

VIZUALIZACE PITTINGOVÉHO PROCESU

M. Černý, J. Filípek, R. Požár

Došlo: 28. dubna 2010

Abstract

ČERNÝ, M., FILÍPEK, J., POŽÁR, R.: *Pitting process visualization*. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2010, LVIII, No. 5, pp. 57–66

The paper describes time-domain simulation of gear pitting damage using animation program. Key frames have been used to create illusion of motion. The animation uses experimental results of high-cycle fatigue of material. The fatigue damage occurs in the nominal creep area on the side of the gear tooth sample loaded with variable-positioned Hertz pressure. By applying the force, the pressure cumulates between two convex surfaces. This phenomenon results in material damage under of curved surfaces in contact. Moreover, further damage has been registered on the surface. This is due to exceeding the elastic-plastic state limit and development of „tabs“. The tabs serve as origin of surface micro cracks powered by shear stress and enclosed grease pressure as well. This deformation and extreme pressures of Pascal law contribute to elongation and growth of the surface micro crack. Non-homogenous parts of material volume support the initialization/development of the micro cracks as well. Resulting visualization of the tooth-side fatigue damage provides clear and easy-to-understand description of the damage development process right from the micro crack initialization to the final fragmentation due to pitting degradation.

gears, fatigue damage, pitting, animation

Velmi časté poškození, které je u ozubených kol detekováno, má únavový charakter. Únavové opotřebení ozubených kol se vyznačuje postupnou kumulací poruch v povrchové vrstvě při opakovaných kontaktních napětích (Pošta, Veselý, Dvořák; 2002). Vznik, průběh i intenzita poškození únavovým opotřebením jsou závislé na provozních podmínkách, materiálu a geometrii ozubeného soukolí.

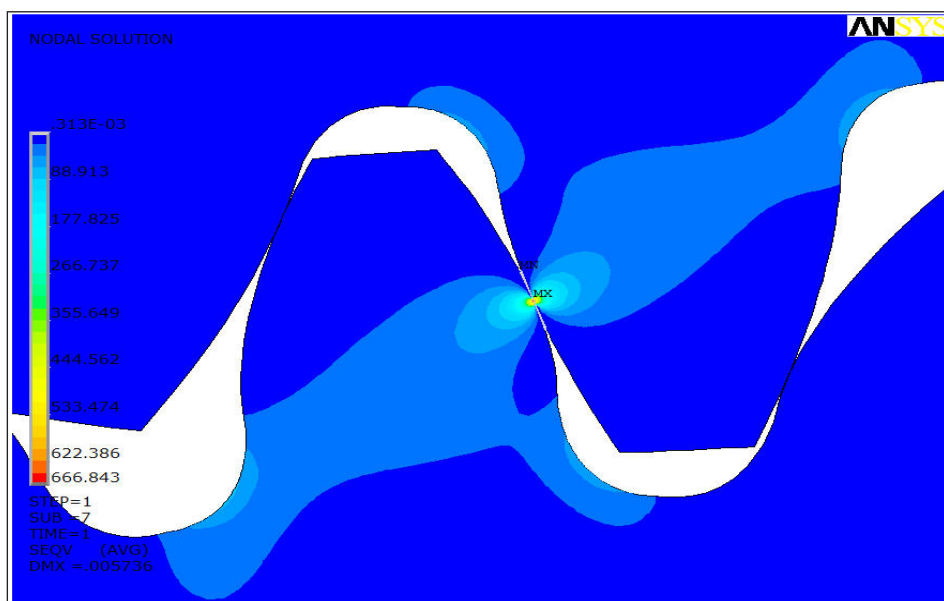
Deformačně-napětovou analýzou čelního soukolí pomocí MKP v systému ANSYS se zabývá např. práce (Kopecký, 2005). Deformačně-napětová analýza v místě záběru zubů je graficky prezentována na Obr. 1. Napětové špičky vznikají jak v místě dotyku, tak i na patách zubů. Velikost redukovaného napětí v MPa je vyjádřena pomocí barevné škály. Kontaktní tlak v místě dotyku zubů je zobrazen na Obr. 2. Získané výsledky deformačně-napětové analýzy, konkrétně průběh kontaktního tlaku a redukovaného napětí ve valivém bodě, poslouží jako jeden z podkladů pro kontinuální vizualizaci pittingového poškození.

MATERIÁL A METODY

Podklady výpočtových modelů deformační interakce ozubených kol byly sestaveny ve spolupráci s Ústavem konstruování FSI VUT v Brně. Vychází se z článku, který podrobněji popisuje mechanismy vzniku pittingu (Černý, Filípek, Mazal; 2010). K tomu přistupují i výsledky vlastních experimentů.

