

SIMULTANEOUS RADIOGRAPHIC OBSERVATION OF DAMAGING AND OPTICAL MEASUREMENT OF 3D SURFACE DISPLACEMENT EVOLUTION IN LOADED SPECIMEN

D. Vavřík*, J. Bryscejn*, J. Jakůbek†, M. Jakůbek†, T. Holý†, J. Valach*,
 Z. Vykydal†

Summary: *This work reports on the results of the experimental observation of generation and evolution of internal material damage during loading process in aluminium alloy flat specimen with stress concentrator. Material damage is investigated by means of the “X-ray Dynamic Defectoscopy” technique. To understand related physical processes, the surface plastic strain field is investigated by the optical Method of Interpolated Ellipses while the out-of plane displacement field is inspected simultaneously by the optical Coded photometric stereo method. Related experiments have been realized using unique experimental setup which consists of microfocus X-ray source, compact loading device, CCD camera, LED red-green-blue lights and single X-ray photon counting device Medipix-2.*

1. Úvod

V práci jsou představeny nové experimentální výsledky radiografického sledování rozvoje procesní zóny před čelem trhliny plochého vzorku, spolu se optickým měřením 3D pole deformací jeho povrchu. Úroveň vnitřního poškození byla analyzována radiografickou dynamickou defektoskopií (Vavřík et al., 2005). 3D pole deformací bylo sledováno kombinací dvou nezávislých optických metod (Vavřík et al., 2005 b), kdy jsou rovinné deformace analyzovány metodou interpolovaných elips (Vavřík 2004) a mimorovinná posunutí jsou paralelně vyhodnocována variantou metody fotometrického sterea (Woodham 1980).

Radiografická dynamická defektoskopie (X-ray Dynamic Defectoscopy, dále označena jako XRDD) kvantifikuje vnitřní poškození vzorku měřením kumulativního zeslabení jeho průřezu objemovým podílem dutin a mikrotrhlin. Vzhledem k výrazné lokalizaci procesní zóny je tato snadno odlišitelná od vlivu zeslabení vzorku kontrakcí vzorku.

Optickou metodou interpolovaných elips (MIE) jsou vyhodnocována přetvoření hexagonální mřížky bodů na povrchu zkoumaného tělesa. Metoda fotometrického sterea staví

* Ing. Daniel Vavřík, Ph.D., Ing. Jan Bryscejn, Ing. Jaroslav Valach, Ph.D.: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Prosecká 76, 190 00 Praha 9; tel.: +420.286 882 121, e-mail: vavrik@itam.cas.cz;

