OBSAH

1 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE 5

1.1 Cíl disertační práce 6

2 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 7

3 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH POZNATKŮ 26

4 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ 27

4.1 Dílčí cíle disertační práce 27

5 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE 28

5.1 Modifikace topografie třecích povrchů 28

5.1.1 Geometrie struktur 30

5.2 Test kontaktní únavy 30

5.2.1 Experimentální zařízení 31

5.2.2 Výsledky testů kontaktní únavy 32

6 ZÁVĚR 33

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ 34

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 35

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 36

1 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Poškozování třecích povrchů v důsledku přítomnosti nerovností na těchto površích 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 [1], takže topografie třecích povrchů má významný vliv na jejich životnost a funkci. Naopak nedávné studie naznačují, že vhodným navržením povrchové struktury lze docílit zlepšení odolnosti třecího povrchu vůči projevům poškození kontaktní únavou [2].

Studium modifikace topografie třecích povrchů je tak orientováno na dva základní směry. Prvním je tzv. přirozená modifikace topografie, vzniklá v důsledku dokončovacích operací na třecích površích, nebo kontaminací maziva [3]. 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. Cílená modifikace topografie je nejčastěji realizována pomocí technologií LST (Laser Surface Texturing) nebo pomocí mechanického vyrážení vtisků do třecích povrchů. Tímto způsobem cílená modifikace umožňuje vytvoření povrchových struktur s velmi dobře definovanou a snadno kontrolovatelnou geometrií [4-6].

Poškozování vyvolané povrchovými nerovnostmi za podmínek mazaného kontaktu konformně zakřivených těles se věnovala řada studií [např. 7,8]. 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 [9-13].

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 interferometre umožnily studovat vliv uměle vytvářených struktur na tloušťku EHD mazacího filmu [9,14,15]. Přítomnost povrchových nerovností v mazaném kontaktu však také významně ovlivňuje rozložení tlaku v mazacím filmu. Uměle vytvořené struktury mohou zároveň působit jako koncentrátory 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. Z výsledků lze usuzovat, že struktura povrchových textur, stejně jako geometrie jednotlivých vtisků má významný vliv na únavové poškozování třecích povrchů strojních součástí a je potřeba ji zohlednit v dalších studiích [16–19].

1.1 Cíl disertační práce

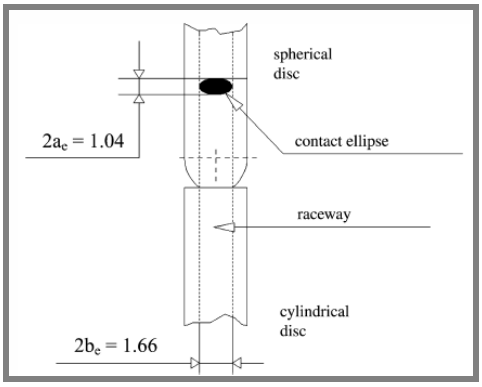
Vlastní experimenty a výzkum, na něž je zaměřena tato práce se věnují cílené modifikaci topografie a jejímu vlivu na kontaktní únavovou životnost třecích povrchů strojních součástí. Jakákoli přítomnost povrchové nerovnosti (uměle vytvořená nebo přirozená) má vliv na rozložení tlaku v kontaktní oblasti a může působit jako koncentrátor napětí. Práce proto posuzuje uměle vytvořené vtisky na třecích površích jako potencionální koncentrátory napětí a jejich vliv na tvorbu únavového poškození. Navazuje na předchozí studie, věnující se zohlednění geometrie mikrovtisků na únavovou životnost strojních součástí a projevy únavového poškozování.

2 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

V.M.M.B da Mota et al., **A study on the effects of dented surfaces on rolling contact fatigue**, International Journal of Fatigue, vol.30, 2008, s.1997-2008.

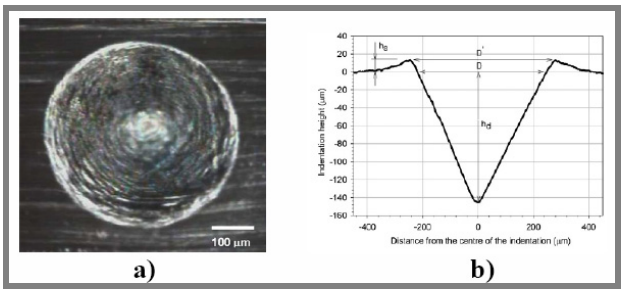
Článek je zaměřen na experimentální a numerické ověření vlivu modifikované struktury třecích povrchů na kontaktní únavu a její projevy. K popisu a pozorování procesu poškozování třecích povrchů autoři provádějí testy na dvoudiskovém zkušebním stroji. Pomocí metody konečných prvků modelují proces vyražení mikrovtisků, následně jsou poté spočtena napěťová pole nacházející se v bezprostřední blízkosti modifikované struktury. Testy byly prováděny ve dvou mazacích režimech – smíšené mazání (vazelína) a EHD mazání (oleje).

Popis experimentu:
Zkoušky a experimentální měření byly prováděny na dvoudiskovém stroji. Tento stroj byl sestaven ze dvou vzájemně se odvalujících disků (ocel AISI 52100). Jeden válcový (cylindrical), druhý sférický (spherical). Poloměry disků byly 70mm a jejich tloušťka 7mm. Zatížení bylo zvoleno tak, aby kontaktní tlak odpovídal 2GPa. Rozměry eliptického kontaktu byly a = 0.52mm a b = 0.83mm. Experimenty byly prováděny za podmínek čistého valení, kdy oba disky se otáčely rychlostí 3000ot./min.



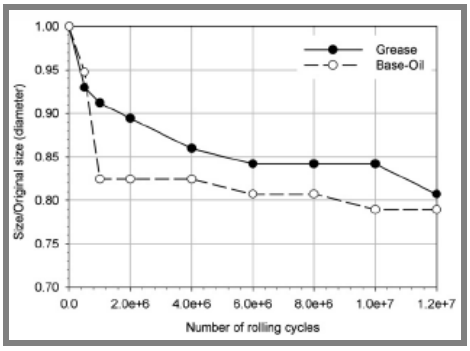
Obr. 1: Kontaktní geometrie

K vlastní modifikaci topografie třecích povrchů bylo využito Rockwellova vyrážecího tělíska typu C při zatížení od 1500N do 5000N.



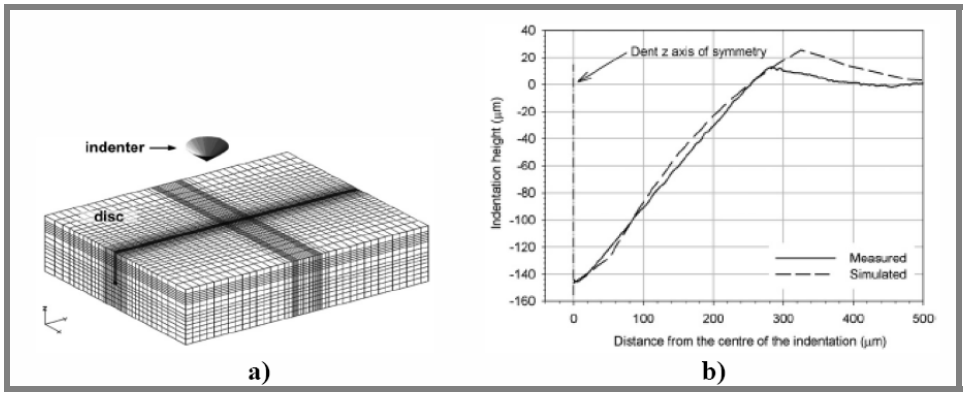
Obr. 2: a) Detail mikrovtisku před experimentem b) profil mikrovtisku

Výsledky:
Zatížení používané při vyrážení mikrovtisků bylo nakonec stanoveno na 2500N z důvodu lepší geometrie mikrovtisku. Autoři poskytují 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 mikrovtisku, v důsledku plastické deformace jeho stěn. Dále pak článek poskytuje srovnání vývoje velikosti (geometrie) vtisku během zkoušky za podmínek mazání vazelínou a olejem (Obr. 3).



Obr. 3: Srovnání vývoje velikosti vtisku za podmínek mazání vazelínou a olejem

Numerické řešení poskytlo model vyrážení mikrovtisků (Obr. 4) a následně zahrnulo výsledky pro jednotlivé oblasti napěťových polí. Vysoká koncentrace napětí byla nalezena na okraji mikrovtisku. Řádově přes 2000MPa až do 2860MPa. Autoři upozorňují na dobrou shodu mezi modelovým mikrovtiskem a změřenou geometrií vtisku.



Obr. 4: a) proces vyrážení mikrovtisku b) srovnání modelu a exp. měření

Závěr:
Článek podává informace o studiu vlivu uměle vytvořených mikrovtisků na únavové poškozování třecích povrchů. Autoři uvažovali dva rozdílné mazací režimy a poukázali na jejich odlišnosti, přičemž uvádějí, že ať experiment probíhal v podmínkách mazání vazelínou nebo olejem, výsledky poškození se téměř neliší. Uvádějí, že k poškození dochází na, nebo poblíž třecího povrchů na okraji mikrovtisku. Jako hlavní rozdíl mezi zmiňovanými režimy uvádějí, že při mazání vazelínou docházelo k poškození spallingem na rozdíl od režimu mazání za použití oleje.

Autoři dále poskytli numerické řešení koeficientů koncentrace napětí. Použitou metodu lze využít jako komparační k jiným experimentům se změnou podmínek, zkušebních vzorků, popřípadě maziv.