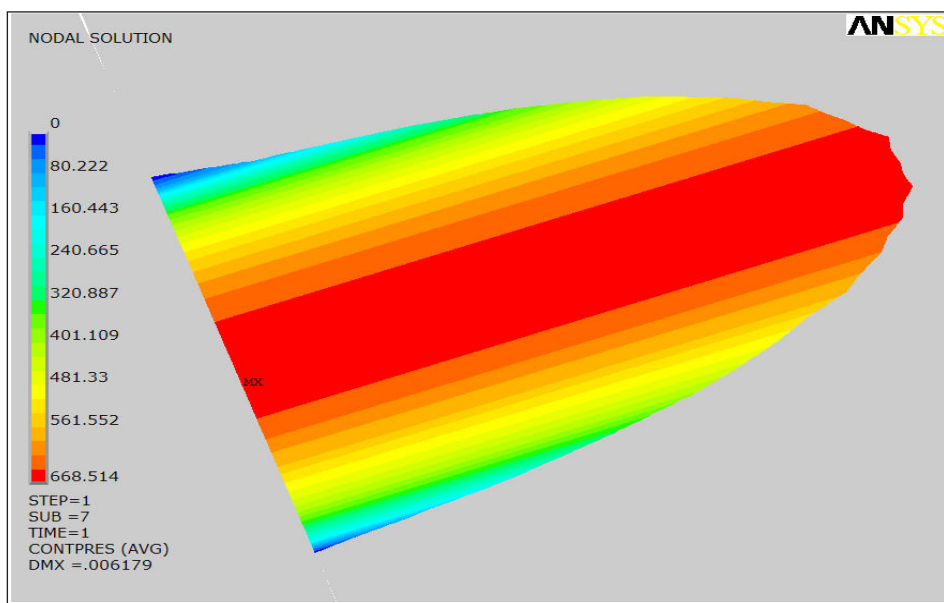
Ozubená kola i jednotlivé segmenty zubů byly vykresleny v počítačovém programu AutoCad 2009 určeném pro projektování a konstruování. Díky rozsáhlé podpoře formátů souborů, které lze importovat do prostředí grafického vektorového programu Adobe Flash, byly tyto objekty vloženy do samostatných vrstev nad vrstvu pozadí a následně graficky upraveny do požadovaného vzhledu základními kreslicími nástroji. Konečný vzhled byl dotvořen s využitím grafického programu Adobe Photoshop. Rovněž byly do Flashe importovány snímky mikrostruktury a makrostruktury pořízené světelnými mikroskopy.

Iluze otáčivého pohybu soukolí, valivě kluzného pohybu zubů, průběhu kontaktního napětí, rozvoje a šíření povrchových i podpovrchových mikrotrh-



1: Redukované napětí σ_{red} v celé ovlivněné oblasti (Kopecký, 2005)

1: Reduced stress σ_{red} throughout the affected area (Kopecký, 2005)



2: Kontaktní tlak v místě dotyku (Kopecký, 2005)

2: Contact pressure in the contact area (Kopecký, 2005)

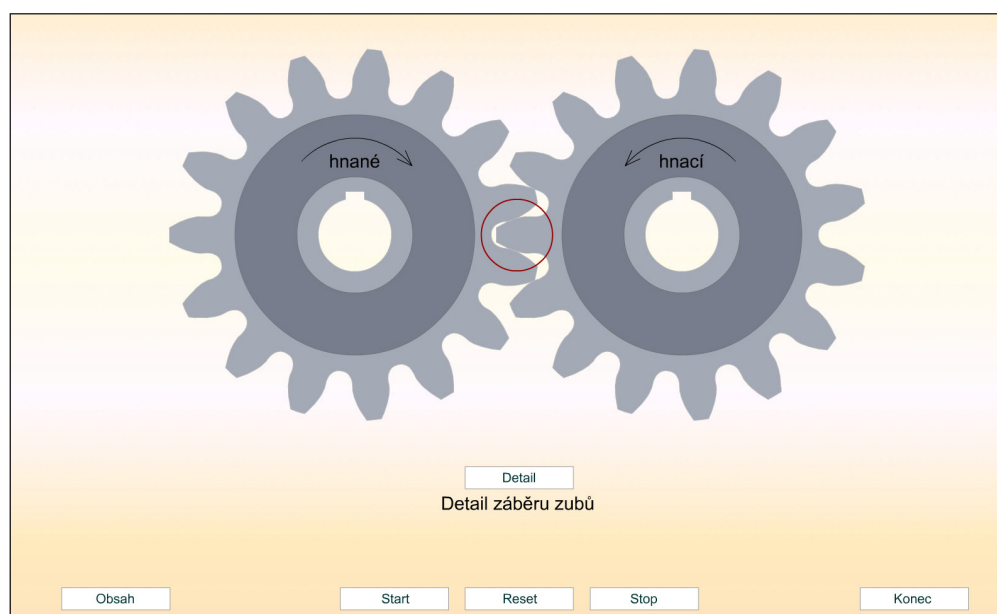
lin a postupu pittingové degradace je vytvořena pomocí funkce „Motion Tween“ a „Shape Tween“. Interaktivní chování reagující na akce uživatelů umožňuje objektově orientovaný programovací jazyk ActionScript. Závěrem byl výsledný soubor exportován do dvou základních formátů, a to swf a exe.

VÝSLEDKY A DISKUSE

Komplexní vizualizaci poškození boků zubů je možné rozdělit do čtyř animačních bloků, které tvoří celkovou prezentaci:

- záběr ozubeného soukolí a průběh dotykového napětí při valivě kluzném pohybu evolventních profilů,
- iniciace a rozvoj povrchových mikrotrhlin,
- iniciace a rozvoj podpovrchových (sekundárních) mikrotrhlin,
- výsledný model degradace materiálu při poškození pittingem.

Záběr ozubeného soukolí a průběh dotykového napětí – V základní vizualizaci je provedena animace čelního soukolí s přímými evolventními zuby (Obr. 3). V další části je znázorněn detail průběhu dotykového napětí při valivě kluzném pohybu



3: Záběr ozubeného soukolí s evolventními zuby – Flash
 3: Involute gear grip – Flash

evolventních profilů (Obr. 4). Rozměry a tvar oblasti kontaktního napětí jsou získány z práce (Kopecký, 2005). Jednotlivé zuby jsou importovány z programu AutoCad a pomocí „Motion Tweenu“ je vytvořen valivě kluzný pohyb. Při tomto vzájemném pohybu je v oblasti měrného skluzu rozvinuta elasticko-deformační zóna, která je zobrazena pohybem kontaktního napětí podél evolventy. Elastická deformace je stejně velká v každém okamžiku styku boků zubů. Hnací kolo je pro zjednodušení považováno za dokonale tuhé těleso, průběh Hertzova kontaktního napětí je tedy zobrazen pouze u zubu hnaného kola.