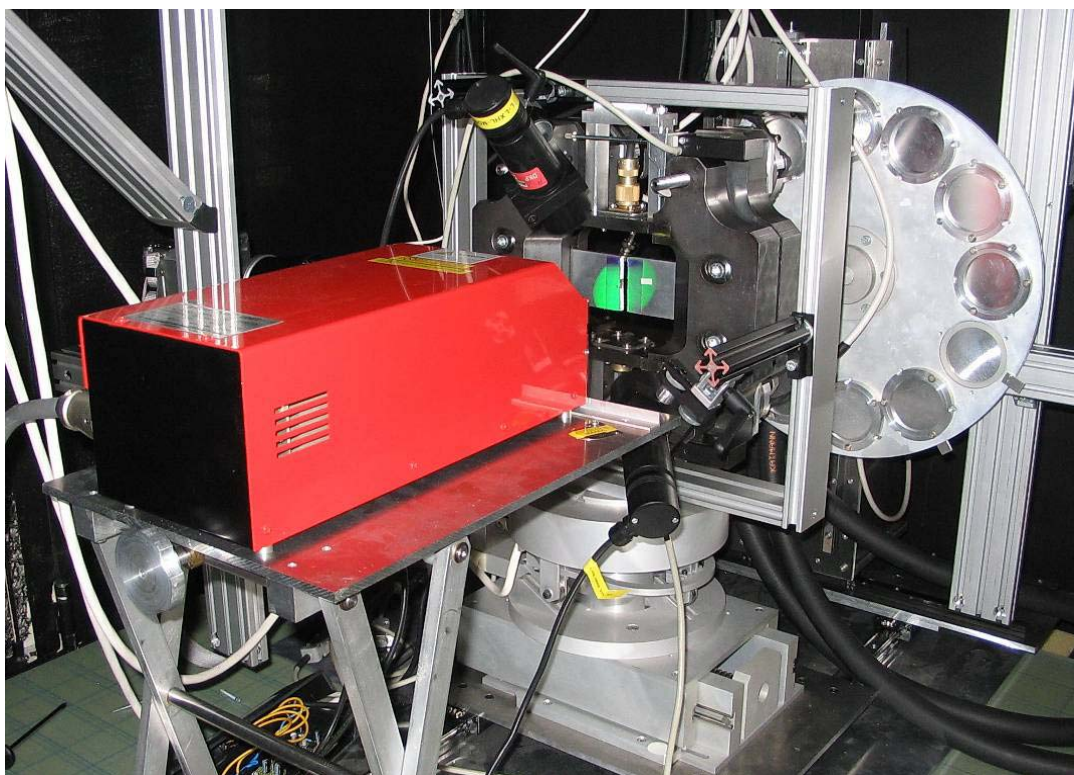
† Ing. Tomáš Holý, Ing. Jan Jakůbek, Ph.D., Ing. Martin Jakůbek, Ing. Zdeněk Vykydal: Ústav technické a experimentální fyziky ČVUT, Horská 3a/22, 128 00 Praha 2; tel. +420.224 359 290

na jednoznačném vztahu mezi sklonem plochy a intenzitou světla, které tato plocha nasvícená směrovým světlem rozptýlí směrem ke kameře. Prostřednictvím tří nezávislých scénérií, které se odlišují směrem nasvícení, lze jednoznačně rekonstruovat změny v rovinnosti vzorku, které vznikly díky mimorovinným deformacím. Vhodnou volbou vlnových délek RGB barev (tj. červená, zelená, modrá) použitých LED osvětlovačů je možné tři nezávislé scénérie zakódovat do jednoho kompozitního obrázku. Tato varianta fotometrického sterea byla proto označena názvem Coded Photometric stereo (CPS). Při paralelním užití optických metod MIE a CPS jsou informace o 3D deformacích na dané hladině zatížení obsaženy v jediném barevném snímku (blíže viz. článek 301 v tomto sborníku).

2. Experimentální sestava

Podrobné sledování chování vysoce houževnatých vzorků je možné pouze při precizním řízení zatěžujícího posuvu. S tímto záměrem byl vyvinut kompaktní zatěžovací stroj pro tahové vzorky, který vyniká mimořádnou tuhostí a nízkou hmotností. Nízká úroveň akumulace elastické energie ve stroji dovoluje pozorovat fyzikální děje i během podkritického růstu trhliny (Vavřík et. al., 2005 c).

Na obr. 1 je fotografie celkového uspořádání experimentu. Na levé straně vepředu je na nůžkovém mechanismu umístěna mikrofokusová rentgenka firmy Hamamatsu. Uprostřed sestavy je na počítačem řízeném polohovacím stolku umístěn zatěžovací stroj zavěšený v pomocném rámu. Na tomtéž rámu jsou instalovány tři barevné LED osvětlovače. Disk s hliníkovými kotoučky slouží ke kalibraci závislosti „tloušťka vzorku-útlum RTG záření“ metodou Přímé kalibrace tloušťky (Jakůbek et. al., 2005). Detektor RTG záření Medipix-2 (<http://www.cern.ch/MEDIPIX/>), upevněný na svislý posuv, je na obr. 1 skrytý za diskem.



Obr 1: Experimentální sestava. V zatěžovacím stroji je přetržený vzorek. Vzhledem ke směrovosti světla je do směru pozorovatele odraženo pouze zelené světlo.