NÉLIAS, D., VILLE, F., **Detrimental effects of debris dents on rolling contact fatigue**, Journal of Tribology, 2000, vol. 17

Článek je zaměřen na popis nepříznivých vlivů mikrovtisků (dentů) na tlak a podpovrchové napětí v EHD kontaktu v závislosti na tvaru vtisku a na provozních podmínkách.

Článek popisuje experiment zaměřený na nalezení:

- mechanismu deformace nebo fragmentace částice
- výsledných vtiskových vlastností
- počátek povrchového poškození

Následuje numerická simulace pohybu mikrovtisku přes EHD kontakt. Výsledky numerických simulací jsou diskutovány ve vztahu ke konceptu životnosti u valivých ložisek.

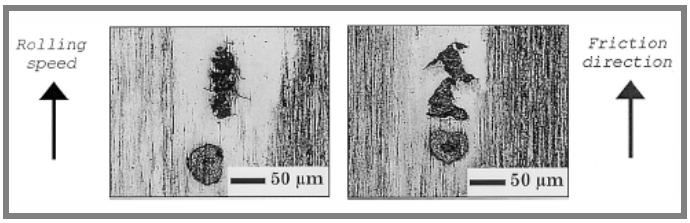
Článek je rozdělen na tři části. První část poskytuje krátký přehled mechanismů vyrážení a následného RCF poškození. Dále tato část obsahuje stručný přehled literatury a shrnuje předchozí výsledky autorů. Druhá část zahrnuje několik předběžných poznámek z oblasti elastohydrodynamického mazání nehladkých povrchů a omezení vlastního experimentu. Účel třetí části je zhodnocení role geometrie (tvaru) mikrovtisku a provozních podmínek na napěťové rozložení v okolí mikrovtisku.

V první části se článek se odkazuje na předchozí studie a podává krátký souhrn jejich výsledků. Autoři poukazují na dřívější články, zaměřené na studium vlivu mikronerovností vzniklých kontaminací maziva, tedy přirozenou cestou [23, 24]. Ke kontaminaci byly použity 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. Jedná se o EHD liniový kontakt.

Popis experimentu:
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. Žádný z experimentů nebyl prováděn v režimu čistého valení.

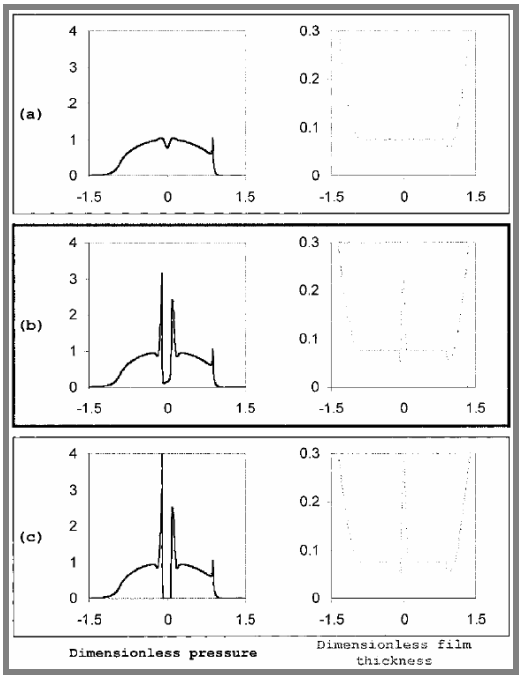
Výsledky:
Testy prokázaly, že mikrovtisky iniciované poškození třecích povrchů kontaktní únavou (microspall) se vyskytuje ve směru odvalování vzorku (skluz/tření) (Obr. 5). Ukázalo se, že velikost maximálního smykového napětí je téměř nezávislá na směru

skluzového pohybu. Změnou skluzu dojde ke změně normálového tlaku a ke změně pozice smykového napětí z jedné strany povrchového poškození na druhou.



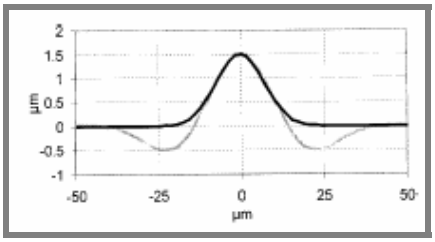
Obr. 5: poškození mikrospallem

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. Mikrovtisky 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. 6a). Mikrovtisky větších rozměrů jsou absorbovány pouze částečně (Obr. 6b,c).



Obr. 6: Mazací režimy pro tři různé velikosti mikrovtisků

Numerické simulace:
Pomocí numerické simulace byl studován vliv mikrovtisků na elastické napětí v okolí vtisku a byl nalezen kritický skluzový poměr. Dále pak článek poskytuje jednoduchou metodu pro určení spodní hranice životnosti valivých ložisek. Článek nabízí porovnání rozložení tlaku a elastického napěťového pole získaného při suchém kontaktu, stacionárním EHD a přechodném (částečném) EHD. Jako model byly využity dva tvary mikrovtisků: vyhlazené a nevyhlazené (Obr. 7).



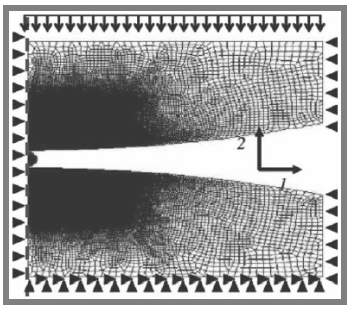
Obr. 7: Modelované typy mikrovtisků

Závěr:
Článek poskytuje model řešení stacionárního a přechodného EHD. Nejnižší koncentrace napětí v okolí defektu se vyskytuje za podmínek čistého valení. Přechodná EHD analýza ukazuje, že tlaková špička a koncentrace vysokých napětí v okolí defektu se vyskytují v oblasti, závisející na směru skluzu. Byla nalezena kritická hodnota skluzového poměru, která hrubě odpovídá poměru průměru mikrovtisku k hlavní poloose kontaktu. Nakonec, byla poskytnuta jednoduchá metoda určení spodní hranice limitu životnosti za podmínek Hertzova tlaku. Článek ukazuje využitelnost výpočtu elastického napětí pro praktické inženýrské aplikace – definování kritické velikosti povrchového defektu nebo nalezení hodnoty skluzového poměru. Jako model byl využit EHL liniový kontakt.

ANTALUCA, E., NÉLIAS, D., **Contact Fatigue Analysis of a Center Surface in a Dry Elastic-Plastic Circular Point Contact**, Tribology Lett, 2008, vol. 29, s.139-153.

Článek popisuje metodologii pro výpočetní analýzu poškození v okolí vtisku v suchém, odvalujícím se bodovém kontaktu. Riziko poškození je hodnoceno pomocí Dang Vanova multiaxiálního únavového kritéria. Experiment uvažuje přirozenou modifikaci topografie vtisky, např. kontaminací maziva. Autoři pomocí metody konečných prvků určují tvar vtisku, podpovrchové napětí a napjatostní pole způsobená přítomností kulové částice. Poté provádějí elasticko-plastickou simulaci odvalování. Nakonec uvádějí vliv součinitele tření, přítomnosti residuálního napětí a velikosti zatížení kontaktu. V článku jsou prezentovány dvě simulace pro dva odlišné materiály částice. První je uvažována nerezová ocel 316L, druhým použitým materiálem je ložisková ocel AISI 52100. Kontaktní povrchy jsou uvažovány z oceli AISI 52100.

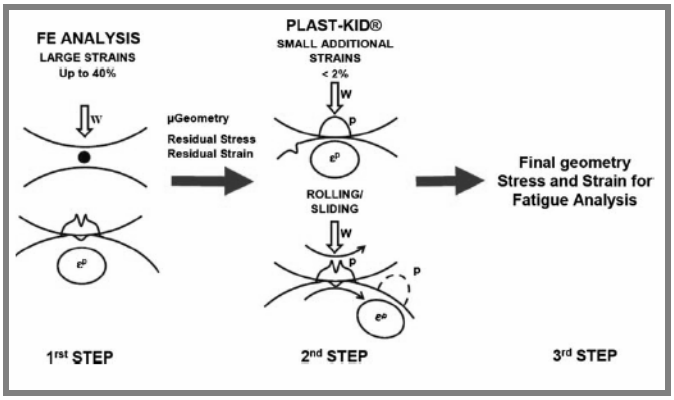
Simulace modifikace topografie metodou konečných prvků:
Prvním cílem simulace bylo stanovení napětí v okolí vtisku před zatížením. Částice byla uvažována kulová o poloměru 30μm. Průměr disků kontaktních povrchů byl 14mm. Z důvodu zjednodušení výpočtu není mazací film v simulaci zahrnut. Autoři odkazují na podrobnější literaturu, popisující FE model přirozené modifikace topografie [25].



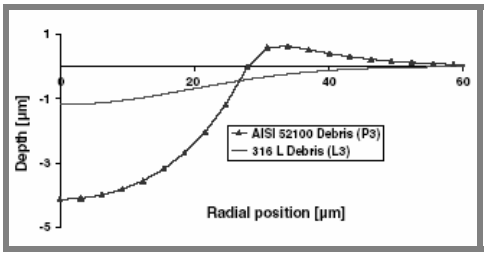
Obr. 8: Sít prvků a okrajové podmínky pro simulaci vyrážení vtisku

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 částečky 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.

Numerická simulace:
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 uvedenými materiály částice lze vidět na obr. 10.