Iniciace a rozvoj povrchových mikrotrhlin – Tento animační blok se věnuje vzniku a rozvoji povrchových mikrotrhlin při valivě kluzném pohybu boků zubů. Vlivem postupující materiálové vlny (vysokocyklová deformace) se na povrchu boku zubu hnaného kola vytvářejí mikrotrhliny (Obr. 5). Povrch zubu hnacího kola je opět považován za dokonale tuhý.

Na vizualizaci vzniku povrchových mikrotrhlin navazuje animace demonstrující rozvoj mikrotrhliny vlivem elastické deformace a hydrodynamického tlaku maziva (Obr. 6). Působením elastického napětí se mikrotrhlina otevírá a vniká do ní mazivo, které je při dalším průchodu zubu tlakovou silou uzavřeno v trhlíně. Vlivem hydrodynamického tlaku maziva působí na čele trhliny hnací síla a zapříčiňuje postupný rozvoj trhliny. Rozvoj povrchové mikrotrhliny na úrovni struktury zrn materiálu je detailně znázorněn na Obr. 7. Animace zobrazuje postupný růst trhlin po hranicích zrn při působení tlakového deformačního napětí a hydrodynamického tlaku maziva.

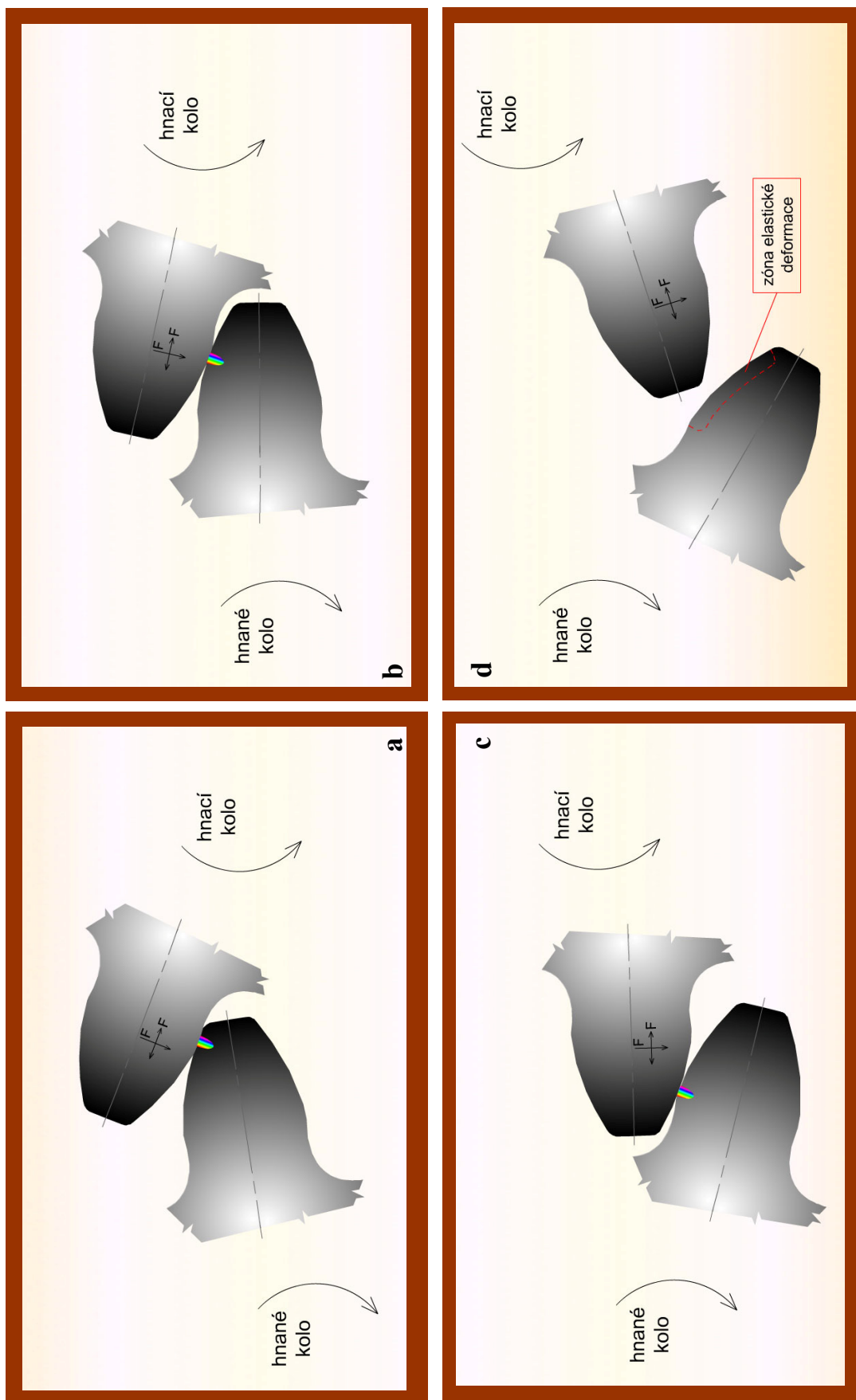
Iniciace a rozvoj podpovrchových (sekundárních) mikrotrhlin – Vznik a postupný růst podpo-

vrchových mikrotrhlin je náplní třetího bloku vizualizace. Procesy spojené s iniciací a rozvojem mikrotrhlin jsou ovlivňovány velikostí deformačně-napětové zóny pod povrchem boku zubu. Animace je zaměřena na tuto napětovou oblast, ve které se vyskytuje iniciační místo mikrotrhliny (vměstek) a je základní ilustrací pro další rozvoj podpovrchových trhlin (Obr. 8).

