

PITTINGOVÉ POŠKOZENÍ OZUBENÝCH KOL

M. Černý, J. Filípek, P. Mazal

Došlo: 23. listopadu 2009

Abstract

ČERNÝ, M., FILÍPEK, J., MAZAL, P.: *Pitting damage of gears*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2010, LVIII, No. 2, pp. 51–60

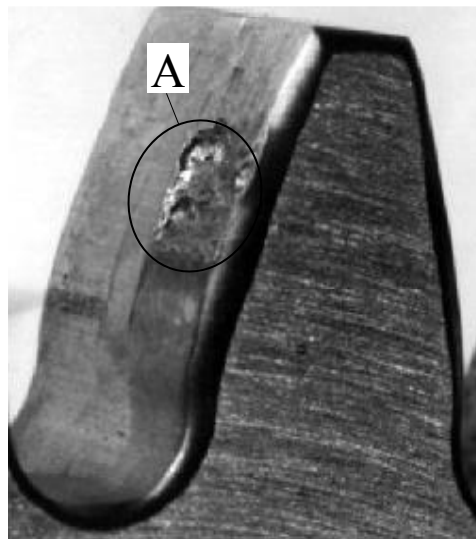
Presented work combines the knowledge presented in literature and own experimental works concerning characteristics of fatigue damage of cog-wheels. Material damage of the cog-wheel tooth sides at their relative movement is demonstrated in terms of microstructure. Development of damage is described with respect to presence of micro-cracks, their connection to another type of structural discontinuities and lubricant influence. The location of pitting damage is exactly determined on the base of experimental results. The conclusion of the work clearly determines the nature of pitting damage of cog-wheels evoked by fatigue loading, presence of under-surface inclusions and effect of lubricant pressure.

cog-wheel, cog side, fatigue wear, crack

S výjimkou lomu zubů v důsledku přetížení je nejrozšířenějším poškozením ozubení degradace stykové plochy boku zubu fragmentací materiálu pittingovým degradačním procesem. Kontaktní únavové poškození je charakterizováno postupnou kumulací poruch v povrchové vrstvě materiálu, tj. při cyklickém zatěžování těles v místě dotyku, což je typické právě pro zakřivené styčné plochy zubů. Tato materiálová exploatace je vyvolána odvalováním a současným skluzem zubů. Tzv. valivě kluzný pohyb je příčinou rozvoje tahových a smykových složek namáhání.

Základními provozními podmínkami, které mají významný vliv na rozsah a druh poškození, jsou: velikost mezního zatížení ozubení, skluzová rychlost i kvalita použitých maziv. Velký podíl na poškození povrchu boků zubů mají také geometrické parametry soukolí, materiál a tepelné zpracování ozubených kol.

Nejčastějším typem poškození zubů kol je tzv. jamková degradace – pitting. Jde o vylamování materiálu z boků zubů a tvorbu důlků s lasturovým lomem (Obr. 1). Speciálním případem kontaktního únavového opotřebení boků zubů je odlupování povrchové vrstvy materiálu vzniklé vlivem podpovrchové trhliny neboli „spalling“ (Obr. 2). Vzniká zejména u povrchově tvrzených ozubených kol (povrchově kalená, cementovaná, nitridovaná), kde



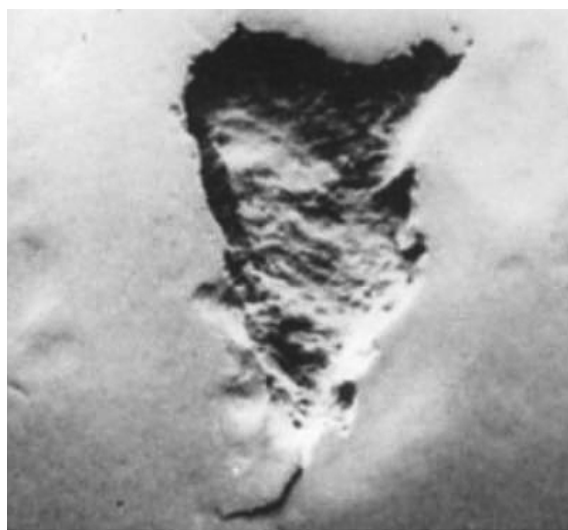
1: Zub poškozený pittingem (A)
1: Tooth damaged by pitting (A)

tloušťka tvrzené vrstvy dosahuje velmi malých hodnot.