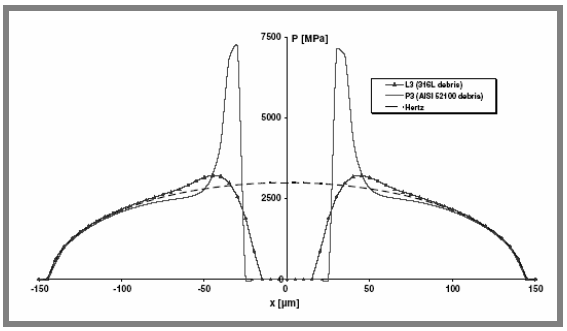


Obr. 9: Metodologie simulace



Obr. 10: Tvar vtisku

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

Závěr:
Autoři nabídli tří-krokovou metodu pro analýzu únavové životnosti. Pomocí FE modelu byly zhodnoceny napjatostní stavy a následně byla provedena 3D analýza zatěžování při odvalování. Mezi řadou prezentovaných výsledků, má významný vliv koeficient tření, který nepříznivě ovlivňuje životnost za přítomnosti povrchového defektu. Tato skutečnost odpovídá experimentálním pozorováním. Díky Dang Van kritériu byly následně stanoveny napěťové stavy v kritickém bodě. Hydrostatické tlaky 300MPa a 500MPa byly odečteny pro měkké částice za podmínek bez tření a odvalování se třením. Pro tvrdou částici za odvalování s prokluzem hodnoty dosahovaly 1500MPa.

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.

Článek poskytuje experimentální výsledky vlivu velkých vtisků na tvorbu poškození spallingem, resp. na jeho iniciaci a propagaci. Pro studium iniciace a propagace poškození autoři vyvinuli analytický EHD model, prezentovaný v tomto článku. Jako řídící mechanismus iniciace a propagace spallu, bylo v tomto modelu uvažováno akumulované plastické napětí v kontaktní vrstvě. Ke studiu vlivu vtisků na iniciaci a propagaci spallingu byl použit liniový model. Vznik tohoto poškození může být rovněž iniciován nedostatkem maziva v kontaktu.

Popis experimentu:
Experimenty byly prováděny na experimentálním zařízení „kulička-tyč“ s povrchovou modifikací jediným velkým vtiskem v kontaktní stopě (Obr. 12). Válcový zkušební vzorek (tyč) je zatížen třemi kuličkami. Detailnější popis zařízení poskytuje Glover ve své práci [26].

Parametry experimentu:

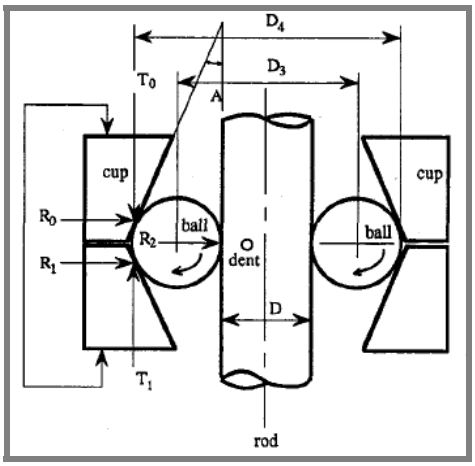
vzorek: válcovitý (tyč), průměr 9,5 mm
materiál: ocel M-50
drsnost povrchu Ra = 0,05-0,075 μm
otáčky: 3600 ot./min.

zátěžná tělesa: kulička, průměr 12,7 mm
materiál: ocel AISI 52100
drsnost povrchu Ra = 0,04 μm

kontaktní tlak: 3,65 GPa

velikost kontaktní oblasti: eliptická, a = 300 μm, b = 528 μm

mazivo: motorový olej SAE 30



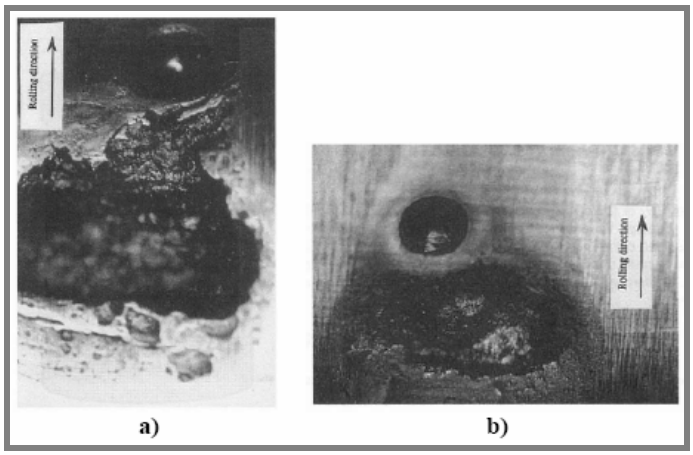
Obr. 12: Schéma zkušebního zařízení

Modifikace topografie:

Modifikace topografie zkušebního vzorku byla realizována jediným (velkým) vtiskem o průměru 280 μm. Vtisky byly realizovány pomocí Rockwellova indentoru typu „C“.

Výsledky:

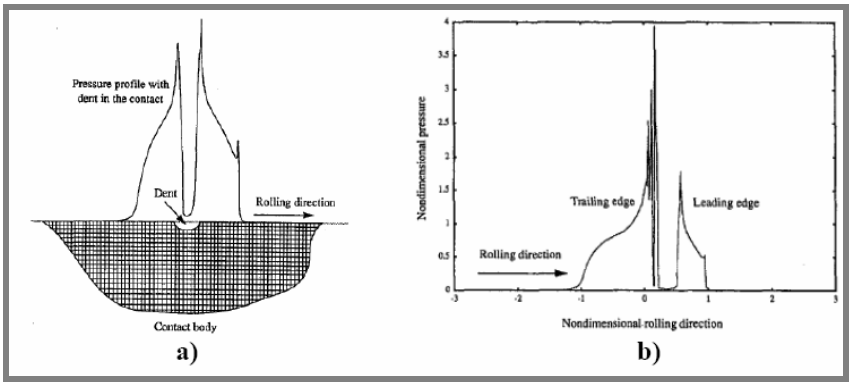
V rámci experimentů byly provedeny zkoušky na modifikovaných i nemodifikovaných površích za podmínek suchého a mazaného kontaktu. Testy a nemodifikovanými povrchy přesahovaly 100 hodin provozu ($51{,}6 \times 10^6$ cyklů) bez známek poškození. Za přítomnosti vtisku v kontaktní oblasti se poškození iniciovalo již po několika hodinách provozu. Obrázek 13a 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.13b. Zkoušky za podmínek suchého kontaktu byly prováděny především pro porovnání a zjištění vlivu maziva na iniciaci a propagaci poškození.



Obr. 13: a) porušení mazaného kontaktu b) porušení suchého kontaktu

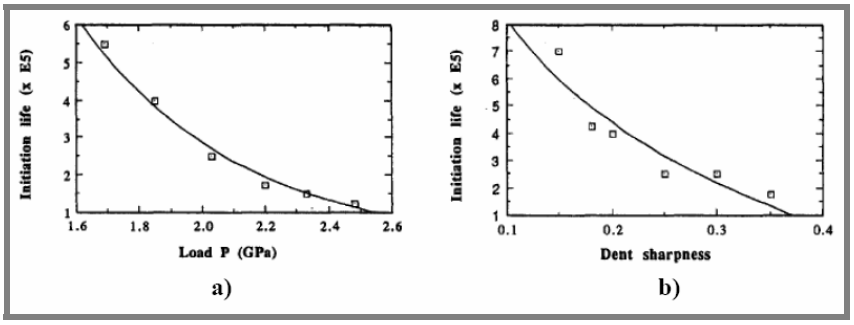
Model iniciace a propagace porušení

Autoři předkládají analytický EHD model popisující iniciaci a propagaci porušení. Liniový kontakt je rozdělen na malé kovové buňky o samostatném objemu (Obr. 14a). 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 povrch a ovlivňuje tak tlakové rozložení v kontaktu. Tím přispívá k šíření porušení (Obr. 14b).



Obr. 14: a) liniový EHL model b) takové rozložení v kontaktní oblasti s vtiskem a spallem

Na procesy iniciace a propagace poškození mají významný vliv podmínky EHL (zatížení, skluz a materiálové vlastnosti) a také geometrie vtisku. Za iniciační dobu je považován počet cyklů do poškození první modelové buňky. Iniciační doby byly zkoumány za různých zatížení a různých „ostrostí“ vtisků (Obr. 15a,b). Se zvyšujícím se zatížením dochází k nárůstu kontaktního tlaku a tím i tlakových špiček na okraji vtisků. Geometrie vtisku rovněž významně ovlivňuje tlakové rozložení v kontaktu. Čím „ostřejší“ je hranice vtisku, tím větší je i tlaková špička.



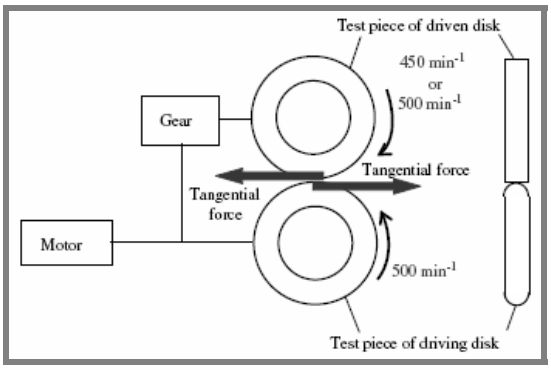
Obr. 15: Iniciační doby poškození a) vliv zatížení b) vliv „ostrosti“ vtisku

Závěr:
Získané výsledky ukazují, že vtisk má vliv na iniciaci poškození a výrazně zkracuje únavovou životnost. Mechanismus poškození povrchu spallingem byl studován pomocí vyvinutého analytického modelu. Model uvažuje cyklické plastické napětí jako iniciační a propagační podmínku poškození. Pakliže toto napětí není přítomno, nedojde k tvorbě poškození. Zatížení a „ostrost“ vtisků má rovněž podstatný vliv na únavový proces. 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 ovlivňují iniciaci poškození spíše než jeho propagaci. Studie nezahrnovala vliv zbytkových napětí, drsnosti povrchu a teplotního zatížení.

