

Vysoké učení technické v Brně

Brno University of Technology

Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování / Odbor metodiky konstruování

Faculty of Mechanical Engineering

Institute of Machine and Industrial Design / Department of Design Theory

Snížení tření a opotřebení strojních částí cílenou modifikací třecích povrchů

[Dizertační práce]

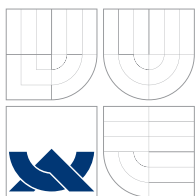
[Doctoral Thesis]

Autor práce: **Ing. Otakar Šamánek**

Author

Brno 2011





Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování / Odbor metodiky konstruování

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

Snížení tření a opotřebení strojních částí cílenou modifikací třecích povrchů

[Dizertační práce]

[Doctoral Thesis]

Autor práce: **Ing. Otakar Šamánek**
Author

Vedoucí práce: **prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.**
Supervisor

PODĚKOVÁNÍ

Poděkování patří především Prof. Ing. Ivanu Křupkovi, Ph.D., vedoucímu disertační práce, za odborné vedení a všestrannou pomoc při řešení daného tématu. Dále děkuji Ing. Martinu Vrbkovi za cenné rady a pomoc při řešení práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci vypracoval samostatně na základě uvedené literatury a za podpory školitele Prof. Ing. Ivana Křupky, Ph.D.

V Brně dne: 31. 8. 2011

Otakar Šamánek

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠAMÁNEK, O. *Snížení tření a opotřebení strojních částí cílenou modifikací topografie třecích povrchů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 75s. Vedoucí disertační práce Prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.

ABSTRAKT

Disertační práce se zaměřuje na popis vlivu přítomnosti struktur na třecích površích u velmi zatěžovaných strojních součástí (valivých ložisek, ozubených soukolí, vaček apod.) za podmínek smíšeného mazání. Úzce se zabývá vlivem těchto struktur na kontaktní únavovou životnost třecích povrchů strojních součástí. Popisuje vliv geometrie jednotlivých vtisků i textur na chování povrchu v kontaktu a snaží se verifikovat riziko míry poškození kontaktní únavou v závislosti na povrchové textuře. Realizace textur na třecích površích součástí byla uskutečněna pomocí cílené modifikace topografie. Tento způsob představuje předem stanovené vytváření soustav mikrovtsků na třecím povrchu. Práce také zahrnuje charakterizaci metodiky přípravy zkušebních vzorků a texturovacího procesu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Cílená modifikace topografie, smíšené mazání, RCF, kontaktní únavová životnost

ABSTRACT

This thesis describes a study of the influence of surface texturing on rolling contact fatigue of non-conformal contacts. The texture depth and density have been considered during experiments. It also describes the methodology and the procedure of creation of micro-dents on sample surfaces. Described results suggested that properly designed surface texturing should not necessarily increase the risk of fatigue failure of rubbing surfaces.

KEY WORDS

Surface texturing, mixed lubrication, RCF, contact fatigue life

OBSAH

PODĚKOVÁNÍ.....	4
PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE.....	5
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE.....	6
ABSTRAKT	7
KLÍČOVÁ SLOVA	7
ABSTRACT	8
KEY WORDS	8
 1 ÚVOD	 11
1.1 Formulace řešeného problému a jeho analýza.....	11
 2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY A PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....	 12
2.1 Přirozená modifikace topografie	12
2.2 Cílená modifikace topografie	18
2.2.1 Kontakt konformně zakřivených těles.....	21
2.2.2 Kontakt nekonformně zakřivených těles	25
 3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ.....	 34
 4 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	 35
4.1 Dílčí cíle disertační práce	35
 5 EXPERIMENTÁLNÍ APARATURA.....	 36
5.1 Realizace cílené modifikace topografie třecích povrchů.....	36
5.1.1 Geometrie struktur	39
5.2 Testy kontaktní únavy	42
5.2.1 Příprava vzorku pro experiment	43
5.2.2 Experimentální zařízení R-Mat	43
5.2.3 Monitorování průběhu experimentu	44
5.3 Metodický postup experimentální metody	45
5.4 Numerický model	46
5.4.1 Geometrie vtisků	46
5.4.2 Kontaktní zatížení.....	47
 6 VÝSLEDKY VSTUPNÍCH EXPERIMENTŮ	 49
6.1 Testy s jednotlivými vtisky v kontaktní stopě.....	49
6.2 Testy s texturami v kontaktní stopě.....	52
 7 VLIV CÍLENÉ MODIFIKACE TOPOGRAFIE TŘECÍCH POVRCHŮ NA PROJEVY POŠKOZENÍ KONTAKTNÍ ÚNAVOU	 54
7.1 Vyhodnocení experimentů.....	54
7.2 Vliv hustoty textury na RCF – mělké vtisky	55
7.3 Vliv hloubky textury na RCF – hluboké vtisky.....	57
7.4 Vliv geometrie textury na RCF – textury T1 až T4.....	59

8 ANALÝZA POZNATKŮ A JEJICH PŘÍNOS PRO PRAXI A ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU	63
9 ZÁVĚR	64
SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	65
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	67
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	68
PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE	73

1 ÚVOD

1

Studium tribologických procesů pokrývá rozsáhlou oblast jevů, se kterými je možné se setkat v reálných strojních soustavách. Jedním tímto jevem je i poškozování strojních součástí v důsledku přítomnosti nerovností na třecích površích v kontaktu. Toto poškozování je jedním z nejvýznamnějších mechanismů poškození při provozu elastohydrodynamicky (EHD) mazaných kontaktů strojních součástí. V důsledku opakovaného cyklického zatížení třecích povrchů může docházet k jejich styku a následnému zvýšení tření a opotřebení, nebo k iniciování a propagaci únavového poškození (RCF). Vznik tohoto poškození může být významně urychlen přítomností nerovností (například vtisků) na třecích površích. Topografie třecích povrchů má tedy významný a nezanedbatelný vliv na jejich životnost a funkci. Dalším významným jevem je kontakt strojních prvků za nestacionárních provozních podmínek (např. rozběh, doběh, reversace pohybu). I zde může topografie třecího povrchu představovat významný člen a svou funkcí ovlivnit celý tribologický proces. Přítomnost mikrovťisku na povrchu zatíženého kontaktu může napomáhat k přívodu maziva do kontaktu tím posunout mazací režim, tedy zlepšit mazání kontaktu. Zároveň ale s přítomností jakékoli nerovnosti v kontaktu dochází k lokálnímu nárůstu tlaku a povrchová textura tedy může působit jako potencionální koncentrátor napětí. Potom snižuje kontaktní únavovou životnost součástí a urychluje její vyřazení z provozu.

Tato disertační práce se zaměřuje na experimentální studium vlivu přítomnosti struktur na třecích površích u velmi zatěžovaných strojních součástí (valivých ložisek, ozubených soukolí, vaček apod.) za podmínek smíšeného mazání. Úzce se zabývá vlivem těchto struktur na kontaktní únavovou životnost třecích povrchů strojních součástí. Popisuje vliv geometrie jednotlivých vtisků i textur na chování povrchu v kontaktu a snaží se verifikovat riziko míry poškození kontaktní únavou v závislosti na povrchové textuře. Realizace textur na třecích površích součástí byla uskutečněna pomocí cílené modifikace topografie. Tento způsob představuje předem stanovené vytváření soustav mikrovťisků na třecím povrchu. Práce také zahrnuje charakterizaci metodiky přípravy zkušebních vzorků a texturovacího procesu.

1.1 Formulace řešeného problému a jeho analýza

1.1

Jakákoli přítomnost povrchové nerovnosti (uměle vytvořená nebo přirozená) má vliv na rozložení tlaku v kontaktní oblasti a může působit jako koncentrátor napětí. Práce proto posuzuje uměle vytvořené vtisky na třecích površích jako potencionální koncentrátoři napětí a jejich vliv na tvorbu únavového poškození.

Řešený problém lze tedy formulovat takto: Může vhodně navržená povrchová textura (modifikace topografie) vést ke snížení tření a opotřebení strojních součástí, tedy k prodloužení jejich kontaktní únavové životnosti?

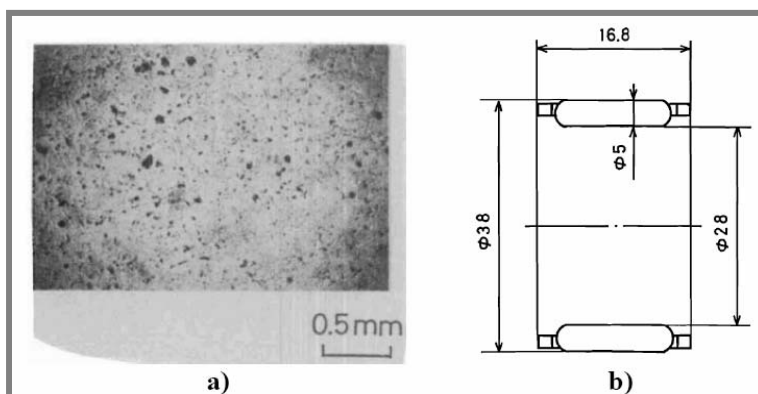
2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY A PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Studium modifikace topografie třecích povrchů je orientováno na dva základní směry. Prvním je tzv. přirozená modifikace topografie, vzniklá v důsledku dokončovacích operací na třecích površích, nebo kontaminací maziva [1]. Takovouto povrchovou strukturu je však obtížné předem definovat a kontrolovat. Druhým směrem je pak cílená modifikace topografie. Ta představuje tvorbu požadované struktury na třecích površích s cílem zlepšení jejich tribologických vlastností, tj. snížení tření a opotřebení.

2.1 Přirozená modifikace topografie

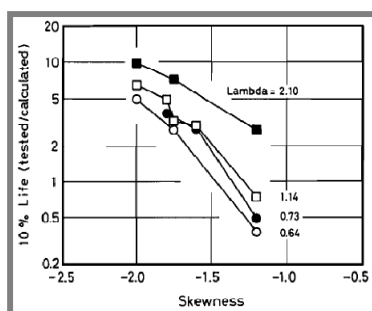
Tento druh modifikace topografie vzniká na třecím povrchu součásti samovolně. Mechanismem vzniku můžou být povrchové dokončovací operace nebo například kontaminace maziva nečistotami (prach, tuhé částice apod.). Tyto nečistoty jsou do maziva dodávány z externího zdroje nebo přímo ze záběhu, popřípadě opotřebení součásti během provozu. Velikost částic je přibližně $50\mu\text{m}$, přičemž tloušťka mazacího filmu v kontaktu je méně než $1\mu\text{m}$. Pokud se tedy tyto nečistoty dostanou do kontaktu a prochází skrz, tvoří přirozeně modifikovaný povrch. Vědecké práce, zabývající se touto tematikou, zohledňují vliv takto modifikovaného povrchu na chování mazacího filmu v kontaktu, na vlastnosti mazání, ale také na projevy a mechanismy poškození vyvolané změnou topografie třecích povrchů v kontaktu. Za podmínek hydrodynamického mazání se iniciací povrchového poškození vlivem přirozeně modifikovaného povrchu zabývala řada numerických i experimentálních studií [2-15]. Jednou z úvodních studií v této oblasti byla práce Waye [2], který konstatoval, že prosakování maziva do iniciované trhliny má za následek její další propagaci a následné poškození součásti. Řada experimentálních prací hodnotila kontaktní únavovou životnost ložisek, za podmínek kontaminovaného maziva při různých úrovních filtrace maziva. Mezi tyto práce se řadí jedná z prvních takovýchto studií Talliana [3,4], který zpracoval teoretický i experimentální přístup. Na jeho práci navázali i Chao et. al. a Averbach et. al. [5,6]. Hlavním závěrem je zde fakt, že filtrace maziva má velmi významný vliv na životnost zkoušených ložisek.

Zásadní prací v oblasti studia přirozené modifikace a jejího vlivu na chování mazacího filmu byla publikace Akamatsu et. al. [7], která hodnotí vliv nahodile rozmístěných malých vtisků na vlastnosti mazání. Za vzorek bylo použito jehlové ložisko (Obr.1b), jehož prvky (jehly a kroužky) byly opatřeny malými vtisky. Výsledná drsnost povrchu byla charakterizována použitím parametru nesouměrnosti Sk (skewness). Parametr nesouměrnosti Sk je třetí moment funkce hustoty pravděpodobnosti (PDF) povrchových nerovností. Jeho hodnota se během experimentů pohybovala od -1.2 do -2.0 za podmínek smíšeného mazání. Příklad takto modifikovaného povrchu reprezentuje obr. 1a. Rozložení mikrovtků bylo přibližně stejné na všech testovaných vzorcích, 10 vtisků/mm. Přičemž, měnila se jejich hloubka a šířka. Maximální hodnota hloubky vtisku byla $2\mu\text{m}$ a šířky $75\mu\text{m}$.



Obr. 1 a) Texturovaný povrch, b) Schéma testovaného ložiska [7]

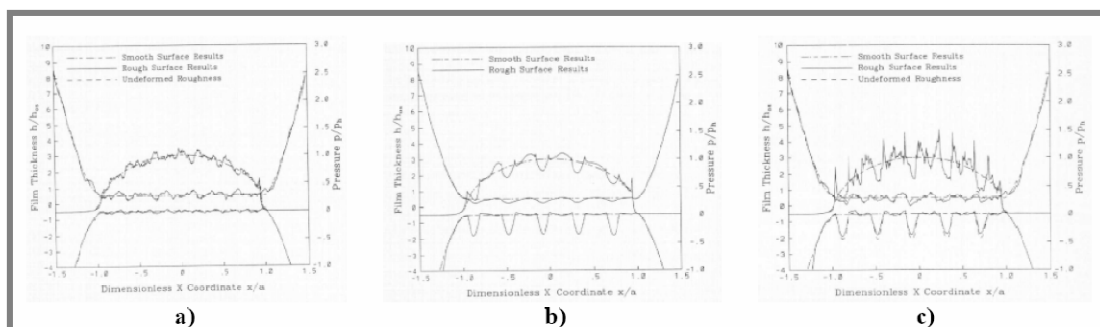
Experimenty byly prováděny za podmínek smíšeného a mezného mazání s parametrem mazání od 0,64 do 2,10. Výsledný vztah mezi parametrem nesouměrnosti (skewness) a 10% životností ukazuje obr. 2. Životnost klesá s klesající hodnotou parametru mazání Λ . Akamatsu uvádí, že při stejných provozních podmínkách lze životnost prodloužit snížením hodnoty parametru nesouměrnosti ložiska.



Obr. 2 Vztah mezi parametrem nesouměrnosti a životností [7]

Povrchové defekty ale značně ovlivňují tlakové rozložení v okolí nerovnosti. To vyvolává otázku, zda by nebylo vhodné zohlednit, zda na zvýšení životnosti nemá vliv jiná příčina. Například zda nerovnosti nejsou příliš daleko od sebe, tzn. napětí nepřesáhne hodnoty parametrů nesouměrnosti. Dále by bylo vhodné vzít v úvahu parametr nesouměrnosti z rozmezí 1,0 až 1,5. Autor sám uvádí, že analytickou studií tlakových špiček se nezabýval.

Tento přístup však oponoval ve své práci Zhai [8], který se snažil detailněji popsat proces porušení třecího povrchu v důsledku modifikace topografie a popsat mechanismy zlepšení únavového života pomocí povrchových vtisků za podmínek blížících se čistému valení. Prezentoval analýzu *transientní micro-EHL* vysoce zatížených kontaktů drsných povrchů s vtisky. Výsledky naopak neukazují žádný výrazný vliv micro-EHL na zlepšení únavového života. Použité parametry pro micro-EHL analýzu odpovídají únavovým testům, které použili Akamatsu et al. Analýza byla zaměřena na vnitřní dráhu kontaktu ložiska.



Obr. 3 Micro-EHL efekt vtisků: a) povrch bez vtisků, b) hladký povrch s vtisky c) drsný povrch s vtisky [8]

Obrázek 3 reprezentuje numerické výsledky tloušťky mazacího filmu a rozložení tlaku v kontaktní oblasti pro kontakt povrchů bez vtisků, kontakt hladkých povrchů s vtisky a kontakt reálných (drsňých) povrchů s vtisky. Povrchy na obr. 3b a obr.3c byly opatřeny pěti vtisky o průměru $0,15a$ (poloosa hertzova kontaktu) a hloubce $1,5h_c$ (tloušťka centrálního filmu). Výsledky nepoukázaly na výrazné příznivé micro-EHL efekty v důsledku modifikace povrchů vtisky. Celková tloušťka mazacího filmu v kontaktu, klesla v případech s vtisky přibližně o 10% oproti výsledkům hladkého povrchu. Tlakové špičky vyskytující se v přítomnosti vtisků spolu se snížením tloušťky mazacího filmu poukazují na zhoršení provozních podmínek ložiska v micro-EHL režimu. Tlakové špičky způsobují koncentraci napětí v okolí vtisku, která pak vede k povrchovému defektu. Prezentované výsledky, které poukazují na nepříznivý vliv vtisků na únavový život liniového kontaktu, jsou opačné k experimentálním zjištěním Akamtsu et al. Zhai tento nesoulad vysvětluje zahrnutím podmínek mazání do únavových zkoušek a numerických analýz. Zároveň předkládá hypotézu vtisků jako *zásobníků maziva*. V nedostatečně mazaných kontaktech mohou vtisky fungovat jako zásobníky maziva a mohou tak přispívat dodáním maziva do kontaktní oblasti a zabránit hladovění. Experimenty ukázaly, že texturované válečky s parametrem sk -1,2 nezvyšují únavovou životnost ložiska. Podstatný nárůst je zaznamenán až u válečků s parametrem sk -1,75 a -2,0. Sk nabude hodnoty -1,2 při průměrné hloubce vtisku $0,11\mu m$, takovýto vtisk je však příliš malý na splnění funkce zásobníku maziva. Proto při těchto podmínkách nedochází ke zvýšení únavové životnosti.

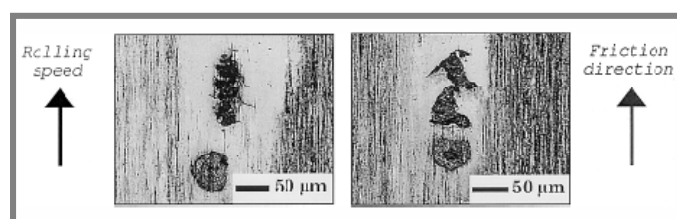
Závěry, vyplývající z této studie lze interpretovat následovně:

- vliv vtisků na únavovou životnost valivého kontaktu závisí na podmínkách mazání, ve kterých kontakt pracuje. Příznivý je v nedostatečně mazaných kontaktech a nepříznivý v plně zaplavených kontaktech.
- zvýšení únavové životnosti pomocí vtisků je možné za předpokladu funkce vtisků jako *zásobníků maziva*. Tyto je však možné použít pouze za podmínek nedostatečného mazání.

Vliv přirozené modifikace topografie na *kontaktní únavovou životnost* popsali i Nélías a Ville, kteří se zaměřili na popis nepříznivých vlivů vtisků na tlak a podpovrchové napětí v EHD liniovém kontaktu v závislosti na tvaru vtisku a na provozních podmínkách [9-12]. V experimentu se zaměřili na nalezení mechanismu deformace nebo fragmentace částice, výsledných vlastností vtisků a počátku povrchového poškození. Ke kontaminaci maziva použili různé typy keramických

částic (B_4C , SiC). Dále pak předkládají souhrn experimentů zaměřených na studii časných únavových poruch v důsledku průchodu mikronerovnosti EHD kontaktem včetně jejich ověření numerickou simulací. Výsledky z těchto simulací poté diskutovali ve vztahu ke konceptu životnosti u valivých ložisek.

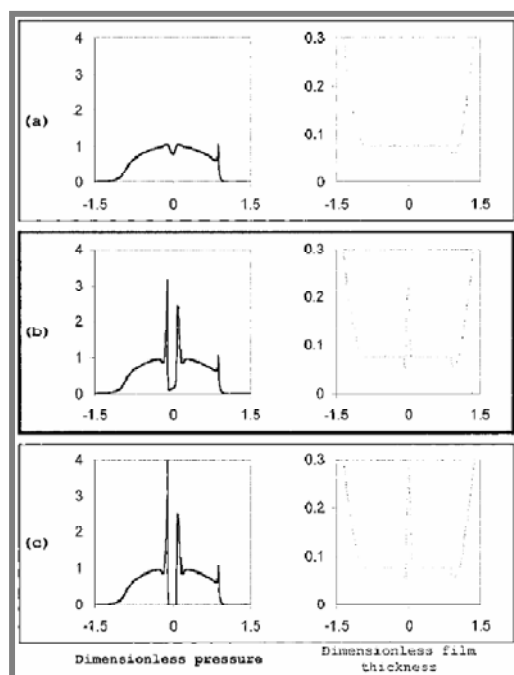
Únavové zkoušky byly provedeny na dvoudiskovém zkušebním stroji s prokluzem třecích povrchů 1.5%, kontaktním tlakem 3GPa a rychlostí 40m/s. Disky byly vyrobeny z oceli AISI 52100 a k mazání bylo použito maziva MIL-L-23699, při teplotě 80°C. Testy prokázaly, že mikrovtrisky iniciované poškození třecích povrchů kontaktní únavou (microspall) se vyskytuje ve směru odvalování vzorku (skluz/tření) (Obr. 4).



Obr. 4 Poškození mikrospallem [9]

Model pro Suchý, Stacionární EHD a Přechodný (částečný) EHD problém:

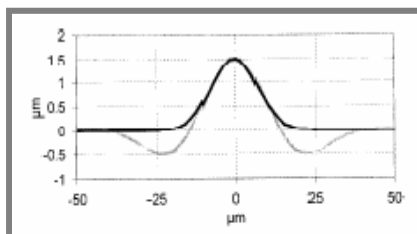
Povrchový defekt má vliv na rozložení tlaku v kontaktu a na tloušťku mazacího filmu tehdy, je – li jeho hloubka (velikost) větší než amplituda drsnosti povrchu. Vtrisky malých rozměrů jsou plně absorbovány elastickou deformací třecích povrchů a díky tomu je tloušťka mazacího filmu stejná jako v případě styku dvou hladkých povrchů (Obr. 5a). Vtrisky větších rozměrů jsou absorbovány pouze částečně (Obr. 5b,c).



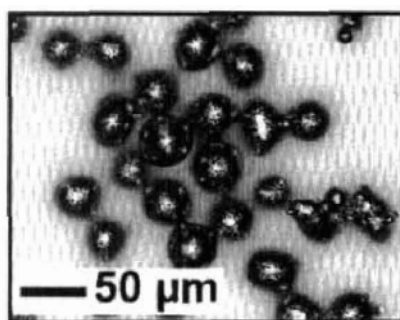
Obr. 5 Mazací režimy pro tři různé velikosti mikrovtrisků [9]

Numerické simulace:

Pomocí numerické simulace Nélías a Ville studovali elastické napětí v okolí vtisku a našli kritický skluzový poměr. Dále poskytli jednoduchou metodu pro určení spodní hranice životnosti valivých ložisek. Jako model byly využity dva tvary vtisků: vyhlazené a nevyhlazené (Obr. 6).



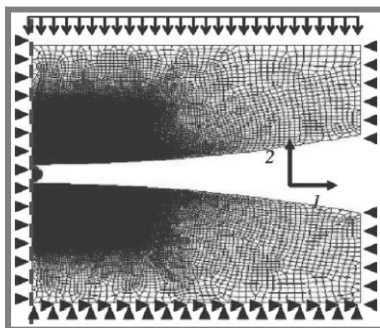
Obr. 6 Modelované typy mikrovtisků [9]



Obr. 7 Vtisky na třecím povrchu [11]

Ukázalo se, že velikost maximálního smykového napětí je téměř nezávislá na směru skluzového pohybu. Změnou skluzu dojde ke změně normálového tlaku a ke změně pozice smykového napětí z jedné strany povrchového poškození na druhou.

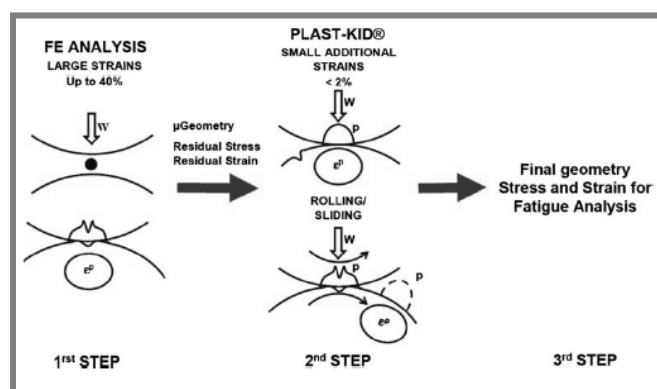
Následně Antaluca a Nélías popsali metodologii pro výpočetní analýzu poškození v okolí vtisku v suchém, odvalujícím se bodovém kontaktu [13]. Autoři pomocí metody konečných prvků určují tvar vtisku, podpovrchové napětí a napjatostní pole způsobená přítomností kulové částice. Prvním cílem této simulace bylo stanovení napětí v okolí vtisku před zatížením. Z důvodu zjednodušení výpočtu nebyl do výpočtu zahrnut mazací film. Autoři odkazují na podrobnější literaturu, popisující FE model přirozené modifikace topografie [14].



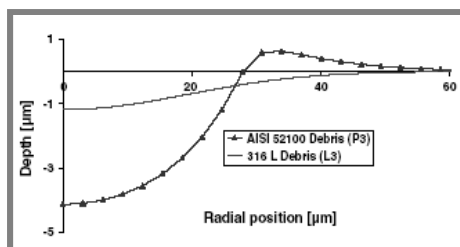
Obr. 8 Síť prvků a okrajové podmínky pro simulaci vyrážení vtisku [13]

Model byl využit pro analýzu procesu vnikání částice za vysokých zatížení, tzn. v elasto-plastické oblasti. Důležité je zmínit, že částice byla plně uchycena mezi kontaktními povrchy a nedeformovala se. Tento mechanismus popisuje, proč i velmi měkké kulové částičky mohou narušit (texturovat) tvrdé povrchy. Hlavním parametrem pro FE simulaci bylo tření mezi částicí a kontaktními povrchy, které určuje průchod částice kontaktem a její tvar.

Numerické simulace byly provedeny za účelem nalezení vlivu povrchového vtisku na RCF. Simulováno bylo vyrážení vtisku částicí, pohyblivé zatížení a únavová analýza. Únavová analýza zahrnovala vliv tvaru vtisku, vliv zbytkového napětí, odvalování se třením a vliv velikosti zatížení. Metodologie numerické simulace je stručně shrnuta na obr. 9. Porovnání vtisků vzniklých různými materiály částice lze vidět na obr. 10.