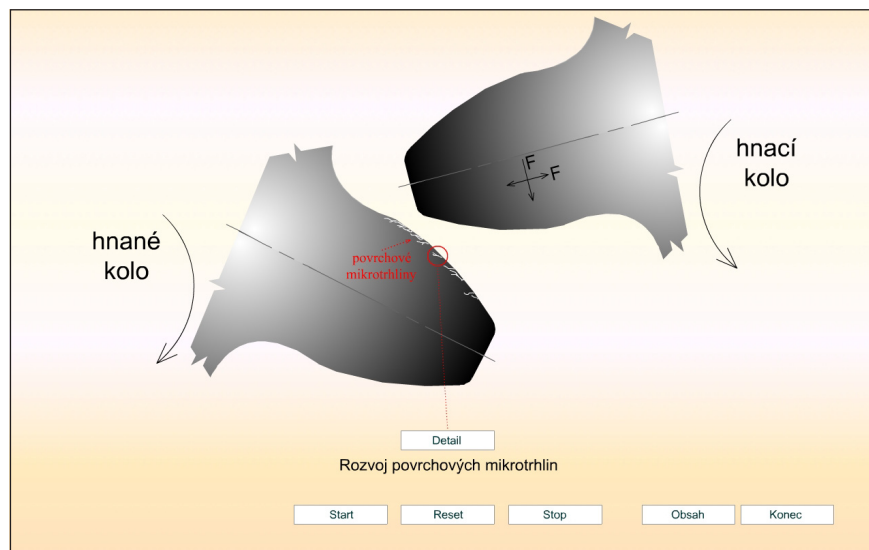
Následující část vyjadřuje vznik a rozvoj podpovrchové mikrotrhliny vlivem elastické deformace (Obr. 9). Při průchodu napětové zóny (valivě kluzný pohyb boků zubů) je vměstek tlakovou silou sevřen a následně rozevírán. Plocha vměstku se rozšiřuje do směru průniku mezi zrna materiálu, kde je minimální napětí, a kde se může propojit s dalším vměstkem nebo povrchovou mikrotrhlinou.

Konečná animace v tomto bloku zobrazuje iniciaci a rozvoj podpovrchových trhlin na úrovni struktury zrn materiálu (Obr. 10). Trhlina se šíří po hranicích zrn směrem k povrchu boku zubu, kde se může propojit přímo s povrchem nebo s postupující povrchovou trhlinou v elasticko-deformační oblasti.

Výsledný model degradace materiálu při poškození pittingem – Poslední oddíl animačního vyjádření pittingového poškození je zaměřen na konečné znázornění degradace materiálu. Postupný rozvoj povrchové a podpovrchové trhliny na úrovni struktury zrn a jejich vzájemné propojení v místě nedokonalosti materiálu je uveden na Obr. 11. Tento blok uzavírá vizualizace konečného poškození boku zubu, kdy se při vzájemném záběru uvolňuje vlivem propojení povrchových a podpovrchových trhlin objem materiálu z povrchu (Obr. 12). Zobrazení je doplněno experimentálně získanými metalografickými snímky pittingové degradace.

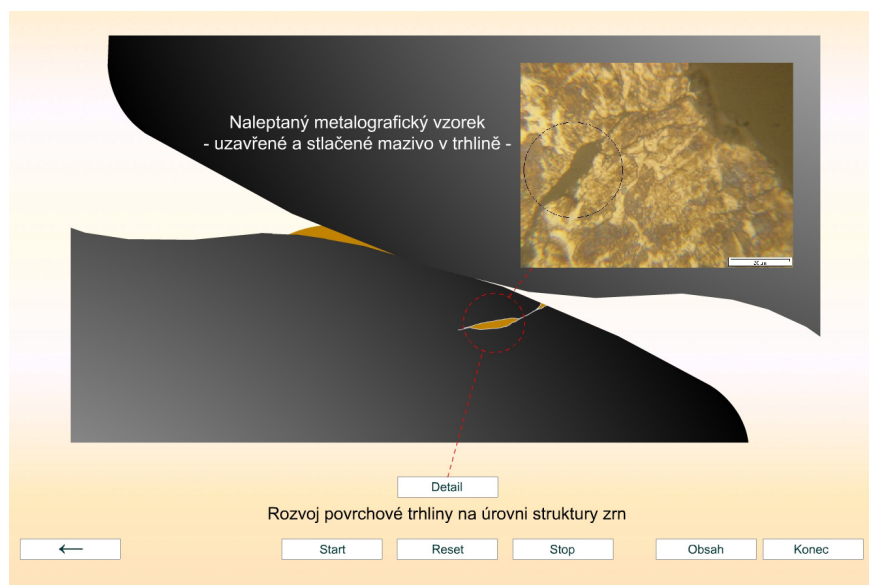


4: Průběh dotykového napětí při valivě kluzném pohybu evolvutních zubů – Flash
 4: Contact stress process during the roll-slide movement of the involute teeth – Flash



