



## **RADIOGRAPHIC OBSERVATION OF STRAIN FIELD AND CONSEQUENT DAMAGE ZONE EVOLUTION**

**D. Vavrik<sup>1,2</sup>, J. Jakubek<sup>2</sup>, I. Jandejsek<sup>1</sup>**

**Summary:** *This work reports on results of the radiographic observation of 3D displacement field and consequent damage evolution during loading of specimens with recognizable inner structure. Assuming flat geometry of the loaded specimen, the in-plane deformation is evaluated from radiographs using the image correlation technique. The related out-of plane displacement field is measured thanks to an accurate 'radiograph intensity to material thickness' calibration.*

### **1. Úvod**

Při sledování chování trhlin v houževnatých tělesech je žádoucí sledovat rozvoj vnitřního poškození na čele trhliny současně s polem deformací v blízkém okolí. V souvislosti s úlohou pozorování rozvoje poškození byla vyvinuta experimentální metoda „X-ray dynamic defectoscopy“ (XRDD)<sup>1</sup>, Vavřík a kol. (2005). Její podstatnou součástí je Direct Thickness Calibration (DTC) metoda, Jakubek a kol. (2005). DTC metoda nám spolu s unikátním detektorem rentgenovského záření Medipix-2 dává radiogramy ojedinělé kvality. Díky tomu je možné sledovat rozvoj zóny poškození a zároveň měřit 3D pole posunutí zatěžovaného vzorku.

Za předpokladu, že je radiograficky zřetelná vnitřní struktura materiálu, lze měření 2D pole posunutí realizovat s využitím nástrojů Digital image correlation (DIC). Tato technika je poměrně známá pro materiály s výraznou vnitřní strukturou, jako jsou například vyztužené kompozity, Russel (1989) nebo kovové pěny. Jak bude ukázáno později, je zmíněný přístup použitelný i pro homogenní kovová tělesa, u kterých se díky vysoké kvalitě radiogramů stane zřetelnou vnitřní zrnitá struktura. Jak bude také představeno, lze navíc díky metodě DTC u plochých vzorků měřit i změny tloušťky vzorku v celé jeho ploše (třetí rozměr posunutí).

### **2. X-ray Dynamic Defectoscopy**

X-ray dynamická defektoskopie (XRDD) kvantifikuje vnitřní poškození vzorku měřením kumulativního zeslabení jeho tloušťky objemovým podílem dutin a mikrotrhlin. Vzhledem

---

<sup>1</sup> Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Czech Academy of Sciences, Prosecka 76, Prague 9, Czech Republic, E-mail: vavrik@itam.cas.cz

<sup>2</sup> Institute of Experimental and Applied Physics of the Czech Technical University in Prague, Horská 3a/22, 128 00, Prague 2, Czech Republic

k výrazné lokalizaci procesní zóny je tato snadno odlišitelná od vlivu zeslabení vzorku vzniklého kontrakcí vzorku.

S ohledem na měřítko krystalické struktury kovu a rozměru zóny poškození, která má být sledována, je u radiografického měření vyžadováno prostorové rozlišení na úrovni setin milimetru. Toho je dosaženo na základě „bodového“ zdroje X-záření, kvalitního detektoru a korekce tvrdnutí svazku. V našem experimentálním zařízení je použita mikrofokusová rentgenka s velikostí emisní skvrny 5  $\mu\text{m}$  a divergentním svazkem. Geometrickým zvětšením je možné dosáhnout rozlišení na úrovni jednotek mikrometrů. Pro zobrazování rentgenogramů je použit pixelový detektor Medipix-2. Pixely mají rozměr 55x55  $\mu\text{m}$  a jsou sestaveny do matice 256x256 pixelů, blíže viz. <http://www.cern.ch/MEDIPIX/>.