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.

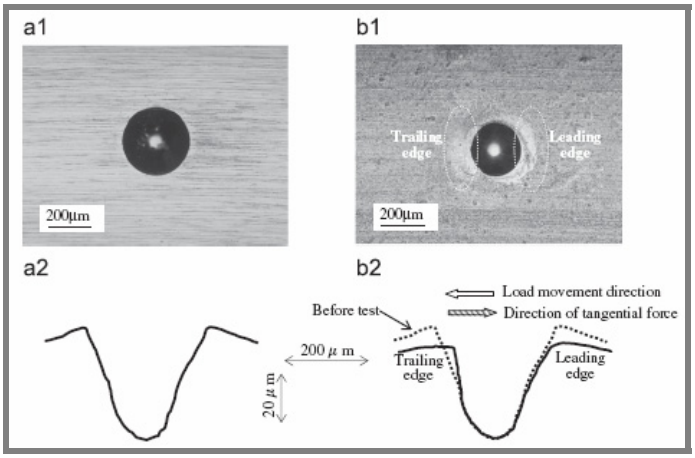
Článek poskytuje experimentální studii mechanismu iniciace povrchového poškození odlupováním, v důsledku přítomnosti umělého vtisku na třecím povrchu za podmínek mazání kontaminovaným mazivem. Byly provedeny experimenty na dvou-diskovém zařízení a na stroji typu „ball on rod (kulička-tyč)“. Ze získaných výsledků autoři předkládají závěr, že iniciace poškození na okraji vtisku je významně ovlivněna tangenciální silou. Tato síla vede ke generaci tahového napětí na okraji vtisku a tím způsobuje iniciaci poškození.

Popis experimentu:
RCF testy byly provedeny na dvou-diskovém stroji (Obr. 16) 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 Ra 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. 16: Schéma dvou-diskového RCF zkušebního zařízení

Výsledky:
Autoři diskutují možné ovlivnění iniciace poškození v důsledku přítomnosti tangenciální síly, působící na vzorku. Poukazují na to, že výzkum byl prováděn s cílem experimentálně popsat mechanismus iniciace poškození třecího povrchu v důsledku přítomnosti vtisku. Během experimentů byly uvažovány provozní podmínky kontaminovaného maziva. Srovnání geometrie vtisku před a po experimentu je možné vidět na obrázku 17.



Obr. 17: Deformace vtisku před a po experimentu: a1,a2: před testem, b1,b2: po testu

Ze získaných výsledku autoři uvádějí následující závěry:

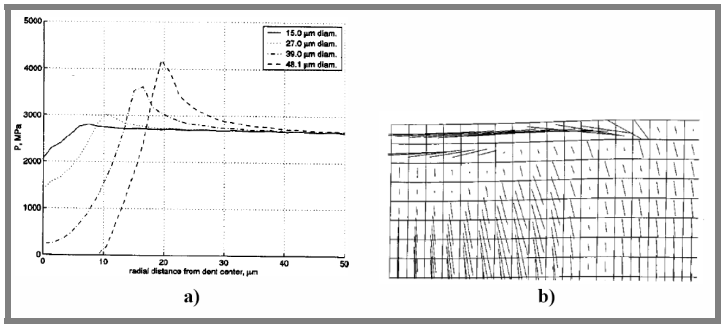
- tangenciální síla urychluje iniciaci porušení na okraji vtisku.
- Pozice poškození je dána směrem tangenciální síly (spíše než směrem odvalování).
- K iniciaci a propagaci poškození dochází nejčastěji na hnaném komponentu soustavy.
- Tangenciální síla způsobuje nárůst napětí na okrajích vtisku.
- Poškození lze snížit použitím maziva s vysokým trakčním koeficientem

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.

Článek poskytuje FEM (Finite Element Metod) simulaci průchodu kontaktem pro čtyři různé velikosti kruhových vtisků. Navazuje na předchozí experimentální studie se zařízeními typu „ball on rod (kulička-tyč)“. Studován byl vliv velikosti vtisku na tlakové rozložení a pozici poškození pro suchý bodový kontakt. Cílem článku je popsat proces kontaktní únavy pomocí realistického materiálového modelu. Výsledky z FEM analýzy vedou k nalezení místa iniciace poškození.

Popis procedury:
FEM model sestává 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.

Výsledky:
Výsledky získané ze simulace byly porovnány s několika experimentálními měřeními. Maximální zatížení při modelování vyrážení vtisku bylo 29 N, poté nastávaly problémy s konvergencí řešení. Proto nebylo možné provést přímé srovnání s experimentem. Zatížení při experimentální tvorbě vtisku bylo 981N. Modelovány byly tlakové rozložení v kontaktu, napěťové rozložení a odhad místa tvorby poškození (Obr. 18a,b). Předpokládaná hloubka iniciace poškození byla stanovena na 0,75 μm pod povrchem.



Obr. 18: Výsledky simulace: a) tlakové rozložení, b) napěťové rozložení

Závěr:
Článek poskytuje bližší náhled do problematiky RCF a materiálových deformaci a napětí pomocí simulace FEM modelem bez výpočtu únavového poškození. Modelován byl kontakt se čtyřmi vtisky různých průměrů. Analýza zanedbala několik faktorů, vliv EHD, tření, teplotní zatížení a dynamiku procesu. Ke srovnání s experimentem bylo použito pouze čtyř experimentálních měření poškození.

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.

Článek popisuje metodiku hodnocení chování kontaktní únavy (RCF) ložiskových ocelí za přítomnosti povrchových vtisků. Experiment sestává z tvorby vtisků různých poloměrů (tj. 200, 400 a 600 μm), při různých zatíženích (5 až 50 daN). Testy kontaktní únavy byly prováděny na dvou-diskovém stroji za různých provozních podmínek, pro porovnání nitridované oceli 32CrMoV13 a oceli M50. Numerická analýza byla provedena k ověření experimentálních výsledků. Pomocí FEM simulace texturovacího procesu byla získána zbytková napětí v okolí vtisků. Následně bylo simulováno zatížení kontaktní oblasti s vtiskem a byla stanovena mez únavy. Experimentální i numerické testy ukazují lepší výsledky při použití nitridované oceli 32CrMoV13 oproti oceli M50. Článek dále poukazuje na důležitost skluzu při RCF testech a stanovuje dvě oblasti iniciace poškození.

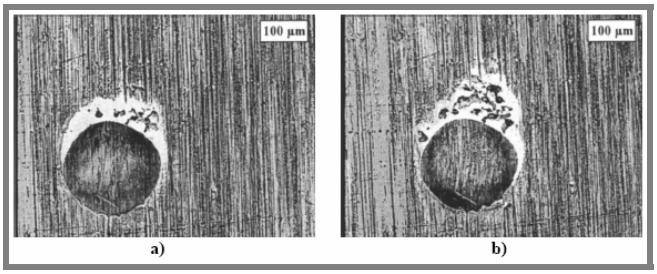
Popis experimentu:
Hlavní cíle experimentu byly:

- stanovit chování texturovaných ocelí 32CrMoV13 a M50 při RCF testech
- stanovit vliv Hertzova tlaku, skluzového poměru a tangenciálního napětí na RCF
- identifikovat místa výskytu poškození

Parametry experimentu:
Experimentálním zařízením byl dvou-diskový 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. Povrch vzorků byl opatřen vtisky o poloměrech 200, 400 a 600 μm, vyrážených silami 5, 10, 20, 30 a 50 daN.

Numerická simulace:
Proces texturování a zatížení vtisku v kontaktní oblasti byl 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.

Výsledky:
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 $50x10^6$ cyklů. Celkové pozorované poškození bylo iniciováno při $20x10^6$ cyklech (Obr. 19). Je třeba zdůraznit, že toto kritérium je zaměřeno na výskyt lokálního povrchového poškození a ne na jeho propagaci a růst.



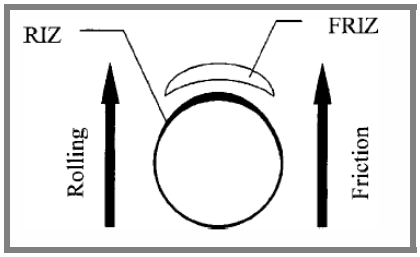
Obr. 19: Ocel M50 vtisk 400-30: a) $10x10^6$ cyklů, b) $50x10^6$ cyklů

Srovnání ocelí 32CrMoV13 a M50
Srovnávány byly 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
Výsledky ukazují, 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
Dvě oblasti výskytu poškození byly nalezeny. 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. 20).