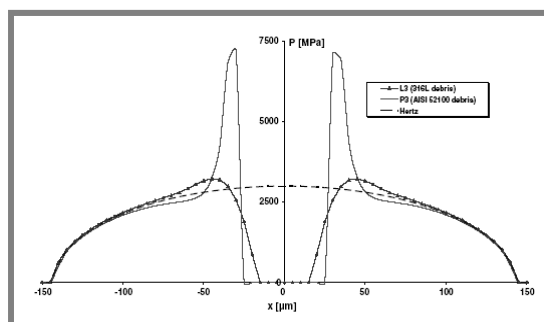


Obr. 9 Metodologie simulace [13]



Obr. 10 Tvar vtisku [13]

Autoři uvádějí, že projevy porušení kontaktní únavou v důsledku přítomnosti vtisku se mohou objevit v blízkosti vtisku nebo na opačné straně v nemodifikovaném místě povrchu. Během kontaktu jsou povrchy vystaveny stejnému tlakovému a napěťovému rozložení. Obr. 11 ukazuje tlakové rozložení v okamžiku, kdy je vtisk uprostřed kontaktu. Tlakové rozložení nezávisí na zbytkovém napětí, naopak přítomnost výstupků na okraji vtisku jej silně ovlivňuje. Během prvního zátěžného cyklu není tlakové rozložení symetrické.



Obr. 11 Rozložení tlaku povrchu s vtiskem během simulace odvalování [13]

Mezi řadou prezentovaných výsledků, má významný vliv koeficient tření, který nepříznivě ovlivňuje životnost za přítomnosti povrchového defektu. Tato skutečnost odpovídá experimentálním pozorováním provedeným Ai, Wedevenem a dalšími [15-17].

2.2 Cílená modifikace topografie

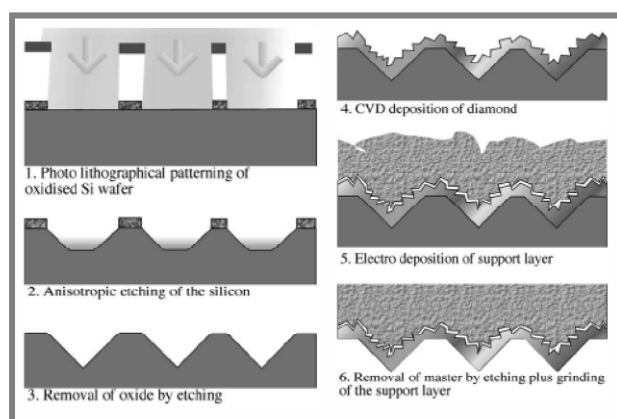
Cílená modifikace topografie je v praxi nejčastěji realizována pomocí technologií *Laser Surface Texturing* (LST) nebo pomocí mechanického vyrážení vtisků do třecích povrchů. Tímto způsobem cílená modifikace umožňuje vytvoření povrchových struktur s velmi dobře definovanou a snadno kontrolovatelnou geometrií. Charakteristiku metody LST uvedl Etsion [18] a zároveň poukázal na potenciál této metody v různých strojních aplikacích [19,20]. Také popsal některé ze základních a probíhajících výzkumů využívajících LST po celém světě. Technologii, využívající svazek energie k tvorbě textur na třecích površích dále popsali Vincent a kolektiv, kteří se zaměřili na hodnocení kvality LST metody a výsledných textur [21] a Voevodin, který využil laserového paprsku k texturování povrchových povlaků [22].

Různé formy a techniky realizace povrchových textur byly vyvinuty v průběhu let pro zvýšení tribologického výkonu strojních částí. Schneider vyvinul metodu „vibrorolling“, která se skládá z výroby mělkých drážek plasticou deformací pomocí pevného indentoru na kovových součástech [23]. Zároveň Suh představil myšlenku modulovaného (přizpůsobeného) povrchu pro odstraňování oxidických nečistot z rozhraní elektrických kontaktů [24]. Zpočátku používal leptací techniku, která byla později nahrazena abrazivním obráběním k tvorbě drážek [25-27]. Tyto drážky měly působit jako lapače nečistot čímž bylo docíleno snížení opotřebení a deformace součásti. Další metodou realizace cílené modifikace topografie bylo reaktivní iontové leptání, které popsali Wang a Kato za účelem studia vlivu textur, ve formě mikro-důlků na povrchu axiálního ložiska, pracujícího ve vodní lázni [28, 29]. Jiné techniky realizace textur zahrnují tryskové obrábění [30], litografii a anizotropní leptání [31], popřípadě využití elektrického výboje [32,33].

Dalším přístupem, kterým lze realizovat cílenou modifikaci strojního povrchu je *mechanické vyrážení* jednotlivých vtisků nebo vzorových matic do třecího povrchu součásti.

Popisem jedné z technik mechanického vyražení vtisků do třecího povrchu strojních součástí se zabývá ve své práci Petterson [34]. Popisuje proces tvorby základní matrice (geometrie textury) a proces samotného vytváření textury na povrchu zkušební vzorku. Tvorba matrice je realizována nanesením diamantového filmu na ocelovou formu, tento film je podpořen tenkou vrstvou niklu a následně je obroben do požadované podoby. Takto vytvořený nástroj je posléze přitlačen k třecímu povrchu a vytvoří velké pole malých vtisků, tedy finální texturu.

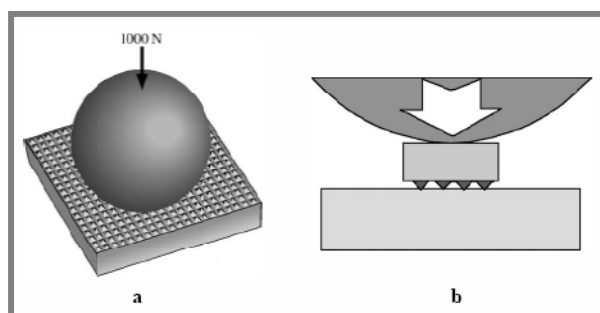
Samotný texturovací nástroj byl vytvořen pomocí šesti základních kroků (Obr. 12): (1) šablonování silikonového těsnícího materiálu, (2) leptání pro vytváření formy, (3) odstranění oxidické vrstvy, (4) povlakování formy diamantovým filmem, (5) niklová podpora diamantového filmu a (6) odkrytí povrchu nástroje odstraněním silikonu.



Obr. 12 Popis procedury tvorby texturovacího nástroje [34]

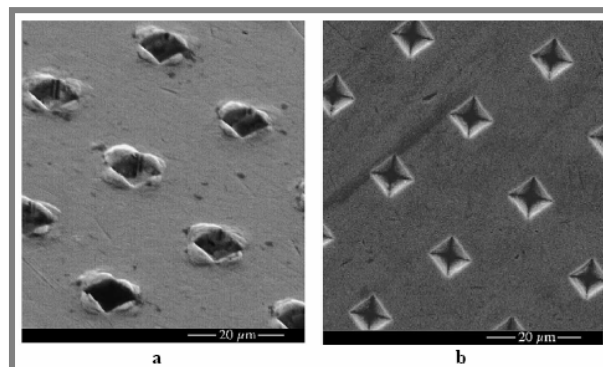
Výhodou této techniky je rozmanitost v dosažitelných geometriích textur. Minimální velikost jednoho vtisku je limitována rozlišením procesu, které se zde pohybuje kolem $1\text{ }\mu\text{m}$. To odpovídá hustotě rozmístění přibližně 250.000 vnikacích elementů na mm^2 . Maximální hloubka je limitována tloušťkou těsnícího materiálu, která je běžně $500\text{ }\mu\text{m}$.

Petterson provedl experimentální zkoušky na rovinných a zakřivených (kulička) vzorcích. Princip texturování obou těchto případů ukazuje obrázek 13. K měření byla použita kulička o průměru 10 mm , na kterou bylo aplikováno zatížení 1000 N . V případě rovinných vzorků byly použity ploché ocelové desky o rozměrech 4 mm^2 a $78,5\text{ mm}^2$, zatížené silou 1000 N a 45.000 N v uvedeném pořadí.



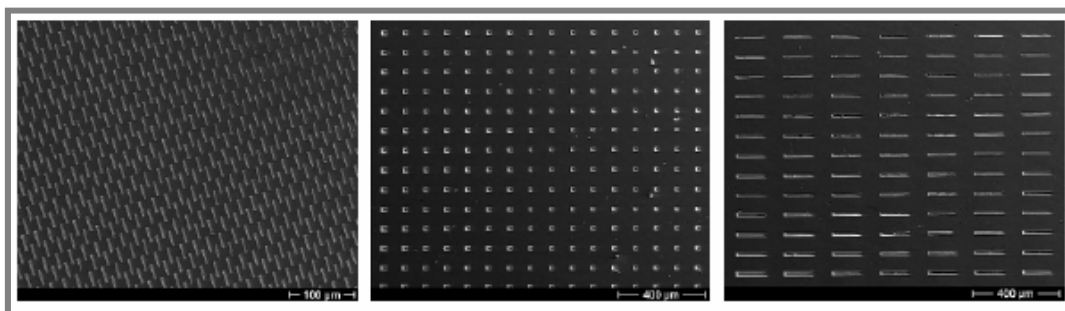
Obr. 13 Princip texturování a) kuličky b) desky [34]

Po vyražení textury byly povrchy obou vzorků leštěny, aby došlo k odstranění přebytečného materiálu, vytlačeného během procesu tvorby textury. Obrázek 14 pak ukazuje detail výsledné textury před a po leštění.



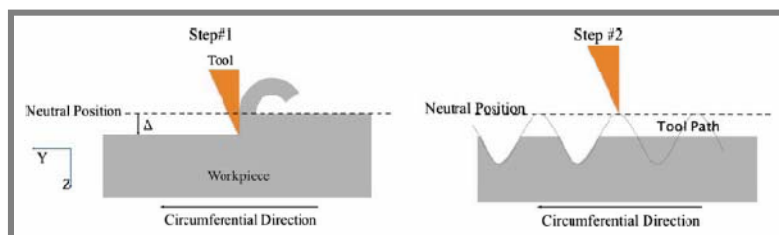
Obr. 14 Detail textury: a) přes leštění b) po leštění [34]

Technika texturování prezentovaná Pettersonem poskytuje tvorbu vtisků s velmi dobře definovanou geometrií. Pro využitelnost v komerční oblasti je však další vývoj nutný. Autor uvádí výhodu této techniky v možnostech tvorby libovolných struktur (Obr. 15). Další možností využití texturovacího nástroje je jeho použití při studiu tvrdosti různých materiálů.



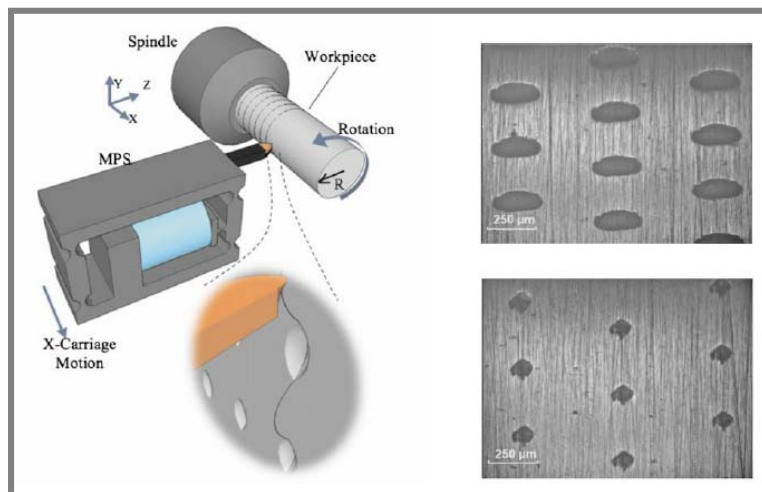
Obr. 15 Příklady různých typů textur [34]

Mechanického přístupu využil i Greco, který k vlastní modifikaci strojního povrchu použil řezný nástroj [35, 36]. Proces je založen na standardním soustružení, kde se pozice hrotu nástroje vzhledem k otáčení obrobku přesně ovládá pomocí mikropolohovací jednotky (MPS). Obrázek 16 znázorňuje dva základní kroky procesu obrábění: nastavení vzdálenosti nástroje a vlastní tvorbu textury. Na obrázku 17 je pak ukázáno schéma texturování s výslednými texturami na třecím povrchu vzorku.



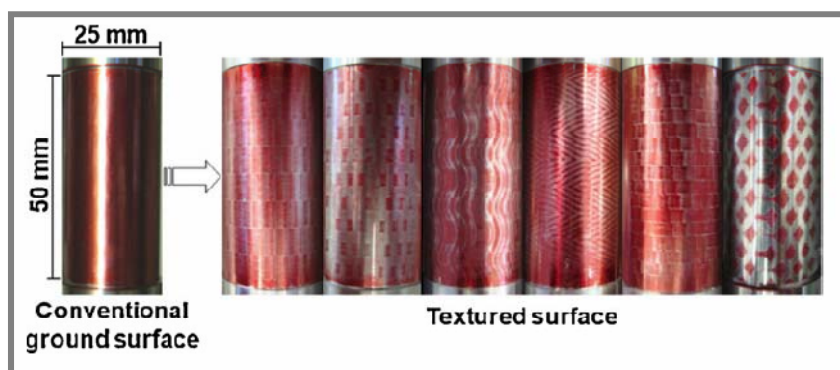
Obr. 16 Proces obrábění [34]

Velikost, tvar a rozmístění vtisků jsou řízeny vibračními charakteristikami, jako je amplituda, frekvence, a tvar vlny, v poměru k rychlosti otáčení obrobku a rychlosti posuvu nástroje. Metoda, kterou vyvinul Greco, umožňuje tvorbu požadované textury na vnitřním i vnějším kroužku (např. ložiskového elementu), zároveň také na hladkém rovném disku.



Obr. 17 Schéma vyrážení vtisků, realizované textury [36]

Oliveira ve své studii představuje novou techniku, která umožňuje tvorbu konfigurovatelných vzorů, nebo textur, na povrchu brusného kotouče. Poukazuje na použití tvarovaných brusných kotoučů pro zlepšení výkonnosti brusných procesů v běžných aplikacích a také pro výrobu vzorovaných povrchů s cílem změnit jejich funkčnost a zlepšit jejich vlastnosti (Obr.18) [37].



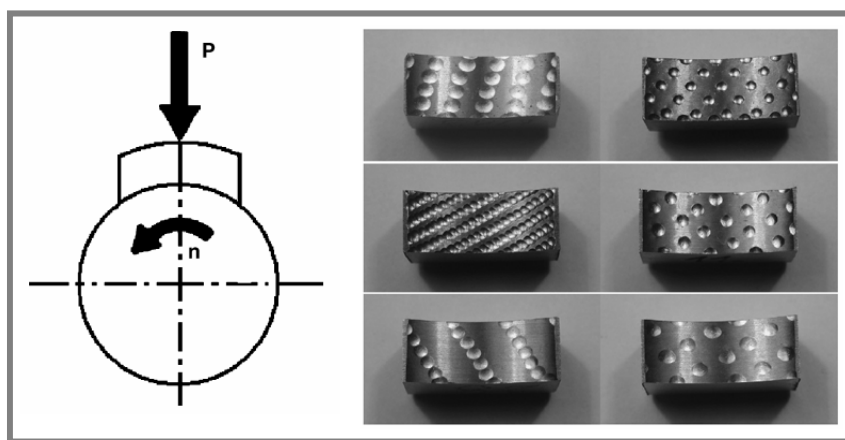
Obr. 18 Konvenční povrch, texturované povrchy [37]

2.2.1 Kontakt konformně zakřivených těles

Poškození vyvolané povrchovými nerovnostmi za podmínek mazaného kontaktu *konformně zakřivených těles* se věnovala řada studií [např. 38, 39]. Bylo prokázáno, že tento přístup má příznivý vliv na utváření hydrodynamického mazacího filmu a vede ke zvýšení jeho tloušťky v kontaktní oblasti mnoha strojních prvků. Povrchy některých strojních součástí se proto opatřují soustavami vtisků, které slouží jako zásobníky maziva a napomáhají tak ke snížení tření a opotřebení těchto povrchů [40-45]. Technologie LST zde poskytuje velmi efektivní a snadnou

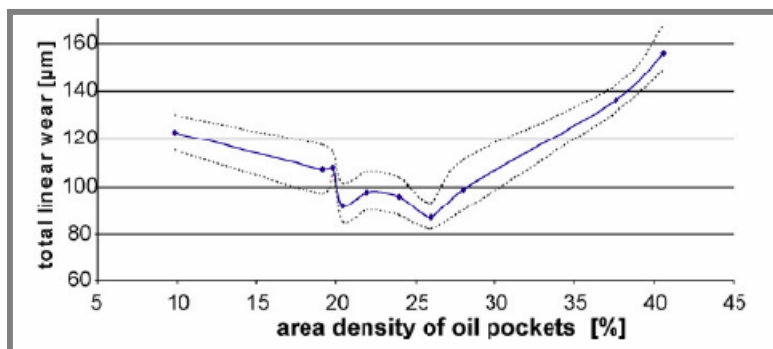
tvorbu modifikovaného povrchu (v praxi například mechanická těsnění nebo vložky válců).

Pawlus a Koszela provedli zkoušky odolnosti texturovaného povrchu proti opotřebení [38]. Experimentálně vyšetřovali vliv cílené modifikace topografie (předpokládali funkci textury jako zásobníku maziva) na koeficient tření za podmínek smíšeného mazání. Jako třecí a kontaktní členy uvažovali bronzový blok a ocelový kroužek (Obr.19). Během experimentu měřili intenzitu opotřebení a koeficient tření. Poukázali na fakt, že přítomnost textur na povrchu bronzového bloku vedla k významnému zlepšení odolnosti proti opotřebení ve srovnání se systémem konvenčně obrobeným blokem. Parametry textur byly charakterizovány poměrem mezi hloubkou a průměrem jednotlivých vtisků, který se pohyboval v rozmezí 0,03 a 0,11, přičemž hloubka vtisků se pohybovala mezi 45 až 115 μm .



Obr. 19 Schéma testu, příklady textur na třecím povrchu [38]

Autoři uvádějí, že povrchová textura bloku (hustota mezi 20 a 26%) má za následek výrazné zlepšení odolnosti proti opotřebení ve srovnání se systémem se vzorky bez povrchových úprav (Obr.20). V oblasti, kde se hustota textury pohybovala kolem hodnoty 26%, bylo minimalizováno opotřebení testované sestavy o 27% ve srovnání se systémem, kde byl blok pouze obroben a neopatřen texturou.

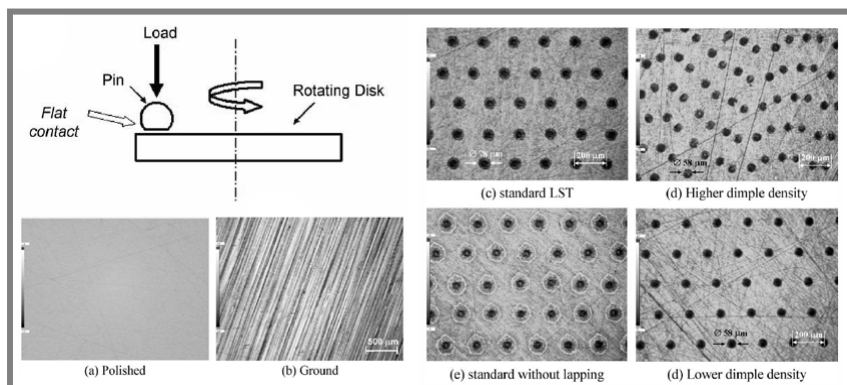


Obr. 20 Vliv hustoty textury na celkové opotřebení povrchu [38]

Autoři uvádějí, že poměr hloubky a průměru jednotlivých vtisků textury by neměl být příliš velký, protože to by mohlo způsobit zvýšení lokálních tlaků a následně zvýšení celkového opotřebení. Tímto mechanismem se ale autoři podrobně

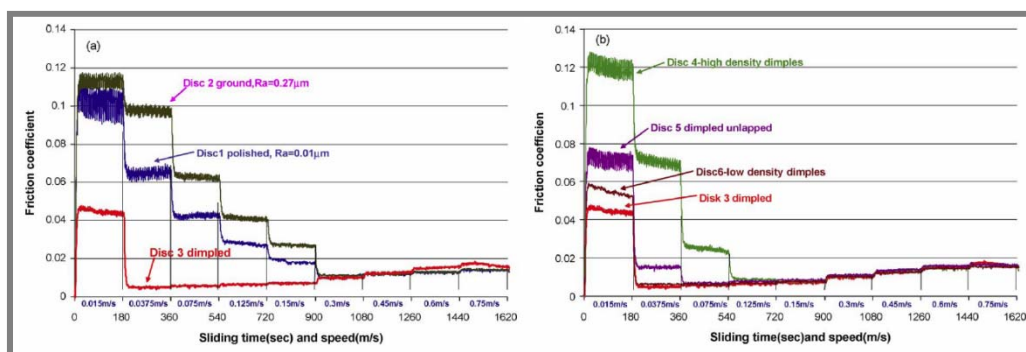
nezabývali. Uvádějí, že nejmenší opotřebení třecího povrchu bylo pozorováno za přítomnosti největších hloubek vtisků.

K obdobným závěrům došel i Kovalchenko [39], který hodnotil vliv povrchových textur na koeficient tření. Experimentální zkoušky porovnával s výsledky při měření broušeného a leštěného vzorku. K cílené modifikaci využil technologii LST, kterou aplikoval na plochý kontakt kolíku (zbroušené koule) a disku (Obr.21).

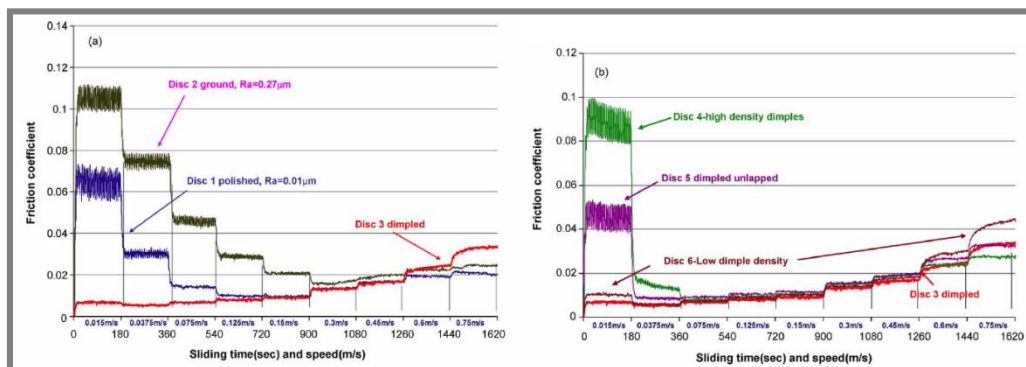


Obr. 21 Schéma procesu měření, Textury na povrchu disku [39]

Autor poukazuje, že touto metodou lze zvýšit rozsah hydrodynamického režimu mazání, jak pro vysoko-viskózní i nízko-viskózní maziva (Obr.22, Obr.23). Pro optimální funkci LST na zlepšení mazacích podmínek, je vhodné odstranění přetečeného materiálu na okrajích důlků leštěním. Kromě toho, bylo pozorováno snížení koeficientu tření při porovnání s povrchy srovnatelné drsnosti povrchu a neopatřené texturami.

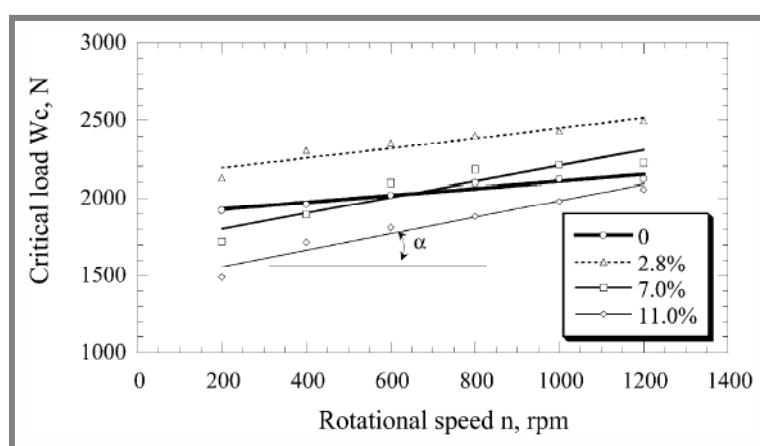


Obr. 22 Třecí koeficienty různých textur při mazání olejem s nízkou viskozitou [39]

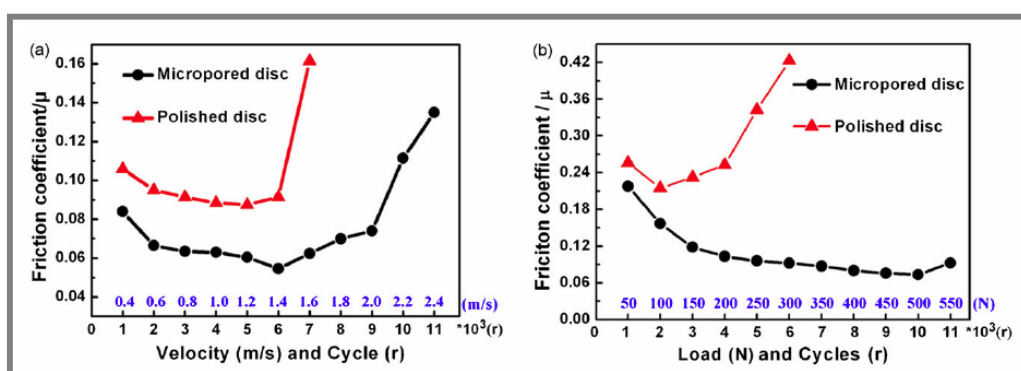


Obr. 23 Třecí koeficienty různých textur při mazání olejem s vysokou viskozitou [39]

Kovalchenko uvádí, že nižší hustota povrchové textury je výhodnější pro změny rozsahu režimu mazání. Dále poskytuje závěr, že technologie cílené modifikace topografie třecích povrchů (v tomto případě konkrétně LST) mohou být použity ke snížení tření v olejem mazaných tribologických komponentách, které pracují v režimu mezního mazání. Tuto skutečnost potvrdil i Yi [40] a následně Wang [41], který aplikoval povrchovou texturu na SiC povrch a zkoumal její vliv na koeficient tření za podmínek hydrodynamického mazání vodou. Snažil se experimentálně stanovit nejvyšší možnou výši kritické zátěže testovací sestavy (kontakt disk-válec), tedy zvýšení únosnosti. K hodnocení využíval poměru pórovitosti, který definoval jako poměr plochy obsažené vtisky a zbývající plochy zkušebního disku. Došel k závěru, že pro dané provozní podmínky existuje optimální hodnota poměru pórovitosti, která má za následek získání největší hodnoty kritické zátěže. V této studii byl tento poměr 2,8% pro SiC, přičemž získané kritické zatížení bylo o 20% větší než u plochy bez povrchových textur (Obr.24). Tento účinek byl zachován v rozsahu rychlostí mezi 400 a 1200 ot/min.