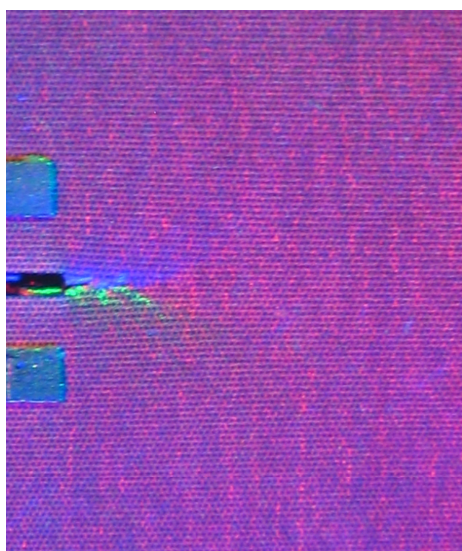
Rentgenka, zatěžovací stroj se stolky i stojan s detektorem RTG záření jsou připevněny na vodorovné posuvné vozíky, které dovolují nastavit jejich vzájemnou vzdálenost a tím i definovat geometrické zvětšení radiogramů. Digitální kamera (nebo fotoaparát) pro optické pozorování deformací, která přes zrcátko snímá stejné místo, jako je sledováno radiograficky, je z tohoto pohledu skrytá za rentgenkou. Díky tomuto zrcátku je možné všechny zmíněné experimentální metody zapojit současně. Radiografické sledování rozvoje poškození v zatěžovaném vzorku je umožněno umístěním sestavy do plně stíněné skříně. Další podrobnosti o sestavě a zatěžovacím stroji jsou uvedeny v (Vavřík et. al., 2005 c).

3. Experiment

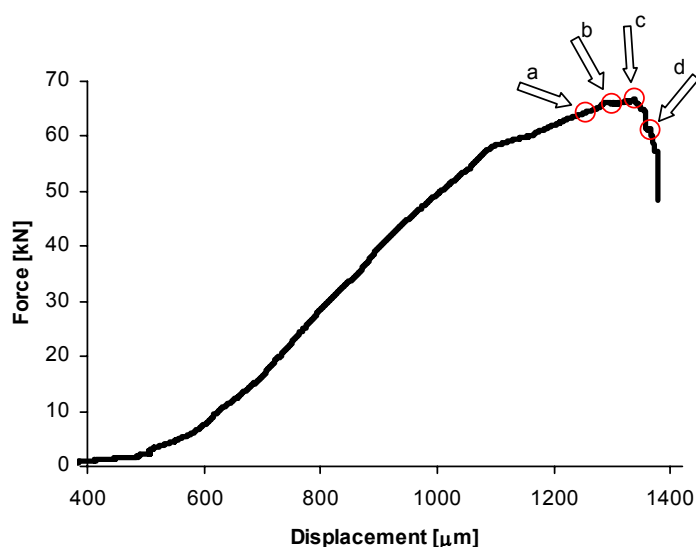
Na výrobu vzorků byla použita vysoce houževnatá slitina hliníku (dural) ČSN 42 42 03.6. Její elastický modul E je 70 GPa, mez kluzu 296 MPa a Poissonovo číslo 0,315. Zde uvedené výsledky byly získány z měření plochého vzorku s centrální trhlinou. Celková délka vzorku je 170 mm, šířka 50 mm a tloušťka 5 mm. Koncentrátor napětí o délce 10 mm a šířce 0,3 mm byl vyjiskřen. Vzhledem k poměru délky a šířky (rádiusu) lze koncentrátor napětí považovat za blízký trhlině (nadále proto označován jako trhlina).