Obr. 20: Výskyt oblastí poškození

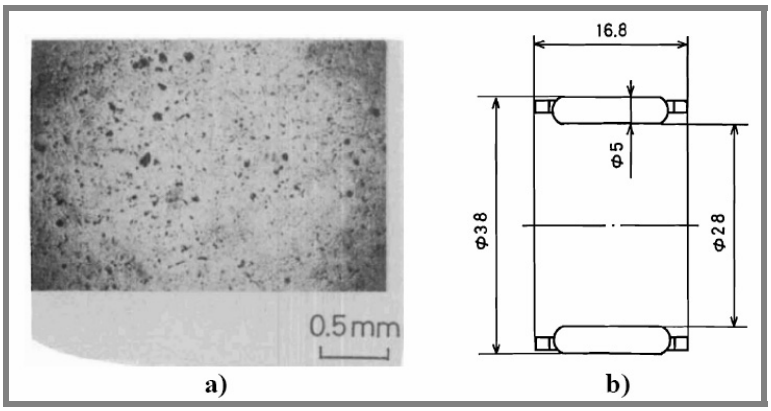
Závěr:
Byla navržena experimentální procedura, zahrnující vliv modifikovaných struktur dvou ocelí na RCF. Provedena byla i numerická analýza pro srovnání s experimentálními výsledky. Tato rovněž stanovila novou analytickou rovnici

popisující tvar vtisků. Experimenty i numerická simulace ukázaly, že nitridovaná ocel 32CrMoV13 výrazně zlepšuje odolnost povrchu proti projevům únavových poškození než ocel M50.

AKAMATSU, Y. el. al., **Influence of Surface Roughness Skewness on Rolling Contact Fatigue Life**, Tribology Transactions, vol. 35, 1992, s. 745–750.

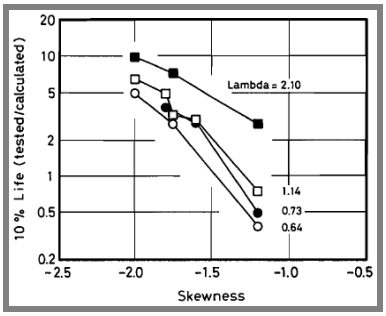
Článek hodnotí vliv nahodile rozmístěných malých vtisků na vlastnosti mazání. Za vzorek bylo použito jehlové ložisko (Obr.21b), jehož prvky (jehly a kroužky) byly opatřeny malými vtisky. Výsledná drsnost povrchu byla charakterizována použitím parametru nesouměrnosti Sk(skewness). Parametr nesouměrnosti 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.

Popis experimentu:
Hladké povrchy byly opatřovány nahodile rozmístěnými mikrovtisky. Příklad takto modifikovaného povrchu reprezentuje obr. 21a. Rozložení mikrovtisků bylo přibližné stejné na všech testovaných vzorcích, 10 vtisků/mm. Přičemž, měnila se jejich hloubka a šířka. Maximální hodnota hlouby vtisku byla 2μm a šířky 75μm.



Obr. 21: a) Texturovaný povrch, b) Schéma testovaného ložiska

Výsledky a závěr:
Experimenty byly prováděny za podmínek smíšeného a mezného mazání s parametrem mazání od 0,64 do 2,10. Vztah mezi parametrem nesouměrnosti (skewness) a 10% životností ukazuje obr. 22. Životnost klesla s klesající hodnotou parametru mazání Λ. Článek uvádí, že při stejných provozních podmínkách lze životnost prodloužit snížením hodnoty parametru nesouměrnosti ložiska.



Obr. 22: vztah mezi parametrem nesouměrnosti a životností

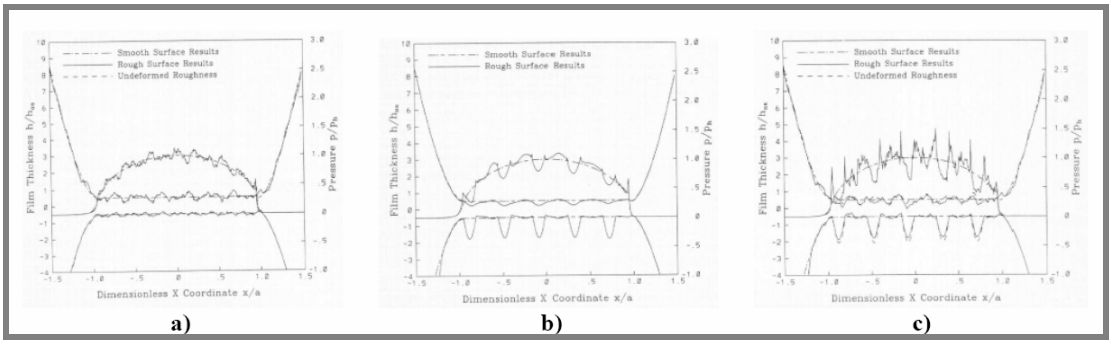
Povrchové defekty ale značně ovlivňují tlakové rozložení v okolí nerovnosti. To vyvolává otázku, zda by nebylo vhodné zohlednit, zda na zvýšení životnosti nemá vliv jiná příčina. Například zda nerovnosti nejsou příliš daleko od sebe, tzn. napětí nepřesáhne hodnoty parametrů nesouměrnosti. Dále by bylo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

ZHAI, X., CHANG, L., HOEPRICH, M. R., NIXON, H. P., **On mechanisms of fatigue life enhancement by surface dents in heavily loaded rolling line contacts**, Triblology transactions, vol. 40, 1997, s.708-714.

Článek reaguje na předchozí studii autorů Akamatsu a spol.[20] a popisuje mechanismy zlepšení únavového života pomocí povrchových vtisků za podmínek blížících se čistému valení. Prezentována je analýza transientní micro-EHL vysoce zatížených kontaktů drsných povrchů s vtisky. Výsledky naopak neukazují žádný výrazný vliv micro-EHL na zlepšení únavového života. Článek nadále poskytuje hypotézu, že možností zvýšení životnosti je pravděpodobné při uvažování vtisků jako „zásobníků“ maziva.

Micro-EHL analýza:
Použité parametry pro micro-EHL analýzu odpovídají únavovým testům, které použili Akamtsu et al. Analýza byla zaměřena na vnitřní dráhu kontaktu ložiska.
Parametry:

- válečkové ložisko: průměr elementu 5 mm; průměry vnitřního a vnějšího kroužku: 28mm a 38mm; ocel SAE 52100
- drsnost povrchu válečku: RMS 0.025µm
- Hertzův kontaktní tlak: 2.5GPa
- otáčky ložiska: 3050 ot./min.
- centrální tloušťka mazacího filmu: 0.118µm
- drsnost povrchu je modelována sinusovou funkcí
- počet vtisků na kontakt: 3 až 5



Obr. 23: Micro-EHL efekt vtisků: a) povrch bez vtisků, b) hladký povrch s vtisky c) drsný povrch s vtisky

Obrázek 23 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 (drsných) povrchů s vtisky. Povrchy na Obr.23b a Obr.23c 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 snížení 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.

Závěr:
Prezentované výsledky, které poukazují na nepříznivý vliv vtisků na únavový život liniového kontaktu, jsou opačné k experimentálním zjištěním Akamtsu et al. Autoři tento nesoulad vysvětlují zahrnutím podmínek mazání do únavových zkoušek a numerických analýz. Zároveň předkládají 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 zabraňovat hladovění. Experimenty ukázaly, že texturované válečky s parametrem sk -1,2 nezvyšují únavovou životnost ložiska. Podstatný nárůst je zaznamenám až u válečků s parametrem *sk* -1,75 a -2,0. Sk nabude hodnoty -1,2 při průměrné hloubce vtisku 0,11μm, takovýto vtisk je však příliš malý na splnění funkce zásobníku maziva. Proto při těchto podmínkách nedochází ke zvýšení únavové životnosti.

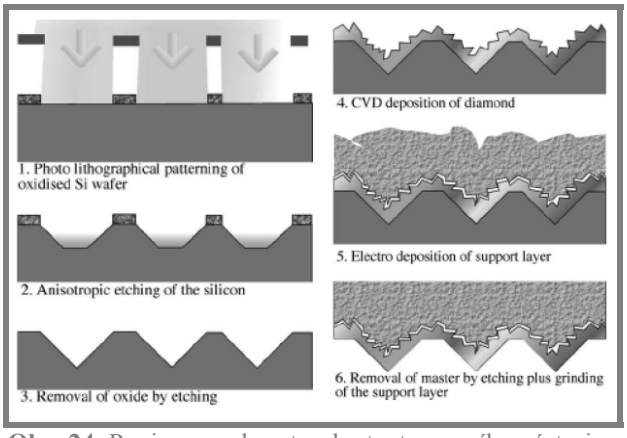
Hlavní závěry této studie jsou následující:

- 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.

PETTERSON, U. – JACOBSON, S.: **Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique**, *Tribology International*, 2006, vol. 39, s. 695-700.

Článek poskytuje popis nové techniky tvorby textur na třecích površích. Popisuje proces tvorby základní matrice (geometrie textury) a proces samotného vytváření textury na povrchu vzorku. Tvorba matrice je realizována nanesením diamantového filmu na ocelovou formu. Nanesený diamantový 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. Článek stručně popisuje techniku tvorby texturovacího nástroje a uvádí příklady plochých a zakřivených ocelových povrchů s takto vytvořenou texturou. V diskuzi dále uvádí možnosti využitelnosti této techniky v komerčním použití.