Obr. 24 Lineární závislost kritického zatížení a rychlosti třecích ploch pro netexturovaný povrch a různé hodnoty pórovitosti povrchu [41]

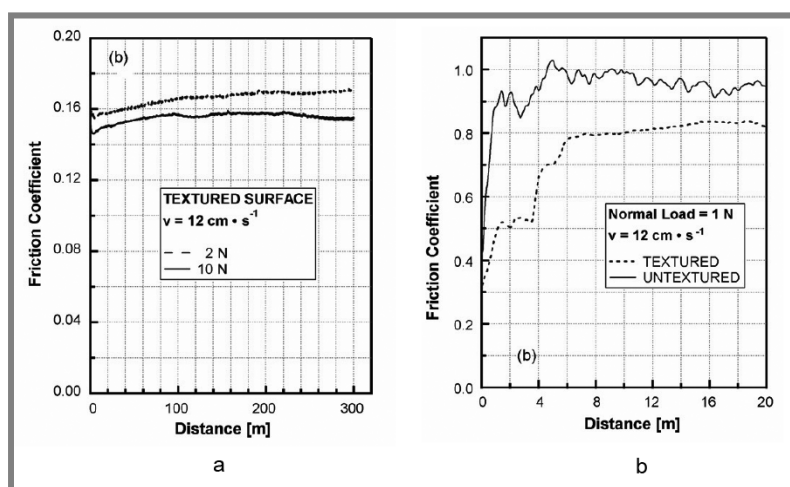


Obr. 25 Srovnání třecích koeficientů pro leštěný a texturovaný disk při různých rychlostech a zatíženích [40]

Možnosti využití cíleně modifikovaného povrchu v oblasti automobilového průmyslu se věnoval Etsion v několika pracích [42-44]. Provedl numerické simulace, ve kterých se zaměřil na studium třecího koeficientu a jeho změny za přítomnosti textury na třecím povrchu součásti v kontaktu. Získané výsledky numerickou

analýzou porovnával s experimentálními měřeními. Poukázal na fakt, že cílená modifikace třecího povrchu pístních kroužků může mít pozitivní vliv na zlepšení účinnosti spalovacího motoru [44].

Obdobné experimenty provedli i Borghi a Valeri, kteří se zaměřili na použití modifikace topografie u nitridovaných ocelí ve vysoce-výkonných motorech [45]. Zejména srovnávali tribologické vlastnosti netexturovaných a texturovaných nitridovaných ocelí za podmínek hydrodynamického, smíšeného a mezného mazání. Tření experimenty byly provedeny při rychlostech v rozmezí od 1 do 12 cm s^{-1} a kontaktních tlaků v rozmezí od 1 do 10 MPa. Autoři studovali dvě různé konfigurace provozních podmínek: nedostatečné mazání (Obr. 26a) a suchý kontakt (Obr. 26b). Maximální účinek modifikovaného povrchu na koeficient tření byl pozorován za podmínek nedostatečného mazání (Obr. 26).

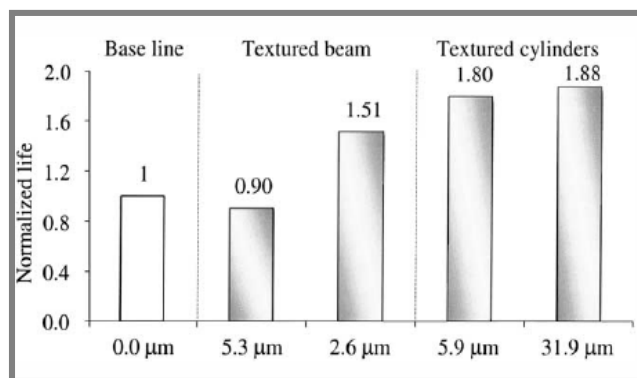


Obr. 26 Srovnání experimentů a) nedostatečné mazání b) suchý kontakt [45]

2.2.2 Kontakt nekonformně zakřivených těles

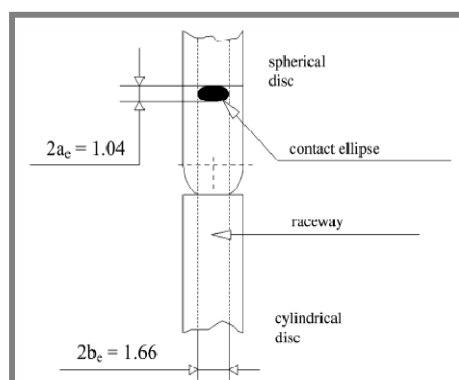
Novodobé studie se zabývají vlivem a účinky cílené modifikace topografie za reálných podmínek v oblasti styku *nekonformně zakřivených těles*. Tyto práce se zaměřují převážně na vliv povrchových nerovností na chování a utváření mazacích filmů při bodovém kontaktu těles. Metody optické interferometrie umožnily studovat vliv uměle vytvářených struktur na tloušťku EHD mazacího filmu [46-51]. Přítomnost povrchových nerovností v mazaném kontaktu však také významně ovlivňuje rozložení tlaku v mazacím filmu. Uměle vytvořené struktury mohou zároveň působit jako koncentrátoři napětí a mohou vést k poškození třecího povrchu. Z tohoto důvodu se řada dalších studií zabývala vlivem takovýchto struktur na iniciaci a propagaci únavového poškození třecích povrchů [52-55].

Jednou ze studií zaměřených na popis vlivu modifikovaného povrchu na kontaktní únavovou životnost třecího povrchu byla práce Volchoka a Etsiona [56]. Pro experimentální měření kontaktní únavy využili liniový kontakt válce s plochou. Z testů bylo zjištěno, že povrchová textura v kontaktní oblasti zvýší únavovou životnost třecího povrchu téměř až na dvojnásobek oproti běžnému povrchu bez textury (Obr. 27).



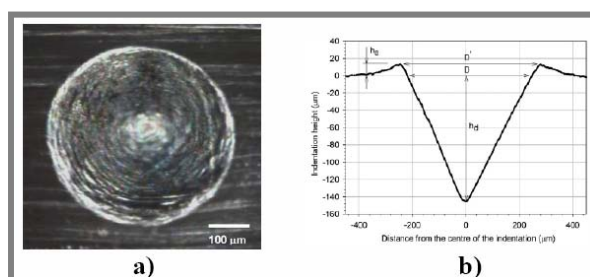
Obr. 27 Vliv vtisků na kontaktní únavovou životnost [56]

Experimentálním a numerickým ověřením vlivu modifikované struktury třecích povrchů na kontaktní únavu a jejími projevy se zabýval rovněž Mota [57]. Zkoušky a experimentální měření byly prováděny na dvoudiskovém stroji. Tento stroj byl sestaven ze dvou vzájemně se odvalujících disků (ocel AISI 52100). Jeden válcový, druhý sférický. Poloměry disků byly 70mm a jejich tloušťka 7mm. Zatížení bylo zvoleno tak, aby kontaktní tlak odpovídal 2GPa. Rozměry eliptického kontaktu byly $a = 0.52\text{mm}$ a $b = 0.83\text{mm}$ (Obr.28). Experimenty byly prováděny za podmínek čistého valení, kdy se oba disky otáčely rychlostí 3000ot./min.



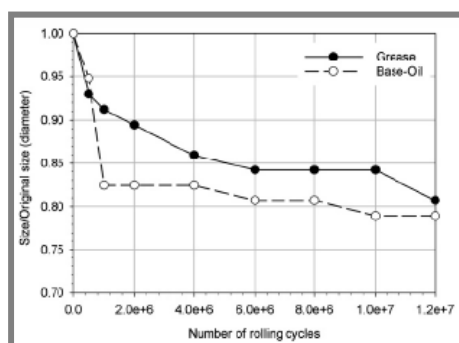
Obr. 28 Kontaktní geometrie [57]

K vlastní modifikaci topografie třecích povrchů Mota využil Rockwellova vyrážecího tělíska typu C. Zatížení používané při vyrážení mikrovrtisků bylo nakonec stanoveno na 2500N z důvodu lepší geometrie mikrovrtisku (Obr.29).



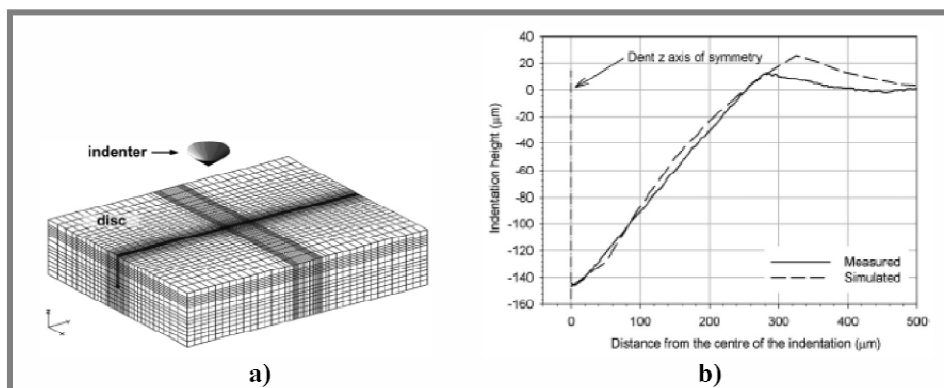
Obr. 29 a) Detail mikrovrtisku před experimentem
b) profil mikrovrtisku [57]

Autor poskytuje náhled na nárůst poškození vzorku během experimentu, vždy po určitém počtu cyklů zatěžování za podmínek EHD a smíšeného mazání. Během prvních několika cyklů dochází ke znatelnému zmenšení mikrovrtisku, v důsledku plastické deformace jeho stěn. Dále pak poskytuje srovnání vývoje velikosti (geometrie) vtisku během zkoušky za podmínek mazání tuhým mazivem a olejem (Obr. 30).



Obr. 30 Srovnání vývoje velikosti vtisku za podmínek mazání tuhým mazivem a olejem [57]

V numerickém řešení autor poskytl model vyrážení mikrovrtisků (Obr. 31a) a následně zahrnul výsledky pro jednotlivé oblasti napěťových polí. Vysoká koncentrace napětí byla nalezena na okraji mikrovrtisku. Řádově přes 2000MPa až do 2860MPa. Autor upozorňuje na dobrou shodu mezi modelovým mikrovrtiskem a změřenou geometrií vtisku (Obr.31b).



Obr. 31 a) proces vyrážení mikrovrtisku b) srovnání modelu a exp. měření [57]

Autor uvedl, že ať experiment probíhal v podmínkách mazání tuhým mazivem nebo olejem, výsledky poškození se téměř neliší. Jako hlavní rozdíl mezi zmiňovanými režimy mazání poukazuje na fakt, že při mazání tuhým mazivem docházelo k poškození spallingem na rozdíl od mazání za použití oleje.

Realizovanou numerickou lze využít jako komparační k jiným experimentům se změnou podmínek, zkušebních vzorků, popřípadě maziv.

Experimentální zjištění vlivu velkých vtisků na tvorbu poškození spallingem, resp. na jeho iniciaci využil i Xu[58]. Experimenty byly prováděny na zařízení „kulička-tyč“ s povrchovou modifikací jediným velkým vtiskem v kontaktní stopě (Obr. 32). Detailnější popis tohoto zařízení poskytuje ve své práci Glover[59]. Vtisky byly realizovány pomocí Rockwellova indentoru typu „C“, jejich průměr byl 280 μm .

Parametry experimentu:

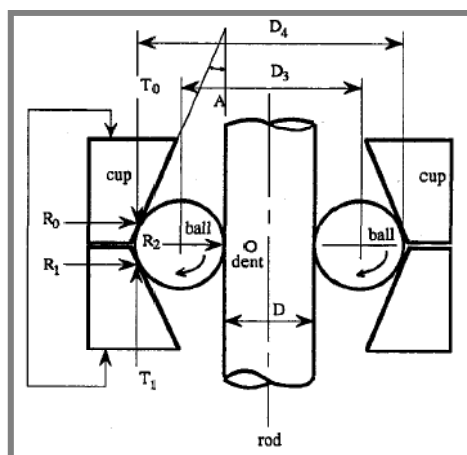
vzorek: válcovitý (tyč), průměr 9,5 mm
materiál: ocel M-50
drsnost povrchu $R_a = 0,05\text{--}0,075 \mu\text{m}$
otáčky: 3600 ot./min.

zátěžná tělesa: kulička, průměr 12,7 mm
materiál: ocel AISI 52100
drsnost povrchu $R_a = 0,04 \mu\text{m}$

kontaktní tlak: 3,65 GPa

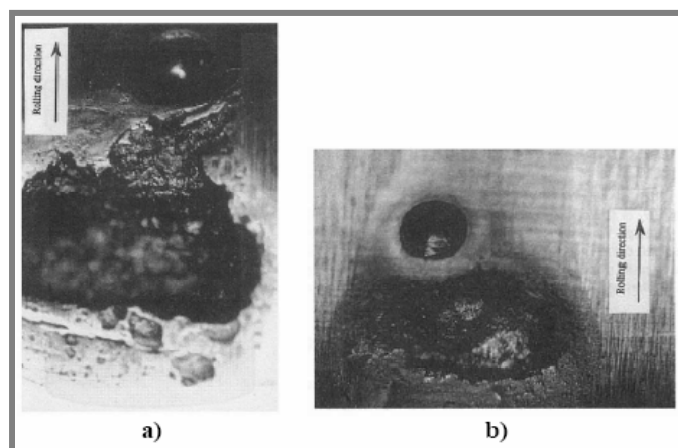
velikost kontaktní oblasti: eliptická, $a = 300 \mu\text{m}$, $b = 528 \mu\text{m}$

mazivo: motorový olej SAE 30



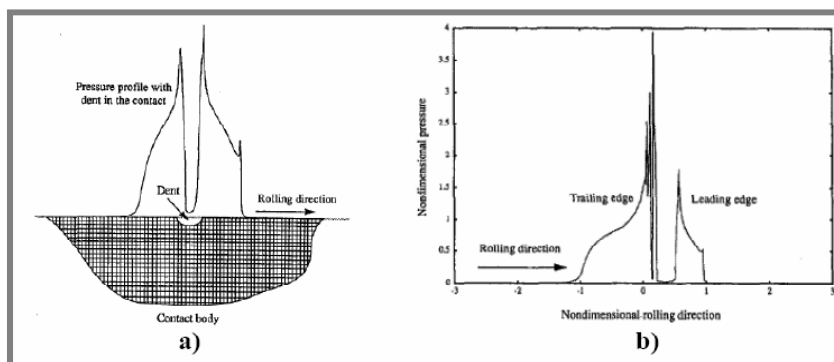
Obr. 32 Schéma zkušebního zařízení [58]

V rámci experimentů byly provedeny zkoušky na modifikovaných i nemodifikovaných površích za podmínek suchého a mazaného kontaktu. Testy s nemodifikovanými povrchy přesahovaly 100 hodin provozu ($51,6 \times 10^6$ cyklů) bez známek poškození. Za přítomnosti vtisku v kontaktní oblasti se poškození iniciovalo již po několika hodinách provozu. Obrázek 33a ukazuje porušení generované po 2×10^6 (4,2 hodin) cyklech na modifikovaném, mazaném povrchu. Příklad poškození za podmínek suchého kontaktu je zobrazen na obr.33b. Zkoušky za podmínek suchého kontaktu autor provedl především pro porovnání a zjištění vlivu maziva na iniciaci a propagaci poškození.



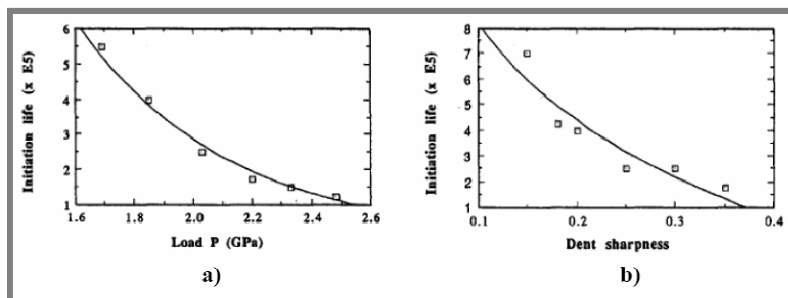
Obr. 33 a) porušení mazaného kontaktu b) porušení suchého kontaktu [58]

Autor také předkládá analytický EHD model, popisující iniciaci a propagaci porušení. Kontakt je rozdělen na malé buňky o samostatném objemu (Obr. 34a). Pro každou buňku je pak spočteno, zda v ní dojde k porušení či ne. Pakliže k porušení dojde, buňka je odebrána z povrchu a dochází k tvorbě spallingu. K porušení může dojít i pod povrchem součásti. Spall modifikuje geometrii povrchu a ovlivňuje tak tlakové rozložení v kontaktu. Tím přispívá k šíření porušení (Obr. 34b).



Obr. 34 a) EHL model b) tlakové rozložení v kontaktní oblasti s vtiskem a spallem [58]

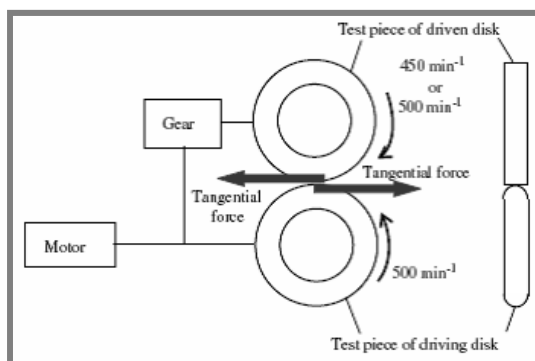
Na procesy iniciace a propagace poškození mají významný vliv podmínky EHL (zatížení, skluz a materiálové vlastnosti). Za iniciační dobu autor Xu uvažuje počet cyklů do poškození první modelové buňky. Iniciační doby zkoumal za různých zatížení a různých „ostrotí“ vtisků (Obr. 35a,b). Se zvyšujícím se zatížením dochází k nárůstu kontaktního tlaku a tím i tlakových špiček na okraji vtisků. Geometrie vtisku také významně ovlivňuje tlakové rozložení v kontaktu. Čím „ostřejší“ je hranice vtisku, tím větší je i tlaková špička.



Obr. 35 Iniciační doby poškození a) vliv zatížení b) vliv „ostrosti“ vtisku [58]

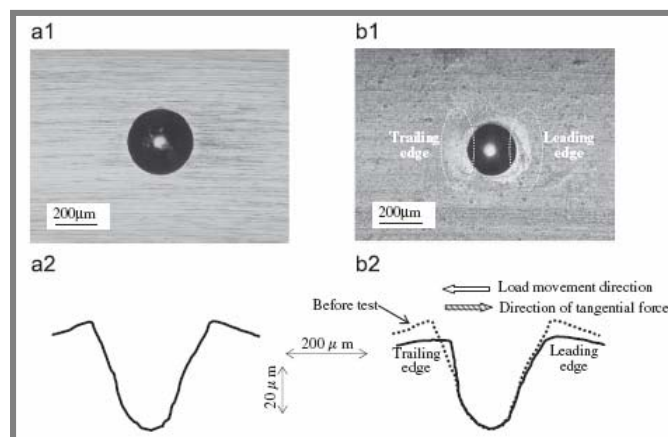
Narůstající zatížení vede ke zkrácení iniciační doby poškození, stejně tak tuto dobu zkracuje i narůstající „ostrost“ vtisku. Pokud spall dosáhne velkých rozměrů, začne sám působit jako vtisk a napomáhá iniciaci dalšího poškození. Vtisky zde ovlivňují iniciaci poškození spíše než jeho propagaci. Xu ve své studii nezahrnul vliv zbytkových napětí, drsnosti povrchu a teplotního zatížení.

Experimentální studii mechanismu iniciace povrchového poškození, v důsledku přítomnosti umělého vtisku na třecím povrchu za podmínek mazání kontaminovaným mazivem se zabývali Ueda a Mitamura [60]. RCF testy byly provedeny na dvou-diskovém stroji (Obr. 36) a zároveň na zkušebním zařízení „ball on rod (kulička-tyč)“. Autoři se experiment snažili přiblížit co nejvíce reálným podmínkám, vyskytujícím se v běžném provozu. Použité disky byly vyrobeny z ložiskové oceli (JIS SUJ2) se střední aritmetickou úchylkou profilu R_a 0,05 μm . Zkušební vzorky byly opatřovány vtisky o průměru 150 μm a hloubce přibližně 10 μm . Vtisky byly vytvářeny mechanicky, pomocí Rockwellova indentoru typu „C“. Kontaktní tlak byl stanoven na 3,2 GPa u dvou-diskového stroje a na 4,8 GPa u „ball on rod“ testeru.



Obr. 36 Schéma dvou-diskového RCF zkušebního zařízení [60]

Autoři diskutují možné ovlivnění iniciace poškození v důsledku přítomnosti tangenciální síly, působící na vzorku (viz obr. 36). Srovnání geometrie vtisku před a po experimentu je možné vidět na obrázku 37.



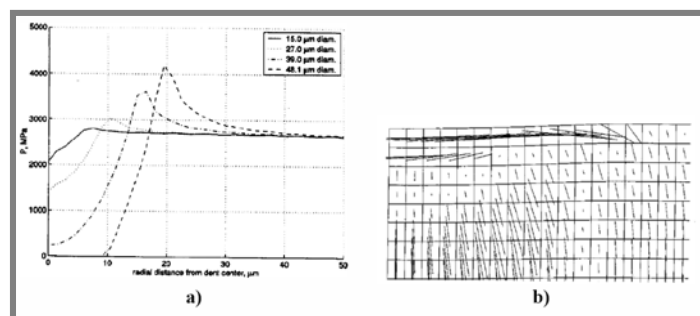
Obr. 37 Deformace vtisku před a po experimentu: a1, a2 -před testem, b1,b2 -po testu [60]

Ze získaných výsledků lze interpretovat následující závěry:

- Tangenciální síla způsobuje nárůst napětí na okrajích vtisku a urychluje iniciaci porušení na okraji vtisku.
- Pozice poškození je dána směrem tangenciální síly (spíše než směrem odvalování).
- K iniciaci a propagaci poškození dochází nejčastěji na hnaném komponentu soustavy.

Howell provedl FEM (Finite Element Metod) simulaci průchodu kontaktem pro čtyři různé velikosti kruhových vtisků [61]. Navazuje na předchozí experimentální studie se zařízeními typu „ball on rod (kulička-tyč)“. FEM model sestával z modifikovaného poloprostoru (kulička) a pevného vyrážecího tělesa. Tento model sloužil k simulaci kontaktu. Povrchová struktura byla modelována simulací Rockwellova tvrdoměru typu „C“, který vytváří kruhové vtisky v povrchu vzorku. Průměr vyrážecího tělesa byl 400 μm , průměr kuličky 12700 μm . Do simulace byly zahrnuty čtyři vtisky a průměry od 15 μm do 48 μm . Hertzův kontaktní tlak byl 4,6 GPa. Howell studoval vliv velikosti vtisku na tlakové rozložení a pozici poškození pro suchý bodový kontakt. Cílem bylo popsat proces kontaktní únavy pomocí realistického materiálového modelu.

Výsledky získané ze simulace byly porovnány s několika experimentálními měřeními. Autor uvádí, že maximální zatížení při modelování vyrážení vtisku bylo 29 N, poté nastávaly problémy s konvergencí řešení. Proto nebylo možné provést přímé srovnání s experimentem, ve kterém bylo zatížení 981 N. Modelována byla tlaková rozložení v kontaktu, napěťové rozložení a odhad místa tvorby poškození (Obr. 38a,b). Předpokládaná hloubka iniciace poškození byla stanovena na 0,75 μm pod povrchem.



Obr. 38 Výsledky simulace: a) tlakové rozložení, b) napěťové rozložení [61]

Howell ve své práci zanedbal několik faktorů: vliv EHD, tření, teplotní zatížení a dynamiku procesu. Zároveň ke srovnání s experimentem použil pouze čtyř experimentálních měření poškození.

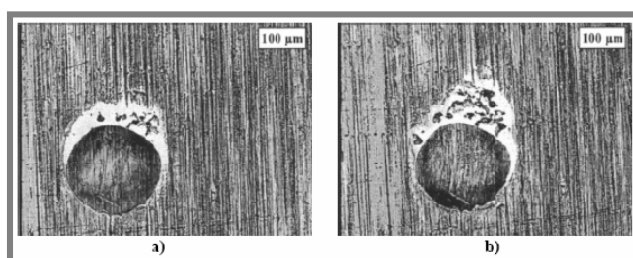
Metodiku hodnocení chování kontaktní únavy (RCF) ložiskových ocelí za přítomnosti povrchových vtisků pomocí numerické simulace popsal i Nélías [62]. Závěry ze simulace pak porovnával s experimentálními měřeními. Za hlavní cíle experimentu si stanovil popis chování texturovaných ocelí 32CrMoV13 a M50 při RCF testech, stanovení vlivu Hertzova tlaku, skluzového poměru a tangenciálního napětí na RCF a identifikaci místa výskytu poškození.

Nélías použil dvou-diskový experimentální stroj s disky o poloměrech 24 mm (texturovaný) a 40 mm. Uvažované kontaktní tlaky byly 2,5 a 3 GPa. Vzorky z oceli 32CrMoV13 byly použity v kontaktu s ocelí M50, následně byly provedeny testy se vzorky z oceli M50 v kontaktu s disky z oceli 32CrMoV13. Jako mazivo byl použit olej MIL-L-23699 při provozní teplotě 80°C. Testy byly prováděny za podmínek čistého valení a za podmínek 1,5% skluzu, přičemž povrch vzorků byl opatřen vtisky o poloměrech 200, 400 a 600 μm, vyražených silami 5, 10, 20, 30 a 50 daN.

