.; Park, J. Tribological and RCF (rolling contact fatigue) effects of UNSM (ultrasonic nano crystal surface modification) treatment on the bearings. *Proceedings of the iCAT2008: second international conference on advanced tribology*. 2008, p. 183-185.
- [68] Pyoun, Y.S.; Park, J.H.; Kim, Ch.S.; Cho, I.H. Method of making bearing using ultrasonic nano crystal surface modification technology. *Patent Application Publication*. 2010, US2010/0024218A1.
- [69] www.designmecha.co.kr
- [70] Greco, A.; Martini, A.; Liu, Y.; Lin, Ch.; Wang, Q.J. Rolling Contact Fatigue Performance of Vibro-Mechanical Textured Surfaces. *Tribology Transactions*. 2010, vol. 53, no. 4, p. 610-620.
- [71] Greco, A.; Raphaelson, S.; Ehmann, K.; Wang, Q.J.; Lin, Ch. Surface Texturing of Tribological Interfaces Using the Vibromechanical Texturing Method. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*. 2009, vol. 131, no. 6, p. 1-8.
- [72] www.shotpeener.com
- [73] SKF Engineering & Research Centre B.V. Rolling element bearing with improved rolling contact surfaces. *Patent Cooperation Treaty*. 1999, WO/1999/013235.
- [74] Townsend, D.P.; Zaretsky, E.V. Effect of shot peening on surface fatigue life of carburized and hardened AISI 9310 spur gears. NASA Technical Paper 2047, 1982.
- [75] Widmark, M.; Melander, A. Effect of material, heat treatment, grinding and shot peening on contact fatigue life of carburised steels. *International Journal of Fatigue*. 1999, vol. 21, no. 4, p. 309-327.
- [76] Ohba, H.; Matsuyama, S.; Yamamoto, T. Effect of Shot Peening Treatment on Rolling Contact Fatigue Properties of Austempered Ductile Iron. *Tribology Transactions*. 2002, vol. 45, no. 4, p. 576-582.
- [77] Dimitrov, L.; Michalopoulos, D.; Apostolopoulos, Ch.Alk.; Neshkov T.D. Investigation of Contact Fatigue of High Strength Steel Gears Subjected to Surface Treatment. *Journal of materials engineering and performance*. 2009, vol. 18, no. 7, p. 939-946.
- [78] Gangopadhyay, A.; McWatt, D.G. The Effect of Novel Surface Textures on Tappet Shims on Valvetrain Friction and Wear. *Tribology Transactions*. 2008, vol. 51, no. 2, p. 221-230.
- [79] Wakuda, M.; Yamauchi, Y.; Kanzaki, S.; Yasuda, Y. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact. *Wear*. 2003, vol. 254, no. 3-4, p. 356-363.
- [80] Dumont, M.-L.; Lugt, P.M.; Tripp, J.H. Surface Feature Effects in Starved Circular EHL Contacts. *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*. 2002, vol. 124, no. 2, p. 358-366.
- [81] Zhao, J.; Sadeghi, F. The Effects of a Stationary Surface Pocket on EHL Line Contact Start-Up. *Journal of Tribology, Transactions of the ASME*. 2004, vol. 126, no. 4, p. 672-680.
- [82] Mourier, L.; Mazuyer, D.; Lubrecht, A.A.; Donnet, C. Transient increase of film thickness in micro-textured EHL contacts. *Tribology International*. 2006, vol. 39, no. 12, p. 1745-1756.

- [83] Mourier, L.; Mazuyer, D.; Ninove, F.-P.; Lubrecht, A.A. Lubrication mechanisms with laser-surface-textured surfaces in elastohydrodynamic regime. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2010, vol. 224, no. 8, p. 697-711.
- [84] Křupka, I.; Hartl, M.; Svoboda, P. Effects of surface topography on lubrication film formation within elastohydrodynamic and mixed lubricated non-conformal contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2010, vol. 224, no. 8, p. 713-722.
- [85] Křupka, I.; Vrbka, M.; Vaverka, M.; Poliščuk, R.; Hartl, M. Effect of surface dents on contact pressure in elastohydrodynamic contacts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2009, vol. 223, no. 4, p. 683-693.
- [86] Křupka, I.; Hartl, M. The effect of surface texturing on thin EHD lubrication films. *Tribology International*. 2007, vol. 40, no. 7, p. 1100-1110.
- [87] Křupka, I.; Poliščuk, R.; Hartl, M. Behavior of thin viscous boundary films in lubricated contacts between micro-textured surfaces. *Tribology International*. 2009, vol. 42, no. 4, p. 535-541.
- [88] Křupka, I.; Hartl, M. Effect of Surface Texturing on Very Thin Film EHD Lubricated Contacts. *Tribology Transactions*. 2009, vol. 52, no. 1, p. 21-28.
- [89] Křupka, I.; Vrbka, M.; Hartl, M. Effect of surface texturing on mixed lubricated non-conformal contacts. *Tribology International*. 2008, vol. 41, no. 11, p. 1063-1073.
- [90] Křupka, I.; Svoboda, P.; Hartl, M. Effect of surface topography on mixed lubrication film formation during start up under rolling/sliding conditions. *Tribology International*. 2010, vol. 43, no. 5-6, p. 1035-1042.
- [91] Křupka, I.; Hartl, M.; Zimmerman, M.; Houška, P.; Jang, S. Effect of surface texturing on elastohydrodynamically lubricated contact under transient speed conditions. *Tribology International*. 2011, vol. 44, no. 10, p. 1144-1150.
- [92] Nanbu, T.; Ren, N.; Yasuda, Y.; Zhu, D.; Wang, Q.J. Micro-Textures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion. *Tribology Letters*. 2008, vol. 29, no. 3, p. 241-252.
- [93] Zhu, D.; Nanbu, T.; Ren, N.; Yasuda, Y.; Wang, Q.J. Model-based virtual surface texturing for concentrated conformal-contact lubrication. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2010, vol. 224, no. 8, p. 685-696.
- [94] Gao, L.; Yang, P.; Dymond, I.; Fisher, J.; Jin, Z. Effect of surface texturing on the elastohydrodynamic lubrication analysis of metal-on-metal hip implants. *Tribology International*. 2010, vol. 43, no. 10, p. 1851-1860.
- [95] Hartl, M.; Křupka, I.; Poliščuk, R.; Liška, M. An Automatic System for Real-Time Evaluation of EHD Film Thickness and Shape Based on the Colorimetric Interferometry. *Tribology Transactions*. 1999, vol. 42, no. 2, p. 303-309.
- [96] Hartl, M.; Křupka, I.; Poliščuk, R.; Liška, M.; Molimard, J.; Query, M.; Vergne, P. Thin Film Colorimetric Interferometry. *Tribology Transactions*. 2001, vol. 44, no. 2, p. 270-276.
- [97] Křupka, I.; Hartl, M.; Urbanec, L.; Čermák, J. Single dent within elastohydrodynamic contact - comparison between experimental and numerical results. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2007, vol. 221, no. 6, p. 635-644.
- [98] Kolář, D. Vliv maziva na trvanlivost valivých ložisek. *Habilitační práce*. 1980, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 107 s.