Významným zdrojem zkreslení radiogramu je takzvaný „efekt tvrdnutí svazku“. Který je možné velmi účinně eliminovat metodou DTC. Tato metoda je založena na přesném proměření vztahu „tloušťka kalibrátoru – počet zaznamenaných fotonů“. Mapa radiografických intenzit je při použití DTC nahrazena mapou „efektivních“ tloušťek. Pojem efektivní tloušťky byl zaveden pro tělesa, která nemají stejnorodé prvkové složení. V takovém případě vypadá vzorek v ploše jako různě tlustý, ačkoliv je geometricky zcela plochý. Typickým případem je i náš případ, kdy se zrnitost slitiny hliníku po zpracování metodou DTC jeví jako „hrbolatý“. Pokud je těleso prvkově stejnorodé (míněno na úrovni rozlišení radiogramů), je efektivní tloušťka totožná se skutečnou tloušťkou.

### 3. X-ray Image correlation

X-ray digital image correlation metoda (XDIC), která byla použita na měření deformací zatěžovaného tělesa, je založena na stejných principech, jako jsou použity u standardní optické digitální image correlation techniky (DIC): V sekvenci snímků, které byly zaznamenány během experimentu, hledáme soběpodobná místa. Hledání soběpodobných míst je z matematického hlediska založeno na dobře známém výpočtu vzájemné korelace. Rozdíl je ve zdroji dat: Standardní DIC metoda používá optické snímky povrchu, který byl pokryt kontrastním „skvrnitým“ nástřikem. Soudržnost takového nástřiku s houževnatým vzorkem může být problematická, obzvláště v blízkosti čela trhliny, kde se vyskytuje vysoký gradient deformace. Navíc optická DIC metoda měří pole deformací na povrchu za podmínek rovinné napjatosti, zatímco v blízkosti čela trhliny se vnitřní objem materiálu deformuje převážně za podmínek rovinné deformace. Oproti tomu XDIC je založena na radiografickém pozorování přes celou tloušťku vzorku. Dominantní typ deformace je tak měřen nezávisle na tom, zda se jedná o napjatost rovinnou, nebo deformační.

Během zatěžovacího experimentu je zaznamenávána sekvence radiogramů. V prvním (referenčním) radiogramu je vygenerována síť měřících bodů. Pozice těchto bodů je následně hledána v následujícím (cílovém) radiogramu. Při hledání těchto souřadnic se začíná ve stejných souřadnicích měřících bodů.

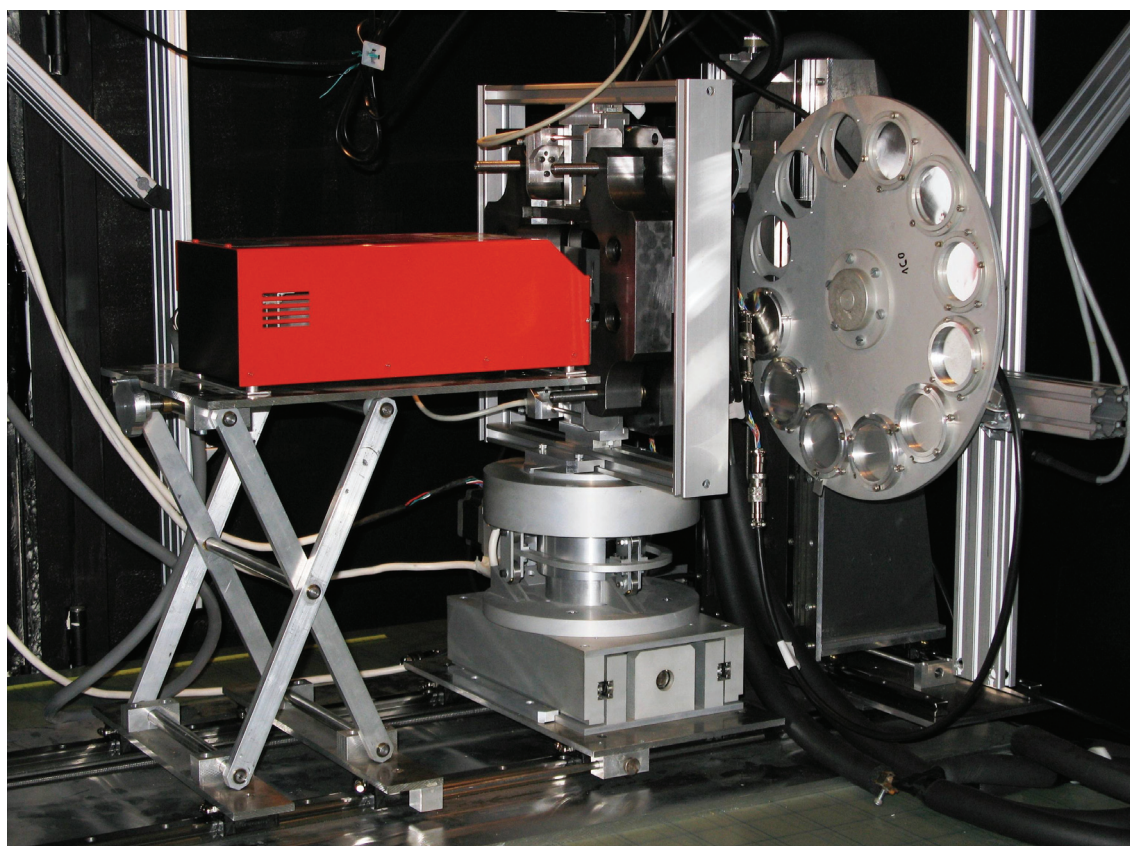
Obecně XDIC používá následující algoritmus: z referenčního i cílového radiogramu je v okolí každého měřícího bodu vybrána podoblast radiogramu (maska). Následně je počítána vzájemná korelace vzorové a cílové masky u každé dvojice bodů referenční sítě bodů. Cílovou maskou se posunuje v okolí měřícího bodu a korelace se vyčísluje i v těchto polohách. Tímto způsobem