Proces texturování a zatížení vtisku v kontaktní oblasti byl následně modelován pomocí FEM metody. Účelem simulace bylo ověřit experimentální výsledky a popsat zbytková napětí vzniklá v důsledku vyražení vtisků, dále pak ověřit vliv koeficientu tření na geometrii vtisků.

Kritérium poškození

Cílem experimentů bylo stanovit, zda daný vtisk způsobuje iniciaci poškození či ne. Pokud byly v okolí vtisku pozorovány projevy, byl vtisk označen za škodlivý. Testy pro stanovení tohoto kritéria byly zatíženy na 50×10^6 cyklů. Celkové pozorované poškození bylo iniciováno při 20×10^6 cyklech (Obr. 39). Je třeba zdůraznit, že toto kritérium je zaměřeno na výskyt lokálního povrchového poškození a ne na jeho propagaci a růst.



Obr. 39 Ocel M50 vtisk 400-30: a) 10×10^6 cyklů, b) 50×10^6 cyklů [62]

Srovnání ocelí 32CrMoV13 a M50

Nélias srovnával testy za podmínek 1,5% skluzu při kontaktním tlaku 3 GPa. Výsledky ukázaly, že vtisky 400-20, 600-20 a 600-30 mohou být označeny za škodlivé pro ocel M50, ale ne pro ocel 32CrMoV13. Z výsledků vyplývá, že modifikace topografie nitridované oceli (32CrMoV13) má příznivý vliv na prodloužení únavové životnosti oceli.

Vliv skluzu

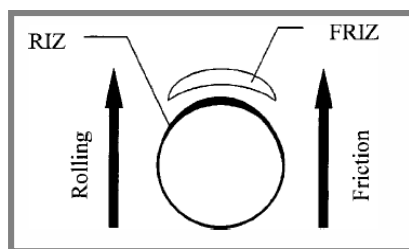
Při zahrnutí 1,5% skluzu do měření, byly pozorovány projevy poškození u vtisků 400-20, 400-30, 400-50 a 600-50. Tyto výsledky naznačují, že skluz významně (nepříznivě) ovlivňuje RCF.

Vliv tangenciálního napětí

Autor poukázal, že přítomnost tangenciálního napětí snižuje odolnost materiálu vůči únavovému poškození. Tento vliv je však limitován provozními podmínkami. Tangenciální napětí stejně jako kontaktní zatížení může být velmi důležitým parametrem růstu a propagace povrchového poškození.

Místo výskytu poškození

Nélias ve své práci uvádí dvě oblasti výskytu poškození. První, nazvaná RIZ (rolling initiation zone), se aktivuje pouze za podmínek čistého valení. Druhá oblast, FRIZ (friction and rolling initiation zone), se nachází přibližně 20 μm před vtiskem po směru třecí síly (Obr. 40).



Obr. 40 Výskyt oblastí poškození [62]

Novodobé studie, zohledňující vliv textur na chování a projevy kontaktní únavy třecího povrchu, jsou zaměřeny na studium iniciace a propagace únavového poškození. Zároveň se snaží najít místo prvotního výskytu poškození [62-66]. Několik prací se zabývá virtuálním modelováním textur na površích s cílem nalézt optimální tvar vtisků i výsledné textury. Tu potom podobojí numerickým analýzám [67-69]. V těchto studiích jsou většinou uvažovány konformně zakřivené povrchy.

3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ

Výše uvedené shrnutí odborné literatury představuje popis současného stavu poznání v oblasti experimentálního studia vlivu cílené modifikace topografie třecích povrchů na projevy poškozování kontaktní únavou. K modifikaci těchto povrchů je využíváno jednotlivých vtisků, ale i jejich soustav (textur). Literatura předkládá několik přístupů ke studiu cílené modifikace topografie. Nejčastější je přístup, kde vtisky působí jako *zásobníky maziva* a svojí funkcí napomáhají k dodávání maziva do kontaktu (například v kritických fázích provozu, jako jsou rozběh, doběh, atd.). Studován je pak vliv geometrie vtisků na tvar a tloušťku mazacího filmu. Druhým přístupem je studium vlivu vtisků (geometrie a hustoty rozmístění) na projevy kontaktní únavy. Tyto studie předpokládají vtisk jako *potenciální koncentrátor napětí* a popisují rozložení tlaku a napětí v kontaktní oblasti. Většina těchto metod se omezuje pouze na numerické, popřípadě napjatostní analýzy a nezahrnuje jejich experimentální ověření.

Chování modifikovaného povrchu v kontaktu je však také značně ovlivněno provozními podmínkami a materiálovou charakteristikou zkušebních vzorků. Většina výzkumů se experimentem snaží co nejvíce přiblížit reálným podmínkám v běžném provozu. Studovány jsou zejména ložiskové oceli za podmínek částečného EHD nebo hydrodynamického mazání. Každé experimentální zařízení pro testování vzorků na kontaktní únavu, je pak upraveno (popřípadě vyvinuto) pro účely konkrétního experimentu.

4 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

4

Na základě rozboru problematiky cílené modifikace topografie třecích povrchů strojních součástí a současného stavu problematiky se vlastní výzkum zaměřil na stanovení metodiky texturovacího procesu a experimentální studium vlivu geometrie soustav vtisků na kontaktní únavu třecích povrchů strojních prvků. Soustavy vtisků byly studovány jako potenciální koncentrátoři napětí, přičemž zohledněn byl vliv různých geometrií soustav včetně různých tvarů jednotlivých vtisků. Práce navazuje na předchozí výzkum a doplňuje jej o stanovení metodiky vyrážení soustav vtisků a přípravy vzorků pro jednotlivá měření.

4.1 Dílčí cíle disertační práce

4.1

Pro úspěšné splnění cíle disertační práce bylo třeba zohlednit tyto dílčí etapy řešení. Ty byly následující:

- stanovení metodiky vyrážení soustav vtisků
- popis a charakterizace metodiky tvorby soustav vtisků s ohledem na jejich geometrii
- stanovení postupu přípravy vzorků pro vlastní měření
- popis výsledků realizovaných experimentů
- stanovení vlivu soustav vtisků na kontaktní únavu strojních prvků

5 EXPERIMENTÁLNÍ APARATURA

Z rozboru dostupné literatury vyplývá, že vhodně navržená povrchová textura může za konkrétních provozních podmínek přispět k prodloužení únavové životnosti součástí. Tyto studie však hodnotily pouze vliv samostatného vtisku v kontaktní stopě. Z výsledků je patrné, že geometrie vtisků podstatně ovlivňuje rozložení tlaku v kontaktní oblasti a tím i celkovou životnost součástí. Geometrie jednotlivých vtisků v kontaktní stopě však také vykazuje odlišné vlastnosti než za přítomnosti textury (soustavy vtisků) v kontaktu. Z toho důvodu byl experiment rozšířen o zohlednění vlivu soustav vtisků na únavovou životnost.

Byla realizována úprava stávajícího experimentálního zařízení. Základ konvenčního mikroskopu byl rozšířen tak, aby bylo možné vytvářet složitější textury na třecích površích se zaručením přesnosti a opakovatelnosti. Tato úprava umožňuje snadnou kontrolu geometrie vtisků i jejich soustav. Pro takto modifikované experimentální zařízení byl vyvinut řídicí software. Jeho pomocí lze kontrolovat a řídit horizontální pohyb vyrážení, otočný pohyb vzorku a velikost přitlačné síly.

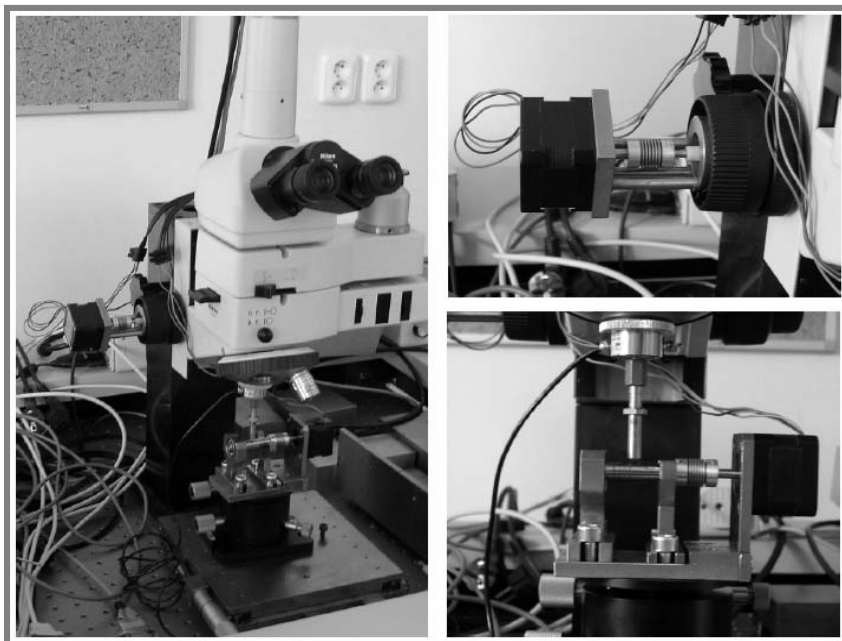
Realizované experimenty umožnily odladění měřicí soustavy a řídicího softwaru. S takto upravenou aparaturou proběhly další experimenty, které umožnily popsat vliv cílené modifikace topografie třecích povrchů na kontaktní únavovou životnost třecích povrchů a naplnit vymezené dílčí cíle disertační práce.

5.1 Realizace cílené modifikace topografie třecích povrchů

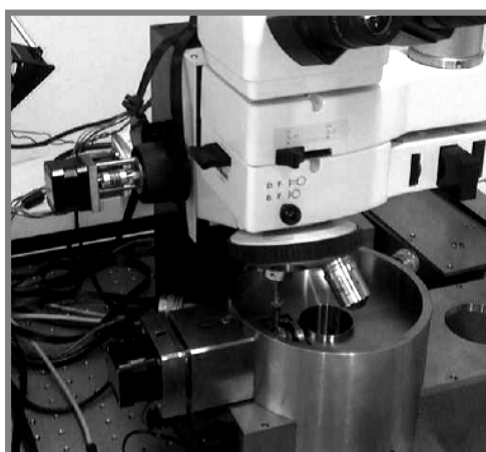
K cílené modifikaci topografie povrchů vzorků byl využit mechanický princip vyrážení vtisků pomocí vnikacího tělíska (Indentor - Rockwell typu C) s diamantových hrotem s poloměrem zaoblení 0,2 mm. Tento indentor umožňuje tvorbu vtisků s velmi dobře definovanou geometrií. V rámci disertační práce byla navržena modifikace stávajícího vyrážecího zařízení z manuálního na řízené. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik úprav. Původní manuální koncept představoval velkou časovou zátěž na tvorbu mikrostruktur a zároveň nedovoloval zachování přesnosti a opakovatelnosti procesu vyrážení vtisků. Proto byl nahrazen procesem automatizovaným, který tyto nežádoucí prvky odstranil.

První fází úprav bylo využití modifikace konvenčního mikroskopu (Obr. 41, 42). Přiřazeny byly dva krokové motory, které slouží k vertikálnímu posuvu mikroskopu a k otáčení vzorkem. Proces vytváření jednotlivých měřicích stop byl tímto plně automatizován, řízen počítačem. Rovněž byl vyvinut řídicí software, umožňující snadnou kontrolu základních parametrů vyrážecího procesu. Modifikace topografie povrchu vzorku byla realizována vertikálním posuvem mikroskopu. Horizontální posuv nebyl řízený, ale byl realizován ručním posuvem, pomocí mikrometru. Tímto způsobem byla zajištěna realizace požadovaných struktur na třecím povrchu a snadná kontrola geometrie vtisků.

Druhou fází úprav na aparatuře bylo doplnění celé sestavy o motorizovaný lineární posuv Optosigma SGSP-100X (Obr. 43). Jeho zařazením do aparatury bylo docíleno plně automatizovaného provozu realizace textur na třecích površích vzorků (hřídel). Tento posuv zajistil řízený pohyb vzorků v horizontální rovině a tedy schopnost přesného a opakovatelného definování geometrie textury.

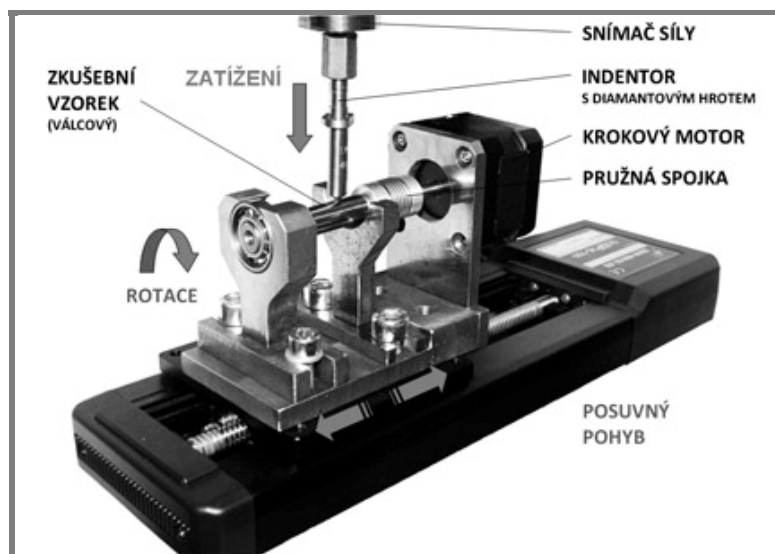


Obr. 41: Modifikace konvenčního mikroskopu



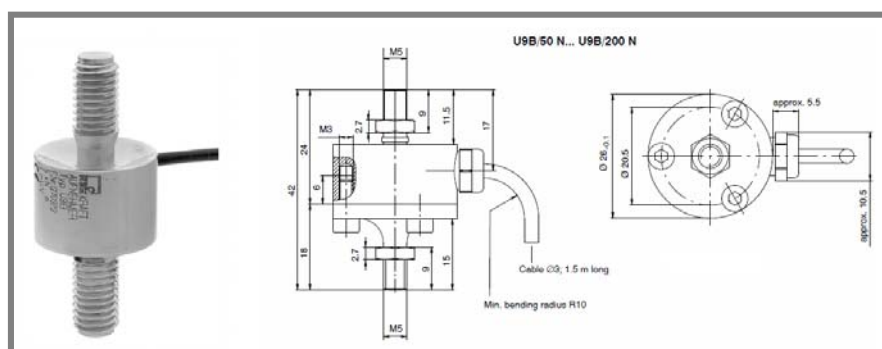
Obr. 42: Sestava pro texturování kuličky

Proces tvorby mikrostruktur na třecích površích vzorků byl stanoven požadovanými podmínkami na geometrii vtisků a na mechanickém principu vyrážení. Princip vyrážení vtisků s popisem jednotlivých částí upínacího přípravku vzorků je ukázán s popisem na obrázku 43. Mikrostruktury jsou vytvářeny po jednotlivých vtiscích. Zkušební vzorek je upevněn v upínacím přípravku, připevněném na polohovacím stolku Newport M-PO80N nebo M-PO45N. Geometrie vtisků je definována zátěžnou silou, působící na vzorek během procesu vyrážení. Tato síla se pohybuje v rozmezí od 0,1 až 80N a je měřena přiřazeným tenzometrickým snímačem HBM-C9B. Maximální zatížení vzorku 80N je dáno maximálním zatížením aretace polohovacího stolku a maximálním silovým zatížením snímače 100N.



Obr. 43 Realizace mikrostruktur

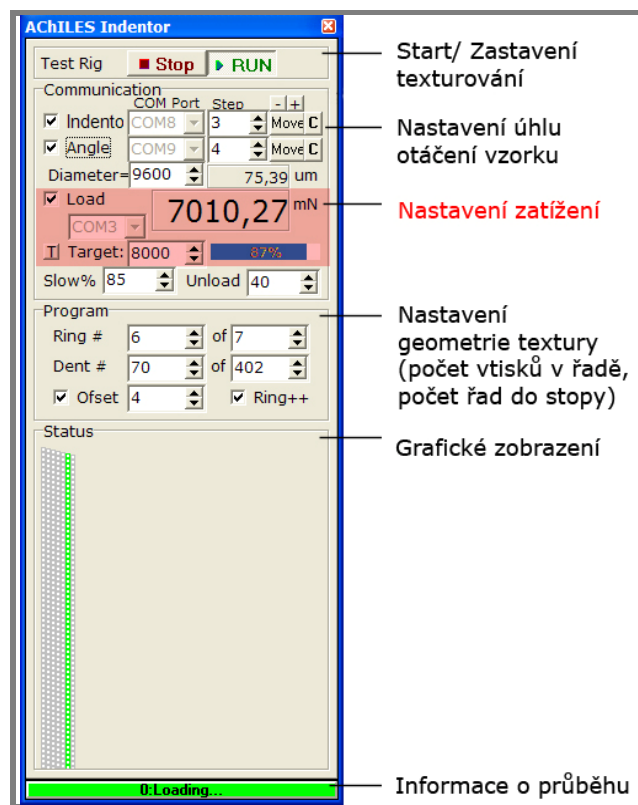
V průběhu řešení disertační práce bylo potřeba upravit upínání tenzometrického snímače k indentoru a zároveň navýšit možné zatížení vzorku. Toho bylo docíleno nákupem tenzometrického snímače s oboustranným závitem HBM-U9B, který umožňuje měření zatížení až 200N (Obr. 44).



Obr. 44 Tenzometr HBM-U9B

Popis řídicího software

Pro účely vytváření různých typů struktur na třecích površích byla vytvořena jednoduchá softwarová aplikace, umožňující celkovou kontrolu nad procesem tvorby textury. Aplikace je implementována v jazyce Delphi a je určena pro operační systém Windows. Provádět lze nastavení úhlu otáčení vzorku, krok horizontálního posuvu indentoru, počet vtisků v řadě a počet řad ve stopě. Dále lze nastavit zatěžující sílu a horizontální posuv vzorku (Obr. 45).

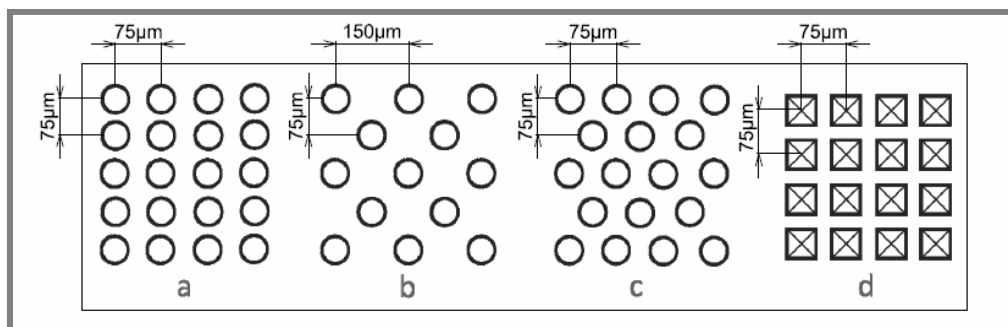


Obr. 45 Řídicí software pro tvorbu mikrostruktur

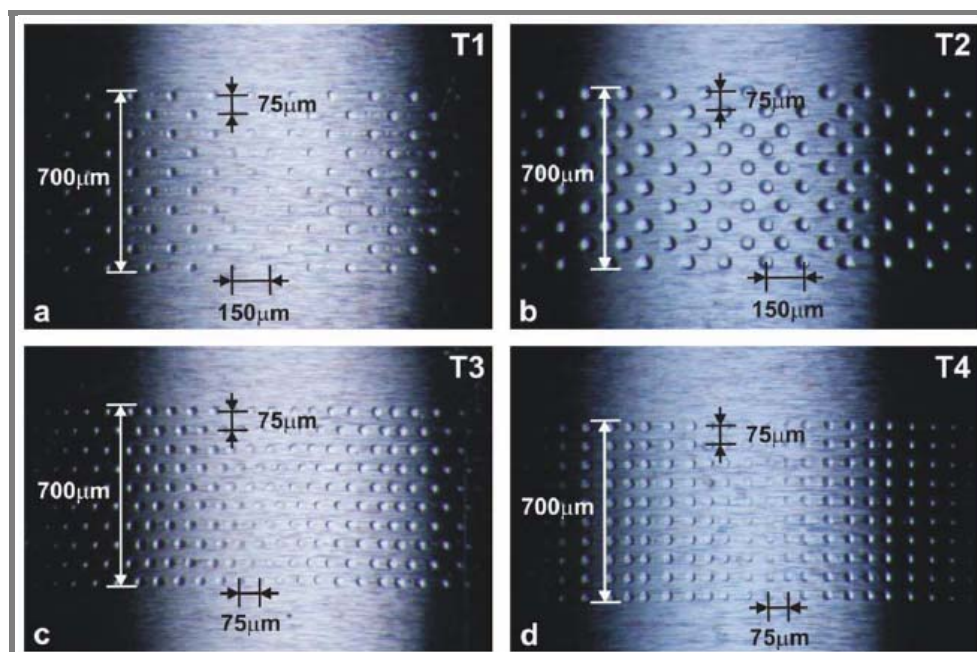
5.1.1 Geometrie struktur

5.1.1

Pro realizaci experimentů byly zvoleny koncepty textury na obr. 46. Rozměry mezi vtisky byly voleny 75 μm mezi vtisky, 75 μm a 150 μm mezi řadami, průměr jednotlivých vtisků byl variabilní v závislosti na zátěžné síle. Pro úvodní testy byl průměr vtisku stanoven na 35 μm a 65 μm , což odpovídá zátěžné síle 8N a 20N v daném pořadí. Obrázek 47 pak ukazuje realizovanou modifikaci povrchu vzorku. Z důvodu vysoké časové náročnosti tvorby vtisků, nebyl texturován celý povrch zkušebních vzorků, ale pouze jednotlivé úseky (stopy), odpovídající velikosti kontaktní oblasti [70]. V tabulce 1 jsou uvedeny základní rozměry (parametry), charakterizující jednotlivé koncepty povrchových textur.



Obr. 46 Koncepty struktur vtisků



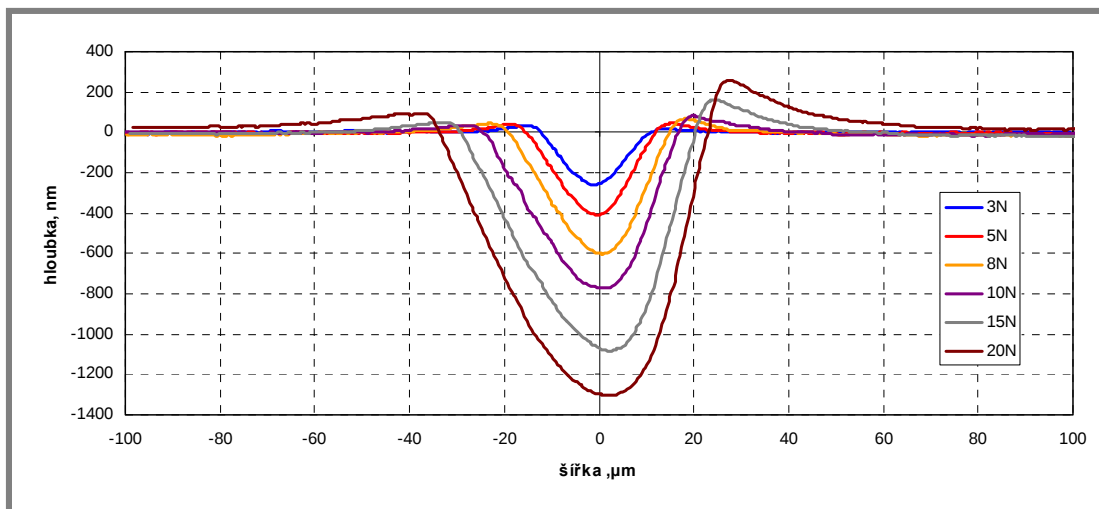
Obr. 47 Reálná struktura - soustavy vtisků [64]

Tab. 1: Parametry textur

	Bez textury	Textura 1 (T1)	Textura 2 (T2)	Textura 3 (T3)	Textura 4 (T4)
RMS (μm)	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Průměr vtisku (μm)	-	35	65	35	35
Hloubka vtisku (μm)	-	0.6	1.45	0.6	0.6
Tvar textury (hustota)	-	trojúhelníková (nízká)	trojúhelníková (nízká)	trojúhelníková (vysoká)	čtvercová (vysoká)

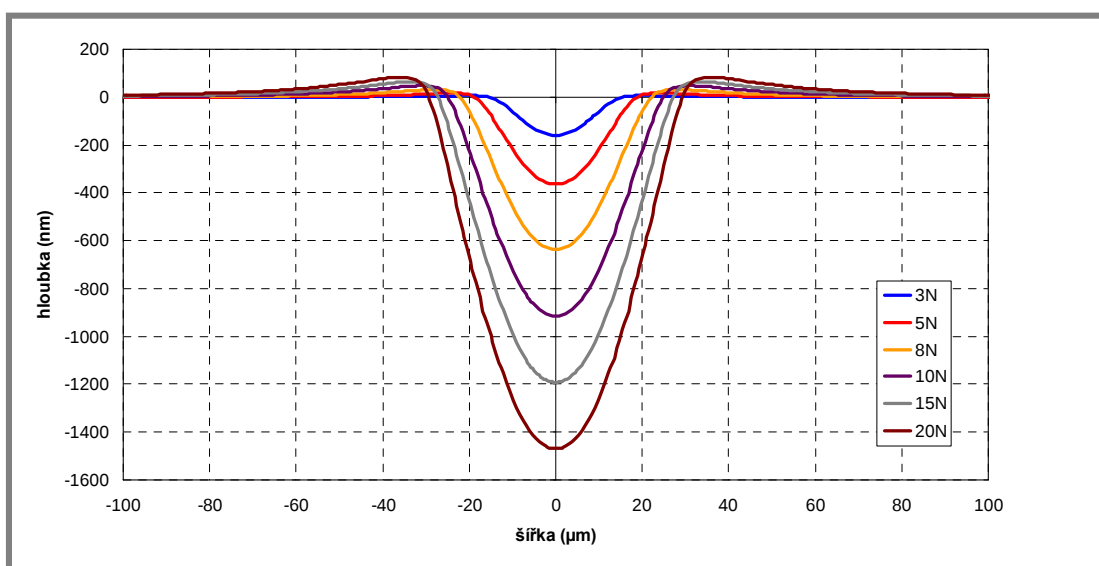
Pro stanovení geometrie jednotlivých vtisků v návaznosti na zatěžující sílu bylo provedeno experimentální měření hloubek vtisků při odlišných zatíženích (Obr. 48). Získání a vyhodnocení geometrie jednotlivých vtisků probíhá v několika krocích. Ze vzorku je pomocí digitální CCD kamery zaznamenáno několik interferenčních obrazců kontaktní oblasti. Vzdálenosti měřené plochy a referenčního zrcadla jsou posunuty o 68 nm pro každý snímek. Z výsledných snímků poté vyhodnocujeme geometrii jednotlivých vtisků. Na základě těchto měření byly definovány hodnoty zatížení s příslušnými hodnotami hloubek a průměrů vtisků.