Mřížka určená k optickému měření MIE byla vyrobena metodou suchého fotorezistu. Rozteč bodů mřížky je 0,2 mm a průměr bodů je 0,1 mm. Na úrovni čela trhliny byly nalepeny dvě olověné značky, určené k prostorové orientaci při vyhodnocování radiografických dat. Povrch vzorku byl osvětlen třemi barevnými světly v pořadí červená, zelená, modrá. Všechna měla úhel elevace 45 stupňů, jejich azimutální úhly pak byly 0, 120 a 240 stupňů. Na obr. 2 je kompozitní RGB obrázek, zobrazujícího okolí čela trhliny deformovaného vzorku. Skutečný rozměr zobrazené oblasti je zhruba 14x12 mm. Trhlina je uprostřed vlevo. Obdélníky nad a pod ní jsou výše zmíněné olověné značky.

Vzorek byl zatěžován v tahu, posuvem čelistí o rychlost 0,4 μm/sec, až do přetržení. Celý experiment trval 1:20 h. Data z extenzometrů měřících posunutí čelistí a ze siloměrů (integrovaných do zatěžovacího stroje) byla čtena každých 200 ms. Na obr. 3. je zobrazen výsledný zatěžovací diagram „posunutí-síla“. Radiogramy byly čteny jedenkrát za sekundu. Optické obrázky byly snímány jednou za 20 sekund. Použitý fotoaparát při řízení z počítače vyšší snímkovou frekvenci neumožňuje (dáno rychlostí jeho USB rozhraní).



Obr. 2: Kompozitní RGB obrázek



Obr. 3: Zatěžovací diagram

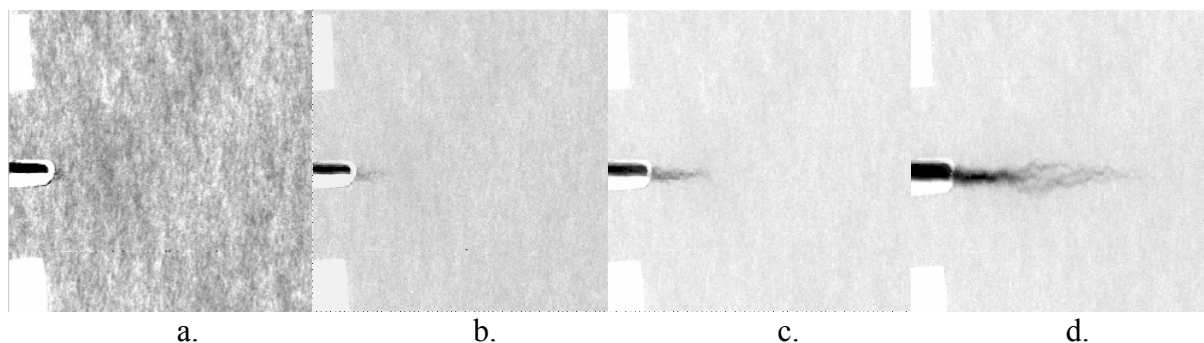
3D pole deformací bylo vyhodnocováno po ukončení experimentu. Kompozitní obrázky byly rozloženy do tří R, G, B kanálů (což je ve skutečnosti standardní reprezentace barevných obrázků). Tím byly získány tři nezávislé scénérie. Tyto scénérie sloužily pro topografickou rekonstrukci deformovaného povrchu. Topografie povrchu postihuje odchylky od rovinnosti, vzniklé mímorovinnými deformacemi na dané hladině zatížení. Topografie povrchu byla analyzována na dvanácti zatěžovacích hladinách, které byly na základě zatěžovacího diagramu vybrány jako „zajímavé“. Kompozitní RGB obrázky sloužily pro analýzu rovinných deformací povrchu metodou MIE. Na obr. 2 je zobrazen poslední kompozitní obrázek před dolomením vzorku. Rovinné deformace byly s ohledem na výpočet plastické deformace při užití přírůstkové teorie plastických deformací analyzovány na 35 zatěžovacích úrovních. Zde budou ukázány výsledky ze čtyř vybraných zatěžovacích stavů. Tyto stavy jsou v zatěžovacím diagramu na obr. 3 vyznačeny kroužky.