získáme matici korelačních koeficientů. Okolí maxima této matice je interpolováno polynomiální plochou. Její maximum nám udává polohu nového referenčního bodu sítě se subpixelovou přesností.

Popsaná procedura je provedena pro celou sekvenci radiogramů. Poznamenejme, že každá maska musí zahrnovat rozpoznatelnou náhodnou strukturu, nemůže být proto libovolně malá. Blíže k popsané XDIC metodě viz. Jandejsek & Vavřík (2007) v tomto sborníku.

#### 4. Experimentální sestava

Experimentální sestava, viz. Obr. 1, sestává z radiografického systému, zatěžovacího stroje a několika počítačově řízených stolků, Vavřík a kol. (2005). Z bezpečnostních důvodů je celá sestava je umístěna v plně odstíněné skříni.



Obr. 1: Experimentální sestava zahrnuje rentgenku (vlevo), zatěžovací stroj na motorizovaném stolku (uprostřed) a detektor X-záření Medipix (skrytý za disky s kalibračními filtry).

Pro radiografický systém byla zvolena stabilní poloha rentgenky a X-ray detektoru, zatímco zatěžovací stroj s uchyceným vzorkem je umístěn na motorizovaném stolku. Součástí sestavy jsou i dva disky s kalibračními vzorky, které jsou určeny pro kalibrační fázi DTC metody.

S ohledem na radiografické měření byl vyvinut stolní zatěžovací stroj. Ten je osazen čtyřmi servopohony, které zajišťují symetričnost zatěžování a relativně stabilní polohu pozorovaného

místa. Ve stroji jsou integrované dva siloměry, posuv je odečítán dvěma optoelektronickými úchylkoměry. Maximální zatěžovací síla je 100 kN. Kompaktní rozměry (377x343x190 mm) a nízká váha (25 kg) dovoluje umístit zatěžovací stroj na počítačově řízený motorizovaný stolek.

S ohledem na preciznost polohování pozorovaného objektu je stolek osazen krokovými motory. Stolek má dvě lineární osy v rovině kolmé k ose svazku, polohující s přesností 5  $\mu\text{m}$  a jednu vertikální rotační osu s přesností 0.5 sec.

Všechny říditelné veličiny a procesy experimentální sestavy jsou ovládané jedním softwarovým balíkem Pixelman. V tomto programu probíhá také zpracování radiogramů metodou DTC. Součástí balíku je i modul na řízení zatěžovacího stroje, čtení dat z extenzometrů a siloměrů. Pro ovládní systému je využito USB rozhraní, čímž je přirozeně zajištěna synchronizace všech procesů.