Pro porovnání byly provedeny i numerické výpočty celého zatěžovacího procesu (Obr. 49). Ty potvrdily správnost a shodu s experimentálním měřením. Na jejich základě tedy bylo možné stanovit rozměry vtisků k libovolným silovým zatížením.



Obr. 48 Geometrie vtisku pro různé zatěžovací síly (naměřené hodnoty)

K získání potřebných dat ze snímaných interferogramů byla zvolena pokročilá Schwider-Hariharanova pěti-snímková metoda [72, 73]. Pro tuto metodu je charakteristická malá citlivost na chyby způsobené nesprávným fázovým posunem a dalšími vlivy. Jednotlivé hodnoty fázových posunů byly: $\{0\pi, 1/2\pi, \pi, 3/2\pi, 2\pi\}$.



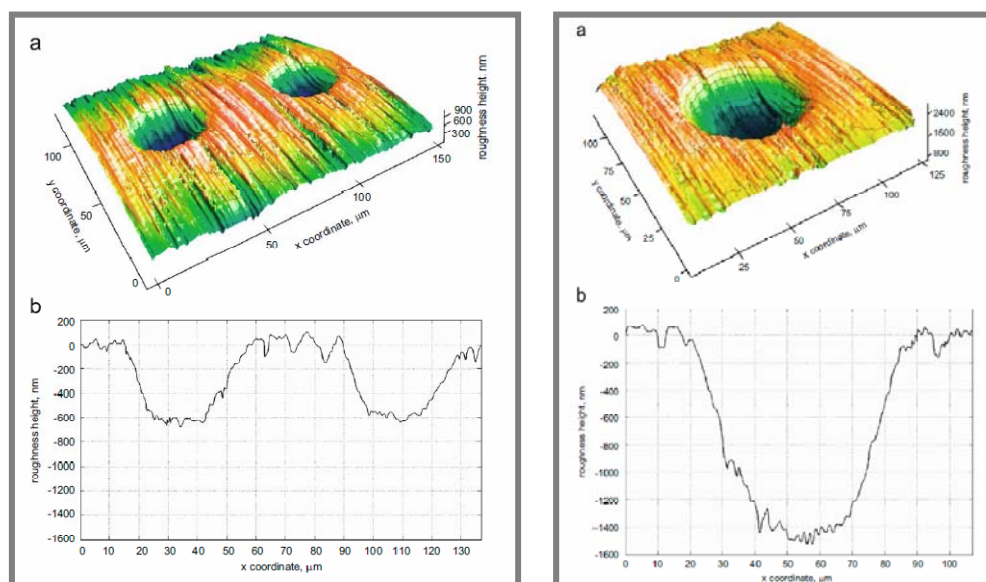
Obr. 49 Geometrie vtisku pro různé zatěžovací síly (numerický model)

Tab. 2: Parametry geometrie vtisků

Zatížení	Naměřené		Numerický model	
	hloubka (μm)	průměr (μm)	hloubka (μm)	průměr (μm)
3N	0,26	28	0,16	31
5N	0,41	33	0,36	38
8N	0,6	35	0,63	48
10N	0,77	47	0,9	54
15N	1,08	57	1,19	60
20N	1,35	65	1,47	68
40N	4,15	90	4,2	90

Odchyšky mezi měřenými a modelovanými hodnotami geometrie jednotlivých vtisků se pohybují v rozmezí 0,03 až 0,12 μm . Tyto odchyšky jsou zanedbatelné a nemají přílišný vliv na přesnost metody. Z předchozích obrázků (Obr. 48, 49) je patrné, že s narůstajícím silovým zatížením na vtisk, dochází ke vzájemnému přiblížení měřených a modelovaných hodnot. Tento trend lze pozorovat i v tabulce 2. Příslušné hodnoty lze tedy brát za korektní a směrodatné. Stejně tak i numerický model lze využít pro výpočet dalších parametrů geometrie textur, díky jeho dobré shodě s experimentálně získanými daty.

Pro srovnání dosažených výsledků byla geometrie vtisků měřena pomocí další metody – interferometrie s řízenou změnou fáze (Phase shifting interferometry – PSI) (Obr. 50) [64]. Jedná se o bezkontaktní optickou metodu poskytující vysoce přesná a rychlá měření topografie povrchu. Tato metoda využívá monochromatického svazku světla, který prochází soustavou čoček a clon, odráží se od polopropustného zrcadla k děliči svazku. Zde se paprsek rozděluje, jedna jeho část je nasměrována k referenčnímu povrchu a druhá k měřenému povrchu. Odražené paprsky putují zpět do objektivu, kde spolu interferují. Výsledný interferogram je snímán digitální CCD kamerou a zpracováván počítačem.



Obr. 50 Povrchová textura T1 a T2, a) 3D profil b) 2D profil ve směru x [64]

Výsledky z měření touto metodou rovněž prokázaly dobrou shodu s předchozími měřeními a potvrdily tak jejich relevanci.

5.2 Testy kontaktní únavy

Ke studiu cíleně modifikovaného třecího povrchu lze přistupovat dvěma základními způsoby. Prvním je studium vtisků jako zásobníků maziva, které napomáhají dodávat mazivo do kontaktu v případě jeho nedostatku (rozběh, doběh). Druhým způsobem je studium vtisků jako potenciálních koncentrátorů napětí a jejich vliv na kontaktní únavu. S přítomností nerovnosti v mazaném kontaktu dochází k nárůstu tlaku a tvorbě tlakových špiček na okrajích vtisků, které mohou vést až

k porušení součásti a jejímu vyřazení z provozu. Z toho důvodu bylo přistoupeno ke studiu vlivu textur na třecích površích na kontaktní únavu. Testy byly prováděny vždy do výskytu poškození pittingem, přičemž sledován byl čas do porušení součásti. Ze známých parametrů experimentu pak bylo snadné dopočítat počet cyklů do porušení. Během zkoušek se na vzorku snímaly vibrace, pokud došlo k překročení předem stanovené limitní hodnoty vibrací, experiment byl automaticky zastaven. Zkoušky byly prováděny za podmínek smíšeného (částečného EHD) mazání při čistém valení, 5% a 10% prokluzu. Výsledky byly následně porovnány se zkouškami s nemodifikovanými vzorky.

5.2.1 Příprava vzorku pro experiment

5.2.1

Vzorky mají velmi dobré povrchové vlastnosti, vysokou pevnost. Jejich tvrdost se pohybuje okolo 60-66 HRC. Během některých experimentů byl povrch vzorku před měřením leštěn. Vzorky byly následně opatřeny vtisky a podrobeny testům kontaktní únavy.

Tab. 3: Chemické složení oceli AISI 52100

Legovací složky (%)	
C	0.95 – 1.10
Si	0.15 – 0.35
Mn	0.25 – 0.45
Cr	1.35 – 1.65
Přípustné nečistoty (max %)	
P	0.03
S	0.025

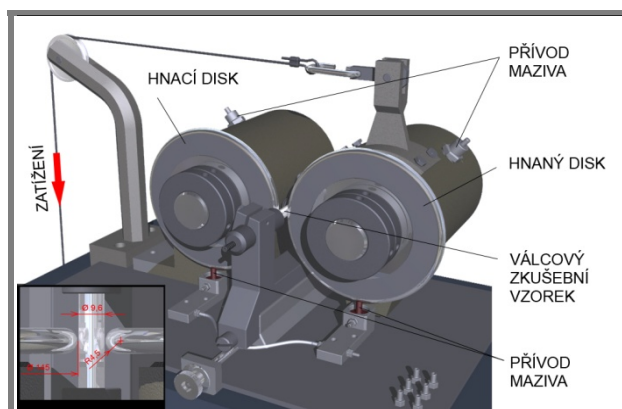
5.2.2 Experimentální zařízení R-Mat

5.2.2

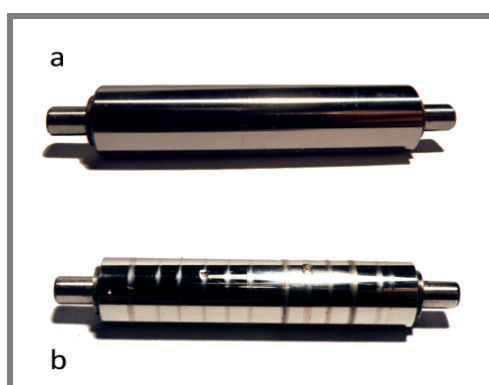
Chování cílené modifikace topografie za reálných podmínek vyskytujících se v tribologických soustavách bylo studováno s využitím simulátoru R-Mat (Obr.50). Simulátor je sestaven ze dvou disků, z nichž jeden je poháněn elektromotorem, druhý je hnaný. Zkušební vzorek je umístěn mezi disky a přitlačnou silou je zatížen. Tuto sílu lze přesně regulovat pomocí přídavného závaží. Poháněný disk byl mazán a svým pohybem přenášel mazivo do celé soustavy [70].

Parametry měření na simulátoru R-Mat lze nastavit tak, aby vznikly podmínky smíšeného (částečného EHD) mazání. Během zkoušek byly na vzorku snímány vibrace, pomocí nichž byl monitorován celý průběh experimentu. Jednotlivá měření byla ukončena při prvních projevech poškození povrchu (pitting).

Zkoumaným vzorkem byla hřídel (váleček) o průměru 9,6 mm, vyrobená z oceli AISI 52100 (ekvivalent ČSN 14 109, 100Cr6, DIN W.13505) se střední aritmetickou úchylkou profilu Ra 0,1 μm (Obr.51). V experimentu byly použity disky z oceli AISI 52100, jejichž průměr byl 145 mm a poloměr zaoblení v ose kolmé na osu otáčení 4,5 mm. Ze známých parametrů experimentu lze potom snadno určit počet cyklů do porušení zkušebního vzorku.



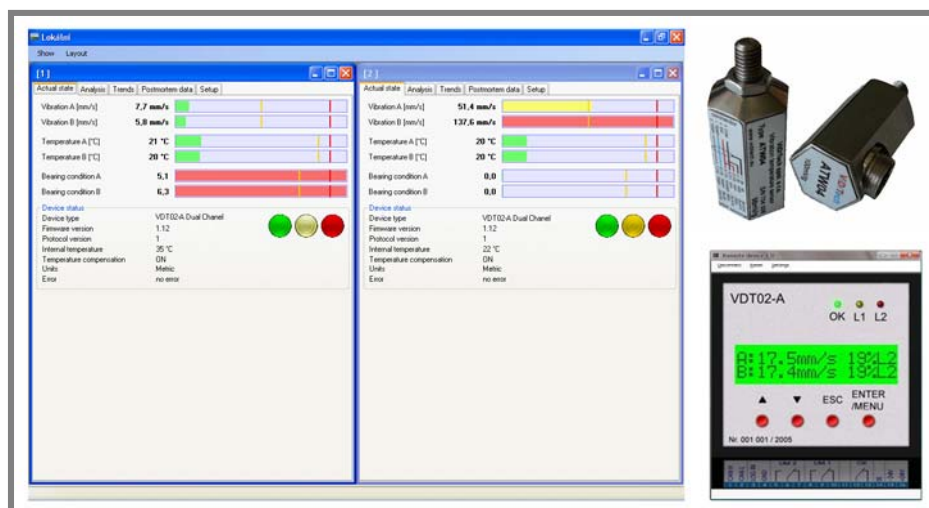
Obr. 50 Experimentální zařízení R-Mat [70]



Obr. 51 Zkušební vzorky: a) před RCF testy
b) po RCF testech

5.2.3 Monitorování průběhu experimentu

S přítomností nerovnosti na třecím povrchu v kontaktu dochází k nárůstu vibrací celé soustavy. Tyto vibrace jsou vyvolány i vzniklým povrchovým poškozením. Z toho důvodu se na vzorcích monitorovaly vibrace. Při překročení kritické hladiny vibrací došlo k automatickému zastavení experimentu, vzorek byl vyjmut z testovacího zařízení a byla na něm vyhodnocena míra poškození a počet cyklů do porušení. Kritická hladina vibrací byla stanovena experimentálně. K monitorování bylo využito komplexního řešení Viditech, umožňující online kontrolu měřicího procesu (Obr.52).



Obr. 52 Software, snímače a ovladač Viditech pro monitorování experimentu [74]

5.3 Metodický postup experimentální metody

5.3

Postup jakým lze experimentální metodu charakterizovat reflektuje předchozí kapitoly a doplňuje je o další kroky. V následujících bodech je uveden celý metodický postup při přípravě, realizaci, měření a vyhodnocení přítomnosti cílené modifikace topografie na třecích površích vzorků.

▪ *Příprava vzorku*

Zde se jedná především o čištění povrchu vzorku, pro odstranění nečistot. Případně je před tímto krokem vzorek ještě povrchově upravován (leštění) pro snížení jeho střední aritmetické úchytky profilu a ke snížení mazacího režimu soustavy.

Parametry vzorku - hřídel:

Poloměry zaoblení: $R_{21} = 4,8 \text{ mm}$, $R_{12} = \infty \text{ mm}$

Modul pružnosti: $E = 190959 \text{ MPa}$

Poissonův poměr: $\mu = 0,3$

▪ *Sestavení texturovacího zařízení*

Texturovací zařízení je nutné sestavit pro konkrétní využití. Sestavení se liší pro texturování hřídelů nebo kuličky. V obou případech je třeba částečně rozebrat a přestavět celé zařízení. Zachován je pouze stend konvenčního mikroskopu Nikon.

▪ *Realizace textury*

Následně je třeba v softwarovém rozhraní nastavit parametry požadované textury a zajistit správné přepočty hodnot posuvů krokových motorů a lineárního motorizovaného posuvu. Realizace je prováděna automaticky, bez potřeby zásahu uživatele. Nicméně je doporučeno celý proces kontrolovat a zamezit tak případným potížím.

- **Čištění, doleštění vzorku**

Po vlastní realizaci textur je v některých případech vzorek opět čištěn, popřípadě znovu leštěn pro odstranění přetečeného materiálu po vytváření textury.

- **Příprava experimentálního zařízení R-Mat**

Příprava zařízení R-Mat spočívá v optické kontrole funkčnosti zařízení, v kontrole kontaktních povrchů zátěžných disků. Při výskytu povrchového poškození na discích je třeba je vyměnit. Provádí se rovněž kontrola funkčnosti snímačů vibrací. Před experimentálním měřením se rovněž nastavuje kritická hodnota hladiny těchto vibrací.

Parametry zátěžných Disků:

Poloměry zaoblení: $R_{11} = 72,5 \text{ mm}$, $R_{12} = 4,5 \text{ mm}$

Modul pružnosti: $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$

Poissonův poměr: $\mu = 0,3$

- **Realizace RCF testů**

Vzorek je upnut a umístěn do zařízení mezi zatěžující disky. Průběh RCF testů na experimentálním zařízení R-Mat je kontrolován snímáním vibrací na vzorku. Při překročení předem stanovené kritické hodnoty vibrací je měření automaticky ukončeno. Na vzorek je aplikováno zatížení 933,9 N což odpovídá Hertzovu kontaktnímu tlaku 5 GPa.

- **Vyhodnocení měření**

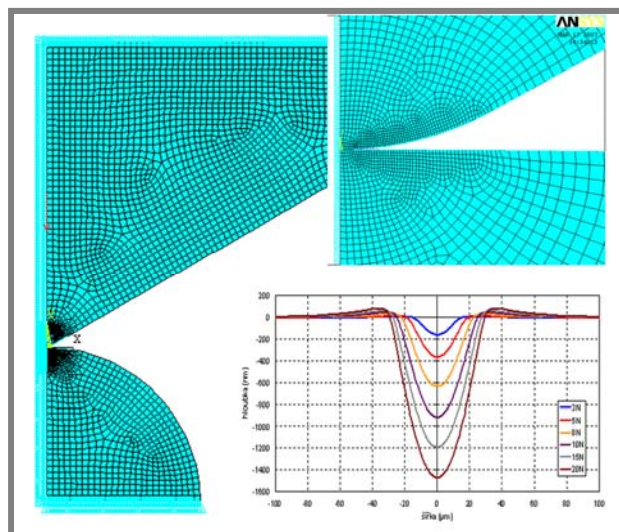
Po ukončení měření je vzorek vyjmut ze zařízení a je na něm vyhodnocena míra jeho poškození. Sledována je doba měření do výskytu povrchového poškození. Ze známých parametrů je posléze dopočítán počet cyklů do porušení vzorku (kontaktní stopy) z něj může následně být posuzována kontaktní únavová životnost vzorku.

5.4 Numerický model

Numerický výpočet byl proveden pro simulaci texturovacího procesu a získání profilů jednotlivých vtisků v závislosti na zatěžující síle, zároveň byla provedena simulace a výpočet kontaktního zatížení v zařízení R-Mat. Vše bylo provedeno pomocí software ANSYS.

5.4.1 Geometrie vtisků

Vzhledem k tomu, že se jednalo o symetrickou úlohu, byly pro model využity prvky typu: PLANE82, TARGET169 a CONTACT172. Modelován byl samostatný vtisk vnikacího tělíska s diamantovým hrotem do ocelového zkušební vzorku (Obr. 53). Získanými výsledky byly hodnoty posuvů (deformací) v jednotlivých bodech geometrie vtisku. Z těchto hodnot pak bylo možné sestavit profil výsledného vtisku.



Obr. 53 Model texturovacího procesu

Tab. 4: Parametry výpočtu

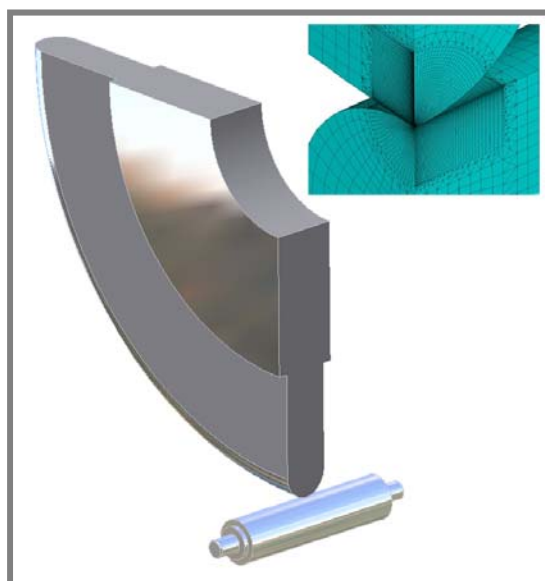
Indentor		vzorek	
Modul pružnosti E (MPa)	Poissonův poměr	Modul pružnosti E (MPa)	Poissonův poměr
$9 \cdot 10^5$	0,2	190959	0,3

Plasticita materiálu vzorku byla do modelu implementována pomocí hodnot, získaných z tahových diagramů vzorků.

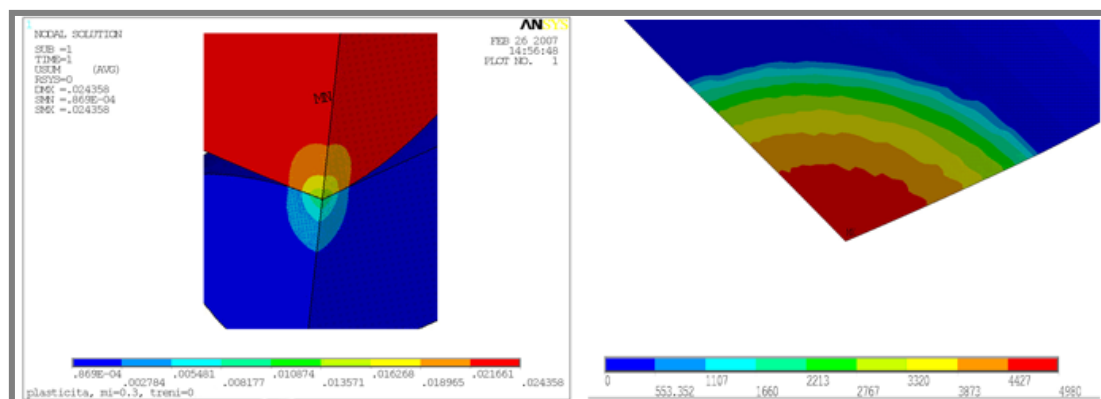
5.4.2 Kontaktní zatížení

5.4.2

Modelováno bylo i kontaktní zatěžování válcového vzorku v experimentálním zařízení R-Mat. Kontakt byl tvořen mezi dvěma tělesy, diskem a hřídelí (vzorkem) (Obr. 54).



Obr. 54 Model zatížení v zařízení R-Mat



Obr. 55 Celkové deformace kontaktu, celkový kontaktní tlak

Podobně jako v předchozím případě byla plasticita materiálu zavedena ve formě hodnot, získaných z tahových diagramů oceli 14 109. Vyhodnocován byl celkový kontaktní tlak, jehož hodnota byla 4,9GPa. To odpovídá i experimentálnímu nastavení zařízení. V tomto numerickém modelu byly sledovány i další parametry kontaktu, jak např. maximální deformace (Obr. 55a).

Prioritní však bylo modelování texturovacího procesu a jeho následné zpracování k získání profilů jednotlivých vtisků. Tím bylo možné zjistit profil vtisku pro konkrétní zatěžovací sílu a lépe tak definovat a kontrolovat celkovou geometrii výsledné soustavy vtisků.

6 VÝSLEDKY VSTUPNÍCH EXPERIMENTŮ

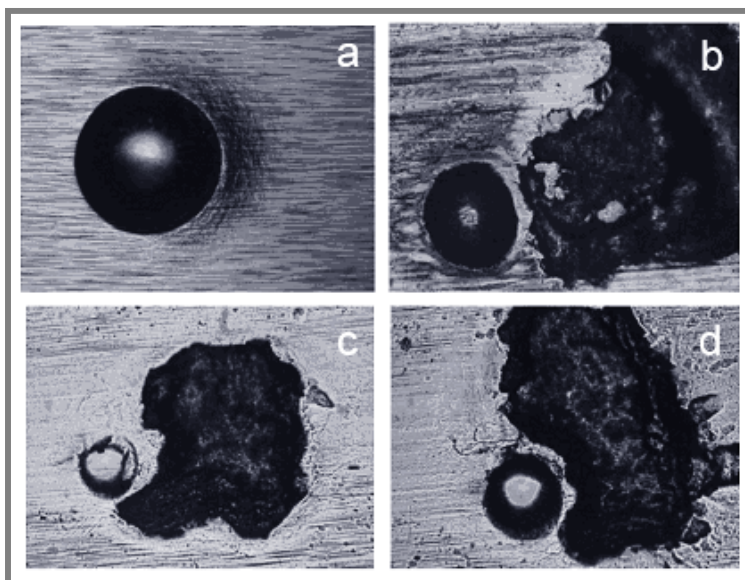
6

Pro popis realizovaných experimentů s cíleně modifikovanými povrchy byly použity výsledky měření, které realizoval a zpracoval M. Vrbka z Ústavu konstruování VUT FSI v Brně. V následující kapitole je uvedeno shrnutí vstupních experimentů s jejich vyhodnocením. Vliv textur na funkci mazaného kontaktu je pak posuzován na základě těchto výsledků.

6.1 Testy s jednotlivými vtisky v kontaktní stopě

6.1

V úvodních experimentech byla cílená modifikace topografie realizována pomocí jednotlivých vtisků v kontaktní stopě. Tyto experimenty sloužily především k odladění aparatury a k experimentálnímu zjištění vztahu zatěžující síly a geometrie (hloubka, průměr) vtisku. Posuzován byl dále vliv těchto vtisků na kontaktní únavovou životnost vzorku [73].



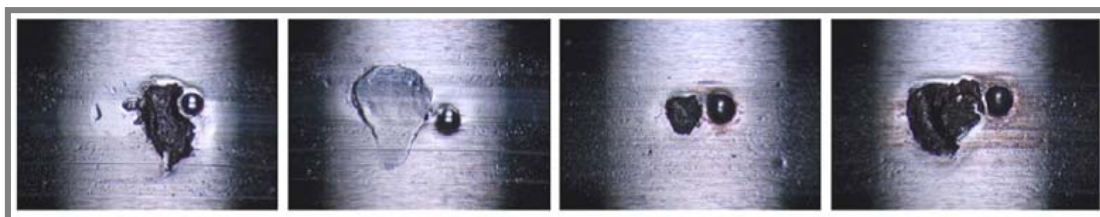
Obr. 56 a) Geometrie vtisku, b) – d) vzniklá poškození [73]

Během první série vstupních experimentů byly uvažovány především hluboké vtisky, přičemž v jedné kontaktní stopě byl vytvořen vždy jeden vtisk. Dále pak byla provedena měření se změnou provozních podmínek, a to především porovnání chování modifikované topografie třecích povrchů za podmínek čistého valení a za podmínek s prokluzem. Na Obr. 56a je zobrazena geometrie vtisku před zatížením v kontaktní stopě. Průměr vtisku $45\text{ }\mu\text{m}$ a dosažená hloubka $4\text{ }\mu\text{m}$. Obr. 56b-d potom ukazuje vzniklá porušení pittingem. Experimenty byly provedeny za podmínek čistého valení při kontaktním tlaku $4,9\text{ GPa}$. Následně byl určen počet cyklů do porušení vzorku. Pro statistické vyhodnocení výsledků byl využit parametr medián. Počet cyklů do porušení modifikovaného vzorku byl $2,9 \times 10^8$ cyklů při čistém valení. Poškození vznikalo vždy v bezprostřední blízkosti vtisků [73].

Druhou sérii experimentů tvořily testy vzorků s vtisky o hloubce 20 μm , 4 μm a 2 μm . Všechny tyto případy lze vzhledem k povrchovým nerovnostem vzorku označit za hluboké vtisky. Střední aritmetická úchylka profilu RMS vzorku byla 0,1 μm . Testy byly provedeny za dvou podmínek: kontaktní tlak 5GPa podmínek čistého valení a kontaktní tlak 3,9GPa při prokluzu $\Sigma = 0,2$. Za podmínek čistého valení se disky i zkušební vzorek pohybovaly rychlostí 4,5 m/s. Při prokluzu docházelo ke zpomalení rychlosti zkušebního vzorku na 3,57 m/s, rychlost otáčení disků zůstávala stejná, tedy 4,5 m/s. Vtisky o hloubce 20 μm byly testovány za podmínek čistého valení. Jako mazivo byl použit minerální základový olej RENOLIN MA22 s dynamickou viskozitou 0,021Pa·s a tlakově-viskózním koeficientem 15GPa⁻¹. Testy byly provedeny za podmínek smíšeného mazání při teplotě 33°C.