Při valivě kluzném pohybu nastává opakovaná plastická deformace. Pod povrchem materiálu, kde působí vysoké deformace, jsou zrna materiálu orien-

rovnoměrně s povrchem a jsou vlivem napětí protáhlá. Toto napětí působí do hloubky a následně vytváří dislokační buňky, které jsou popisovány jako malé oblasti bez dislokací. Na Obr. 3a je zobrazena struktura dislokačních buněk mimo oblast únavy, získaná pozorováním transmisním mikroskopem při zvětšení 35 000× (Černý, 1980). V místě dotyku boku zubů jsou hranice mezi dislokačními buňkami protáhlé ve směru namáhání (Obr. 3b) a jsou pravděpodobnými místy vzniku podpovrchových trhlin. Mimo těchto míst s vysokou hustotou blokováných dislokací jsou příčinou vzniku podpovrchových trhlin různé vměstky či strukturní nedokonalosti materiálu.

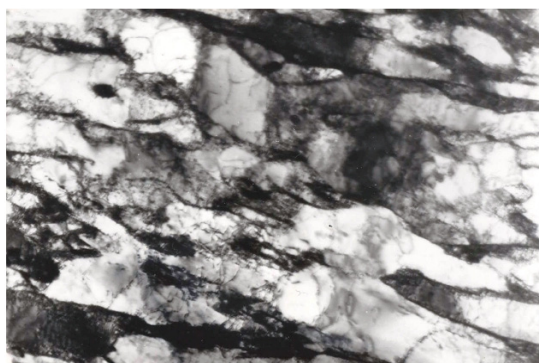
Průběh napětového pole zobrazeného metodou fotoelasticimetrie při vzájemném odvalování dvou zubů a jeho působení na počáteční trhlinu je vidět na Obr. 4. V okolí čela trhlinky se kumuluje vysoká koncentrace tohoto napětí, které vyvolává další šíření trhliny. K šíření únavových trhlin přispívá mazivo, které je do trhlin zatlačováno velkým tlakem.



1 mm

2: Spalling (Stachowiak, Batchelor; 2005)

2: Spalling (Stachowiak, Batchelor; 2005)



a – mimo oblast únavy

a – outside the area of fatigue

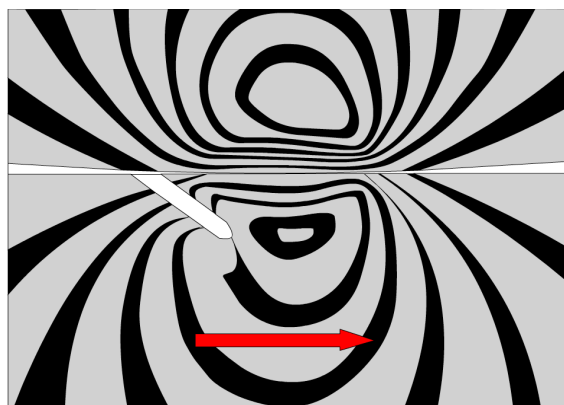
3: Struktura dislokačních buněk 30 000 ×

3: Structure of the dislocation cells 30 000 ×



b – v místě dotyku zubů

b – in the area of contact of the teeth

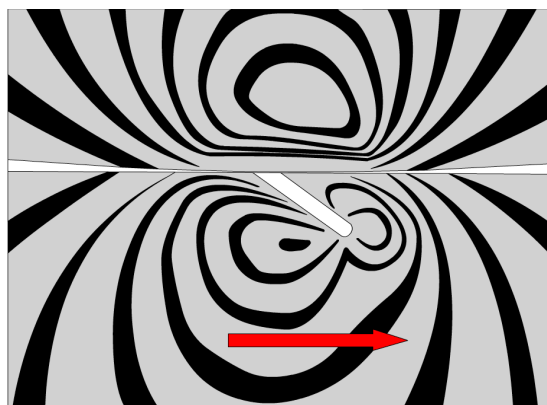


a – mimo oblast únavy

a – outside the area of fatigue

4: Napětové pole působící na únavovou trhlinu (Stachowiak, Batchelor; 2005)

4: Stress field causing the fatigue crack (Stachowiak, Batchelor; 2005)



b – v místě dotyku zubů

b – in the area of contact of the teeth

MATERIÁL A METODY

Pro zkoumání únavového poškození boků zubů bylo zvoleno ozubené kolo s čelním přímým evolventním ozubením s modulem $m = 2$ z rozvodu textilního stroje. Jedná se o ocel 12 061.1 (ČSN 41 2061) o tvrdosti HV = 255.

Na ozubeném kole byly vybrány zuby nejvíce poškozené kontaktním únavovým opotřebením. Oddělení zubů bylo provedeno laboratorní metalografickou pilou Mikron 110 korundovým kotoučem (Obr. 5).