4. Výsledky

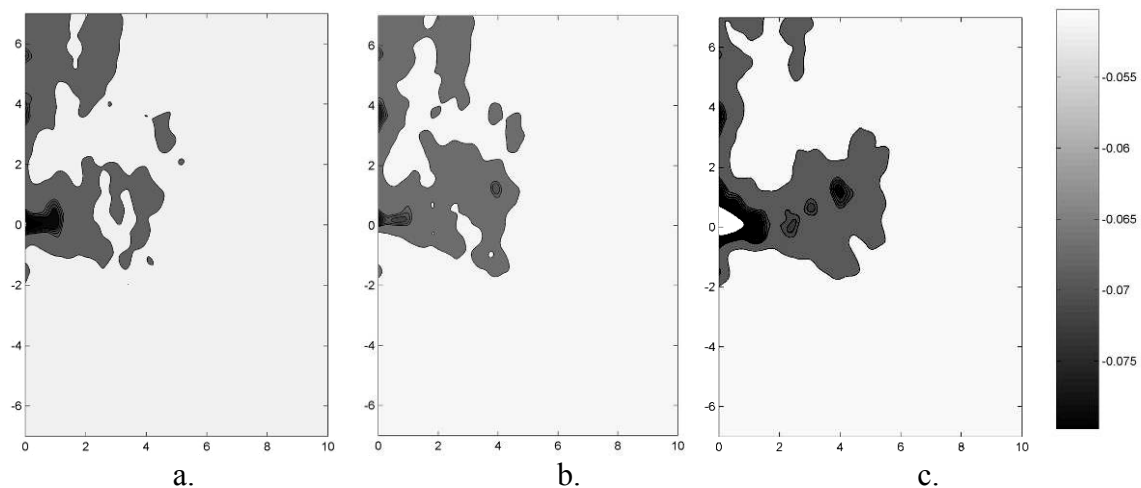
Zatěžovací diagram na obr. 3 má očekávatelný charakter. První část představuje usazování mechanismu zatěžovacího stroje. Druhá literární část odpovídá lineárním deformacím vzorku. Následující část koresponduje s rozvojem plastických deformací vzorku, které jsou v závěrečné fázi doprovázené poškozováním vzorku dutinami, mikrotrhlinami a podkritickým růstem makroskopické trhliny. Mezi místy označenými písmeny *a* a *b* je patrné lokální maximum. Maximální zatěžovací síla je v grafu označena písmenem *c*. U posledního vyhodnocovaného zatěžovacího stavu, označeného písmenem *d*, byla pozorována makroskopická trhlina i na povrchu vzorku (viz. obr.2).

První vnitřní poškození vzorku na čele trhliny bylo radiografickou metodou XRDD pozorováno v zatěžovacím stavu *a*. Má přibližně kruhový tvar a zasahuje zhruba 100 mm před čelo trhliny, viz. obr. 4a. Pole mímorovinných posunutí na této hladině je zobrazeno na obr. 5a. Odpovídající přírůstek plastické deformace je velmi nízký, viz. obr. 5b.