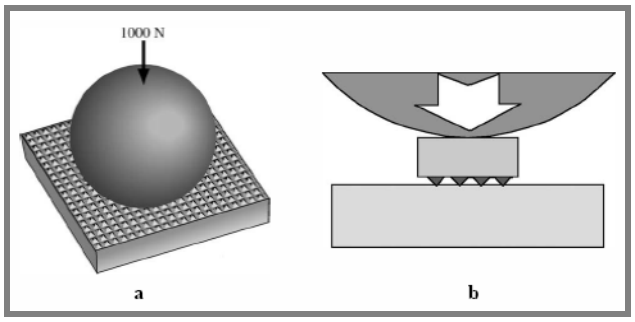
Popis techniky tvorby texturovacího nástroje:
Samotný nástroj byl vytvořen pomocí šesti základních kroků (Obr. 24): (1) šablonování silikonového těsnícího materiálu, (2) leptání pro vytvarování formy, (3) odstranění oxidické vrstvy, (4) povlakování formy diamantovým filmem, (5) niklová podpora diamantového filmu a (6) odkrytí povrchu nástroje odstraněním silikonu.



Obr. 24: Popis procedury tvorby texturovacího nástroje

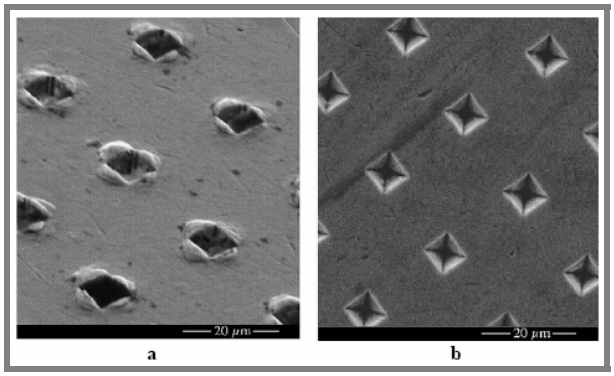
Výhodou této techniky texturování je rozmanitost v dosažitelných geometriích textur. Minimální velikost jednoho vtisku je limitována rozlišením procesu, zde se pohybuje kolem 1 μm. To odpovídá hustotě rozmístění přibližně 250.000 čtvercových tvarů na mm^2. Maximální hloubka je limitována tloušťkou těsnícího materiálu, která je běžně 500 μm.

Princip texturování:
Textrurování bylo experimentálně zkoušeno na rovinných a zakřivených (kulička) vzorcích. Princip texturování obou těchto případů ukazuje obrázek 25. K měření byla použita kulička o průměru 10mm, na kterou bylo aplikováno zatížení 1000N. V případě rovinných vzoků byly použity ploché ocelové desky o rozměrech 4 mm2 a 78,5 mm^2, zatížené silou 1000N a 45.000N v uvedeném pořadí.



Obr. 25: Princip texturování a) kuličky b) desky

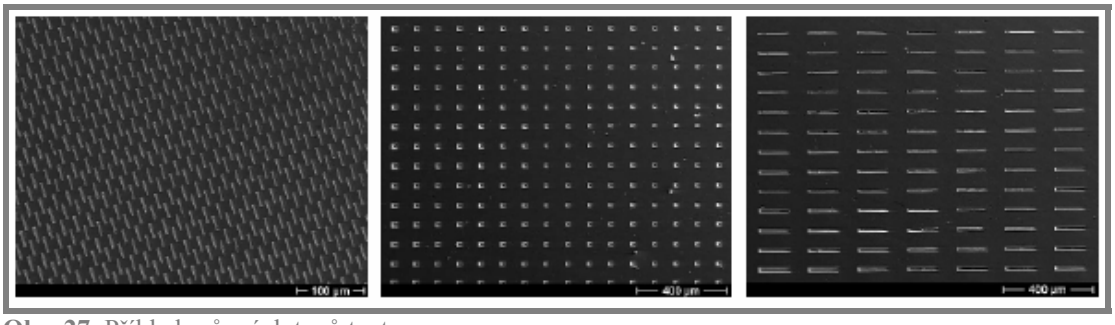
Po vyražení textury byly povrchy obou vzorků leštěny, aby došlo k odstranění přebytečného materiálu, vytlačeného během procesu tvorby textury. Obrázek 26 pak ukazuje detail výsledné textury před a po leštění.



Obr. 26: Detail textury: a) přes leštěním b) po leštění

Závěr:

Technika texturování prezentovaná v tomto článku poskytuje metodu tvorby vtisků s velmi dobře definovanou geometrií. Na jedno vyražení se podařilo texturovat plochu o rozměrech až 78,5mm^2. Pro využitelnost v komerční oblasti je však další vývoj nutný. Autoři uvádějí výhodu této techniky v možnostech tvorby libovolných struktur (Obr. 27). Další možností využití texturovacího nástroje je jeho použití při studiu tvrdosti různých materiálů.



Obr. 27: Příklady různých typů textur

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 kontaktní únavy. 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 přístupen 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 a 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

Na základě rozboru problematiky cílené modifikace topografie třecích povrchů strojních součástí a současného stavu problematiky se vlastní výzkum zaměří na experimentální studium vlivu geometrie soustav vtisků na kontaktní únavu třecích povrchů strojních prvků. Soustavy vtisků budou studovány jako potenciální koncentrátory napětí, přičemž zohledněn bude vliv různých geometrií soustav včetně různých tvarů jednotlivých vtisků. Práce naváže na předchozí výzkum a doplní jej o stanovení metodiky vyražení soustav vtisků a přípravy vzorků pro jednotlivá měření. Práce také předpokládá realizaci vlastních experimentů s jejich vyhodnocením.

4.1 Dílčí cíle disertační práce

Práce bude zohledňovat tyto dílčí etapy řešení:

- stanovení metodiky vyražení soustav vtisků
- stanovení postupu přípravy vzorků pro vlastní měření
- realizace experimentů a jejich vyhodnocení
- stanovení vlivu soustav vtisků na kontaktní únavu strojních prvků
- vyhodnocení soustav vtisků s ohledem na jejich geometrii

5 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DISERTAČNÍ PRÁCE

Předchozí studie ukázaly, že vhodně navržená povrchová textura může za konkrétních provozních podmínek přispět k prodloužení únavové životnosti součásti. 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 součásti. 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.

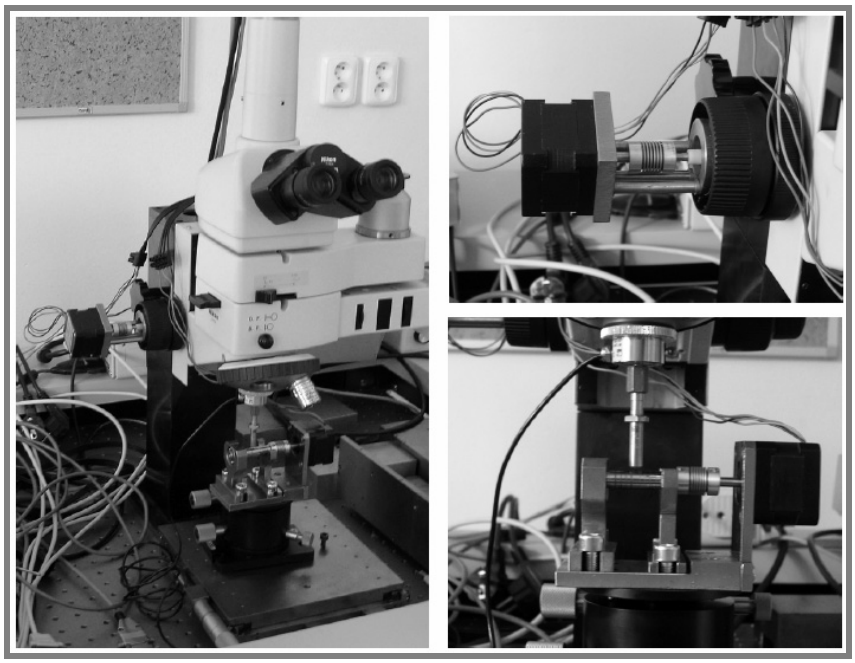
Byla realizována úprava stávajícího experimentálního zařízení. Základ konvenčního mikroskopu byl rozšířen tak, aby bylo možné vytvářet složitější textury na třecích površích se zaručením přesnosti a opakovatelnosti. Tato úprava umožňuje snadnou kontrolu geometrie vtisků i jejich soustav. Pro takto modifikované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

Realizované experimenty umožnily odladění měřicí soustavy a řídicího softwaru. V současné době probíhají další experimenty, které umožní popsat vliv cílené modifikace topografie třecích povrchů na kontaktní únavovou životnost třecích povrchů a naplnit vymezené dílčí cíle disertační práce.

5.1 Modifikace topografie třecích povrchů

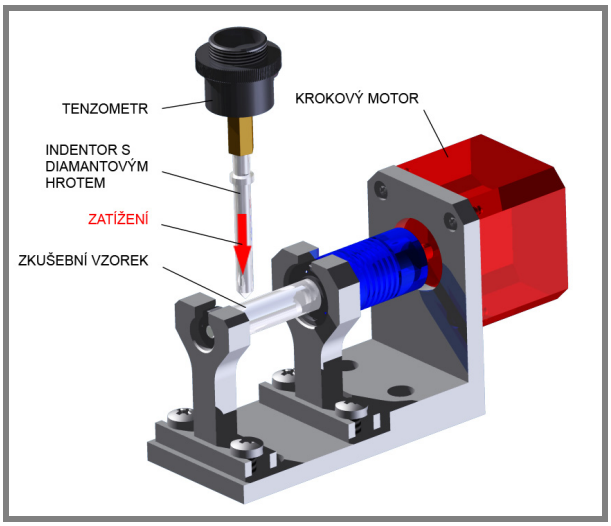
K cílené modifikaci topografie povrchů vzorků bylo využito mechanické vyražení vtisků pomocí vnikacího tělíska (Rockwell) s diamantových hrotem s poloměrem zaoblení 0,2 mm. V rámci disertační práce byla navržena modifikace stávajícího vyražecího zařízení z manuálního na řízené. Z tohoto důvodu bylo provedeno několik úprav. Původní manuální koncept představoval velkou časovou zátěž na tvorbu mirkostruktur a zároveň nedovoloval zachování přesnosti a opakovatelnosti procesu vyražení vtisků. Proto byl nahrazen procesem automatizovaným. Úprava využívá modifikaci konvenčního mikroskopu (Obr.28). Přiřazeny jsou dva krokové motory, které slouží k vertikálnímu posuvu mikroskopu a k otáčení vzorkem.