Pro možnost srovnání byly provedeny testy na vzorcích nepopatřených vtisky. Při kontaktním tlaku 5GPa došlo k poškození po $1,4 \times 10^8$ cyklech.

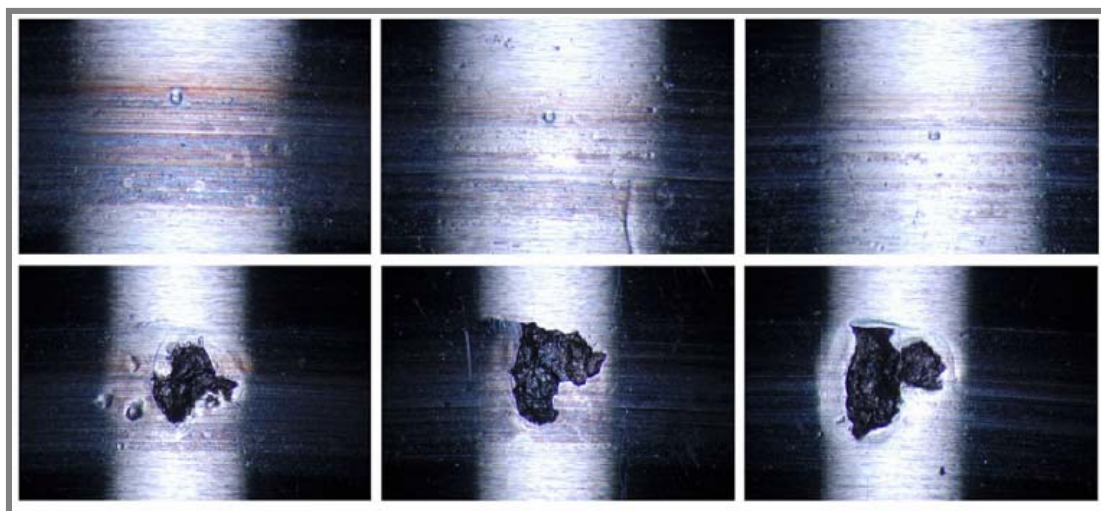
Vrbka a kolektiv poté provedli testy vzorků za podmínek čistého valení s vtisky o hloubce 20 μm [63]. Kontaktní únavová životnost vzorků byla v tomto případě redukována na 5×10^6 cyklů, přičemž ve všech případech došlo k poškození povrchu vzorku pittingem (Obr. 57).



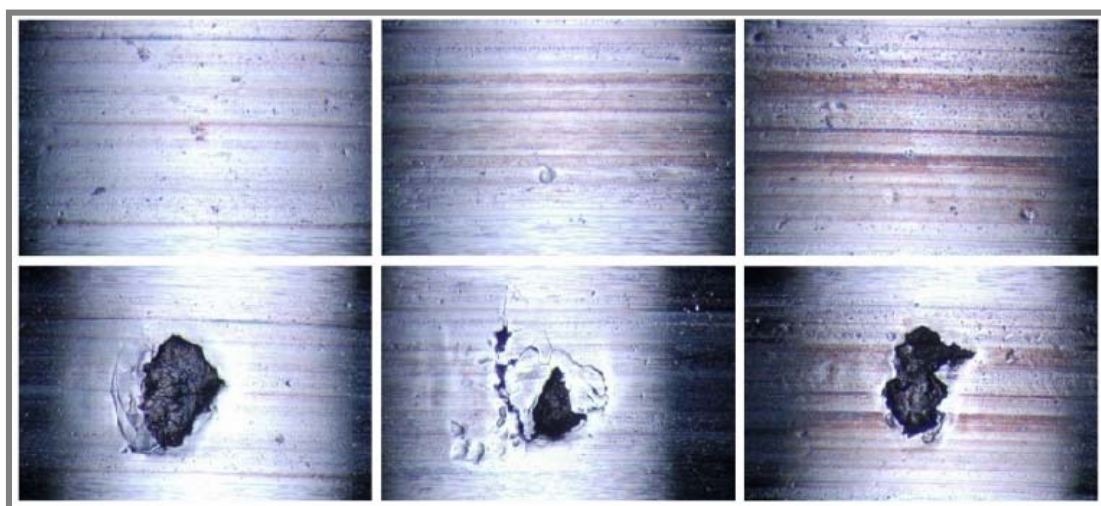
Obr. 57 Poškození na povrchu vzorku s vtisky o hloubce 20 μm po 5×10^6 cyklech; čisté valení; kontaktní tlak 5GPa [63]

Na obrázku lze rovněž pozorovat místo výskytu poškození, to se nacházelo v bezprostřední blízkosti vtisku ve směru valení. Svým rozsahem pak bylo průměrně 2x až 6x větší než samotný vtisk a pokrývalo tak celou kontaktní oblast. Přítomnost vtisků v tomto případě významně ovlivnila iniciaci a propagaci poškození a snížila tak kontaktní únavovou životnost třecího povrchu.

Pro další srovnání Vrbka testoval vzorky s vtisky o hloubce 4 μm a 2 μm . Provozní podmínky byly zachovány stejné, tedy smíšené mazání a kontaktní tlak 5GPa. K poškození povrchu docházelo na různých místech kontaktních stop, nezávisle na vtiscích (Obr. 58, 59). Na obrázcích jsou zobrazeny vtisky po ukončení testů a vzniklá poškození, příslušející jednotlivým kontaktním stopám. Počet cyklů do porušení se během těchto testů pohyboval v rozmezí $3,5 \times 10^7$ až $4,5 \times 10^8$ [63].



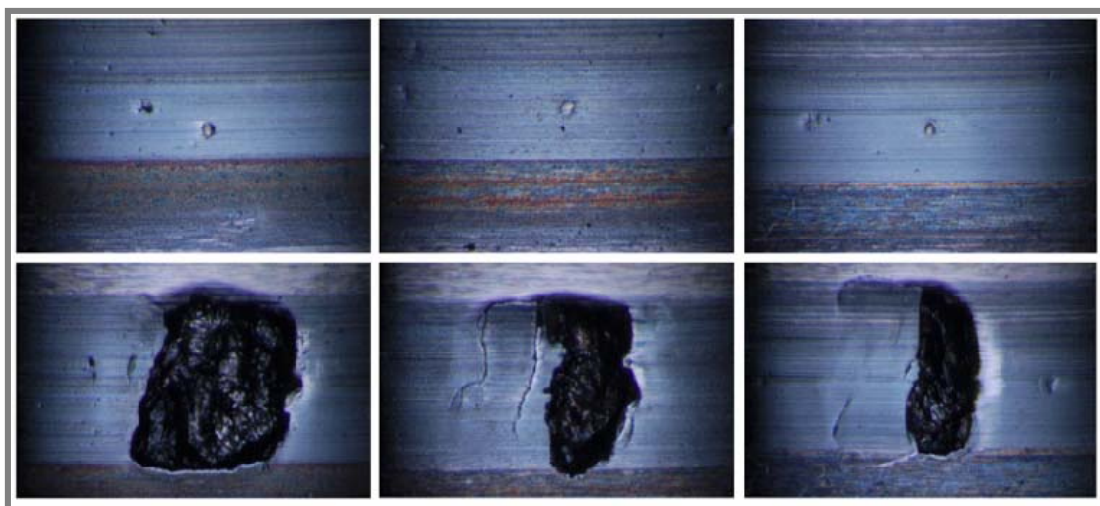
Obr. 58 Poškození na povrchu vzorku s vtisky o hloubce 4 μ m; čisté valení; kontaktní tlak 5GPa [63]



Obr. 59 Poškození na povrchu vzorku s vtisky o hloubce 2 μ m; čisté valení; kontaktní tlak 5GPa [63]

Ze získaných výsledků je zřejmé, že vtisky o hloubce 4 μ m a 2 μ m nemají podstatný vliv na tvorbu resp. iniciaci poškození třecího povrchu kontaktní únavou. Vtisky je zde možné charakterizovat jako běžné povrchové nerovnosti vzniklé provozem součástí. Jejich funkce neovlivňuje chování mazacího filmu v kontaktu ani samotného třecího povrchu. Během testů vždy došlo k porušení povrchu pittingem, přičemž velikost poškozené plochy byla srovnatelná s šířkou kontaktní stopy.

Tyto testy byly prováděny za podmínek čistého valení, proto se přistoupilo k ověření chování modifikovaného povrchu za podmínek 0,2 prokluzu. Kontaktní tlak byl snížen na 3,9GPa. Povrch vzorků byl opatřen vtisky o hloubce 4 μ m. Jak ukazuje obrázek 60 i v tomto případě došlo k významnému poškození povrchu vzorků pittingem. Toto poškození se stejně jako v předchozím případě nenacházelo v okolí vtisků. Došlo však k výraznému snížení kontaktní únavové životnosti. Projevy porušení povrchu byly pozorovány již po 2×10^7 cyklech.

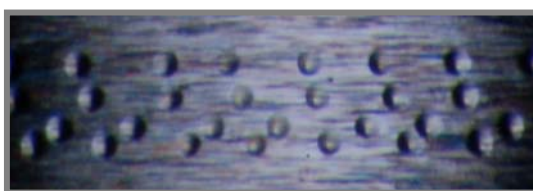


Obr. 60 Poškození na povrchu vzorku s vtisky o hloubce $4\mu\text{m}$; prokluz $\Sigma=0,2$; kontaktní tlak $3,9\text{GPa}$ [63]

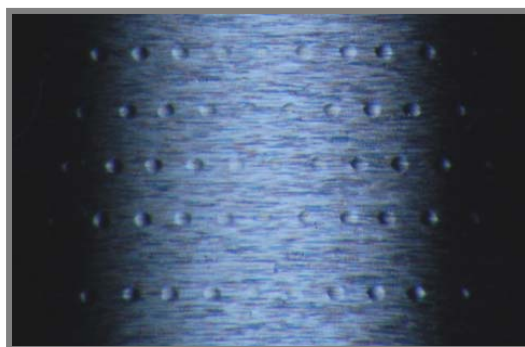
Testy prokázaly, že vtisky o relativně malých rozměrech (hloubka $2\mu\text{m}$ a $4\mu\text{m}$) nemají významný negativní vliv na celkovou kontaktní únavovou životnost třecích povrchů součástí. Zároveň potvrdily, že je třeba popsat chování texturovaného povrchu v zatíženém kontaktu. Na základě těchto experimentů byla stanovena geometrie jednotlivého vtisku, která sloužila jako reference pro tvorbu textur.

6.2 Testy s texturami v kontaktní stopě

Úvodní experimenty, zohledňující vliv mikrostruktur na kontaktní únavu sloužily především k odladění řídicího softwaru a k nalezení vhodného uspořádání soustavy vtisků. Pro tyto zkoušky bylo důležité odladit výslednou geometrii textury [70]. Bylo odzkoušeno několik programových nastavení, které umožnily tuto geometrii nastavit. Obrázek 61 zobrazuje jeden z úvodních testovacích nastavení geometrie textury. Lze si povšimnout, že toto uspořádání není ideální. Posléze se podařilo nastavení geometrie soustav vtisků realizovat dle požadovaných konceptů (Obr. 62). Tato textura představovala výchozí koncept pro úvodní experimenty.

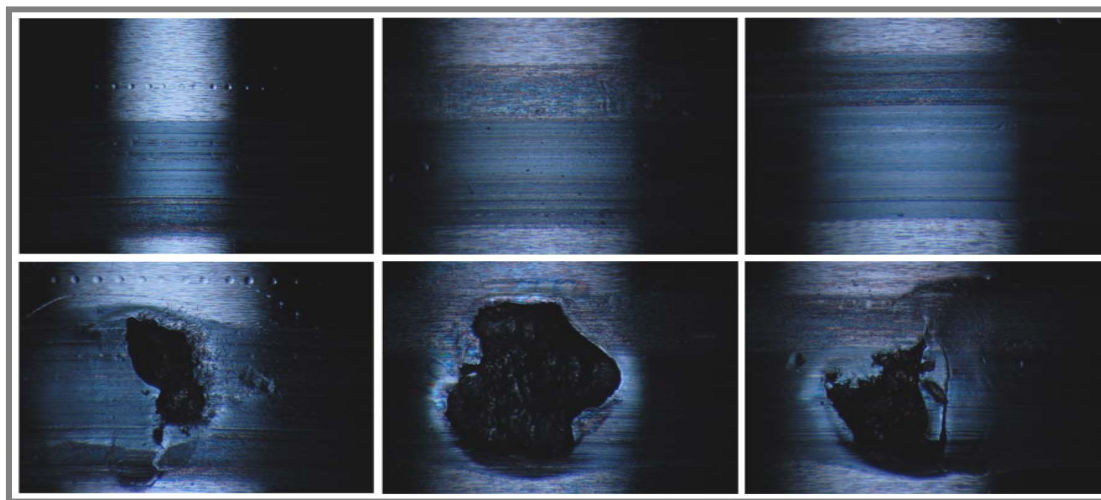


Obr. 61 Úvodní realizace textury na povrchu vzorku [70]



Obr. 62 Realizovaná textura na povrchu vzorku [70]

Na základě vstupních experimentů bylo provedeno několik ověřovacích zkoušek a posléze byla stanovena metodika vlastního procesu vyrážení. Hloubka jednotlivých vtisků byla v těchto experimentech $4\text{ }\mu\text{m}$. Vzorky byly opatřeny texturami o rozměrech $75\text{ }\mu\text{m}$ mezi jednotlivými vtisky a $150\text{ }\mu\text{m}$ mezi řadami. Průměr kontaktní oblasti byl $0,6\text{ mm}$, z toho důvodu bylo realizováno celkem 5 řad vtisků na jednu kontaktní stopu. Tím bylo zajištěno, že textura pokryje celý obsah kontaktní oblasti. Při umisťování vzorků do zkušebního simulátoru R-mat však došlo k nepřesnostem při nastavení kontaktu, proto v několika případech textura zasahovala mimo kontakt (viz Obr. 63). Z obrázku je rovněž patrná míra poškození třecího povrchu vzorku.



Obr. 63 Realizovaná textura na povrchu vzorku

Testy neprokázaly přílišnou změnu v kontaktní únavové životnosti vzorků, z toho důvodu byla naplánována další série experimentů za stejných provozních podmínek, která napomohla zhodnotit míru rizika únavového poškození třecích povrchů v závislosti na cílené modifikaci topografie.

Na základě dalších získaných výsledků jsou pak popsány a kvantifikovány jevy, vyskytující se v běžných podmínkách provozu strojních součástí.

7 VLIV CÍLENÉ MODIFIKACE TOPOGRAFIE TŘECÍCH POVRCHŮ NA PROJEVY POŠKOZENÍ KONTAKTNÍ ÚNAVOU

Výsledky měření a vyhodnocení poškození kontaktních stop byly získány M. Vrbkou a jsou v této disertační práci interpretovány. Na jejich základě je pak posuzován vliv cílené modifikace topografie na chování mazaného kontaktu. Ohled byl brán i na míru poškození jednotlivých kontaktních stop a místo výskytu únavového poškození. Následně pak byly posuzovány hypotézy funkce mikrostruktur v zatíženém kontaktu.

Pro sérii experimentů, provedené na Ústavu konstruování VUT FSI v Brně, byly použity komerčně dodávané ocelové vzorky (hřídele) se střední aritmetickou úchylnou profilu $R_a = 0,1 \mu\text{m}$. Pro některé experimenty bylo provedeno další leštění třecích povrchů vzorků z důvodu dosažení lepších vlastností těchto povrchů a změny režimu mazání. Vzorky byly opatřeny maticemi mikrovrtisků, dle stanovených konceptů vstupních experimentů. Mikrovrtisky byly vytvořeny za použití vnikacího tělíska Rockwell typu „C“. Během všech testů byl sledován počet cyklů do porušení vzorků.

7.1 Vyhodnocení experimentů

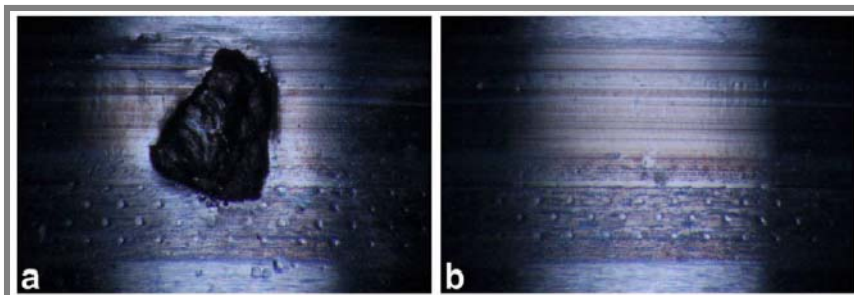
K vyhodnocení reálných textur jejich srovnání se stanovenými koncepty byla použita metoda optické interferometrie s řízenou změnou fáze, popsaná v předchozí kapitole.



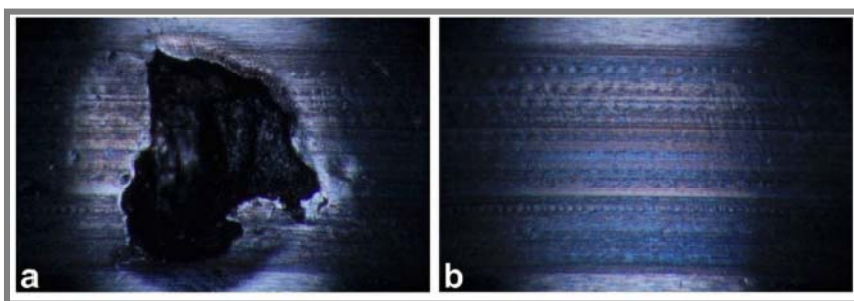
Obr. 64 Místo poškození vzorku

Obrázek 64 ukazuje vybrané výsledné poškození kontaktní stopy pittingem po ukončení zkoušky.

Jak uvádí Vrbka [63], pro další experimenty byla naplánována série testů s texturami T1 a T3 (viz kapitola 5) s mělkými vtisky o hloubce $0,6\text{ }\mu\text{m}$. Sledován byl počet cyklů do porušení vzorku. Kontaktní stopa po ukončení testu a výsledné kontaktní poškození je ukázáno na obrázcích 65 a 66.



Obr. 65 Výskyt poškození na vzorku T1 [63]



Obr. 66 Výskyt poškození na vzorku T3 [63]

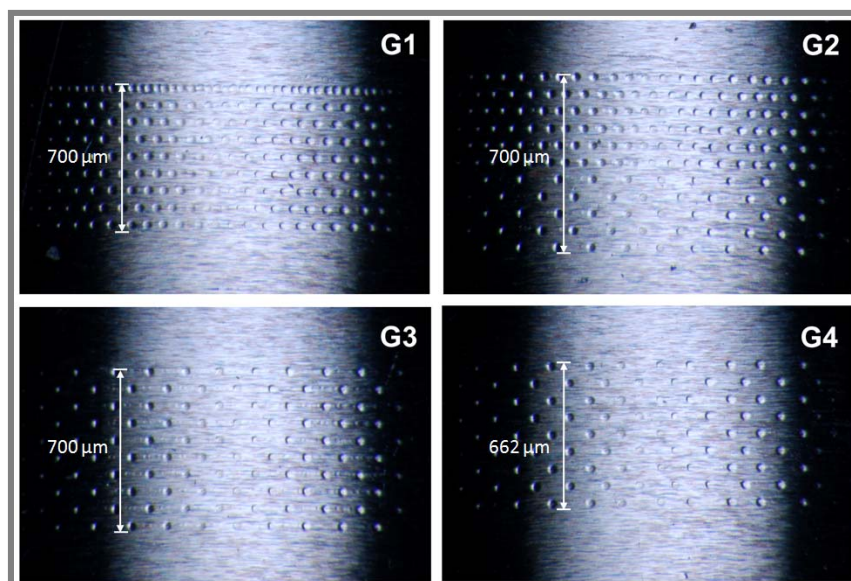
Testy neukázaly žádný výrazný negativní efekt použitých textur na snížení kontaktní únavové životnosti vzorku. Naopak prokázaly navýšení kontaktní únavové životnosti vzorku oproti netexturovaným vzorkům. Jednalo se o nárůst v počtu cyklů do porušení z $2,3 \times 10^6$ na $1,1 \times 10^7$.

Je tedy možné usoudit, že vhodně navržená povrchová textura může mít za konkrétních podmínek příznivý vliv na zvýšení kontaktní únavové životnosti součásti. Pro aplikaci a studium cílené modifikace topografie je však nutné zohlednit i režim mazání, provozní podmínky a použitou metodu vyrážení vtisků.

7.2 Vliv hustoty textury na RCF – mělké vtisky

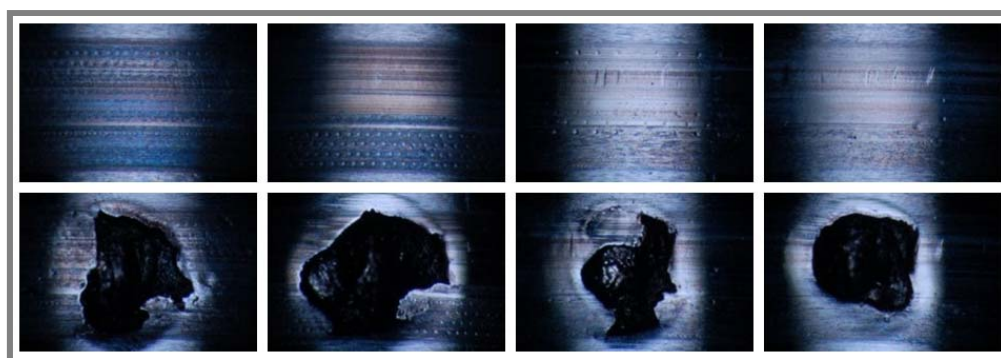
7.2

Jedním z dalších posuzovaných parametrů byla i hustota (geometrie) realizované povrchové textury. Zachováno bylo trojúhelníkové rozmístění vtisků, měnily se pouze vzdálenosti řad jednotlivých vtisků (Obr. 67). Pro porovnání byly provedeny testy RCF i na vzorcích bez povrchové úpravy. Míra vlivu hustoty textury na RCF životnost vzorku pak byla vyhodnocena vzhledem k netexturovaným vzorkům i vzhledem k různým typům hustot (Obr. 67 G1 – G4) [65].

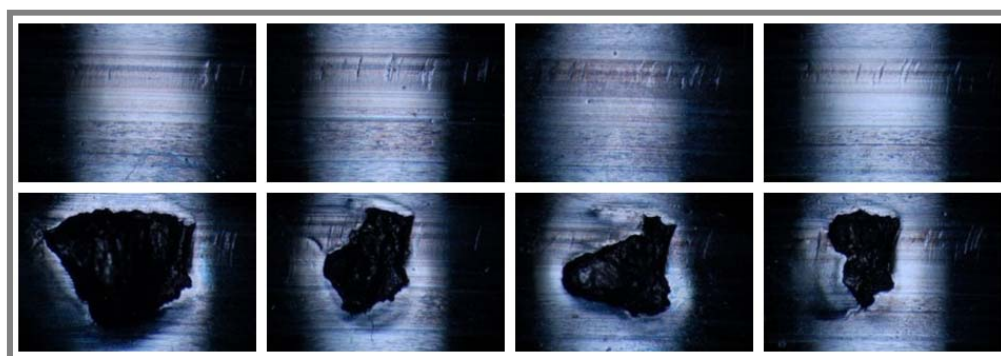


Obr. 67 Povrchové textury – vliv hustoty

Pro realizaci povrchové textury bylo použito zatížení 8N, což odpovídá hloubce vtisku $0,6 \mu\text{m}$ a průměru $35 \mu\text{m}$. Texturovaná šířka měřicí stopy byla $700 \mu\text{m}$ pro textury G1 až G3 a $662 \mu\text{m}$ pro texturu G4. Zatěžující síla kontaktu na zařízení R-Mat byla $971,19\text{N}$, které odpovídá hodnotě Hertzova kontaktního tlaku $4,98\text{GPa}$ a průměru kontaktní oblasti $0,61 \text{ mm}$. Testy byly prováděny za podmínek smíšeného mazání při rychlostech povrchu disků $4,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a vzorku $3,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což odpovídá hodnotě prokluzu $\Sigma = 0,05$.

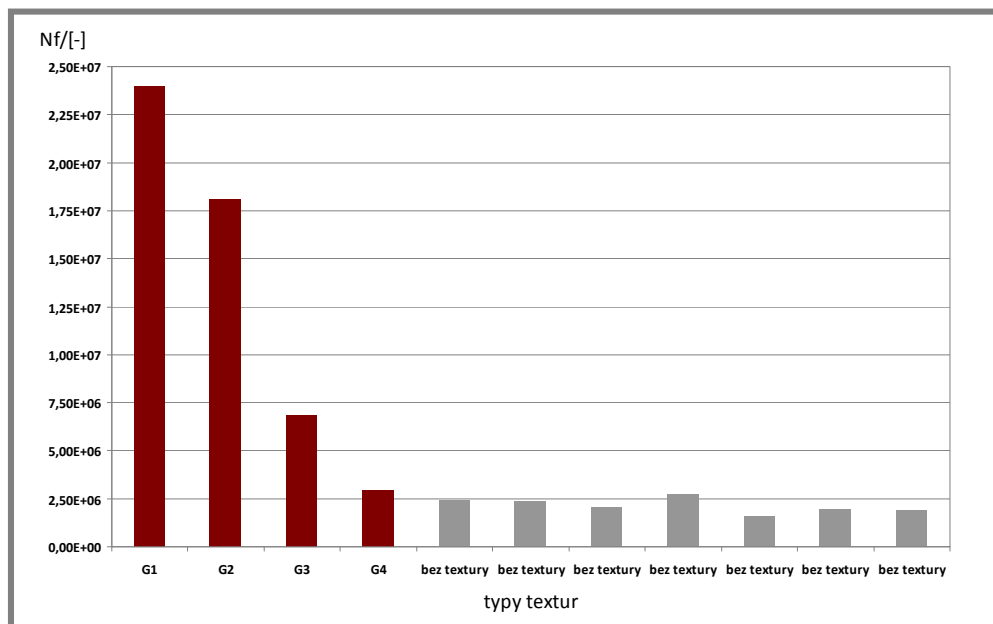


Obr. 68 Vzorky s texturami G1-G4; kontaktní stopa, povrchové poškození



Obr. 69 Vzorky bez textury; kontaktní stopa, povrchové poškození

Výsledné poškození kontaktních stop pro vzorek s texturami G1 až G4 je zobrazeno na obrázku 68. Celkový počet cyklů do porušení vzorku N_f se v těchto případech pohyboval v rozmezí $2,9 \times 10^6$ až $2,4 \times 10^7$ cyklů. Obrázek 69 pak ukazuje povrchové poškození měřicích stop, neopatřených texturou. Zde počet cyklů do porušení dosahoval hodnot $1,5 \times 10^6$ až $2,7 \times 10^6$ cyklů. Celkové srovnání naměřených dat a rozdíly mezi měřicími stopami jsou zobrazeny na obrázku 70 [65].