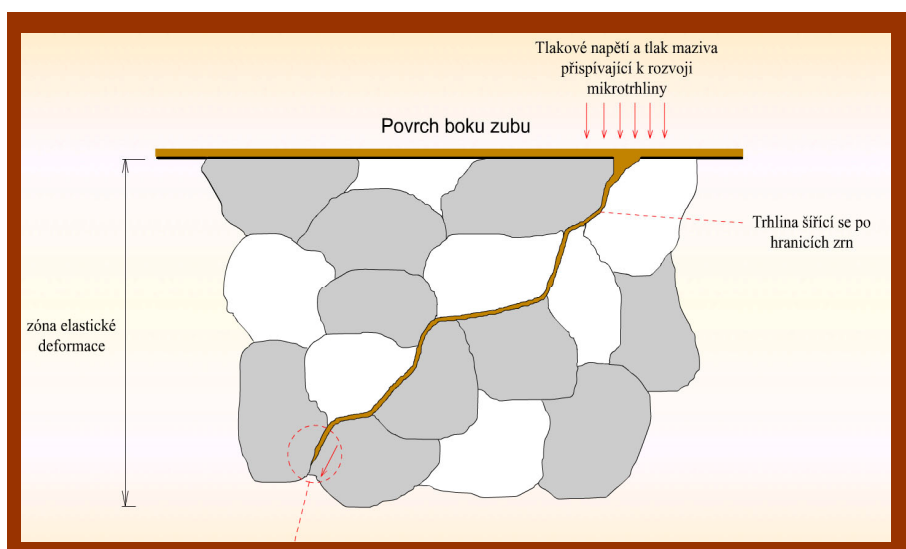
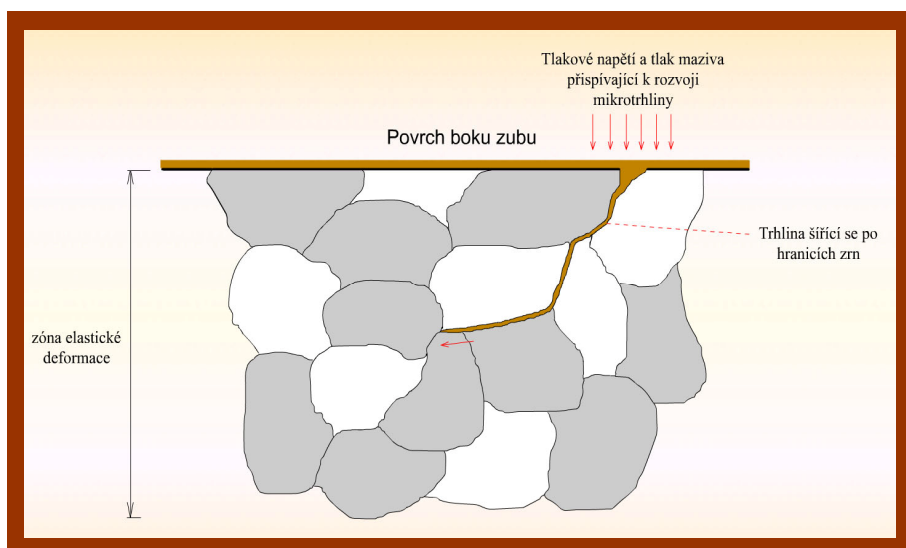
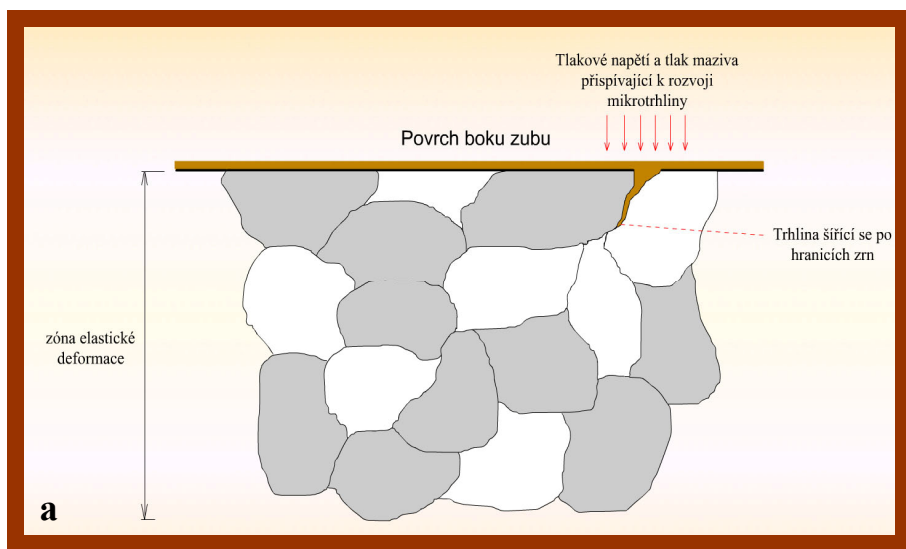
5: Vznik povrchových mikrotrhlín v průběhu elastické deformace – Flash

5: Origin of the surface microcracks in the process of elastic deformation – Flash