Proces vytváření jednotlivých měřicích stop je plně automatizován a je řízený počítačem. Za tímto účelem byl vyvinut řídicí software, umožňující snadnou kontrolu základních parametrů vyražecího procesu. Modifikace topografie povrchu vzorku je realizována vertikálním posuvem mikroskopu. Horizontální posuv není řízený a je realizován ručním posuvem, pomocí mikrometru. Tímto způsobem jsme schopni zajistit požadovanou strukturu třecího povrchu a snadnou kontrolu geometrie vtisků.



Obr. 28 Modifikace konvenčního mikroskopu

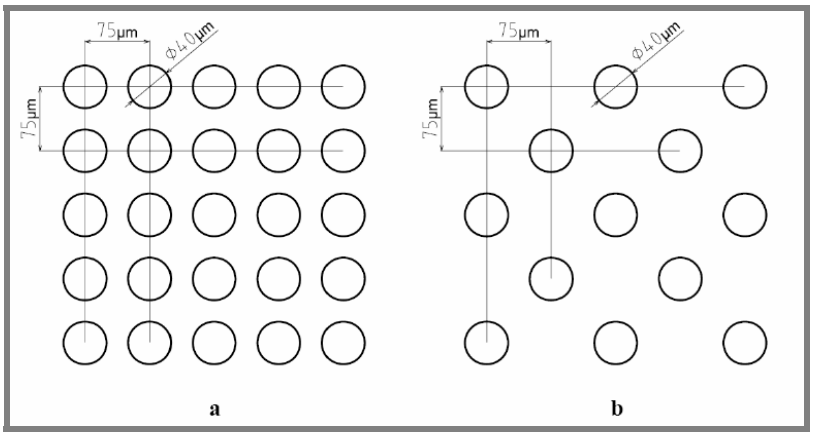
Proces tvorby mikrostruktur na třecích površích vzorků je stanoven požadovanými podmínkami na geometrii vtisků a na mechanickém principu vyrážení. Princip vyrážení vtisků je ukázán na obr. 29. Ocelový Indentor s diamantovým hrotem umožňuje tvorbu vtisků s velmi dobře definovanou geometrií. Mikrostruktury jsou vytvářeny po jednotlivých vtiscích. Zkušební vzorek je upevněn v upínacím přípravku, připevněném na polohovacím stolku Newport M-PO80N. 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. Maximální zatížení vzorku 80N je dáno maximálním zatížením aretace polohovacího stolku.



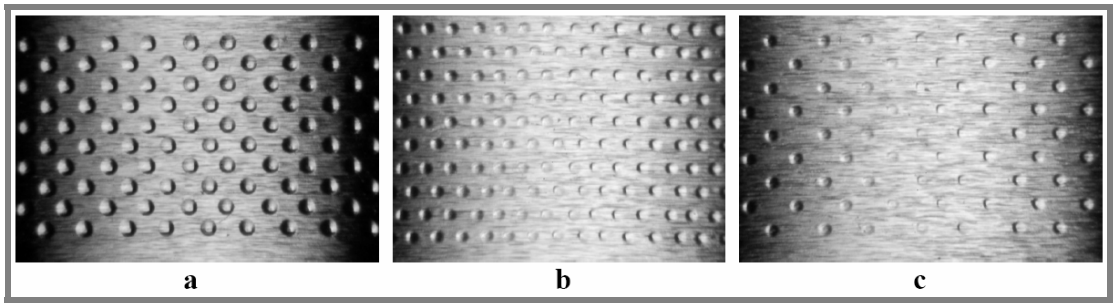
Obr. 29 Princip tvorby mikrostruktur

5.1.1 Geometrie struktur

Úvodní experimenty, zohledňující vliv mikrostruktur na kontaktní únavu sloužily především k odladění řídicího softwaru a k nalezení vhodného uspořádání soustavy vtisků (Obr. 30). Pro další realizaci experimentů byl zvolen koncept textury na obr.25b. Rozměry mezi vtisky byly voleny 75µm mezi řadami i mezi sloupci. Průměr jednotlivých vtisků je variabilní v závislosti na zátěžné síle, pro úvodní testy byl průměr vtisku stanoven na 40µm. Obrázek 31 pak ukazuje reálnou strukturu. Z důvodu vysoké časové náročnosti tvorby vtisků, nebyl texturován celý povrch zkušebních vzorků, ale pouze jednotlivé úseky, odpovídající velikosti kontaktní oblasti [27].



Obr. 30 Koncepty struktur vtisků [27]



Obr. 31 Reálná struktura - soustavy vtisků

5.2 Test 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 můžou vést až

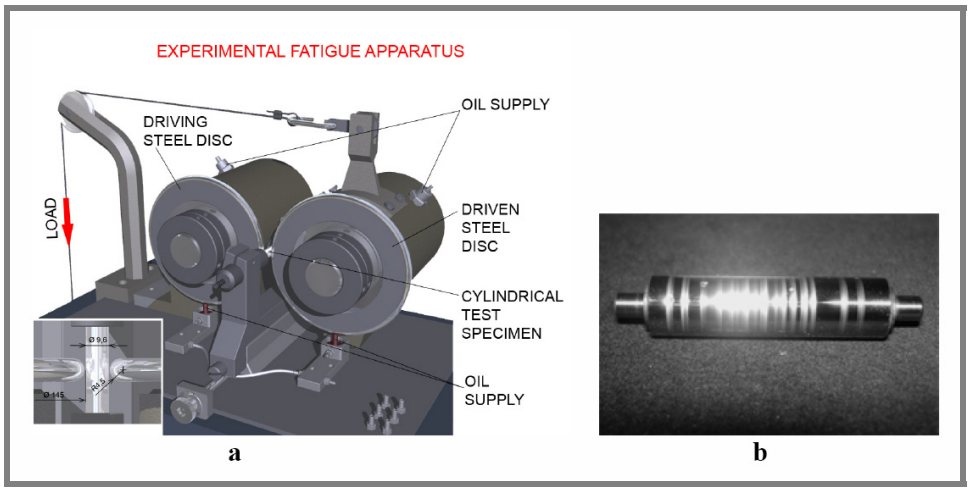
k porušení součásti a jejímu vyřazení z provozu. Z toho důvodu bylo přistoupeno ke studiu vlivu textur na třecích površích na kontaktní únavu. Testy byly prováděny vždy do výskytu poškození pittingem. Sledován byl čas do porušení součásti. Ze známých parametrů experimentu je pak snadné dopočítat počet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

5.2.1 Experimentální zařízení

Chování cílené modifikace topografie za reálných podmínek vyskytujících se v tribologických soustavách bylo studováno s využitím simulátoru R-Mat2 (Obr.32a). Simulátor je sestaven ze dvou disků, z nichž jeden je poháněn elektromotorem, druhý je hnaný. Zkušební vzorek je umístěn mezi disky a přítlačnou silou je zatížen. Tuto sílu lze přesně regulovat pomocí přídavného závaží. Poháněný disk je mazán a svým pohybem přenáší mazivo do celé soustavy [28].

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

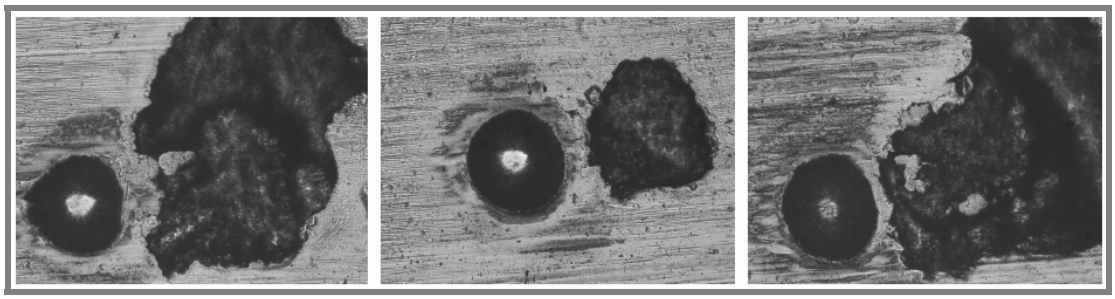
Zkoumaným vzorkem byla hřídel o průměru 9,6 mm, vyrobena z oceli 14 109 se střední aritmetickou úchylkou profilu Ra 0,1 μm (Obr.32b). V experimentu byly použity disky z oceli 14 109, jejichž průměr byl 145 mm a poloměr zaoblení v ose kolmé na osu otáčení 4,5 mm. Ze známých parametrů experimentu lze potom snadno určit počet cyklů do porušení zkušebního vzorku.