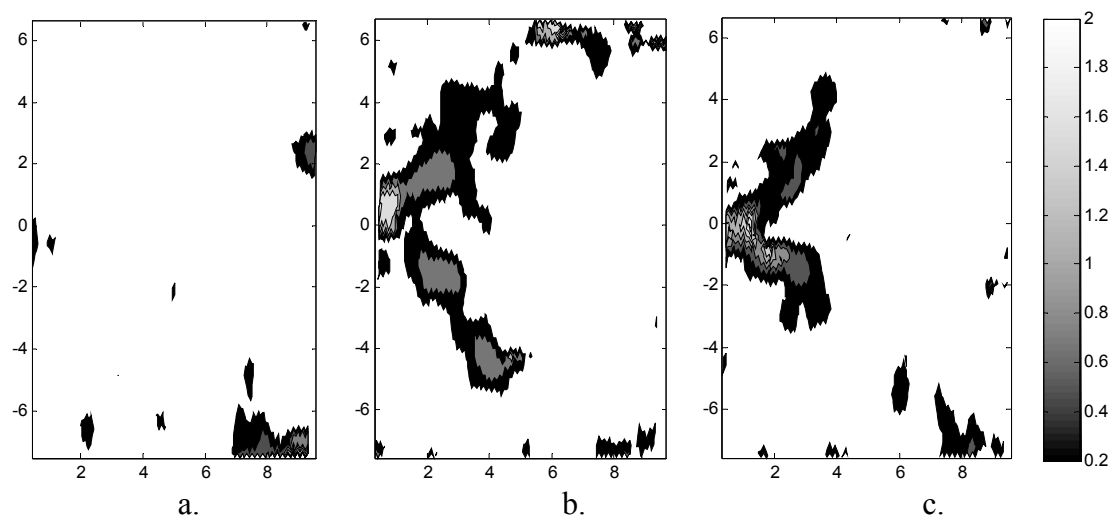
Na zatěžovací hladině *b*, těsně za lokálním maximem, byla metodou XRDD pozorována zóna poškození rozvětveného trojúhelníkového tvaru, viz. obr. 4b. Tato zóna je třikrát větší a lze předpokládat koalescenci dutin. Indikované „změkčení“ vzorku je doprovázené výrazným přírůstkem plastické deformace, viz. obr. 6b. Mímorovinná posunutí jsou přitom menší, než na předchozí zatěžovací hladině *a*, viz. obr. 5b. Což je dáno relaxací hydrostatické napjatosti uvnitř vzorku. Toto chování vzorku lze považovat za známku statistického modelu poškozování.



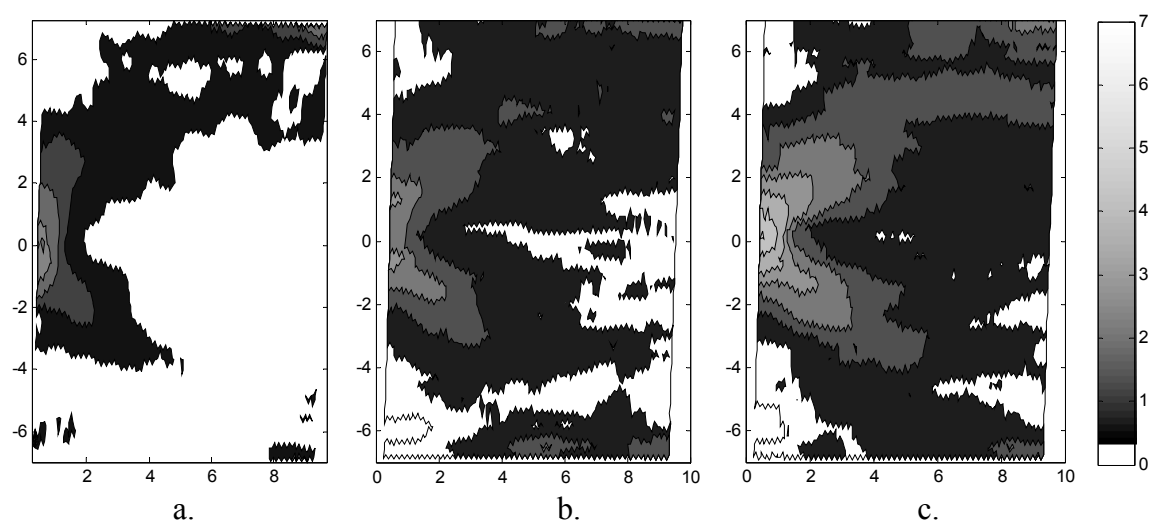
Obr. 4: Rozvoj procesní zóny sledovaný XRDD metodou. Skutečný rozměr každého snímku je 5x5 mm. Na prvním snímku *a* je dobře viditelná vnitřní struktura materiálu. Trhlina je vždy nalevo uprostřed. V textu zmíněné olověné značky jsou zobrazeny bíle.



Obr. 5: Rozvoj mimorovinných posunutí byl analyzován pomocí CPS. Skutečná velikost každého podobrázku je 13x10 mm. Jednotky posunutí jsou v milimetrech



Obr. 6: Přírůstky plastické deformace. Jednotky jsou v procentech.



Obr. 7: Rozvoj pole plastických deformací před čelem trhliny byl vyhodnocován na stejných zatěžovacích hladinách jako mimorovinná posunutí a přírůstky plastické deformace. Rozměry podobrázku jsou uvedeny v milimetrech, jednotky plastické deformace v procentech.

XRDD obrázek na obr. 4c odpovídá maximální zatěžovací síle. Procesní zóna v tomto zatěžovacím stavu tvar ostrého trojúhelníka. Na optickém obrázku byla přitom na povrchu vzorku pozorována velmi krátká 100 μm dlouhá trhlina. Změřená mimorovinná posunutí jsou pochopitelně velmi výrazná.

Na XRDD obrázku 4 d, který odpovídá zatěžovacímu stavu d , je zřetelně vidět víc jak 1 mm dlouhá, rozvětvená trhlina.

5. Závěry

Představená experimentální sestava umožňuje komplexní sledování fyzikálních dějů, probíhajících během porušování houževnatých materiálů. Během zatěžovacích experimentů na vysoce houževnatém duralovém vzorku byly zjištěny jednoznačné souvislosti mezi zatěžovacím diagramem „posunutí-zatěžující síla“, poškozujícími procesy, přírůstky plastické deformace na povrchu vzorku a změnami mimorovinných posunutí. Byl identifikován vznik a rozvoj zóny poškození, která přerostla v podkritický růst makrotrhliny. Experiment byl ukončen dolomením vzorku.

Pro vyšší prostorové i časové rozlišení XRDD metody je třeba zvýšit geometrické zvětšení a s ohledem na intenzitu použité rentgenky i snížit rychlost zatěžování. Kvalitu optických obrázků a následné zpřesnění optických metod je možné zlepšit zmatněním povrchu vzorků. Bude tak dosaženo lepšího kontrastu mřížky a zamezeno nežádoucím odrazům.

6. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory grantového projektu GA ČR 106/04/0567, výzkumného záměru AV0Z20710524 a částečně i EU projektu Histoclean EVK4-CT-2002-30011.

7. Literatura

- Vavřík, D.; Jakůbek, J.; Pospíšil, S.; Visschers, J. (2005) Non-destructive Observation of Damage Processes in Loaded High Ductile Specimens with Different Crack Configuration by X-Ray Dynamic Defectoscopy, *Materials Science Forum*, Vol. 480, pp. 231-236
- Vavřík D., Bryscejn J., Jakůbek J., Valach J. (2005 b) Optical measurement of 3D displacement field using one camera, *Computational Methods and Experiments in Material Characterisation II*, Wit Press, Southampton, UK, Vol 51, 2005, pp. 229-237
- Vavřík, D. & Zemánková, J. (2004) Crack Instability in Ductile Materials Analyzed by the Method of Interpolated Ellipses., *Experimental Mechanics*, Vol. 44, pp. 327-335
- Woodham, R. J. (1980), Photometric method for determining surface orientation from multiple images, *Optical Engineering*, Vol. 19, pp. 139-144
- Vavřík D., Holý T., Jakůbek, J., Jakůbek M., Vykydal Z. (2005 c), New experimental setup for study of physical processes preceding specimen failure, In *Proc. Engineering Mechanics 2005*, Svratka, ČR
- Jakůbek J., Vavřík D., Pospíšil S., Uher J. (2005): Quality of X-ray transmission radiography based on single photon counting pixel device, *NIMA*, Vol. 546, Issues 1-2, pp. 113-117