Obr. 70 Srovnání výsledků – hustota textury [65]

Pro měření byl využit minerální základový olej s dynamickou viskozitou $0,021 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ a tlakově viskózním koeficientem 15 GPa^{-1} . Testy proběhly při teplotě 33°C .

Z výsledků je patrné, že s nárůstem hustoty textury, tedy se vzájemným přiblížením jednotlivých vtisků, dochází i k nárůstu počtu cyklů do porušení vzorku. Je patrné, že přítomnost mělkých vtisků na třecím povrchu vzorku má za následek prodloužení jeho kontaktní únavové životnosti, a to i v případě textury G4, kde je tento nárůst nejmenší ve srovnání s měřeními bez textur.

Je možné předpokládat, že místní zvýšení tloušťky mazacího filmu má pozitivní vliv na kontaktní únavovou životnost. Přítomnost textury na třecím povrchu může ale také vést k jeho lokálnímu zpevnění. Efekt zpevnění také pomáhá prodloužit RCF životnost strojních součástí. Nicméně tento efekt má význam pouze v případě, že geometrie textury je významně větší než drsnost povrchu vzorku a její hustota je také vyšší. Mělké důlky nemají vliv na proces zpevnění, ale silně ovlivňují tloušťku mazacího filmu. Proto tedy dochází k navýšení počtu cyklů do porušení.

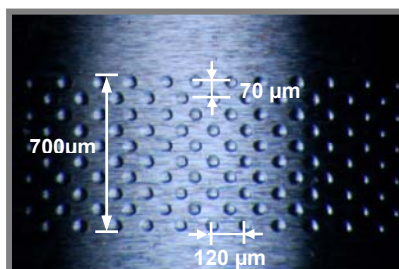
7.3 Vliv hloubky textury na RCF – hluboké vtisky

7.3

Následující testy byly provedeny pro posouzení vlivu přítomnosti hlubokých vtisků na třecím povrchu na kontaktní únavovou životnost vzorku [63]. Hloubka vtisků byla při těchto testech $1,45 \text{ }\mu\text{m}$ a jejich průměr $65 \text{ }\mu\text{m}$, zachováno bylo

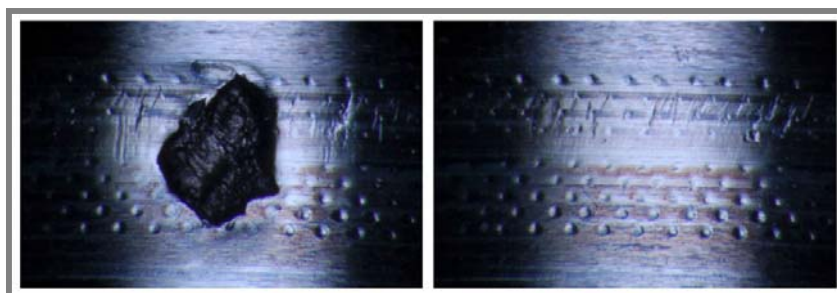
trojúhelníkové rozložení textury. Parametry geometrie textury jsou uvedeny na obrázku 71 a svým uspořádáním reflektují navrženou texturu T2.

Testy zároveň sloužily pro srovnání s předchozími měřeními mělkých vtisků, u nichž byl mj. sledován vliv hustoty textury na RCF. Z tohoto důvodu byly pro měření využity stejné provozní podmínky jako v předchozím případě, tj. Hertzův kontaktní tlak 5GPa, režim smíšeného mazání a prokluz $\Sigma = 0,05$.

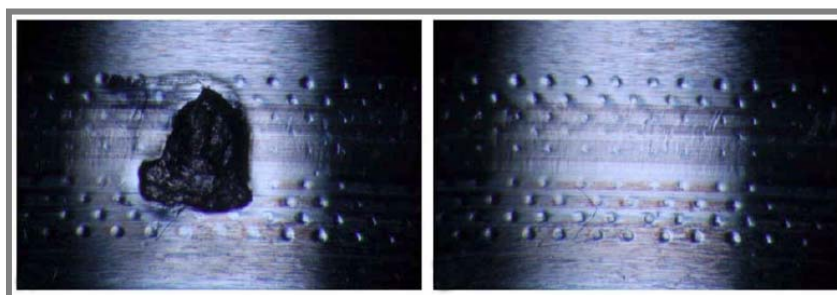


Obr. 71 Realizovaná textura

Obrázky 72 a 73 ukazují vzniklé poškození kontaktní stopy. Zároveň je možné si povšimnout, že zde dochází k úplnému vyhlazení vtisků v centrální oblasti kontaktu. Počet cyklů do porušení se v těchto případech pohyboval v rozmezí $1,3 \cdot 10^6$ až $2,2 \cdot 10^6$ cyklů. Na každé měřicí stopě došlo k porušení, tzn. žádné měření nebylo ukončeno před výskytem povrchového poškození [63].

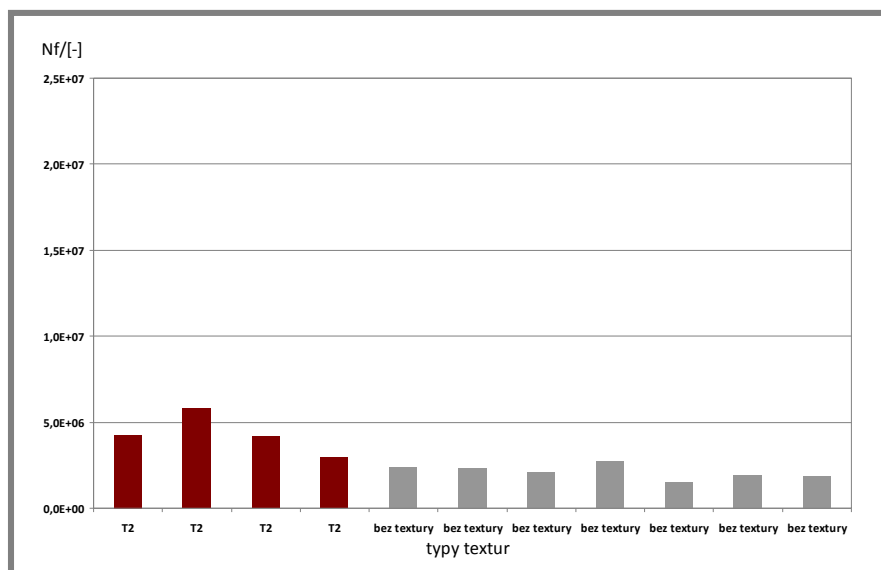


Obr. 72 Kontaktní stopa povrchové poškození vzorku [63]



Obr. 73 Kontaktní stopa povrchové poškození vzorku [63]

Měření byla porovnána s testy kontaktních stop neopatřených texturami. Výsledné srovnání je patrné z obrázku 74 [63]. Nárůst v celkové době do porušení už není tak jednoznačný jako v případě testů s mělkými vtisky. Nicméně i v tomto případě došlo ve všech případech k prodloužení počtu cyklů do porušení vzorku, tedy jeho kontaktní únavové životnosti.



Obr. 74 Srovnání výsledků – hluboké vtisky [63]

Ze získaných výsledků lze soudit, že i přítomnost textury s hlubokými vtisky na třecím povrchu součásti ovlivňuje pozitivně kontaktní únavovou životnost součásti. Mechanismus, kterým k tomuto ovlivnění dochází, však již není jednoznačný. Textura ovlivňuje rozložení tloušťky mazacího filmu v kontaktu, kdy při vstupu vtisku do kontaktu dochází k uvíznutí maziva ve vtisku a k jeho následnému uvolnění. To má za následek navýšení tloušťky mazacího filmu a tedy navýšení počtu cyklů do porušení při RCF testech.

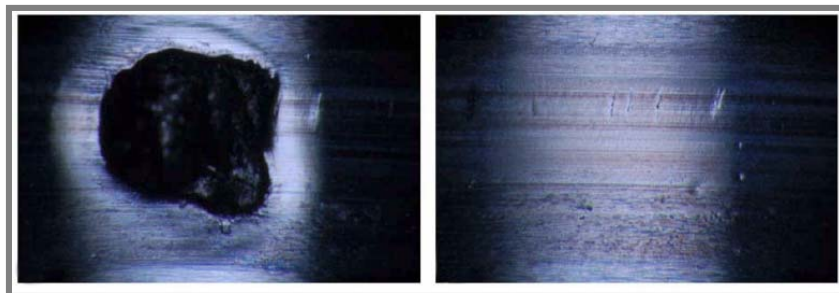
Nicméně při realizaci cílené modifikace topografie velmi hlubokými vtisky, může dojít i ke zpevnění třecího povrchu vzorku, kde už tento fakt není možné zanedbat. V případě vtisků o hloubce 1,45 μm a průměru 65 μm k tomuto mechanismu ale nedochází a tak jej můžeme zanedbat.

Na základě výsledků z předchozích měření s mělkými a hlubokými vtisky byla naplánována další série měření, která napomohla kvantifikovat míru rizika poškození povrchu součásti únavovým porušením ve vztahu ke geometrii realizované textury.

7.4 Vliv geometrie textury na RCF – textury T1 až T4

7.4

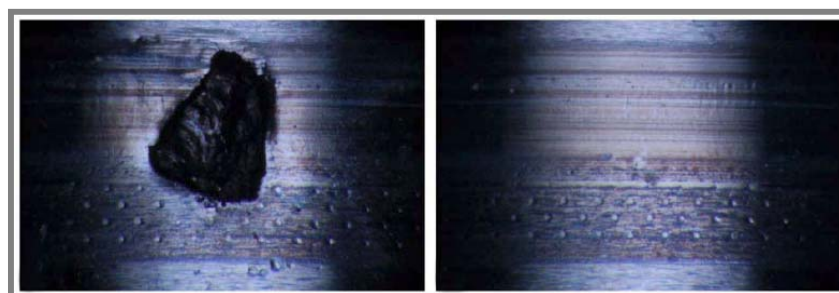
Pro studium vlivu geometrie soustavy a jednotlivých vtisků na RCF životnost součásti, bylo třeba zabývat se předchozími dvěma možnostmi zároveň, tj. studium vlivu hustoty textury a geometrie jednotlivých vtisků (hloubka textury). Tomuto problému se věnoval ve své publikaci Vrbka a kolektiv [64]. Ke studiu využil textury T1 až T4 (Obr. 47), které se vzájemně lišily nejen uspořádáním vtisků, ale i jejich hloubkou. Testy RCF pak byly porovnány s měřeními na stopách neopatřených texturami, za stejných podmínek na téže vzorku. Následně byl zaznamenán počet cyklů do porušení N_f každé kontaktní stopy. I v tomto případě byly použity podmínky smíšeného mazání a prokluzu třecích povrchů $\Sigma = 0,05$.



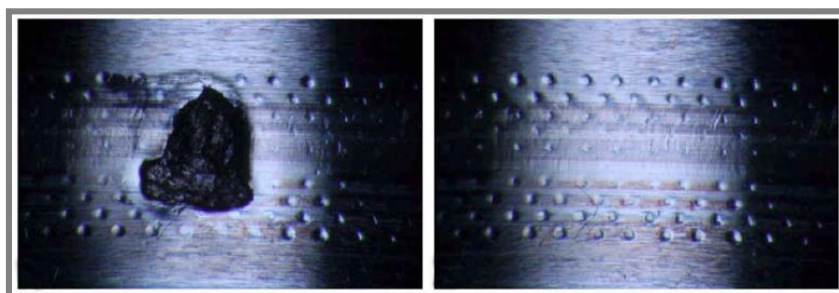
Obr. 75 Kontaktní stopa a poškození netexturovaného vzorku [64]

Obrázek 75 zobrazuje poškození a kontaktní stopu vzorku, na němž nebyla provedena povrchová úprava. K poškození povrchu pittingem došlo po $8,2 \cdot 10^5$ cyklech. Pro srovnání, vzorky bez povrchové úpravy za podmínek čistého valení dosahovaly hodnot počtu cyklů do porušení $1,4 \cdot 10^8$. Je tedy zřejmé, že za podmínek prokluzu došlo k výraznému snížení kontaktní únavové životnosti třecího povrchu.

Hlavním cílem bylo poukázat na možné pozitivní dopady soustav vtisků na RCF životnost strojních součástí. První série experimentů byla provedena s texturami T1 a T2 s cílem posoudit vliv hloubky vtisků na kontaktní únavovou životnost povrchu. (Obr. 76 a 77). Počty cyklů do porušení zde dosahovaly hodnot $2,3 \cdot 10^6$ a $8,7 \cdot 10^5$. Tyto pokusy ukazují, že použití textury T1 vedlo ke zvýšení kontaktní únavové životnosti v porovnání s povrchem bez textury. Nicméně, testy s přítomností textury T2 (tj. s hlubokými vtisky) neukázaly výrazný pozitivní vliv na únavovou životnost vzorku [64].



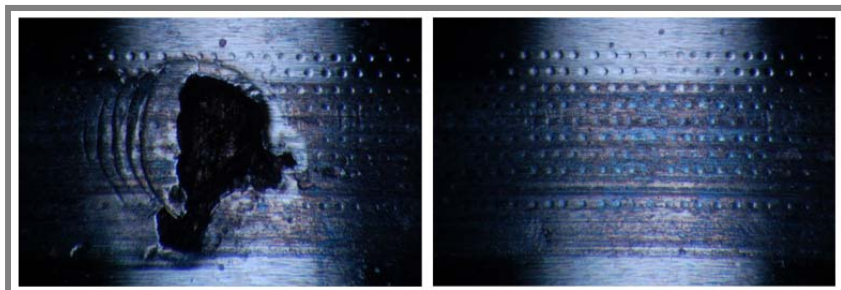
Obr. 76 Textura T1 – kontaktní stopa a poškození [64]



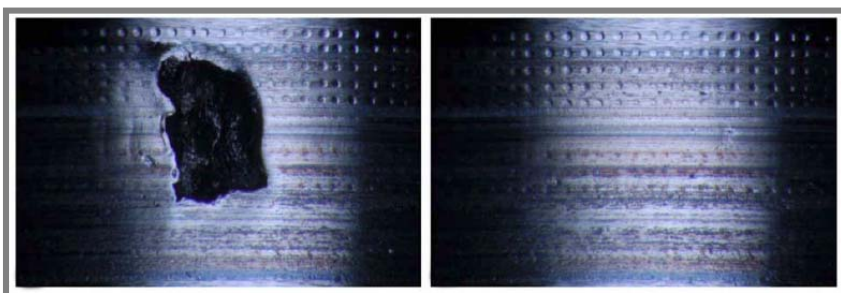
Obr. 77 Textura T2 – kontaktní stopa a poškození [64]

Následně byla provedena další sada experimentů, tentokrát s mělkými vtisky. Cílem bylo zahrnout a zvážit vliv hustoty textur. Použity byly textury T3 a T4 (Obr. 78 a 79). Tyto textury se liší svým uspořádáním a hlavně počtem vtisků v kontaktní stopě od textur T1 a T2. Autoři poukazují, že zvyšující se počet vtisků významně ovlivňuje únavovou životnost. Toto ovlivnění je pozitivní, tj. vede k nárůstu

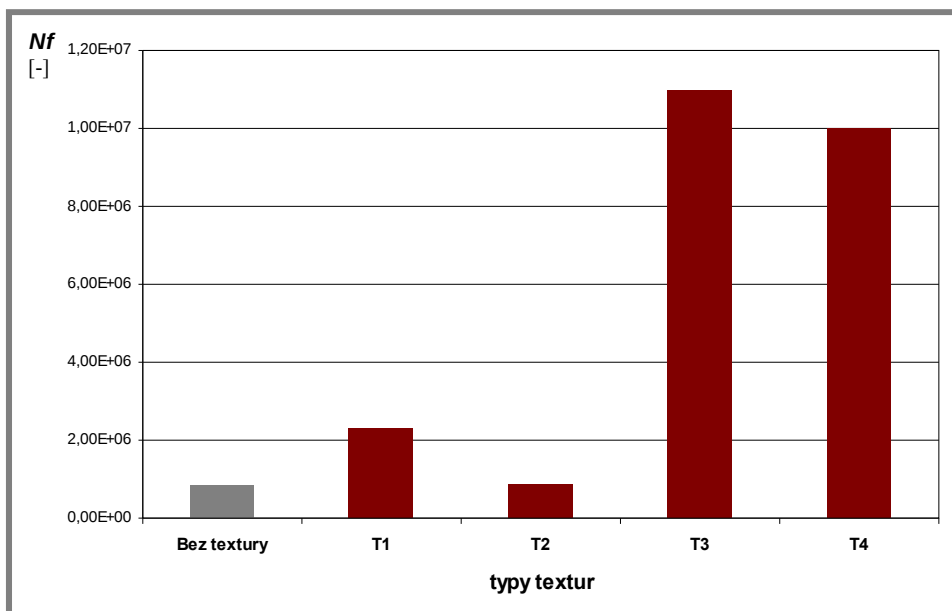
kontaktní únavové životnosti třecího povrchu vzorku. Vliv uspořádání jednotlivých vtisků v textuře (T3, T4) byl v tomto případě zhruba stejný. Obr. 80 shrnuje výsledky získané při RCF testech všech zmiňovaných textur a porovnává je s měřením netexturovaného povrchu.



Obr. 78 Textura T3 – kontaktní stopa a poškození [64]



Obr. 79 Textura T4 – kontaktní stopa a poškození [64]



Obr. 80 Srovnání výsledků – textury T1 až T4 [64]

Výše uvedené výsledky ukazují, že použití mělké povrchové textury s cílem zlepšení mazacích podmínek nemusí nutně vést ke snížení životnosti RCF strojních součástí. Naopak, pozorován byl mírný nárůst v RCF životnosti ve všech uvedených testech s povrchovou strukturou. Přesto je třeba zdůraznit, že byl proveden pouze omezený počet testů, z důvodu časově náročné přípravy vzorku.

Lze tedy usoudit, že přítomnost textury by neměla za daných podmínek snižovat RCF životnost součástí. Nicméně, o jejím přímém vlivu na kontaktní únavovou životnost z těchto výsledků usuzovat nelze. K popisu chování povrchové textury a jejím přímém vlivu na RCF životnost součástí je třeba provést další měření a statisticky je zpracovat. Přesto mohou výsledky s texturami T3 a T4 sloužit, jako první krok ve studiu možného příznivého vlivu povrchových textur na kontaktní únavovou životnost strojních prvků.

8 ANALÝZA POZNATKŮ A JEJICH PŘÍNOS PRO PRAXI A ROZVOJ VĚDNÍHO OBORU

Na základě experimentálních výsledků již Zhai [75] konstatoval, že zvýšení povrchového únavového poškození s texturou je pravděpodobně způsobeno vlivem vtisků a povrchových nerovností jako zásobníků maziva. Tento efekt je zřejmý i za podmínek čistého valení. Podmínky prokluzu pak přináší další možný příznivý vliv povrchu s vtisky na RCF životnost a to díky mazivu, které je z těchto vtisků emitováno do kontaktní oblasti. To je způsobeno tím, že mazivo prochází přes kontakt průměrnou rychlostí třecích povrchů. Mazivo, uzavřené uvnitř vtisku předbíhá nebo naopak zaostává a elasticky deformuje třecí povrchy. Z tohoto důvodu je možné očekávat, že vtisky s větším průměrem by měly zajistit lepší výsledky RCF, protože vzájemná interakce povrchových nerovností by se měla s narůstající celkovou rozlohou vtisků snižovat.

V předchozích studiích bylo prokázáno, že při vstupu vtisku do kontaktní oblasti dochází na vstupním okraji vtisku ke snížení tloušťky mazacího filmu, které by mohlo mít nepříznivý vliv životnost součástí. Při vstupu vtisku do kontaktu, dochází k úniku maziva spolu s poklesem hydrodynamického tlaku. Míra (hloubka) snížení tloušťky filmu je dána hloubkou vtisku, čím hlubší je vtisk, tím hlubší redukce tloušťky mazacího filmu nastane.

Praktickou aplikací metody cílené modifikace topografie na strojních površích se zabýval i Etsion ve svých publikacích [42-44, 46]. Prokázal, že při modifikaci topografie pístních kroužků motoru automobilu dochází ke snížení spotřeby paliva a k navýšení účinnosti spalovacího motoru [44]. Jako technologii realizace cílené modifikace pak použil metodu LST [18]. Tuto metodu však aplikoval pouze na styk konformně zakřivených těles.

Mechanická metoda, prezentovaná v této práci má výhodu v možnosti aplikace na nekonformně zakřivené povrchy, včetně malých rozměrů. Reflektuje tak provozní podmínky reálných strojních aplikací, jako jsou vačky, ozubená soukolí a valivé elementy v ložiscích. Dále poskytuje možnost variability geometrie samostatných vtisků i výsledných textur. Pomocí této metody je možné realizovat i velmi malé vtisky (řádově v desítkách až stovkách nanometrů). Poskytnutá metodika pak shrnuje celý postup přípravy vzorku pro realizaci textur a vlastních měření. Uvedeny jsou i numerické simulace, pomocí nichž je možné určit požadovanou geometrii vtisků v závislosti na zatěžovací síle. Je tedy možné snadno navázat při dalším využití této metody.

Popisované výsledky pak mají význam především pro oblast základního výzkumu, kde je možné na jejich základě navázat dalšími experimentálními měřeními a více se přiblížit různým reálným aplikacím. Již nyní je však možné konstatovat, že přítomnost textury na třecím povrchu strojní součásti významně ovlivňuje chování mazaného kontaktu. Velkou roli zde hraje především hloubka jednotlivých vtisků a hustota výsledné textury. Pro praktickou aplikaci této metody je například možné vhodně zvolenou povrchovou texturu aplikovat na povrch vnitřních kroužků valivých ložisek a docílit tak navýšení jejich kontaktní únavové životnosti. Abychom však byli schopni pro tento konkrétní případ jednoznačně tento pozitivní vliv stanovit, je potřeba provést další měření a vyhodnocení.

9 ZÁVĚR

Cílená modifikace topografie třecích povrchů představuje jeden ze způsobů zlepšení tribologických vlastností mazaného kontaktu. V oblasti styku konformně zakřivených povrchů bylo prokázáno pozitivní ovlivnění kontaktu cílenou modifikací topografie. Studie zaměřené na tuto problematiku se věnovaly především vlivem cílené modifikace na tvar a tloušťku mazacího filmu. Bylo prokázáno, že v okolí vtisku dochází k lokálnímu navýšení tloušťky mazacího filmu a tedy k lepšímu oddělení povrchů v kontaktu.

U těles s nekonformně zakřiveným povrchem však přítomnost textury v mazaném kontaktu však může působit jako koncentrátor napětí, ovlivnit rozložení tlaku a tak zapříčinit únavové poškození třecích povrchů.

V rámci práce bylo popsáno několik experimentů, zaměřených na studium únavového poškození třecích povrchů. Geometrie textur (především jejich hloubka a rozložení) byla zohledněna v rámci experimentů. Pro realizaci cílené modifikace topografie byla vyvinuta mechanická metoda vytváření struktur na třecích površích strojních součástí. Byla realizována úprava stávajícího zkušebního zařízení, umožňující automatické vytváření textur na třecích površích. Zároveň byla odladěna metodika postupu přípravy vzorků a textur pro realizaci vlastních měření únavového poškození třecích povrchů a stanoveno několik charakteristických geometrií soustav vtisků, které byly následně podrobovány únavovým zkouškám.

Sledován byl vliv textur na RCF životnost nekonformně zakřivených těles, pracujících za podmínek smíšeného mazání. Testována byla řada typů povrchových textur a různých geometrií vtisků.

Bylo prokázáno, že vliv texturovaného povrchu na RCF je výrazně ovlivněn velikostí vtisků a hustotou textury v kontaktu. Uspořádání vtisků v kontaktu nebylo shledáno významným parametrem.

Z uvedených výsledků lze usuzovat, že vhodně navržená textura na třecím povrchu za konkrétních podmínek nemusí vést ke snížení rizika únavového poškození. Naopak může napomáhat k prodloužení únavové životnosti součástí, tím, že vtisky působí jako mikro-zásobníky maziva a pomáhají tak oddělit nerovnosti obou třecích povrchů. Nicméně další experimenty jsou nezbytné k potvrzení tohoto možného příznivého vlivu texturování na RCF životnost strojních součástí.