## 5. Experiment

Vzorek byl vyroben z vysoce houževnaté slitiny hliníku ČSN 42 42 03.6 (dural), s elastickým modulem  $E$  70 GPa, mezi pevnosti  $\sigma_{ys}$  296 Mpa a Poissonovým číslem  $\mu$  0.315. Zdrojový materiál měl tvar tlusté desky, za tepla válcované. Rozdíl v mechanických vlastnostech je v na sobě kolmých směrech nevýrazný. Na druhou stranu, z morfologického hlediska jsou zrna zřetelně protáhlá ve směru válcování. Volná délka vzorku měla tvar ploché tyče o rozměrech 170x50x5 mm (délka x šířka x tloušťka), na obou stranách jsou vzorky prodloužené o zesílené hlavy. Ve střední rovině byla vyjiskřena štěrbina o délce 10 mm. Na obou stranách štěrby byla nacyklována iniciační trhlinka o délce cca. 3 mm. Líce únavové trhliny nebyly přesně kolmé k rovině vzorku. V blízkosti čela trhliny byly nalepeny olověné plíšky, které v radiogramech slouží jako kontrastní referenční značky.

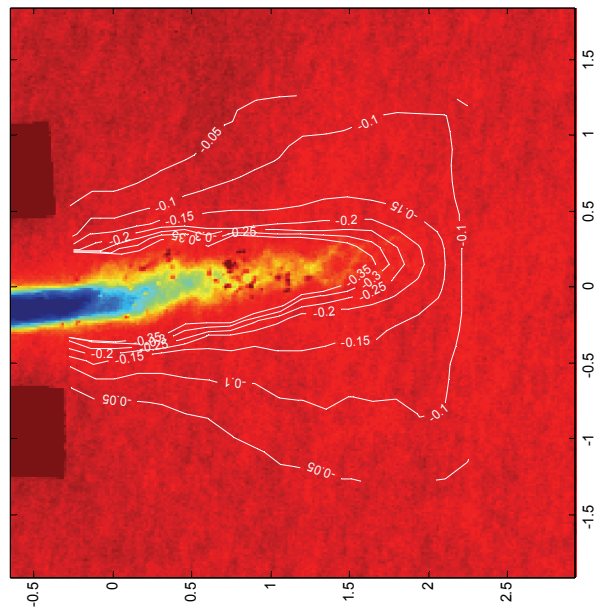
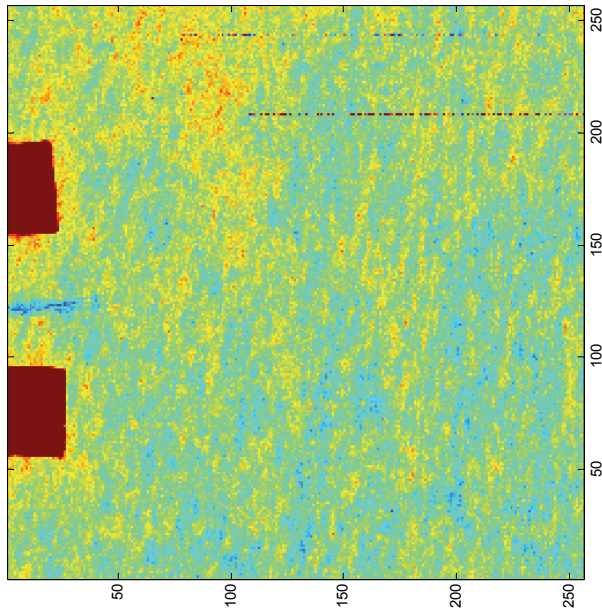
Vzorek byl zatěžován v tahu posuvem čelistí o rychlosti 0.4  $\mu\text{m}/\text{sec}$  až do stádia, kdy iniciační trhliny poporostly o cca. tři milimetry. Aby bylo dosaženo co nejvyššího počtu detekovatelných fotonů X-záření, byla vzdálenost mezi anodou rentgenky, pozorovaným vzorkem a detektorem Medipix-2 nastavena na minimum. Z této geometrie vyplynulo zvětšení o násobku 3,6. Jeden pixel detektoru tak zobrazuje plochu 15x15 mikrometrů v rovině vzorku. Celková doba experimentu byla 34 min, 12 sec. Expoziční čas radiogramů byl 0,5 sec, snímány byly s intervalem 0,85 sec. Celkově tak bylo zaznamenáno 2420 radiogramů. Data z extenzometrů (posunutí čelistí) a ze siloměrů (zatěžovací síla) byly snímány každou sekundu.