Obr. 32 a) Experimentální zařízení R-Mat2 b) zkušební vzorek [28]

5.2.2 Výsledky testů kontaktní únavy

Testy kontaktní únavy navazují na předchozí experimenty s jednotlivými vtisky v kontaktní stopě, které prokázaly, že geometrie vtisku má významný vliv na únavovou životnost vzorku. Příklady porušení kontaktní únavou za přítomnosti jediného vtisku v kontaktní stopě ukazuje obr. 33.



Obr. 33 Příklady poškození s jediným vtiskem v kontaktní stopě

Úvodní série experimentů se soustavami vtisků v kontaktní oblasti sloužily k odladění řídicího softwaru a k nalezení vhodné povrchové textury. Bylo provedeno několik ověřovacích zkoušek a posléze byla stanovena metodika vlastního procesu vyrážení. Různé typy textur byly realizovány pomocí variací zátěžných sil. Z dosavadních výsledků je patrné, že přítomnost textury na třecím povrchu může pozitivně ovlivnit únavovou životnost součásti. Obrázek 34 ukazuje vybrané výsledné poškození pittingem po ukončení jednotlivých zkoušek.

Obr. 34 Příklady poškození se soustavou vtisků v kontaktní stopě

Pro další studium byly stanoveny stejné provozní podmínky a byla naplánována další série experimentů, která napomůže zhodnotit míru rizika únavového poškození třecích povrchů v závislosti na cílené modifikaci topografie.

Další získané výsledky pak pomohou popsat a kvantifikovat jevy, vyskytující se v běžných podmínkách provozu strojních součástí.

6 ZÁVĚR

Cílená modifikace topografie třecích povrchů představuje jeden ze způsobů zlepšení tribologických vlastností mazaného kontaktu u nekonformně zakřivených těles. Přítomnost textury v mazaném kontaktu však může působit jako koncentrátor napětí, ovlivnit rozložení tlaku a tak zapříčinit únavové poškození třecích povrchů.

V rámci práce byla uskutečněna řada experimentů, zaměřených na studium únavového poškozování třecích povrchů. Geometrie vtisků (především jejich hloubka) byla zohledněna v rámci experimentů. Byla realizována úprava stávajícího zkušebního zařízení, umožňující automatické vytváření textur na třecích površích. Zároveň byl odladěn postup přípravy vzorků pro realizaci vlastních měření únavového poškozování třecích povrchů. Bylo stanoveno několik charakteristických geometrií soustav vtisků, které byly následně podrobovány únavovým zkouškám.

Ze získaných výsledků lze usuzovat, že vhodně navržená textura na třecím povrchu může, za daných podmínek, snížit riziko únavového poškození a napomáhat tak k prodloužení únavové životnosti součásti. Na základě těchto výsledků byly naplánovány další série experimentů, které umožní popsat chování textur (reprezentovaných cílenou modifikací topografie) v mazaném kontaktu.

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1: Kontaktní geometrie 7
Obr. 2: a) Detail mikrovtisku před experimentem b) profil mikrovtisku 7
Obr. 3: Srovnání vývoje velikosti vtisku za podmínek mazání vazelínou a olejem 8
Obr. 4: a) proces vyražení mikrovtisku b) srovnání modelu a exp. měření 8
Obr. 5: poškození mikrospallem 10
Obr. 6: Mazací režimy pro tři různé velikosti mikrovtisků 10
Obr. 7: Modelované typy mikrovtisků 11
Obr. 8: Sít prvků a okrajové podmínky pro simulaci vyražení vtisku 12
Obr. 9: Metodologie simulace 12
Obr. 10: Tvar vtisku 12
Obr. 11: Rozložení tlaku povrchu s vtiskem během simulace odvalování 13
Obr. 12: Schéma zkušebního zařízení 14
Obr. 13: a) porušení mazaného kontaktu b) porušení suchého kontaktu 15
Obr. 14: a) liniový EHL model b) takové rozložení v kontaktní oblasti s vtiskem a spallem 15
Obr. 15: Iniciační doby poškození a) vliv zatížení b) vliv „ostrosti“ vtisku 16
Obr. 16: Schéma dvou-diskového RCF zkušebního zařízení 17
Obr. 17: Deformace vtisku před a po experimentu: a1,a2: před testem, b1,b2: po testu 17
Obr. 18: Výsledky simulace: a) tlakové rozložení, b) napěťové rozložení 18
Obr. 19: Ocel M50 vtisk 400-30: a) $10x10^6$ cyklů, b) $50x10^6$ cyklů 20
Obr. 20: Výskyt oblastí poškození 20
Obr. 21: a) Texturovaný povrch, b) Schéma testovaného ložiska 21
Obr. 22: vztah mezi parametrem nesouměrnosti a životností 22
Obr. 23: Micro-EHL efekt vtisků: a) povrch bez vtisků, b) hladký povrch s vtisky c) drsný povrch s vtisky 23
Obr. 24: Popis procedury tvorby texturovacího nástroje 24
Obr. 25: Princip texturování a) kuličky b) desky 25
Obr. 26: Detail textury: a) přes leštěním b) po leštění 25
Obr. 27: Příklady různých typů textur 25
Obr. 28 Modifikace konvenčního mikroskopu 29
Obr. 29 Princip tvorby mikrostruktur 29
Obr. 30 Koncepty struktur vtisků [27] 30
Obr. 31 Reálná struktura - soustava vtisků 30
Obr. 32 a) Experimentální zařízení R-Mat2 b) zkušební vzorek [28] 31
Obr. 33 Příklady poškození s jediným vtiskem v kontaktní stopě 32
Obr. 34 Příklady poškození se soustavou vtisků v kontaktní stopě 32

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Λ	[-]	- parameter mazání
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
PDF		- funkce hustoty pravděpodobnosti
Ra	[µm]	- střední aritmetická úchylka profilu
RCF		- Rolling Contact Fatigue
RMS	[µm]	- střední aritmetická úchylka profilu
Sk	[-]	- Skewness – parametr nesouměrnosti

Plus běžně používané jednotky SI.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

[1] NÉLIAS, D., VILLE, F., Detrimental effects of debris dents on rolling contact fatigue, Journal of Tribology, 2000, vol. 17, s. 55 – 64.

[2] OLVER, A.V.: The mechanism of rolling contact fatigue: an update. *Proc Inst Mech Eng, J Eng Tribol,* 2005, vol. 219, s. 313 – 30.

[3] 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.

[4] PETTERSON, U. – JACOBSON, S.: Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique, *Tribology International*, 2006, vol. 39, s. 695-700.

[5] ETSION, I.: State of the art in laser surface texturing. *Trans ASME Journal of Tribology*, 2005, vol. 127, s. 248-253.

[6] 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.

[7] 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.

[8] WEDEVEN, L.D.: Influence of debris dent on EHD lubrication, *ASLE Transactions*, 1977, vol. 21, s. 41-52.

[9] 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.

[10] 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.

[11] GAO, N., DWYER-JOYCE, R.S., BEYNON, J.H.: Effects of Surface Defects on Rolling Contact Fatigue 0f 60/40 Brass, 1999, *Wear*, vol. 225-229, s. 983-994.

[12] 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.

[13] KOSZELA, W., PAWLUS, P., GALDA, L.: The effect of oil pockets size and distribution on wear in lubricated sliding, *Wear*, 2007, vol. 263, s. 1585-1592.

[14] 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.

[15] WEDEVEN L.D. - CUSANO C.: Elastohydrodynamic film thickness measurements of artificially produced surface dents and grooves, *ASLE Trans,* 1979, vol. 22, s. 369-381.

[16] 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.

[17] VILLE, F. – NÉLIAS, D.: Early Fatigue Failure Due to Dents in EHL Contacts, *Tribology transactions*, 1999, vol. 42, s. 795-800.
[18] ŠAMÁNEK, O. - VRBKA, M.: Vliv povrchových nerovností na funkci mazaných kontaktů strojních součástí, *Konference diplomových prací 2007*, 2007, s.1-3, ISBN 978-80-214-3406-6.
[19] 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.
[20] AKAMATSU, Y., et al. Influence of surface roughness skewness on rolling contact fatigue life, *Tribology Transactions*, 1992, vol. 35, s. 745–750.
[21] 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.
[22] 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.
[23] VILLE, F., and 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.
[24] VILLE, F., and NÉLIAS, D.: An Experimental Study on the Concentration and Shape of Dents Caused by Spherical Metallic Particles in EHL Contacts, *Tribology Transactions*, 1999, vol. 42, No. 1, s. 231–240.
[25] ROBIN, Y., NÉLIAS, D., VINCENT, A.: Etude et modélisation de la fatigue de contact des aciers å roulements aéronatiques avec amorçage de l'endommagement en surface, *Technical Report*, Snecma/SNR, 2006.
[26] GLOVER, D.: A Ball-Rod Rolling Contact Fatigue Tester, *Rolling Contact Fatigue Testing of Bearing Steels*, 1982, ASTM STP 771, J. J. C. Hoo, ed., American Society for Testing and Materials, s. 107-124.
[27] ŠAMÁNEK, O.; MEDLÍK, J., Snížení tření a opotřebení strojních součástí cílenou modifikací topografie třecích povrchů, In *FSI Junior konference 2008 - Prezentace vědeckovýzkumných prací doktorandů - sborník.* Brno: VUT FSI v Brně, 2009. s. 128-133. ISBN: 978-80-214-3834-7.
[28] ŠAMÁNEK, O.: Vliv cílené modifikace topografie třecích povrchů na snížení tření a opotřebení strojních součástí, In sborník prací *49. Mezinárodní konference kateder částí a mechanismů strojů*, Srní: Západočeská Univerzita v Plzni, 2008, s.239-242, ISBN 978-80-7043-718-6.