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 a) Texturovaný povrch, b) Schéma testovaného ložiska [7]	13
Obr. 2 Vztah mezi parametrem nesouměrnosti a životností [7]	13
Obr. 3 Micro-EHL efekt vtisků: a) povrch bez vtisků, b) hladký povrch s vtisky c) drsný povrch s vtisky [8]	14
Obr. 4 Poškození mikrospallem [9]	15
Obr. 5 Mazací režimy pro tři různé velikosti mikrovrtisků [9]	15
Obr. 6 Modelované typy mikrovrtisků [9]	16
Obr. 7 Vtisky na třecím povrchu [11]	16
Obr. 8 Sít prvků a okrajové podmínky pro simulaci vyražení vtisku [13]	16
Obr. 9 Metodologie simulace [13]	17
Obr. 10 Tvar vtisku [13]	17
Obr. 11 Rozložení tlaku povrchu s vtiskem během simulace odvalování [13]	18
Obr. 12 Popis procedury tvorby texturovacího nástroje [34]	19
Obr. 13 Princip texturování a) kuličky b) desky [34]	19
Obr. 14 Detail textury: a) přes leštění b) po leštění [34]	20
Obr. 15 Příklady různých typů textur [34]	20
Obr. 16 Proces obrábění [34]	20
Obr. 17 Schéma vyražení vtisků, realizované textury [36]	21
Obr. 18 Konvenční povrch, texturované povrchy [37]	21
Obr. 19 Schéma testu, příklady textur na třecím povrchu [38]	22
Obr. 20 Vliv hustoty textury na celkové opotřebení povrchu [38]	22
Obr. 21 Schéma procesu měření, Textury na povrchu disku [39]	23
Obr. 22 Třecí koeficienty různých textur při mazání olejem s nízkou viskozitou [39]	23
Obr. 23 Třecí koeficienty různých textur při mazání olejem s vysokou viskozitou [39]	23
Obr. 24 Lineární závislost kritického zatížení a rychlosti třecích ploch pro netexturovaný povrch a různé hodnoty pórovitosti povrchu [41]	24
Obr. 25 Srovnání třecích koeficientů pro leštěný a texturovaný disk při různých rychlostech a zatíženích [40]	24
Obr. 26 Srovnání experimentů a) nedostatečné mazání b) suchý kontakt [45]	25
Obr. 27 Vliv vtisků na kontaktní únavovou životnost [56]	26
Obr. 28 Kontaktní geometrie [57]	26
Obr. 29 a) Detail mikrovrtisku před experimentem b) profil mikrovrtisku [57]	26
Obr. 30 Srovnání vývoje velikosti vtisku za podmínek mazání tuhým mazivem a olejem [57]	27
Obr. 31 a) proces vyražení mikrovrtisku b) srovnání modelu a exp. měření [57]	27
Obr. 32 Schéma zkušebního zařízení [58]	28
Obr. 33 a) porušení mazaného kontaktu b) porušení suchého kontaktu [58]	29
Obr. 34 a) EHL model b) takové rozložení v kontaktní oblasti s vtiskem a spallem [58]	29
Obr. 35 Iniciační doby poškození a) vliv zatížení b) vliv „ostrosti“ vtisku [58]	30
Obr. 36 Schéma dvou-diskového RCF zkušebního zařízení [60]	30
Obr. 37 Deformace vtisku před a po experimentu: a1, a2 -před testem, b1,b2 -po testu [60]	31
Obr. 38 Výsledky simulace: a) tlakové rozložení, b) napětíové rozložení [61]	32

Obr. 39 Ocel M50 vtisk 400-30: a) 10×10^6 cyklů, b) 50×10^6 cyklů [62]	32
Obr. 40 Výskyt oblastí poškození [62]	33
Obr. 41: Modifikace konvenčního mikroskopu	37
Obr. 42: Sestava pro texturování kuličky	37
Obr. 43 Realizace mikrostruktur	38
Obr. 44 Tenzometr HBM-U9B	38
Obr. 45 Řídicí software pro tvorbu mikrostruktur	39
Obr. 46 Koncepty struktur vtisků	39
Obr. 47 Reálná struktura - soustavy vtisků [64]	40
Obr. 48 Geometrie vtisku pro různé zatěžovací síly (naměřené hodnoty)	41
Obr. 49 Geometrie vtisku pro různé zatěžovací síly (numerický model)	41
Obr. 50 Povrchová textura T1 a T2, a) 3D profil b) 2D profil ve směru x [64]	42
Obr. 50 Experimentální zařízení R-Mat [70]	44
Obr. 51 Zkušební vzorky: a) před RCF testy b) po RCF testech	44
Obr. 52 Software, snímače a ovladač Viditech pro monitorování experimentu [74]	45
Obr. 53 Model texturovacího procesu	47
Obr. 54 Model zatížení v zařízení R-Mat	47
Obr. 55 Celkové deformace kontaktu, celkový kontaktní tlak	48
Obr. 56 a) Geometrie mikrovrtisku, b) – d) vzniklá poškození [73]	49
Obr. 57 Poškození na povrchu vzorku s vtisky o hloubce $20 \mu\text{m}$ po 5×10^6 cyklech; čisté valení; kontaktní tlak 5GPa [63]	50
Obr. 58 Poškození na povrchu vzorku s vtisky o hloubce $4 \mu\text{m}$; čisté valení; kontaktní tlak 5GPa [63]	51
Obr. 59 Poškození na povrchu vzorku s vtisky o hloubce $2 \mu\text{m}$; čisté valení; kontaktní tlak 5GPa [63]	51
Obr. 60 Poškození na povrchu vzorku s vtisky o hloubce $4 \mu\text{m}$; prokluz $\Sigma=0,2$; kontaktní tlak 3,9GPa [63]	52
Obr. 61 Úvodní realizace textury na povrchu vzorku [70]	52
Obr. 62 Realizovaná textura na povrchu vzorku [70]	53
Obr. 63 Realizovaná textura na povrchu vzorku	53
Obr. 64 Místo poškození vzorku	54
Obr. 65 Výskyt poškození na vzorku T1 [63]	55
Obr. 66 Výskyt poškození na vzorku T3 [63]	55
Obr. 67 Povrchové textury – vliv hustoty	56
Obr. 68 Vzorky s texturami G1-G4; kontaktní stopa, povrchové poškození	56
Obr. 69 Vzorky bez textury; kontaktní stopa, povrchové poškození	56
Obr. 70 Srovnání výsledků – hustota textury [65]	57
Obr. 71 Realizovaná textura	58
Obr. 72 Kontaktní stopa povrchové poškození vzorku [63]	58
Obr. 73 Kontaktní stopa povrchové poškození vzorku [63]	58
Obr. 74 Srovnání výsledků – hluboké vtisky [63]	59
Obr. 75 Kontaktní stopa a poškození netexturovaného vzorku [64]	60
Obr. 76 Textura T1 – kontaktní stopa a poškození [64]	60
Obr. 77 Textura T2 – kontaktní stopa a poškození [64]	60
Obr. 78 Textura T3 – kontaktní stopa a poškození [64]	61
Obr. 79 Textura T4 – kontaktní stopa a poškození [64]	61
Obr. 80 Srovnání výsledků – textury T1 až T4 [64]	61

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	[-]	- parameter mazání
Σ	[-]	- prokluz třecích povrchů v kontaktu
a, b	[mm]	- hlavní poloosy eliptického kontaktu
EHD		- elastohydrodynamický
EHL		- elastohydrodynamické mazání
FE, FEM		- Finite Element Method – metoda konečných prvků
h_c	[mm]	- tloušťka centrálního mazacího filmu
LST		- Laser Surface Texturing
N_f	[-]	- Počet cyklů do porušení vzorku při testech RCF
PDF		- funkce hustoty pravděpodobnosti
R_a	[μm]	- střední aritmetická úchylka profilu
RCF		- Rolling Contact Fatigue (Kontaktní únavová životnost)
RMS	[μm]	- střední aritmetická úchylka profilu
Sk	[-]	- Skewness – parametr nesouměrnosti

Plus běžně používané jednotky SI.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VILLE, F., COULON, S., LUBRECHT, A.A.: Influence of solid contaminants on the fatigue life of lubricated machine elements, *Proc IMechE, J Eng Tribol*, 2006, vol. 220, s. 441-445.
- [2] WAY, S.: Pitting due to rolling contact, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 1935, vol. 2, s. A49-A58.
- [3] TALLIAN, T.E., Prediction of rolling contact fatigue life in contaminated lubricant: Part I-Mathematical model, *ASME Journal of Lubrication Technology*, 1976a, vol. 98, s. 251-257.
- [4] TALLIAN, T.E., Prediction of rolling contact fatigue life in contaminated lubricant: Part II-Experimental, *ASME Journal of Lubrication Technology*, 1976b, vol. 98, s. 384-392.
- [5] CHAO, K.K., SABA, C.S., CENTRES, P.W.: Effects of lubricant borne solid debris in rolling surface contacts, *Tribology Transactions*, 1996, vol. 39(1), s. 13-22.
- [6] AVERBACH, B.L., Van PELT, S.G., PEARSON, P.K., BAMBERGER, E.N.: Surface initiated spalling fatigue in M-50 and M50-Nil bearings, *Lubrication engineering*, 1991, vol. 47(10), s. 827-843.
- [7] AKAMATSU, Y., et al. Influence of surface roughness skewness on rolling contact fatigue life, *Tribology Transactions*, 1992, vol. 35, s. 745-750.
- [8] ZHAI X, et al.: On mechanisms of fatigue life enhancement by surface dents in heavily loaded rolling line contacts, *Tribology Transactions*, 1997, vol. 40, s. 708-714.
- [9] NÉLIAS, D., VILLE, F., Detrimental effects of debris dents on rolling contact fatigue, *Journal of Tribology*, 2000, vol. 17, s. 55 – 64.
- [10] VILLE, F., NÉLIAS, D.: An Experimental Study on the Concentration and Shape of Dents Cause by Spherical Metallic Particles in EHL Contacts, *Tribology Transactions*, 1999, vol. 42, s. 231-235.
- [11] VILLE, F., NÉLIAS, D.: Early Fatigue Failure Due to Dents in EHL Contacts, *Tribology transactions*, 1999, vol. 42, s. 795-800.
- [12] VILLE, F., NÉLIAS, D.: Influence of the Nature and Size of Solid Particles on the Indentation Features in EHL Contacts, 1998a, Proceedings of the 24th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, London, England, 1997, Dowson et al., ed., *Elsevier, Tribology Series*, vol. 34, s. 399-410.
- [13] ANTALUCA, E., NÉLIAS, D., Contact Fatigue Analysis of a Center Surface in a Dry Elastic-Plastic Circular Point Contact, *Tribology Letters*, 2008, vol. 29, s.139-153.
- [14] ROBIN, Y., NÉLIAS, D., VINCENT, A.: Etude et modélisation de la fatigue de contact des aciers à roulements aéronautiques avec amorçage de l'endommagement en surface, *Technical Report*, Snecma/SNR, 2006.
- [15] WEDEVEN, L.D.: Influence of debris dent on EHD lubrication, *ASLE Transactions*, 1977, vol. 21, s. 41-52.
- [16] XU, G., SADEGHI, F., COGDELL, J.D.: Debris denting effects on elastohydrodynamic lubricated contacts, 1997, *ASME Journal of Tribology*, vol. 19(3), s. 579-587.

- [17] AI, X.L., NIXON, H.P.: Fatigue life reduction of roller bearings due to debris denting: Part II-Experimental validation, 2000, STLE Tribology Transactions, vol. 43(2), s. 311-317.
- [18] ETSION, I.: State of the art in laser surface texturing. *Trans ASME Journal of Tribology*, 2005, vol. 127, s. 248-253.
- [19] RYK, G., KLIGERMAN, Y., ETSION, I.: Experimental Investigation of Laser Surface Texturing for Reciprocating Automotive Components, *Tribol. Trans.*, 2002, vol.45, s. 444-449.
- [20] ETSION, I., KLIGERMAN, Y., HALPERIN, G.: Analytical and Experimental Investigation of Laser-Textured Mechanical Seal Faces, *Tribol. Trans.*, 1999, vol.42, s. 511-516.
- [21] VINCENT, CH., MONTEIL, G., BARRIERRE, T., GELIN, J.C., Control of the quality of laser surface texturing, *Microsyst. Technol.*, 2008, vol.14, s. 1553-1557.
- [22] VOEVODIN, A.A., ZABINSKI, J.S., Laser surface texturing for adaptive solid lubrication, *Wear*, 2006, vol. 261, s. 1285-1292.
- [23] SCHNEIDER, Y. G.: Formation of Surfaces with Uniform Micropatterns on Precision Machine and Instrument Parts, *Precis. Eng.*, 1984, vol. 6, s. 219–225.
- [24] SAKA, A., LIO, M. J., and SUH, N. P.: The Role of Tribology in Electrical Contact Phenomena, *Wear*, 1984, vol.100, s. 77–105.
- [25] TIAN, H., SAKA, N., and SUH, N. P.: Boundary Lubrication Studies on Undulated Titanium Surfaces, *Tribology Transactions*, 1989, vol. 32(3), s. 289–296.
- [26] SUH, N. P., MOSLEH, M., and HOWARD, P. S.: Control of Friction, *Wear*, 1994, vol.175, s. 151–158.
- [27] MOSLEH, M., LAUBE, S. J. P., and SUH, N. P., Friction of Undulated Surfaces Coated with MoS₂ by Pulsed Laser Deposition, *Tribology Transactions*, 1999, vol. 42(3), s. 495–502.
- [28] WANG, X., KATO, K., and ADACHI, K.: The Lubrication Effect of Micro-Pits on Parallel Sliding Faces of SiC in Water, *Tribol. Trans.*, 2002, vol. 45(3), s.294–301.
- [29] WANG, X., KATO, K., ADACHI, K., and AIZAWA, K.: Loads Carrying Capacity Map for The Surface Texture Design of SiC Thrust Bearing Sliding in Water, *Tribology International*, 2003, vol. 36(3), s. 189–197.
- [30] WAKUDA, M., YAMAUCHI, Y., KANZAKI, S., and YASUDA, Y.: Effect of Surface Texturing on Friction Reduction Between Ceramic and Steel Materials under Lubricated Sliding Contact, 2003, *Wear*, vol. 254, s. 356–363.
- [31] PETTERSON, U., JACOBSON, S.: Influence of Surface Texture on Boundary Lubricated Sliding Contacts, 2003, *Tribol. Int.*, vol. 36(11), s. 857–864.
- [32] KUMAR, S., SINGH, S., SINGH, T.P., SETHI, B.L.: Surface modification by electrical discharge machining: A review, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209(8), s. 36.
- [33] MORO, T., MOHRI, N., OTSUBO, H., GOTO, A., SAITO, N.: Study on the surface modification system with electrical discharge machine in the practical usage, *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol.209, s.3675-3687.

- [34] PETTERSON, U., JACOBSON, S.: Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique, *Tribology International*, 2006, vol. 39, s. 695-700.
- [35] GRECO, A., RAPHAELSON, S., EHMANN, K., and WANG, Q.: Surface Texturing of Tribological Interfaces Using the Vibro-Mechanical Texturing Method, *ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2009, vol.131(6), s. 1–8.
- [36] GRECO, A., MARTINI, A., LIU, Y., LIN, Ch., and WANG, Q. J.: Rolling Contact Fatigue Performance of Vibro-Mechanical Textured Surfaces, *Tribology Transactions*, 2010, vol. 53(4), s.610-620.
- [37] OLIVEIRA, J.F.G., BOTTENE, A.C., FRANCA, T.V.: A novel dressing technique for texturing of ground surfaces, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2010, vol.59, Issue 1, s.361-364
- [38] KOZSELA, W., PAWLUS, P., GALDA, L.: The effect of oil pockets size and distribution on wear in lubricated sliding, *Wear*, vol. 263, Issues 7-12, 16th International Conference on Wear of Materials, 10 September 2007, s. 1585-1592, ISSN 0043-1648, DOI: 10.1016/j.wear.2007.01.108.
- [39] 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, s. 219–225.
- [40] YI, W., DANG-SHENG, X.: The effect of laser surface texturing on frictional performance of face seal, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 197, Issues 1-3, 1 February 2008, s. 96-100, ISSN 0924-0136, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.06.019.
- [41] WANG, X., KATO, K., ADACHI, K., AIZAWA, K.: The Effect of Laser Texturing of SiC Surface on the Critical Load for the Transition of Water Lubrication Mode from Hydrodynamic to Mixed, *Tribology International*, 2001, vol. 34(10), s. 703-711.
- [42] RONEN, A., ETSION, I. and KLIGERMAN, Y.: Friction-Reducing Surface Texturing in Reciprocating Automotive Components, *Tribology Transactions*, 2001, vol. 44, No. 3, s. 359-366.
- [43] RYK, G., ETSION, I.: Testing Piston Rings with Partial Laser Surface Texturing for Friction Reduction, *Wear*, 2006, vol. 261, s. 792-796.
- [44] ETSION, I., SHER, E.: Improving Fuel Efficiency with Laser Surface Textured Piston Rings, *Tribology International*, 2009, vol. 42 (4), s. 542-547.
- [45] 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(7-8), s.1046-1051.
- [46] KOVALCHENKO, A., AJAYI, O., ERDEMIR, A., FENSKE, G., ETION, I. The Effect of Laser Texturing of Steel Surfaces and Speed-Load Parameters on the Transition of Lubrication Regime from Boundary to Hydrodynamic. *Tribology Transactions*, 2004, vol. 47(2), s. 299–307.
- [47] WEDEVEN L.D., CUSANO C.: Elastohydrodynamic film thickness measurements of artificially produced surface dents and grooves, *ASLE Trans*, 1979, vol. 22, s. 369-381.

- [48] KŘUPKA, I., HARTL, M. The effect of surface texturing on thin EHD lubrication films, *Tribology International*, 2007, vol. 40(7), s. 1100 – 1110, ISSN 0301-679X.
- [49] MOURIER, L., MAZUYER, D., LUBRECHT, A.A., DONNET, C. Transient Increase of Film Thickness in Micro-textured EHL Contacts, *Tribology International*, 2006, vol. 39, s. 1745-1756.
- [50] CUSANO, C., WEDEVEN, L.D.: The effects of artificially produced defects on the film thickness distribution in sliding EHD point contacts, *Trans ASME Journal of Tribology*, 1982, vol. 104, s. 365-375.
- [51] 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, s. 663–674.
- [52] KŘUPKA, I., et al.: Effect of surface texturing on mixed lubricated non-conformal contacts. *Tribology International*, 2008, doi:10.1016/j.triboint.2007.11.016.
- [53] OLVER, A.V.: The mechanism of rolling contact fatigue: an update. *Proc Inst Mech Eng, J Eng Tribol*, 2005, vol. 219, s. 313 – 30.
- [54] KLIGERMANN, Y., ETSION, I., SHINKARENKO, A.: Improving tribological performance of piston rings by partial surface texturing. *Trans ASME Journal of Tribology*, 2005, vol. 127, s. 632-638.
- [55] GAO, N., DWYER-JOYCE, R.S., BEYNON, J.H.: Effects of Surface Defects on Rolling Contact Fatigue Of 60/40 Brass, 1999, *Wear*, vol. 225-229, s. 983-994.
- [56] VOLCHOK, A., HALPERIN, G., and ETSION, I.: The Effect of Surface Regular Micro-Topography on Fretting Fatigue Life, *Wear*, 2002, vol.253, s. 509-515.
- [57] MOTA, V., et al.: A study on the effects of dented surfaces on rolling contact fatigue, *International Journal of Fatigue*, vol. 30, 2008, s.1997-2008.
- [58] XU, G., SADEGHI, F., HOEPRICH, M. R.: Dent Initiated Spall Formation in EHL Rolling/Sliding Contact, *ASME Journal of Tribology*, 1998, vol. 120, s. 453-462.
- [59] GLOVER, D.: A Ball-Rod Rolling Contact Fatigue Tester, Rolling Contact Fatigue Testing of Bearing Steels, ASTM STP 771, J. J. C. Hoo, ed., American Society for Testing and Materials, 1982, s. 107-124.
- [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, s. 965-974.
- [61] HOWELL, M. B., RUBIN, C. A., HAHN, G. T.: The Effect of Dent Size on the Pressure Distribution and Failure Location in Dry Point Frictionless Rolling Contacts, *ASME Journal of Tribology*, 2004, vol. 126, s. 413-421.
- [62] NÉLIAS, D., JACQ, C., LORMAND, G., DUDRAGNE, G., VINCENT, A.: New Metodology to Evaluate the Rolling Contact Fatigue Performance of Bearing Steels With Surface Dents: Application to 32CrMoV13 (Nitrided) and M50 Steels, *ASME Journal of Tribology*, 2005, vol. 127, s. 611-622.
- [63] 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*, 2010, vol. 2010(6), s.1-8, ISSN 0025-6455.
- [64] 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*, 2010, vol. 43(8), s.1457-1465, ISSN 0301-679X.
- [65] ŠAMÁNEK, O.; ZIMMERMAN, M.; SVOBODA, P.; KŘUPKA, I.; VRBKA, M.: Influence of Surface Texturing on Lubricant Film Formation and Surface Fatigue, *Engineering Mechanics*, 2010, vol. 17(1) s.27-36, ISSN 1802-1484.
- [66] KŘUPKA, I.; HARTL, M.; VRBKA, M.; VAVERKA, M.; SVOBODA, P.; ŠAMÁNEK, O.: The Effect of Surface Texturing on Lubricant Film Thickness and Contact Pressure within Non-Conformal Surfaces, *Ecotrib 2009 - 2nd European Conference on Tribology*, 2009, s.115-120, ISBN 978-88-467-2426-7, Engineering Faculty, University of Pisa.
- [67] ZHU, D., NANBU, T., REN, N., YASUDA, Y., WANG, Q.J.: Model-based virtual surface texturing for concentrated conformal-contact lubrication, *Proc. IMechE, Part J: J. Engineering Tribology*, 2010, vol. 224(8), s. 685-696, DOI: 10.1243/13506501JET739.
- [68] ZHU, D., NANBU, T., REN, N., YASUDA, Y., WANG, Q.J.: Micro-Textures in Concentrated Conformal-Contact Lubrication: Effects of Texture Bottom Shape and Surface Relative Motion, *Tribol Lett*, 2008, vol. 29, s.241–252.
- [69] WANG, Q.J., ZHU, D.: Virtual Texturing: Modeling the Performance of Lubricated Contacts of Engineered Surfaces, *ASME Journal of Tribology*, 2005, vol. 127, s. 722-728.
- [70] ŠAMÁNEK, O.; MEDLÍK, J. Snížení tření a opotřebení strojních součástí cílenou modifikací topografie třecích povrchů. In *FSI Junior konference 2008*. VUT FSI v Brně. 2009. p. 128 - 133. ISBN 978-80-214-3834-7.
- [71] SCHWIDER, J. C., BUROW, R., ELSSNER, K.-E., GRZANNA, J., SPOLACZYK, Merkel K.: Digital wave-front measuring interferometry: some systematic error sources, *Applied Optics*, 1983, vol. 22, s. 3421-3432.
- [72] HARIHARAN P., B. F. OREB A T. EIJU: Digital Phase-Shifting Interferometry: A Simple Error-Compensating Phase Calculation Algorithm, *Applied Optics*, 1987, vol. 26, s. 2504.
- [73] ŠAMÁNEK, O. Vliv cílené modifikace topografie třecích povrchů na snížení tření a opotřebení strojních součástí. In *49. Mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů*. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni. 2008. s. 239 - 242. ISBN 978-80-7043-718-6.
- [74] VDT CONTROL CENTER, [online], [cit. 2011-03-10]. Dostupné online na World Wide Web: <http://www.viditech.eu/cz/produkty/software/vdt-control-center.aspx>
- [75] ZHAI, X. et al., On mechanisms of fatigue life enhancement by surface dents in heavily loaded rolling line contacts. *Tribology Transactions*, 1997, vol. 40, s. 708–714.

PUBLIKACE AUTORA K DANÉ PROBLEMATICE

ŠAMÁNEK, O.; VRBKA, M. Vliv povrchových nerovností na funkci mazaných kontaktů strojních součástí. In *Konference diplomových prací 2007*. 1. Ústav konstruování, fakulta strojního inženýrství, VUT v Brně, Ústav konstruování. 2007. p. 1 - 3. ISBN 978-80-214-3406-6.

ŠAMÁNEK, O. Vliv cílené modifikace topografie třecích povrchů na snížení tření a opotřebení strojních součástí. In *49. Mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů*. 1. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni. 2008. p. 239 - 242. ISBN 978-80-7043-718-6.

ŠAMÁNEK, O.; MEDLÍK, J. Snížení tření a opotřebení strojních součástí cílenou modifikací topografie třecích povrchů. In *FSI Junior konference 2008*. 1. Brno, VUT FSI v Brně. 2009. p. 128 - 133. ISBN 978-80-214-3834-7.

ŠAMÁNEK, O.; ŠPERKA, P. Non-contact 3D topography measurement of mechanical engineering surfaces. In *Engineering mechanics 2009*. 1. Praha, Academy of Sciences of the Czech Republic, Prague. 2009. p. 1273 - 1279. ISBN 978-80-86246-35-2.

KŘUPKA, I.; HARTL, M.; VRBKA, M.; VAVERKA, M.; SVOBODA, P.; ŠAMÁNEK, O. The Effect of Surface Texturing on Lubricant Film Thickness and Contact Pressure within Non-Conformal Surfaces. In *Ecotrib 2009 - 2nd European Conference on Tribology*. 1. Pisa, Italy, Engineering Faculty, University of Pisa. 2009. p. 115 - 120. ISBN 978-88-467-2426-7.

ŠAMÁNEK, O. Únavové opotřebení strojních součástí s modifikovanou topografií. In *50. Medzinárodná vedecká konferencia kateder částí a mechanismov strojov*. 1. Žilina, Žilinská univerzita v Žilině - EDIS - vydavateľstvo ŽU. 2009. p. 69 - 73. ISBN 978-80-554-0080-8.

KŘUPKA, I.; HARTL, M.; POLIŠČUK, R.; ŠAMÁNEK, O.; VRBKA, M.; VAVERKA, M. Effect of surface texturing on lubrication film formation within non-conformal contacts. In *5th China International Symposium on Tribology/1st International Tribology Symposium of IFToMM*. Beijing, TSINGHUA UNIVERSITY PRESS, TSINGHUA UNIVERSITY HAIDIANQU, BEIJING 100084, PEOPLES R CHINA. 2009. p. 84 - 85. ISBN 978-7-302-20422-0.

ŠAMÁNEK, O.; ZIMMERMAN, M.; SVOBODA, P.; KŘUPKA, I.; VRBKA, M. Influence of Surface Texturing on Lubricant Film Formation and Surface Fatigue. *Engineering Mechanics*. 2010. 17(1). p. 27 - 36. ISSN 1802-1484.

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*. 2010. 2010(06). p. 1 - 8. ISSN 0025-6455.

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*. 2010. 43(8). p. 1457 - 1465. ISSN 0301-679X.

ŠAMÁNEK, O. Cílená modifikace topografie třecích povrchů strojních součástí. In *Zborník referátov, 51. Mezinárodná vedecká konferencia katedier časti a mechanismov strojov*. 1. Košice, C-PRESS - Vydavateľstvo a tlačiareň, Košice. 2010. p. 279 - 282. ISBN 978-80-970-294-1-8.

VAVERKA, M.; ZAPLETAL, L.; ŠAMÁNEK, O.; VRBKA, M. Influence of Surface Dents on Elastohydrodynamic and Mixed Lubrication. In *Enginerring Mechanics 2011*. 17th international Conference. Brno, IT ASCR. 2011. p. 643 - 646. ISBN 978-80-87012-33-8.

Funkční vzorek:

ŠAMÁNEK, O.: *Zařízení pro texturování vzorků*, funkční vzorek, umístění A2/423, 2008-11-20