5: Metalografická pila Mikron 110

5: Metallographic saw Mikron 110

Po zalití vzorků do speciální dvousložkové metylmetakrylátové pryskyřice a vytvrzení následovalo broušení a leštění na přístroji Kompakt 1031 na drsnost $Ra \div 0,01 \mu m$. Pro vizuální zkoumání únavových jevů bylo třeba metalografické vzorky vybrousit po vrstvách, aby bylo možné zkoumat počátky vzniku opotřebení a jeho rozvoj až po konečná stadia (brusný a leštící proces se opakoval s odběrem přibližně 0,05 mm k dosažení prostorového vjemu). K leptání povrchu metalografických vzorků byl použit 4% roztok HNO_3 v etanolu (Nital). Detailní pozorování příčin vzniku a dalšího rozvoje kontaktního únavového opotřebení boků zubů bylo prováděno ve světlém poli na optickém mikroskopu NEOPHOT 2 s připojeným digitálním fotoaparátem Olympus Camedia C-5060 a PC.

VÝSLEDKY

Z hlediska vnějšího makropohledu byly nezalité metalografické vzorky snímkovány při zvětšení 16 $\times$, 100 $\times$ a 250 $\times$ (Obr. 6). Trhliny v rámci prostorového projevu ohraničují materiálový objem, který je při silovém působení (smyk, vibrace apod.) příčinou fragmentace materiálu.

Počátky únavového poškození boků zubů na povrchu i pod povrchem materiálu, který je vystaven vysokému zatížení, vznikají při jejich vzájemném valivě kluznému pohybu. Rozvoj výsledné degradace lze tedy shrnout do dvou základních etap.

1. Povrchové mikrotrhliny – vznikají na povrchu boků zubů vlivem elastické deformace způsobené normálovým i tečným silovým zatížením, které v rámci VCÚ (vysokocyklová únava) přispívá k vytvoření iniciačních mikrotrhlin, do kterých je vtačováno mazivo při každé interakci boků zubů.
2. Podpovrchové mikrotrhliny – na vznik a rozvoj mikrotrhlin mají vliv hlavně nehomogenity materiálu. Jsou iniciačním místem a při jejich prostorovém propojení se efektivně podílejí na celkovém růstu výsledné trhliny.

Do povrchové mikrotrhliny (Obr. 7, pozice A) při valivě kluzném pohybu vniká mazivo a vlivem vysokých tlaků se trhlina šíří pod povrch materiálu boku zubu. Na naleptaném metalografickém vzorku (Obr. 8, pozice B) lze vidět, jak uzavřené a stlačené mazivo (vlivem působení tlakových sil při záběru zubů) v trhlíně pod povrchem materiálu působí na její další rozvoj. Trhlina prorůstá a větví se vlivem působení hydrodynamického tlaku podél hranic feritu a perlitu. Tlakem "kapaliny" je excitována i síť okolních mikrotrhlin, které zřejmě také leží v elasticko-deformační zóně.

Obr. 9 znázorňuje smykovou fragmentaci na povrchu boku zubu s vlivem elastické deformace a s průnikem maziva do povrchové mikrotrhliny, které je ovlivněno vstupním rozevřením jejího ústí při tahovém napětí od vzdalující se elastické "vlny".

Iniciační místo podpovrchové trhliny, ze kterého trhlina postupuje směrem k povrchu boku zubu (pod úhlem cca 45° k hlavnímu napětí σ , které je kolmé k napětí smykovému τ), je zobrazeno na Obr. 10 a. Trhlina se současně rozvíjí z iniciačního místa na opačnou stranu (Obr. 10 b).