Všechny radiogramy byly zpracovány metodou DTC. Bylo tak získáno rozložení tlouštěk vzorku pro každou analyzovanou zatěžovací hladinu. Ve výsledku se staly viditelnými nejen nárůst trhliny a rozvoj zóny poškození ale i vnitřní zrnitá struktura vzorku.

## 6. Experimentální výsledky

Rozlišitelnost rysů vzorku v radiogramech je limitována množstvím detekovaných rentgenovských fotonů v každém pixelu použitého detektoru. Byl proto počítán plovoucí průměr vždy na čtyřiceti snímcích, které byly předem zpracovány metodou DTC. Takto získaný integrální snímek nezatíženého vzorku je zobrazen na Obr.2 (pseudobarvy jsou použity pro lepší čitelnost). Měřítka obrázku je uvedeno v pixelech.

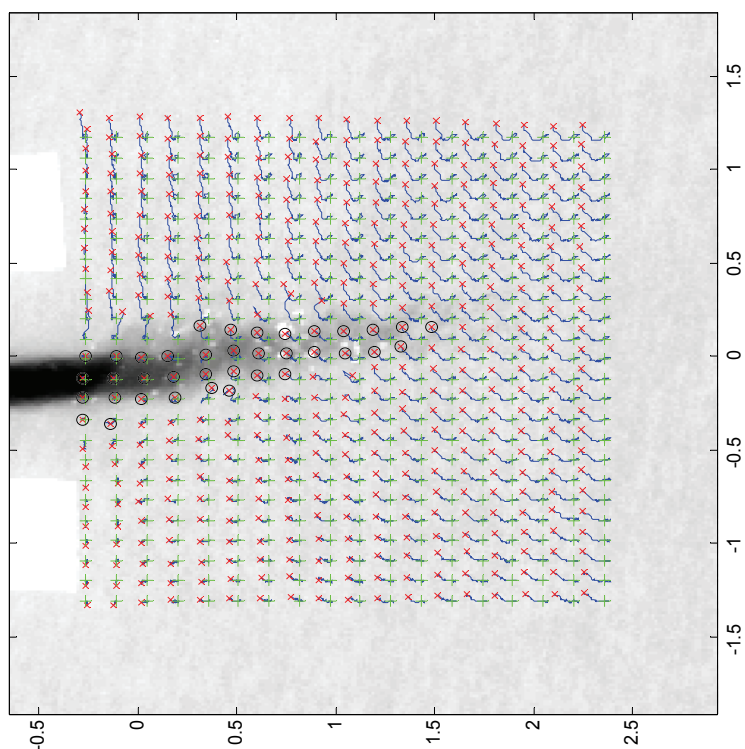
Nejtlustší části vzorku mají tmavě červenou barvu, což v tomto případě odpovídá kontrastním oloveným značkám v levé části snímku. Modrá barva koresponduje s malými tloušťkami vzorku, v našem případě je to iniciační trhlina (vodorovně, uprostřed nalevo, mezi olovenými značkami). Zrnitá struktura materiálu, která se projevuje změnami efektivní tloušťky, je poměrně dobře patrná. Je zřetelné i protažení zrn ve směru válcování, zde ve svislém směru.



Obr. 2.: Integrální snímek nezatíženého vzorku. Obr. 3:  $\Delta z$  izočáry obklopující zónu poškození.

Na Obr. 3 je znázorněna situace při dosažení maximální zatěžovací síly 22,5 kN, spolu s izočárami změn tloušťky vzorku. Měřítko snímku je v mm, souřadnice [0,0] odpovídá čele iniciační trhliny. Oproti předchozímu snímku byla změněna barevná škála, aby byly dobře patrné změny na čele trhliny. Je vidět, že došlo k výraznému otevření lící trhliny. Před čelem trhliny je patrná zóna výrazného poškození materiálu, která sahá až do vzdálenosti cca. 1,5 mm před čelem trhliny (modrá až žlutá barva) a je mírně vychýlená z roviny symetrie vzorku.

Zahuštění izočar změn tloušťky (mimorovinných posunutí) dobře vystihují intenzivní kontrakci v okolí zóny poškození. V místech zóny poškození byla zároveň naměřena „kritická“ změna tloušťky na úrovni cca. 10 %. Poznamenejme, že pro správné vyhodnocování změn tlouštěk je třeba sledovat pohyb odpovídajících míst vzorku. Zrnitost materiálu se totiž po vyjádření v efektivní tloušťce (vypočítané metodou DTC) projevuje „vlněním“ plochy na úrovni desetin milimetru. Pokud bychom tedy odečítali změny tloušťky z nesouvisejících míst, dostali bychom zcela zavádějící údaje.

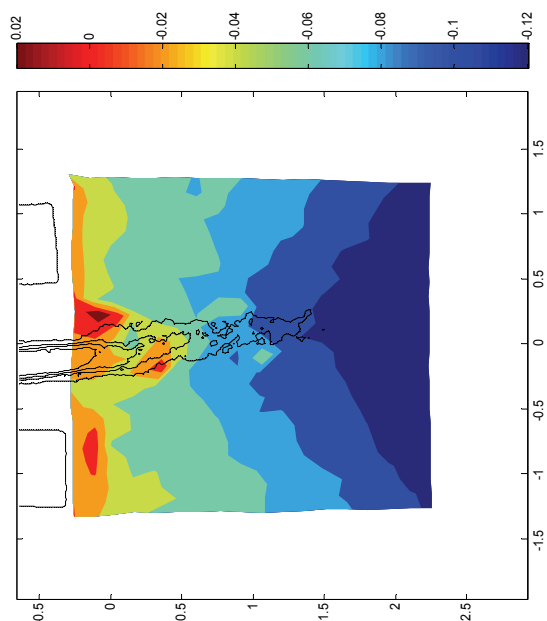


Obr. 4.: Trasy měřících bodů až do maximální zatěžovací síly.

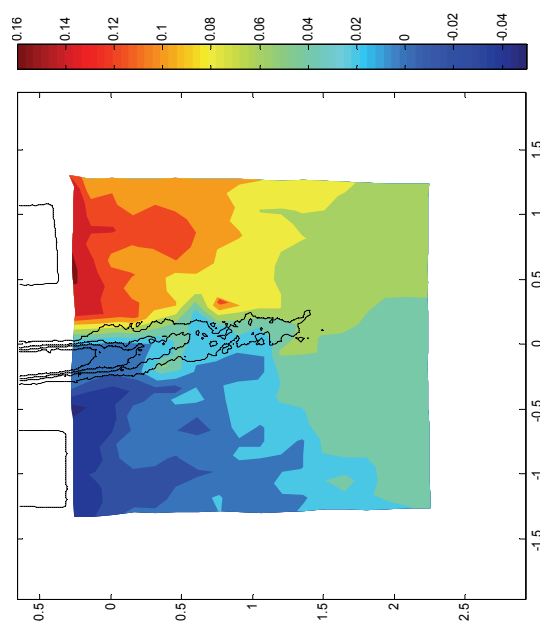
S ohledem na použití XDIC metody byla v prvním snímku vygenerován síť měřících bodů. Trasy těchto bodů byly sledovány ve všech analyzovaných integrálních snímcích. Na Obr. 4. jsou znázorněny trasy bodů až do maximální zatěžovací síly. Zelené křížky představují počáteční pozice bodů měřící mřížky, modré čáry jejich trasy a červené značky x jejich pozici na aktuální hladině zatěžování. Přesnost měření vektoru posunutí v rovině vzorku je na úrovni jednotek mikrometrů. Modrá kolečka vyznačují měřící body, kde byla díky přítomnosti trhliny, resp. intenzivnímu poškození materiálu “ztracena” korelace (původní struktura materiálu se zásadně změnila). Ztrátu korelace lze považovat za jeden z příznaků přítomnosti zóny poškození. Asymetričnost v trasách měřících bodů sleduje asymetrický rozvoj zóny poškození vůči rovině symetrie vzorku. Měřítko snímku je v mm, souřadnice  $[0,0]$  odpovídá čelu iniciační trhliny.

Porovnáním výchozích a konečných poloh bodů byly spočteny obě složky posunutí  $\Delta x$  a  $\Delta y$ . Na Obr. 5 je zobrazeno pole posunutí  $\Delta x$  a na Obr. 6 pole posunutí  $\Delta y$  při maximální zatěžovací síle. Vzhledem k jiným rozsahům deformací mají tyto obrázky jiné škálování. Olovené značky, trhlina a zóna poškození jsou pro lepší orientaci znázorněny černými konturami.

V poli posunutí  $\Delta x$  je dobře patrný nárůst kontrakce ve směru osy  $x$  směrem k zóně poškození. Podobně u pole posunutí  $\Delta y$  byl naměřen nejvyšší gradient v okolí zóny poškození. Analyzovaná plocha snímku odpovídá zhruba ploše  $2,5 \times 2,5$  mm, měřeno v rovině vzorku.



Obr. 5.: Pole posunutí  $\Delta x$  při max. zatěžovací síle.



Obr. 6: Pole posunutí  $\Delta y$ .

## 7. Závěry

Byla úspěšně realizována metoda X-ray Digital Image Correlation zaměřená na měření polí posunutí  $\Delta x$  a  $\Delta y$  v rovině vzorku. Přesnost měření vektoru posunutí v rovině vzorku je na úrovni jednotek mikrometrů. Taktéž byla vyvinuta a ověřena metoda na měření změn tloušťek vzorku  $\Delta z$  v okolí čela trhliny, přesnost měření se pohybuje na úrovni deseti mikrometrů. Změny tloušťky vzorku lze interpretovat jako mimorovinná posunutí povrchu.

Měření 3D pole posunutí při použití XDIC je možné díky excelentní kvalitě radiogramů. Kvalita radiogramů je dána mimo jiné vysokým dynamickým rozsahem pixelového detektoru Medipix-2 a použitím přímé kalibrace tloušťky DTC. Po zpracování radiogramů DTC je na získaných obrázcích patrná orientace zrnité struktura materiálu, vzniklá válcováním za tepla.

Rozvoj zóny poškození je doprovázen výraznými změnami počáteční zrnité struktury. Přítomnost poškození materiálu je indikována ztrátou korelace metody XDIC v příslušných kontrolních bodech. Zóna poškození je zřejmá i z kritické hodnoty změn tloušťky vzorku. Je zároveň obklopena vysokým gradientem  $\Delta y$ .

## 8. Poděkování

Práce byla uskutečněna v rámci pracovní skupiny CERN Medipix Collaboration. Byla podpořena grantovým projektem GA ČR 106/04/0567 a výzkumnými záměry AV0Z20710524 a MSM6840770040 Ministerstva školství, mládeže a sportu.

## 9. Literatura

D. Vavřík, J. Jakůbek, S. Pospíšil, J. Visschers (2005), Non-destructive Observation of Damage Processes in Loaded High Ductile Specimens with Different Crack Configuration by X-Ray Dynamic Defectoscopy, *Materials Science Forum*, Vols. 480-481, pp. 231-236

Jakůbek, J.; Vavřík, D.; Pospíšil, S.; Uher, J. (2005), Quality of X-ray transmission radiography based on single photon counting pixel device, *Instruments and Methods in Physics Research Section A*, Vol. 546, Issues 1-2, pp. 113-117

S. S. Russell and M. A. Sutton (1989), *Experimental Mechanics*, Vol. 29, 237-240, 1989

Vavřík, D., Bryscejn, J., Holý, T., Jakůbek, J., Jakůbek, M., Valach, J. Vykydal, Z. (2005) New experimental setup for study of physical processes preceding specimen failure, In *Inženýrská mechanika 2005*. s. 331-336.

Jandejsek & Vavřík (2007) Digital Image Correlation, In *Inženýrská mechanika 2005*.

Medipix collaboration: <http://www.cern.ch/MEDIPIX/>