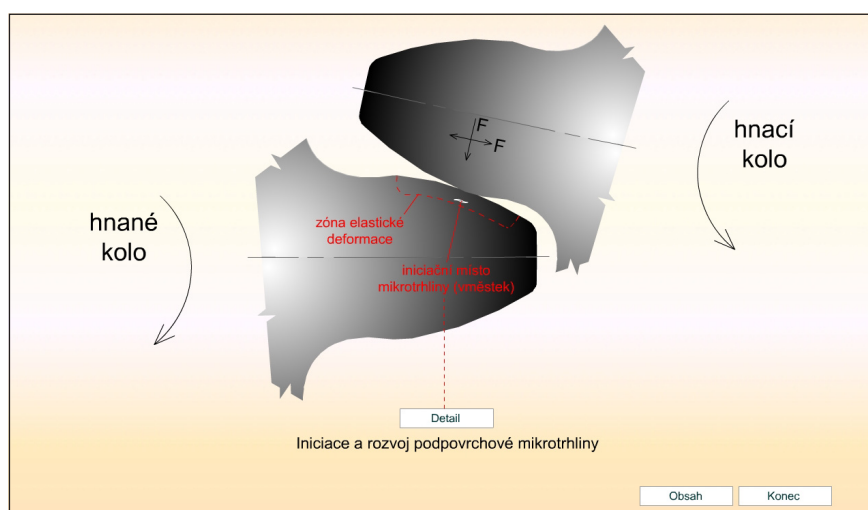
6: Rozvoj povrchové mikrotrhliny – Flash + metalografie

6: Expansion of the surface microcrack – Flash + metallography



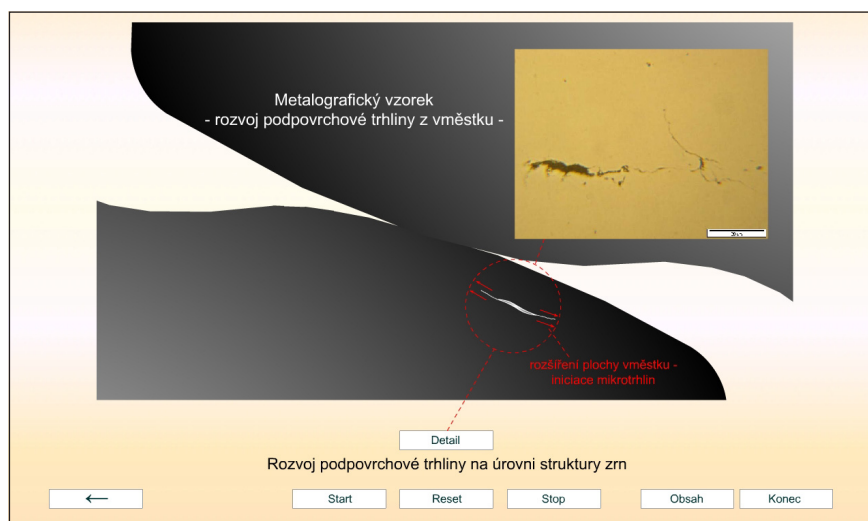
7: Rozvoj povrchové trhliny na úrovni struktury zrn – Flash

7: Expansion of the surface microcrack at the grain structure level – Flash



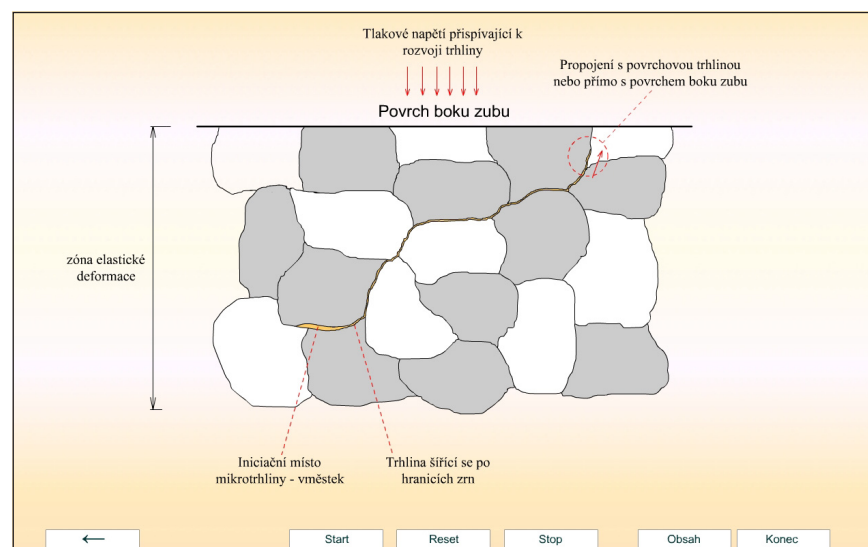
8: Oblast elastické deformace – Flash

8: Area of the elastic deformation – Flash



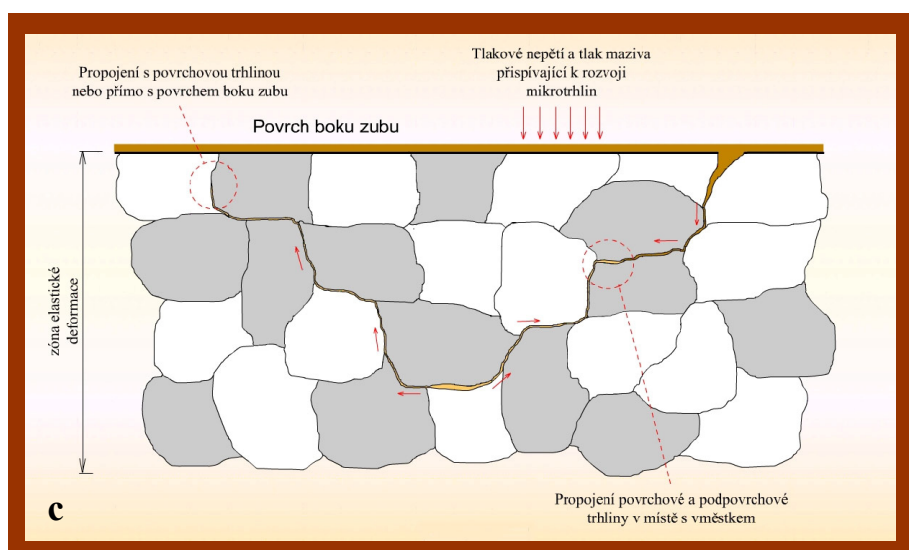
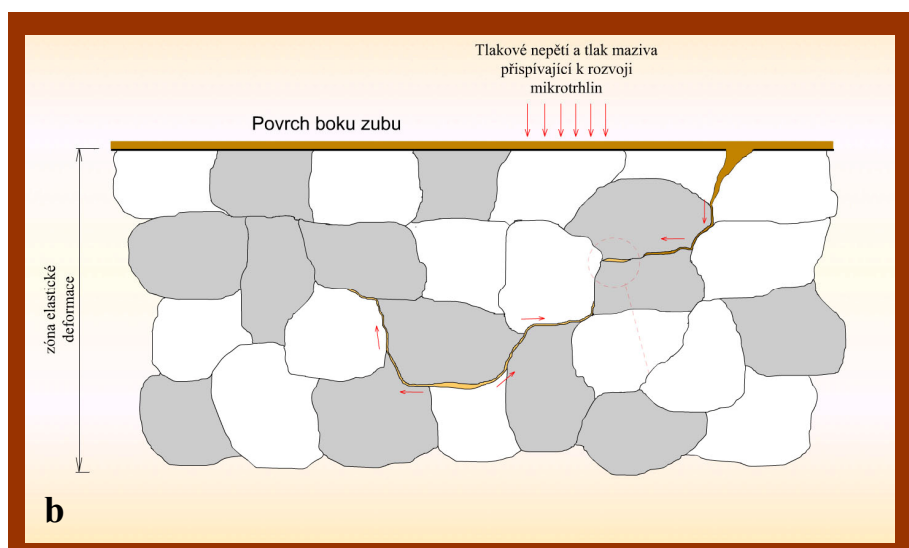
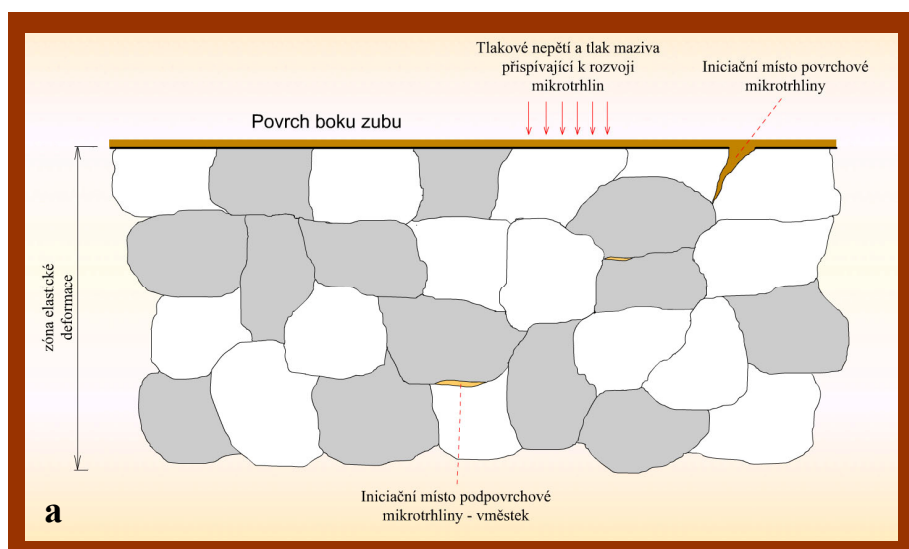
9: Iniciace a rozvoj podpovrchové mikrotrhliny – Flash + metalografie

9: Initiation and the expansion of the under-surface microcracks – Flash + metallography