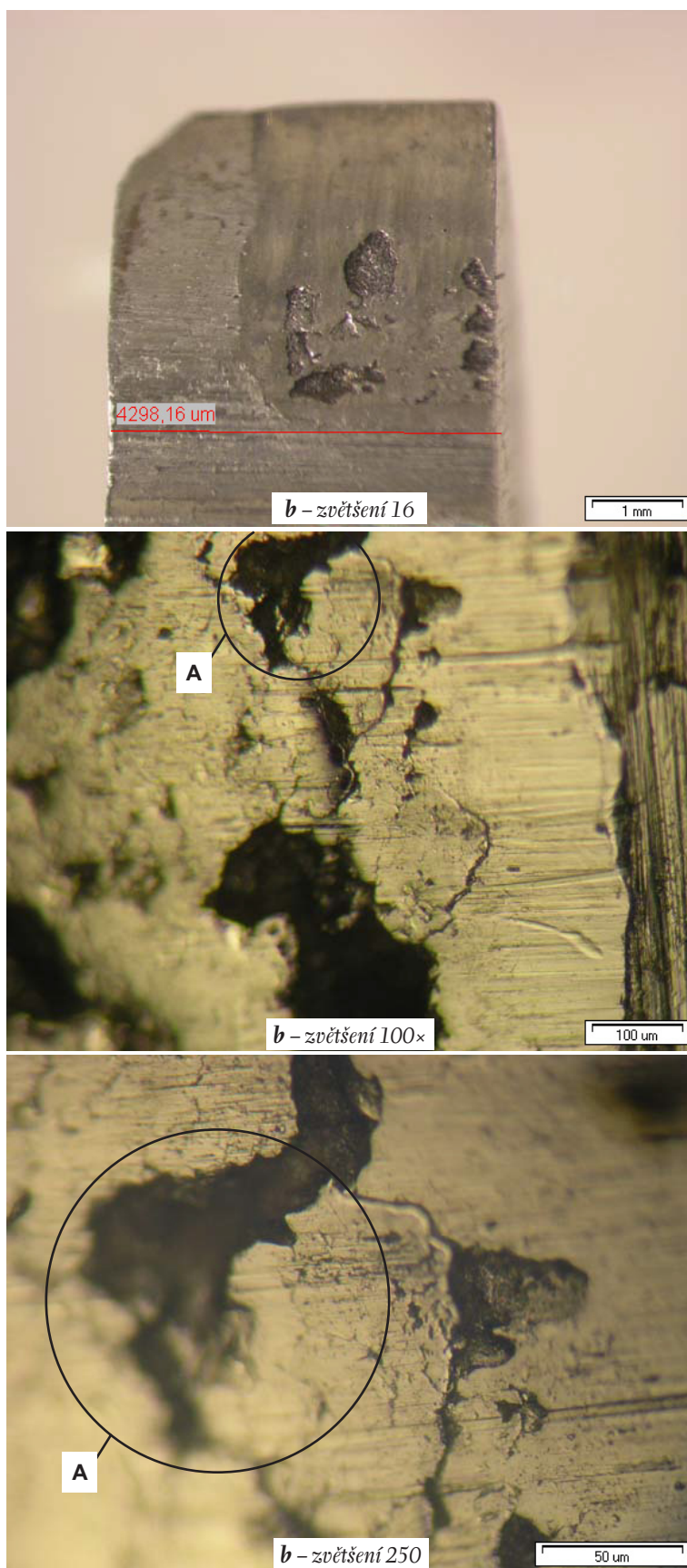
Místem vzniku podpovrchových mikrotrhlin jsou strukturní nedokonalosti materiálu. Nejčastěji se jedná o vměstky (sirníky, oxidy) či dutiny (rozválcované lunkry), které jsou vlivem deformačního napětí protaženy rovnoběžně se směrem tváření (válcování, tažení), jak je vidět na Obr. 11 a.

Obr. 11 b znázorňuje počáteční rozvoj podpovrchové mikrotrhliny v místě se strukturní nedokonalostí materiálu (detail E). Jednotlivé vměstky jsou propojeny sítí mikrotrhlin, která je převážně realizována porušením můstků mezi nehomogenitami.

Detailní růst trhliny po hranicích zrn materiálu lze vidět u naleptaného metalografického vzorku na Obr. 12. Trhlina se šíří mezi feritickými zrny a perlitickými koloniemi (ve směru lamel) a upřednostňuje snadný postup přes vměstky ležící ve směru šíření.

Vzájemné propojení podpovrchové trhliny (Obr. 13, pozice 2) s již vzniklou povrchovou trhlinou (Obr. 13, pozice 1) vytváří předpoklady pro oddělení objemu materiálu. Po vylomení horní vrstvy v rámci primárního pittingu se trhlina ještě více prohlubuje a vytvářejí klínový vstup pro vtažení maziva a pro další rozšiřování sekundární trhliny.

Propojení obou trhlin přispívá k následné materiálové degradaci povrchu boku zubu (Obr. 14) – uvolněním objemu materiálu, kterým je tato de-

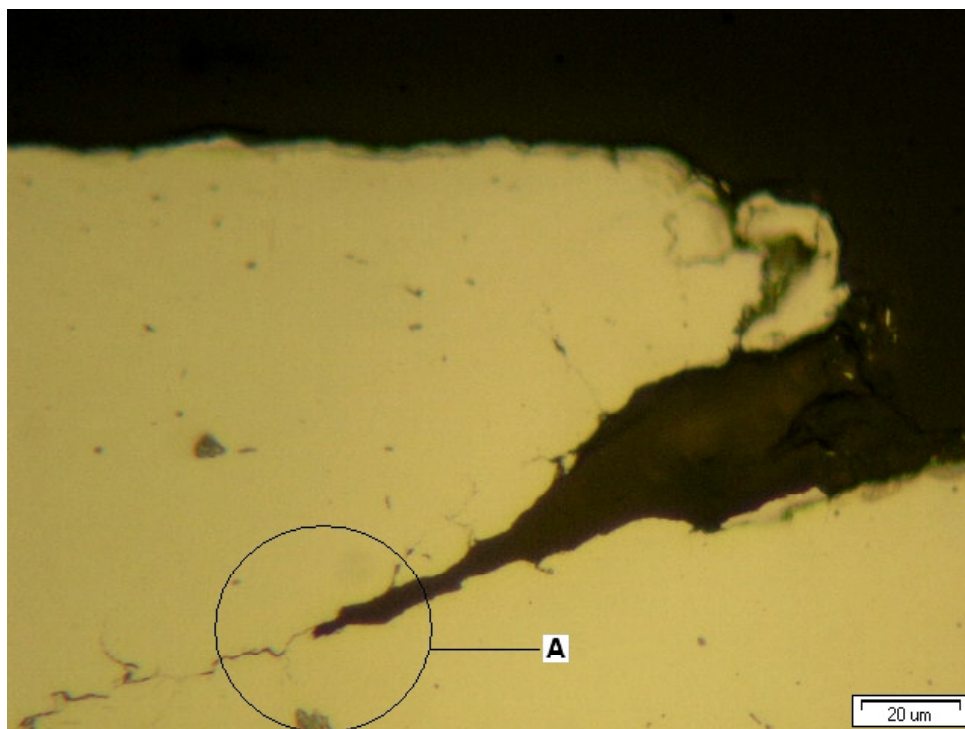


6: Povrch boků zubů poškozených pittingem
6: Side surface of the teeth damaged by pitting

gradace charakterizována jako pittingové porušení. V části materiálu je zřejmá síť mikrotrhlin (detail F) řízených napětově bez přítomnosti hydrostatického tlaku.

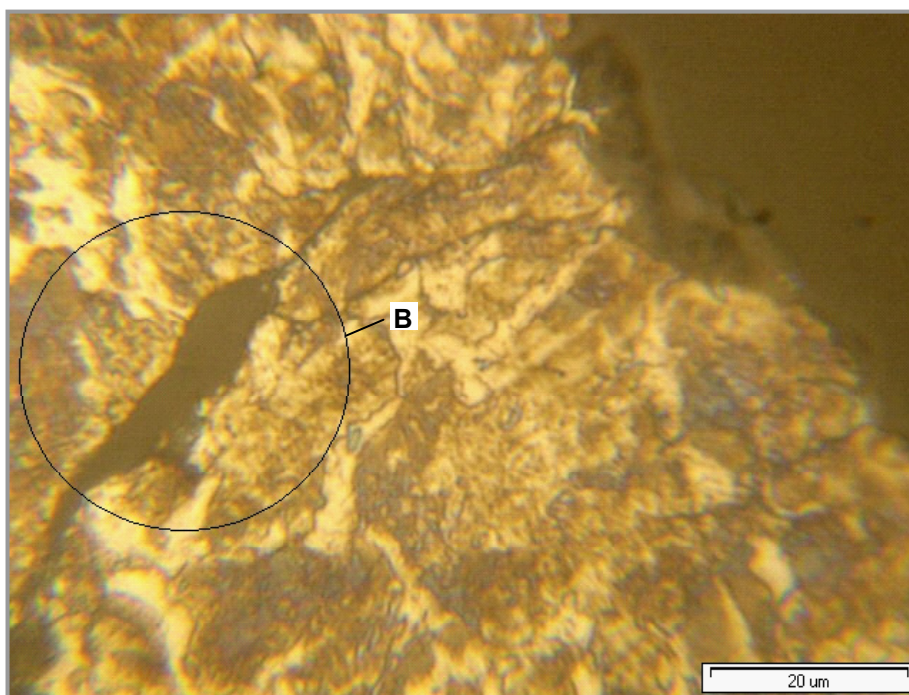
DISKUSE

Ze získaných experimentálních výsledků je zřejmý mechanismus pittingového (jamkového) poškození, které vzniká v součinnosti několika faktorů. Nejvýznamnější dvojicí jsou mechanické vlastnosti ma-



7: Natlačení maziva do trhliny (A)

7: Pushing of the lubricant into the crack (A)

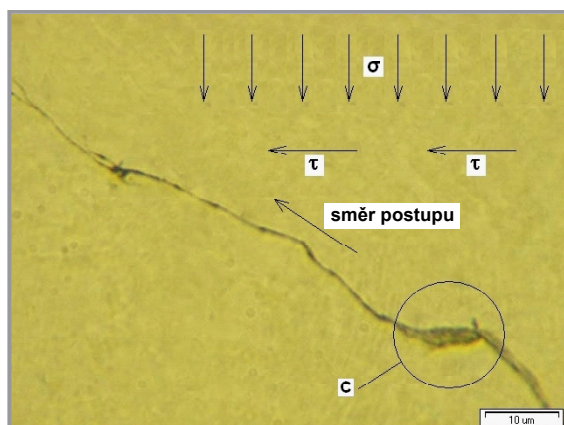


8: Plastické mazivo uzavřené v trhlíně (B)

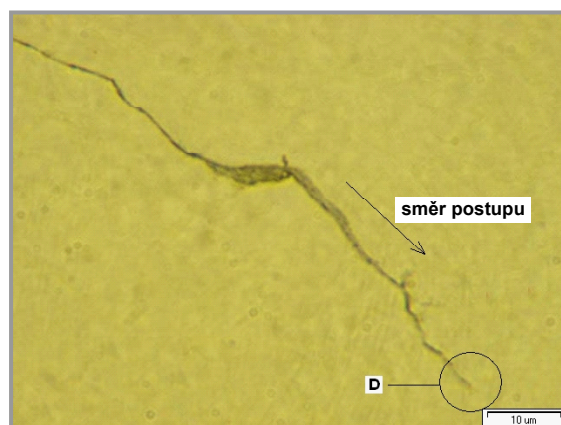
8: Plastic grease closed in the crack (B)



9: Rozvoj trhlin na povrchu boku zubu s různou intenzitou průniku maziva (A – nevýrazný, B – rozsáhlý)
 9: Expansion of the cracks on the side surface of the teeth with the different intensity of lubricant penetration (A – lackluster, B – extensive)



a – iniciační místo trhliny
 a – initiatory area of the crack
 10: Vznik podpovrchové trhliny
 10: Origin of the undersurface crack



b – čelo trhliny
 b – crack front

terálu ozubeného kola a aplikovaný kontaktní tlak v tzv. „bodovém“ kontaktu (jehož velikost byla odvozena ze silového působení a deformace ve styku dvou elastických těles s ohledem na omezující podmínky homogenity, izotropnosti, Hookovského chování, minimálního tření, rozměrů stykové plochy a quasistatického rovnovážného pohybového stavu). Uvažujeme-li pohyb kontaktního elipsoidu po boku zubu, je zřejmá i odezva povrchu a takto vznikající mikrovlna má z pohledu vysokocyklové únavy materiálu za následek iniciaci povrchových mikrotrhlin, tzv. zálupků, které s dalšími zátěžnými cykly prorůstají hlouběji do materiálu zubu. Zde je patrné působení druhé dvojice vlivů, která přispívá k rozvoji jamkového porušení – orientace cyklicky

uzavíraných povrchových trhlin a působení média, které vniká do vlnou rozevřené povrchové trhliny. Postupující povrchová trhlinka následně vstupuje do fáze vzájemného propojování jednotlivých povrchových trhlin již existující sítě, což je souběžně významně ovlivňováno materiálovými nehomogenitami (vměstky, dutiny deformované během tváření lunkrů apod.) i interakcí s podpovrchovými trhlinami. Popsaný mechanismus poškození je tak z pohledu synergického chování jednotlivých degračních dvojic důvodem k vytvoření degradované plochy, která nesplňuje teoretické podmínky plynulého záběru evolventních zubů s konstantním poměrem okamžitých úhlových rychlostí u spoluzabírajících čelních ozubených kol s přímými zuby.

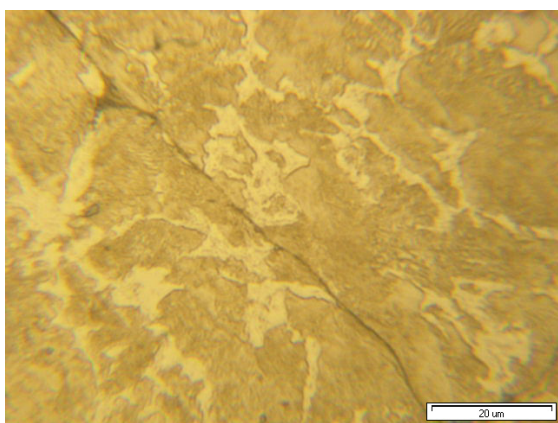


a – protáhlé siřníkové vměstky
a – elongated sulphide inclusions

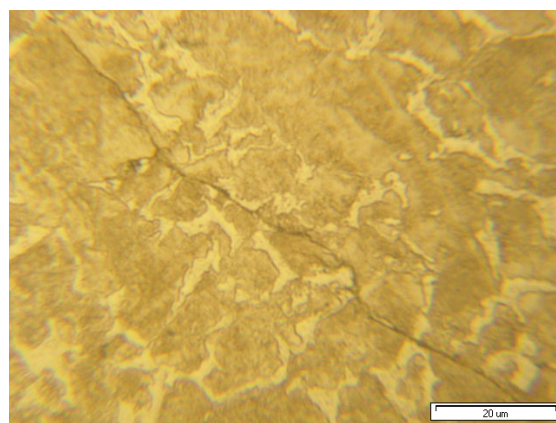
11: Místa vzniku podpovrchových mikrotrhlin
 11: Places of the origin of the undersurface micro-cracks



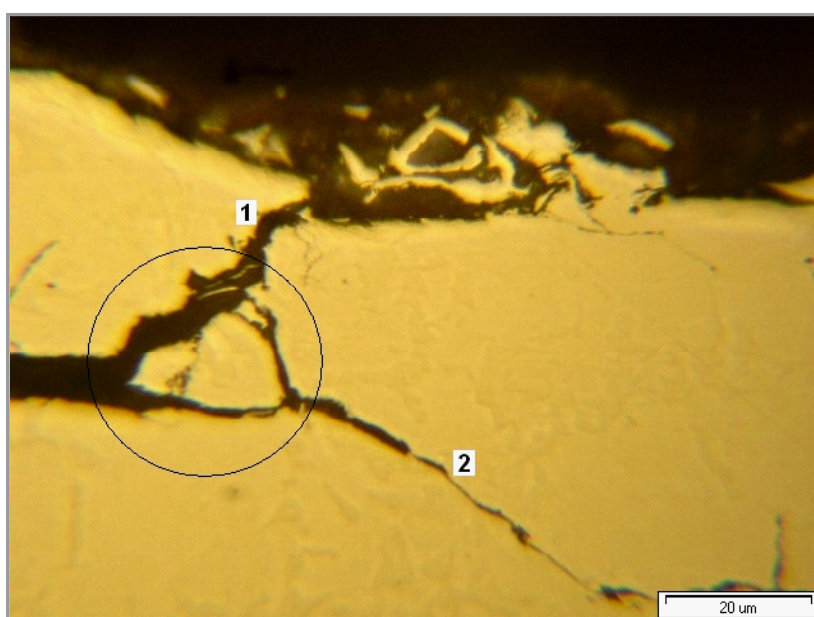
b – iniciace a rozvoj trhliny
b – initiation and expansion of the crack



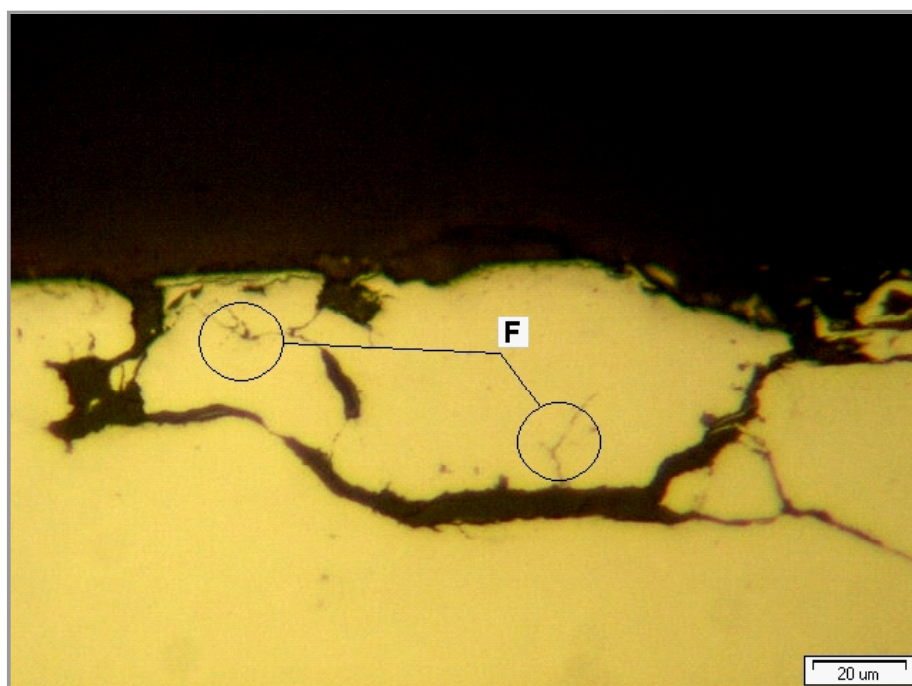
a
 12: Detail růstu trhliny po hranicích zrn
 12: Detail of the crack growth along the grain boundary



b



13: Propojení podpovrchové trhliny s povrchovou trhlinou
 13: Connection of the undersurface crack with the surface crack



14: Vznik jamkového porušení - pitting

14: Origin of the pitting

SOUHRN

Příspěvek byl zpracován jako teoreticko-experimentální model degradace boku zubu. Model poškození ve styku dvou těles je v práci promítnut do materiálové oblasti v rámci jamkové degradace, která vznikla za situace stálého přetěžování ozubeného kola textilního stroje. Aplikovaný materiál 12 061.1 v podmínkách maximálního tlaku reaguje progresivním (a současně destruktivním) pittingem a pokračuje tvorbou jamek hlubokých až k hranici nedeformovaného materiálu. Maximální hloubka poškození se objevuje na konci měrného skluzu v místě před patou zubu, což je důsledkem maximální výšky elastické deformační vlny vzniklé z valivého a smykového působení povrchů. Uvedené skutečnosti jsou doloženy makroskopickými i mikroskopickými snímky v rámci popisu rozvoje povrchových a podpovrchových trhlin. Zdokumentován je vliv nehomogenit v materiálu (vměstky, dutiny apod.), které se evidentně na pittingové degradaci materiálu podílejí. Laboratorní vyšetřování pohybu a vzájemného propojování trhlin bylo provedeno s ohledem na prostorový charakter celého procesu. K tomu účelu byla použita technika postupného odbrušování metalografických vzorků s úběrem přibližně 0,05 mm a následného zakreslování pozice mikrotrhlin. Výsledkem pozorování probíhajících procesů v pseudo-3D pohledu bylo vytvoření konečných závěrů o základním mechanismu rozvoje pittingového poškození.

ozubené kolo, bok zubu, únavové opotřebení, trhlina

SUMMARY

The „Pitting Damage of Gears“ paper has been elaborated as a theoretical-experimental model of tooth-side degradation. Two-solid contact damage model has been used in material analysis context. The damage was represented by pitting gear degradation of a constantly overloaded textile machinery. The material used (12 061.1) reacts under maximum pressure conditions with progressive (and destructive) pitting later showing pit development. The pits reach as deep as undeformed material zone. Maximum damage depth emerges at the end of specific slip in a specific location close to the tooth base. This is probably due to maximum height of the elastic deformation wave emerged from rolling and torsion interaction among corresponding faces. The statements above have been verified using macroscopic/microscopic snapshots taken as a part of surface/undersurface crack description. Also, the influence of non-homogenous zones in material (inclusions, etc.) that significantly contribute to pitting degradation has been documented. Laboratory methods have been used to determine crack movements and convergence with respect to spatial nature of the entire process. This approach included gradual grinding of metallographic samples with reduction of about 0,05 mm and subse-

quent crack position registration. As a result of pseudo-3D representation of the processes involved, we have gained satisfactory information about basic mechanism of pitting damage development.

Poděkování

Práce představené v tomto příspěvku byly realizovány s pomocí projektu MPO TIP FR-TI1/371 "Integrovaný systém průběžného monitorování vybraných strojních uzlů".

LITERATURA

- BOHÁČEK, F., 1987: *Části a mechanismy strojů III: Převody*. 2. upravené vyd. Brno: VUT Brno, 267 s.
- BOLEK, A., 1963: *Části strojů II: Převody a převodová ústrojí*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 412 s.
- HARTL, M., 2006: *Konstruování strojů strojní součásti*. Databáze online [cit. 2009-02-12]. Dostupné na: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/5CK/prednasky/prednaska4.pdf>.
- ČERNÝ, M., 1980: *Nízkocyklové únavové vlastnosti svařových spojů ocelí Cr13Ni6Mo*. Brno: Diplomová práce, VUT FS Brno, 50 s.
- KOPECKÝ, M., 2005: *Pevnostní výpočet čelního soukolí s přímými evolventními symetrickými zuby pomocí MKP*. Brno: Diplomová práce, FSI VUT, Brno, 82 s.
- MORAVEC, V., 2001: *Konstrukce strojů a zařízení II: Čelní ozubená kola*. Ostrava: Montanex, 302 s., ISBN 80-7225-051-5.
- POŠTA, J., VESELÝ, P., DVOŘÁK, M., 2002: *Degradace strojních součástí*. Praha: ČZU, Praha, 67 s., ISBN 80-213-0967-9.
- STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W., 2005: *Engineering Tribology*. 3. vyd. Boston: Butterworth-Heinemann, 832 s., ISBN-13: 9780750678360.
- SVOBODA, P., KOVAŘÍK, R., BRANDEJS, J., 2006: *Základy konstruování*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 186 s., ISBN 80-7204-212-2.
- ŠALAMOUN, Č., SUCHÝ, M., 1990: *Čelní a šroubová soukolí*. Praha: SNTL, 467 s., ISBN 80-03-00532-9.

Adresa

doc. Ing. Michal Černý, CSc., doc. Ing. Josef Filípek, CSc., Ústav techniky a automobilové dopravy, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, doc. Ing. Pavel Mazal, CSc., Ústav konstruování, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika