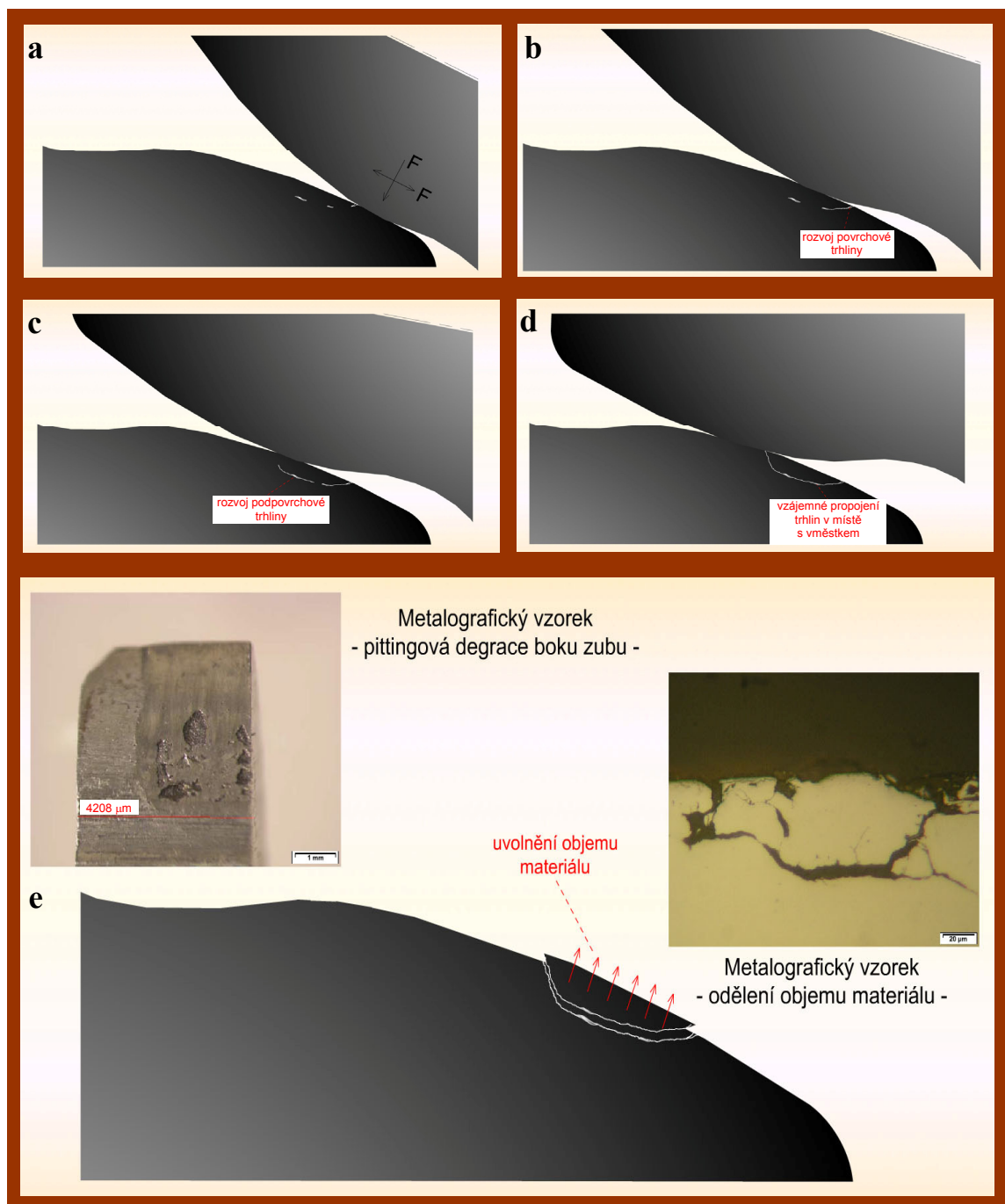
10: Rozvoj podpovrchové mikrotrhliny na úrovni struktury zrn – Flash

10: Expansion of the under-surface microcracks at the grain structure level – Flash



11: Propojení povrchové a podpovrchové trhliny na úrovni struktury zrn – Flash

11: Connection of the surface and under-surface crack at the grain structure level – Flash



12: Konečná materiálová degradace boku
 12: Final material degradation of the tooth flank

SOUHRN

Únavové poškození ozubených kol je vyvoláno řadou faktorů, které je třeba zkoumat jak izolovaně, tak i ve vzájemných souvislostech. K tomu lze využít moderní animační programy jako např. Adobe Flash. V článku je modelován časový průběh:

- záběru ozubeného soukolí a dotykového napětí při valivě kluzném pohybu evolventních profilů,
- iniciace a rozvoje povrchových i podpovrchových trhlin,
- výsledného modelu degradace materiálu při poškození pittingem.

Předložená studie je dokladem toho, že pomocí tvarové animace (shape Tween), pohybové animace (motion Tween) a programovacího jazyka Action Script je možné v software Adobe Flash plynule zobrazovat valivě kluzný pohyb, průběh kontaktního napětí i rozvoj pittingové degradace. Tento přístup je založen na souvislostech vyplývajících z literárních pramenů i ze zkušeností a nenahrazuje matematické modelování a exaktní metody zabývající se degradací ozubených kol.

ozubená kola, únavové poškození, pitting, animace

SUMMARY

Fatigue damage of gears is caused by several processes that ought to be analyzed both separately and in mutual relation. Animation software can be used to demonstrate this phenomenon, such as Adobe Flash. The paper describes time progress of the following:

- Gear contact and contact stress while the rolling/sliding motion occurs on the evolvent profiles
- Initialization and development of both surface and undersurface cracks
- Resulting model of pitting degradation and damage

The presented paper proves that some software tools for shape animation (shape Tween), motion animation (motion Tween), and Action Script programming language, it is possible to smoothly display the roll-slide motion, contact stress, and pitting development in the Adobe Flash software. This approach is based on data from reference sources and experience. As such, it does not substitute mathematical modeling techniques and exact methods dedicated to gear degradation process.

LITERATURA

- ČERNÝ, M., FILÍPEK, J., MAZAL, P., 2010: *Pittingové poškození ozubených kol*. Acta univ. Mendel. Brun., 2010, LVIII, No. 2, s. 51–60, ISSN 1211–8516.
- KOPECKÝ, M., 2005: *Pevnostní výpočet čelního soukolí s přímými evolventními symetrickými zuby pomocí MKP*. Brno: Diplomová práce, FSI VUT, Brno, 82 s.
- POŠTA, J., VESELÝ, P., DVOŘÁK, M., 2002: *Degradace strojních součástí*. Praha: ČZU, Praha, 67 s., ISBN 80-213-0967-9.

- POŽÁR, R., 2007: *Vizualizace záběru ozubených kol*. Závěrečná práce. MZLU, Brno, 43 s.
- STACHOWIAK, G. W., BATCHELOR, A. W., 2005: *Engineering Tribology*. 3. vyd. Boston: Butterworth-Heinemann, 832 s., ISBN-13: 9780750678360.
- ULRICH, K., 2005: *Macromedia Flash MX 2004: Návodný průvodce*. CP Books, Brno, 604 s., ISBN 80-251-0622-5.

Adresa

doc. Ing. Michal Černý, CSc., doc. Ing. Josef Filípek, CSc., Ing. Roman Požár, Ústav techniky a automobilové dopravy, Mendelova univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika