

## NON-DESTRUCTIVE OBSERVATION OF DAMAGE PROCESSES BY X-RAY DYNAMIC DEFECTOSCOPY

D. Vavřík<sup>1</sup>, J. Jakůbek<sup>2</sup>, S. Pospíšil<sup>2</sup>, J. Visschers<sup>3</sup>, J. Zemánková<sup>1</sup>

**Summary:** *The subject of this work is experimental observation of the development of internal damage and its evolution in aluminium alloy flat specimens with different configurations of the pre-crack. We propose direct and non-destructive observation of the material damage evolution by measuring changes in transmission of X-rays penetrating a stressed material, using a single photon counting X-ray imager, called Medipix-1. The specimens were loaded by grips displacement in tension. Observation was performed at a number of loading levels. The measured changes of structural defects in time were correlated with the loading-dependent surface strain field measured by the optical "Method of Interpolated Ellipses".*

### 1. Úvod

Vzhledem ke stále vyššímu využívání vysoce houževnatých materiálů, vyvstává potřeba nalezení věrohodného lomového kritéria za podmínek silně nelineární deformace. Lomu za doprovodu rozsáhlé plastické zóny obvykle předchází intenzivní vnitřní poškození materiálu. Pro oceli je to například proces vzniku, růstu a spojování dutin a mikrotrhlin, což bylo již popsáno řadou modelů [1]. Tyto teorie vyžadují experimentální ověřování svých předpokladů. Doposud se k tomu používala především metalografická stereologie.

S ohledem na pozorování rozvoje poškození byla vyvinuta přímá a nedestruktivní metoda „X-Ray Dynamic Defectoscopy“ (XRDD) [2,3,4], založená na pozorování změn v transmisii X-záření, procházejícího zatěžovaným vzorkem a jejich záznam pomocí pixelového detektoru nazývaného Medipix-1 [5,6]. Polohově citlivý detektor Medipix-1 je mimořádně citlivý, rychlý a má velký dynamický rozsah.

Zjištěný vývoj strukturálních defektů je během zatěžovacího procesu korelovan s rozvojem pole povrchových deformací, měřených optickou metodou interpolovaných elips (Metoda Interpolovaných Elips – MIE) [7] a s mechanickým měřením redukce tloušťky (kontrakce) v jednom bodě těsně před čelem trhliny.

Vzorky byly namáhány jednoosým tahem, ve vlastním speciálně vyvinutém jednoúčelovém zatěžovacím zařízení. Jeho velmi tuhá, avšak jednoduchá konstrukce, nám dala možnost precizního řízení zatěžování, zároveň bylo potlačeno parazitní ohybové napětí.

<sup>1</sup> Vavřík Daniel, Zemánková Jaroslava: ITAM CAS, Prosecka 76, 190 00, Praha 9, CZ, tel.: +420.286 882 121, fax: +420.286 884 634; e-mail: vavrik@itam.cas.cz

<sup>2</sup> Jakůbek Jan, Pospíšil Stanislav: IEAP CTU, Horská 3A/22, 128 00 Praha 2, CZ

<sup>3</sup> Visschers Jan: NIKHEF, Kruislaan 409, 1098 SJ Amsterdam, NL

## 2. X-Ray Dynamic Defectoscopy Method (XRDD)

Experimentální sestava se skládá ze zdroje X-záření, vzorku uchyceného v zatěžovacím zařízení, CCD video systému a Medipix-1 detektoru, viz. obr. 1. S ohledem na optické měření rovinných deformací je na povrchu vzorku nanášena hexagonální síť bodů.

Medipix-1 je polohově citlivým, polovodičovým, pixelovým detektorem, pracujícím v oboru X-záření. Tato detekční struktura je organizována na jednom čipu jako matice 64x64 elementárních detektorů (pixelů), o rozteči 170  $\mu\text{m}$ . K čipu je technologií bump-bondingu (tj. spojení pomocí výstupků) připojen čip vyčítací elektroniky, který obsahuje pro každý pixel detektoru předzesilovač, komparátor, čítač a obvody rozhraní. Každý pixel je tedy schopen s vysokou detekční účinností poskytnout údaj o počtu jednotlivých fotonů dané vlnové délky, které na něj dopadly (detektor je schopen skutečně detekovat jednotlivé fotony). Detektor pracuje plně lineárně v dynamickém rozsahu 15 bitů na pixel.

Medipix-1 detektor je přes vyčítací desku, zvanou MUROS-1 [8], propojen na dvě komerční karty National Instruments (NI), umístěné uvnitř osobního počítače (PC). Celý systém je řízen pomocí software Medisoft 3 [8]. Výstupní data jsou bezprostředně zpracovávána v osobním počítači. Pixelový detektor je zcela unikátní technikou, dostupnou ve světě pouze na několika špičkových pracovištích. Byl navržen a vyroben v rámci Medipix spolupráce [9].

Jednou z aplikací těchto detektorů je defektoskopie. Měření XRDD je založeno na nedestruktivním sledování rozložení změn ve struktuře materiálu, s mikrometrickou přesností, přímo v průběhu jeho zatěžování. Testovaný vzorek je v průběhu namáhání prosvěcován X-zářením a ze změn v transmisi je usuzováno na efektivní změny v tloušťce vzorku. Efektivní změnou tloušťky rozumíme zeslabení vzorku objemovým podílem dutin a redukcí tloušťky vzorku (kontrakcí), která jsou důsledkem zatížení.

Dosažovaná přesnost měření efektivní změny tloušťky materiálu (ve směru svazku X-záření) je pro 5 mm tlustý hliníkový vzorek kolem 20  $\mu\text{m}$  tedy 0.4% (při energii X-záření 23 keV). Této přesnosti bylo dosaženo během jedné expozice. Zvýšením počtu expozic na jedné zátěžové hladině lze tuto přesnost ještě podstatně zvýšit. Funkční závislost *tloušťka vzorku – zeslabení X-záření* byla zjištěna na sadě etalonových vzorků [2]. Přesnost v podélném směru je dána rozměrem pixelu použitého detektoru a faktorem zvětšení, při použití divergentního zdroje X-záření.

Jako zdroj X-záření byl použit Hamamatsu microfocus X-ray zdroj L8601. Ohniskový zdroj X-záření má průměr 5  $\mu\text{m}$ . Tím je dané vysoké možné rozlišení pozorovaných snímků. Úhel rozbíhavého (divergentního) svazku je 39°, což dává možnost značného zvětšení. Během experimentů bylo na terčíku nastaveno napětí 35 keV a proud 250  $\mu\text{A}$ . Z celkového uspořádání experimentu vyplynulo zvětšení s faktorem 1.9.

V průběhu zatěžování je vzorek sledován i kamerovým systémem, přičemž je z deformace rastru metodou interpolovaných elips určován rozvoj povrchových deformací.

## 3. Metoda interpolovaných elips (MIE)

Rozvoj vnitřního poškození byl korelován s rozvojem povrchových deformací, které byly měřeny nezávisle metodou interpolovaných elips [7]. Tato metoda je založena na optickém sledování deformace hexagonální sítě bodů, která je nanášena na povrch zkoumaného vzorku.

Vyomezme na povrchu zatěžovaného vzorku kružnici o poloměru  $r$ . Předpokládejme, že během zatížení je uvnitř takové buňky přibližně homogenní deformace. Během zatížení se pak kružnice změní v elipsu. Každá elipsa je určena šesti sousedními body hexagonální sítě, viz. obr. 2. Ze znalosti parametrů dané elipsy přímo vyplývá velikost a směr hlavních prodloužení na povrchu vzorku,

$$\varepsilon_{11} = \frac{a-r}{r}, \quad \varepsilon_{22} = \frac{b-r}{r}, \quad (1)$$

kde  $a, b$  je velikost hlavní, respektive vedlejší poloosy elipsy a  $r$  je poloměr výchozí kružnice. Úhel  $\varphi$  na obr. 2 představuje v rámci zkoumané buňky rotaci lokálního souřadného systému  $xy$ , souhlasného se směry hlavních prodloužení, vůči globálnímu souřadnému systému  $XY$ , kde osa  $Y$  odpovídá směru vnějšího zatížení.

Poloha středů bodů byla díky obrazové analýze určena s přesností 0.1 pixelu optického snímku [10]. Interpolované kružnice na nezatíženém vzorku měly poloměr 0.4 mm (20 pixelů), tím byla dána přesnost určování polohy bodů na úrovni 0.8  $\mu\text{m}$ .

#### 4. Zatěžování

Vzorky byly namáhány jednoosým tahem, posuvem čelistí speciálního rámu. Vzorky byly přitěžovány krok po kroku. Vzniklá poškození, povrchové deformace a kontrakce byly zjišťovány v každé zatěžovací hladině.

Zatěžovací zařízení bylo navrženo jako jednoduchý mechanický rám, viz. obr. 3. Zatěžovací síla byla měřena pomocí dvou plochých nosníků s centrálními dírami. V obou dírách byly k tomu účelu instalovány dva páry tenzometrů. Siloměry byly předem zkalibrovány na standardním zatěžovacím stroji. Ploché nosníky měly na obou stranách symetrické úkosy a byly rozepryeny mezi dva páry klínů. Ty se pak opíraly o hlavy vzorku. Zatížení bylo vyvozováno utahováním čtveřice šroubů.

Zatížení bylo řízeno pomocí dvou tenzometrů, nalepených na boky vzorku v rovině symetrie (identické s rovinou trhliny). Naměřená tahová deformace je nadále označována jako *řídící prodloužení*.

Jeho velmi tuhá, avšak jednoduchá konstrukce, nám dala možnost precizního řízení zatěžování, zároveň bylo potlačeno parazitní ohybové napětí. Zatěžovací zařízení dimenzované na 100 kN váží i se vzorkem 4,8 kg.

#### 5. Oddělení objemového podílu dutin od kontrakce z celkové efektivní změny tloušťky

Po zpracování snímků z Medipix detektoru je možné určit efektivní změnu tloušťky zatíženého vzorku. Tato změna je daná objemovým podílem poškození a velikostí kontrakce ve směru kolmém na rovinu plochého vzorku.

Intenzitu objemového podílu dutin lze od kontrakce oddělit pomocí dekonvoluce rychlou Fourierovou transformací. Vzhledem k tomu, že jsme neznali skutečný průběh kontrakce v ploše vzorku, vycházeli jsme z předpokladu, že je prostorová frekvence kontrakce nižší, než prostorová frekvence průběhu intenzity poškození.

Maximální hodnota takto určené kontrakce byla porovnávána s hodnotou, naměřenou v jednom bodě těsně před čelem trhliny. Bylo vybráno několik koeficientů fourierovy

transformace které po zpětné transformaci modelovaly předpokládanou plochu kontrakce. Jejich výběr byl pak volen tak, aby bylo dosaženo co nejlepší shody s naměřenou hodnotou.

Tento přístup zjednodušuje úlohu separace obou komponent efektivní tloušťky vzorku. Musíme ale předpokládat, že se tak dopouštíme jisté nepřesnosti. V budoucnu plánujeme měření skutečného průběhu kontrakce pomocí některé z dostupných optických metod.

## 6. Experimentální výsledky

V předkládané práci byla použita vysoce houževnatá slitina hliníku (dural) ČSN 42 42 03.6. Tento materiál je dobře znám z předchozích experimentů [7,11]. Experimenty byly uskutečněny na dvou typech plochých vzorků s vyjiskřenou trhlinou, o šířce 0.3 mm, viz. obr. 4. Tyto vzorky při dané geometrii představují dvě krajní meze stísnění, dané konfigurací trhliny.

Vzorek s centrální trhlinou, nadále označený jako CC, představuje dolní hodnotu stísnění a vzorek s okrajovou trhlinou, nadále označený jako S, představuje horní hodnotu stísnění. Složení a základní mechanické vlastnosti použitého materiálu jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1: Základní mechanické vlastnosti a chemické složení použité Al slitiny.

Modul pružnosti: $E=70.038$ MPa	Al	Cu	Mg	Mn	Zn	Si	Fe	Ni
Poissonovo č.: $\mu=0.315$	92.1	4,9	1,6	0,85	0,03	0,17	0,26	0,09

K pozorování byla použita 1.3 Mpixel CCD digitální kamera, snímky byly zaznamenávány na pevný disk PC. Posléze byly spolu se snímky z Medipixu zpracovány metodami obrazové analýzy. Vzorky byly zatěžovány jednoosým tahem ve výše popsaném zatěžovacím rámu.

Experimentálně zjištěná závislost *zatěžovací síla-řídící prodloužení* vzorku CC je vykreslena na obr. 6. Tučné body označují jednotlivé zatěžovací hladiny, na kterých byla prováděna měření. Na tomto zatěžovacím diagramu je možné najít lehce konkávní charakter křivky na zatěžovací hladině 6, těsně před pozorovanou diskontinuitou v naměřené závislosti *kontrakce-řídící prodloužení*, blíže viz. následující odstavec. Poznamenejme, že bylo možné sledovat postupný nárůst trhliny, který nastal na zatěžovací hladině 12 (LL12), kdy následně došlo k poklesu zatěžovací síly. Nedošlo přitom k dolomení vzorku.

Kontrakce vzorku CC, ve směru kolmém na jeho rovinu, byla měřena mechanicky elektromechanickým úchylkoměrem v jednom bodě, těsně před čelem trhliny. Zjištěná závislost *kontrakce-řídící prodloužení* je vykreslena na obr. 7. Zpočátku hodnota kontrakce rostla úměrně vnějšímu zatížení až po LL7, kdy se v této závislosti objevilo plato. Počátek této diskontinuity předznamenal první pozorovanou oblast intenzivního poškození materiálu na LL8. V inflexním bodě na LL9 bylo dosaženo maximální hodnoty zatěžovací síly. Poté kontrakce začala strmě vzrůstat až po LL12, kde byl opticky pozorován první 200  $\mu\text{m}$  dlouhý nárůst trhliny. Zmíněné plato lze vysvětlit právě vznikem oblasti s výrazným podílem dutin. Vznik a nárůst těchto dutin je doprovázen lokálním uvolněním hydrostatické napjatosti a tedy i lokální „expanzí“ přilehlé oblasti vzorku.

Metodou XRDD jsme v každé zatěžovací hladině vzorku CC měřili objemový podíl dutin (intenzitu poškození) a velikost zóny poškození, viz. obr. 8. První zóna intenzivního poškození byla pozorována na LL8. To odpovídalo 82 % maximální dosažené zatěžovací síly. V následujících dvou krocích docházelo k výrazné expanzi zóny poškození. V dalších krocích

už velikost zóny poškození expandovala pomaleji, rostla však výrazně intenzita poškození. Na hladině LL12 bylo dosaženo kritické hodnoty intenzity poškození, tj. objemovému podílu dutin, a došlo k nárůstu předvyrobené trhliny.

Optickou metodou MIE byl sledován rozvoj povrchového pole intenzity deformace vzorku CC, viz. obr. 8. Díky malému kontrastu mezi hexagonální mřížkou a povrchem zkoumaného vzorku jsou výsledky poměrně významně zašuměné. Přesto lze konstatovat, že v okamžiku, kdy byla pozorována první oblast intenzivního poškození na LL8, začala prudce narůstat intenzita povrchových deformací. V následujících zatěžovacích hladinách rostla jak úroveň tak rozsah oblastí výrazné povrchové deformace. V okamžiku, kdy se objevil první nárůst trhliny, došlo k mírné relaxaci elastických deformací (srovnej zatěžovací hladinu LL11 a LL12).

Snímky na obr. 8 mají měřítko v mm. Všechny mají rozměr 3x2.5 mm. Souřadnice [0,0] odpovídá čelu vyjiskřené trhliny. Hranice vybarvených oblastí reprezentují úrovně objemového podílu dutin, resp. intenzity deformace v procentech, dle škál na pravé straně.

Vzorek S byl zatěžován obdobně jako vzorek CC jednoosým tahem posuvem čelistí. Symetrie zatěžování byla kontrolována měřením vzdáleností mezi kraji obou párů klínů. Oproti vzorku CC bylo řídicí prodloužení odečítáno z tenzometru v rovině symetrie vzorku (shodně s rovinou trhliny) ve vzdálenosti 5 mm od jeho okraje. Síla byla měřena shodně se vzorkem CC. Naměřená závislost *zatěžovací síla-řídicí prodloužení* je vykreslena na obr. 9.

Na vzorku S byly sledovány podobné fyzikální procesy a korelace jako na vzorku CC. V závislosti *zatěžovací síla-kontrakce* se objevila ještě výraznější diskontinuita, kontrakce na LL6 dokonce poklesla, viz. obr. 10. Objemový podíl dutin byl v okamžiku prvního nárůstu trhliny o něco nižší, než v případě vzorku CC (srovnej LL12 na obr. 8 a LL9 na obr. 11). Dosah oblasti poškození před čelem trhliny byl u obou vzorků v okamžiku nárůstu trhliny téměř shodný. Oblast poškození byla u vzorku S ovšem více soustředěna okolo roviny trhliny.

## 7. Závěry

Experimenty XRDD ukázaly, že použitý detektor Medipix-1 je velmi vhodným nástrojem pro sledování rozvoje zóny poškození před čelem trhliny. Pokud bychom chtěli sledovat jednotlivé dutiny, bylo by nutné při zobrazování pomocí X-záření použít větší zvětšení. Tím bychom ovšem byli schopni pozorovat přímo úměrně menší oblast vzorku.

Díky použití vlastního, speciálně vyvinutého zatěžovacího zařízení jsme byli schopni pozorovat rozvoj zóny poškození a to i v případě přírůstku délky trhliny. Bylo zajištěno skutečně čistě tahové zatížení, bez parazitního ohybu vzorku. Měření všech uvedených veličin bylo prováděno během diskrétních zatěžovacích stavů. Po plánovaném osazení motorů, řízených PC, bude možné přistoupit ke kontinuálnímu či kvazistatickému zatěžování, s přesně definovanou rychlostí přitěžování. Tím nastane skutečně časově závislé (dynamické) měření rozvoje poškození před čelem trhliny.

Všechny naměřené experimentální závislosti velmi dobře navzájem souvisejí. Vznik první oblasti intenzivního poškození předchází mírně konkávní charakter závislosti *zatěžovací síla-řídicí prodloužení*. V okamžiku první pozorované oblasti poškození byl pozorován diskontinuální charakter závislosti *kontrakce-řídicí prodloužení*, zároveň nastal intenzivní rozvoj intenzity povrchových deformací. Na zatěžovací hladině LL9, kdy začala kontrakce opět narůstat, bylo dosaženo maximální zatěžovací síly. Poté, co došlo k prvnímu nárůstu makrotrhliny, došlo k poklesu zatěžovací síly a zároveň mírně relaxovaly elastické deformace.

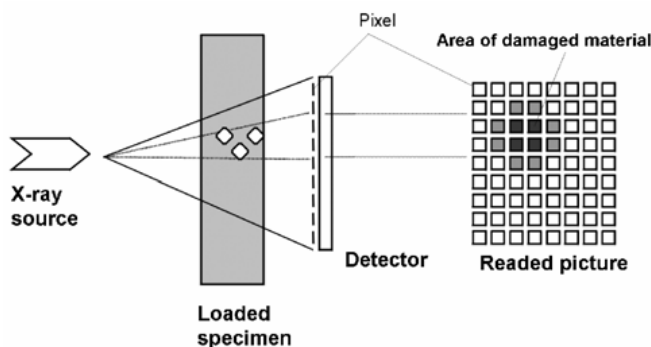
Na následujících zatěžovacích hladinách makrotrhlina u vzorku CC symetricky narůstala. Což je jasný důkaz čistě tahového zatěžování bez parazitního ohybového napětí.

Rozměr zóny poškození a objemový podíl dutin závisí na konfiguraci vyjiskřené trhliny. Šířka zóny poškození byla větší u vzorku CC v porovnání se vzorkem S. Objemový podíl dutin byl u vzorku CC v okamžiku nárůstu trhliny taktéž větší.

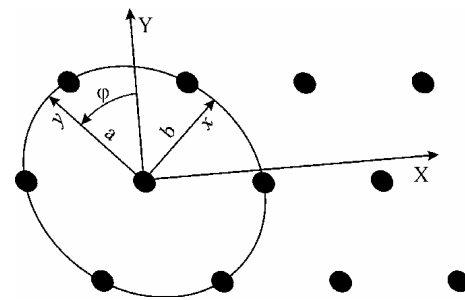
## 8. Poděkování

Práce byla podpořena Grantovou agenturou ČR, č. gr. 106/00/D064. Dále pak výzkumným projektem EU č. HPMF-CT-2000-01066, výzkumným projektem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR č. MSM 210000018, Českou komisí pro spolupráci s CERN za přispění grantu Ministerstva průmyslu a obchodu ČR. Práce byla uskutečněna v rámci spolupráce Medipix, podporované CERN (viz.: [www.cern.ch/medipix](http://www.cern.ch/medipix)).

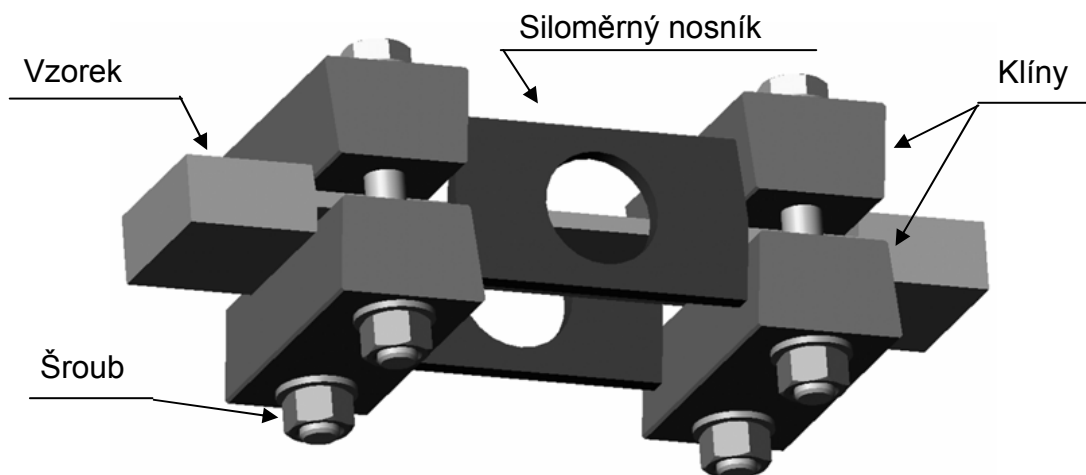
Autoři děkují Petru Jarošovi z pražské firmy Techlab za jeho odbornou pomoc během experimentálního programu.



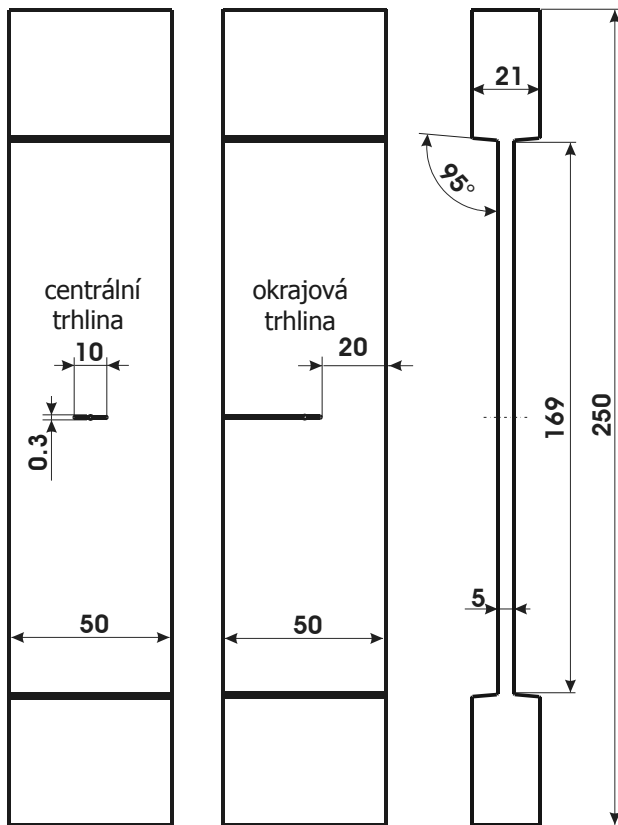
**Obr. 1:** Schéma experimentálního uspořádání



**Obr. 2:** Elipsa interpolovaná šesti sousedními body.



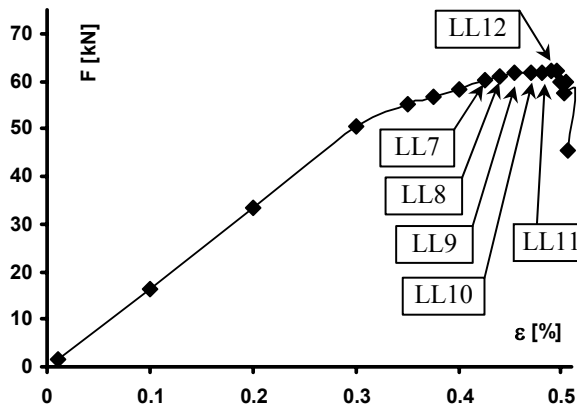
**Obr. 3:** Statický zatěžovací rám. Zatížení je vyvozováno utahováním čtyř šroubů.



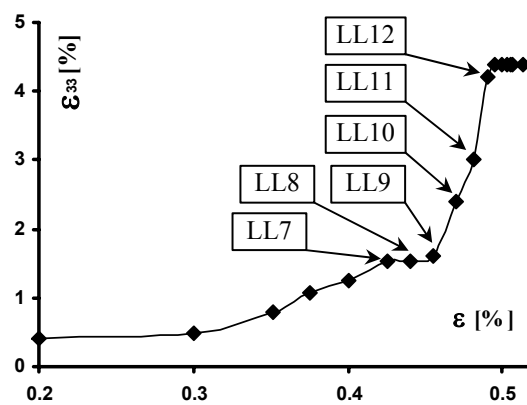
**Obr. 4:** Geometrie vzorku s centrální trhlinou CC a s okrajovou trhlinou S. Šířka vyjiskřené trhliny je 0.3 mm.



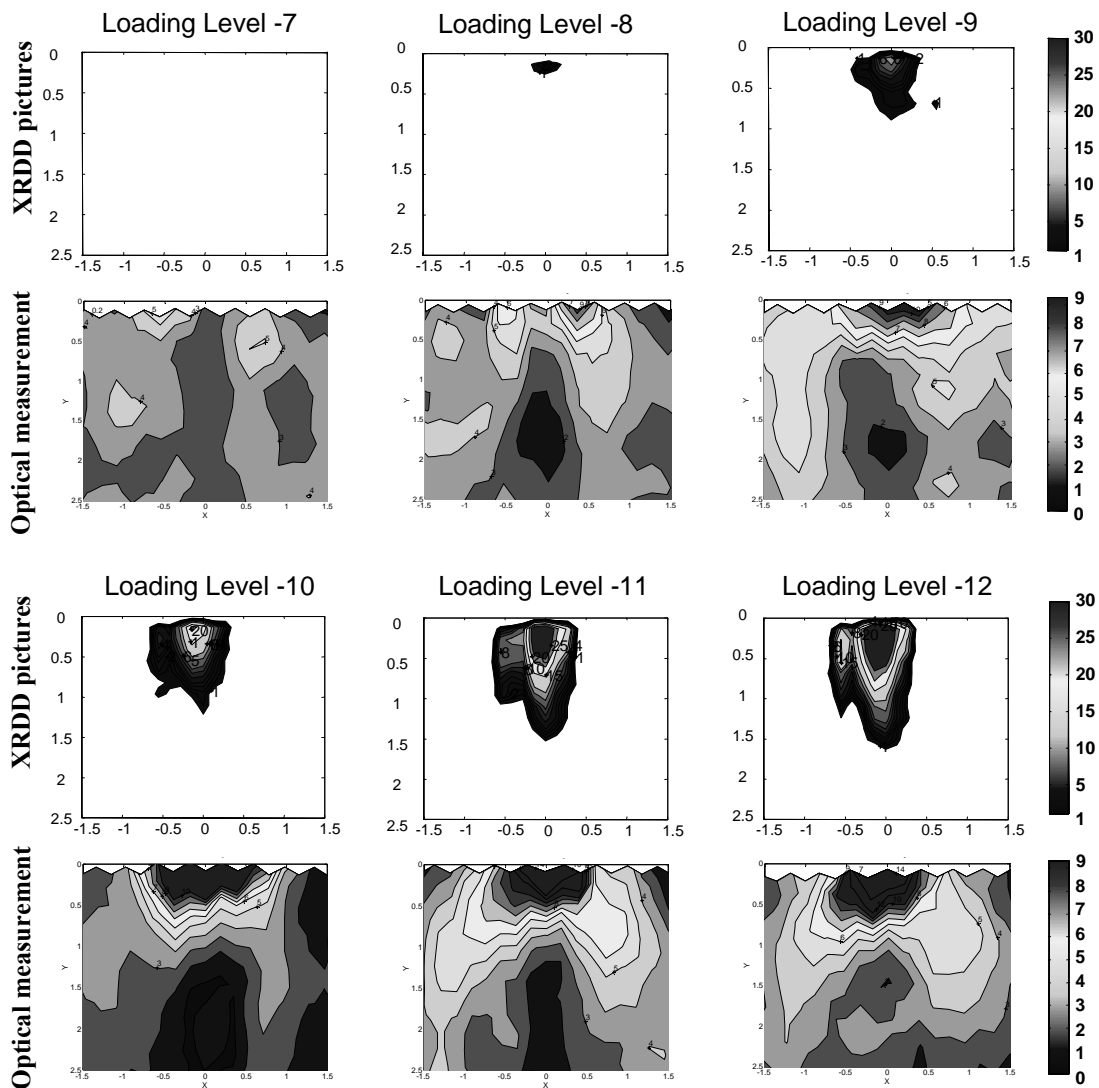
**Obr. 5:** Fotografie vzorku s centrální trhlinou, s nanesenou hexagonální mřížkou.



**Obr. 6:** Experimentálně zjištěná závislost zatěžovací síla – řídicí prodloužení, vzorek CC. Tučné body označují sledované zatěžovací hladiny. Popisky v praporečích označují zatěžovací hladiny popisované v textu (LL7 znamená zatěžovací hladina 7).

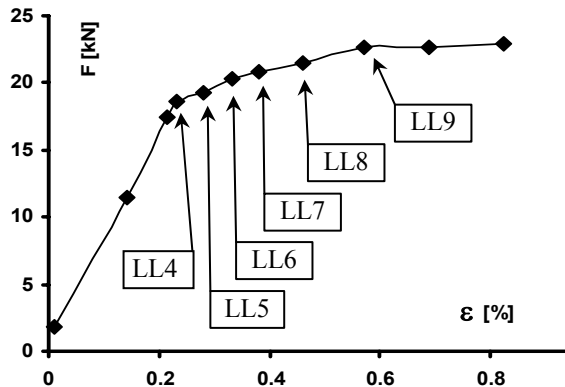


**Obr. 7:** Experimentálně zjištěná závislost kontrakce-řídicí prodloužení, vzorek CC.

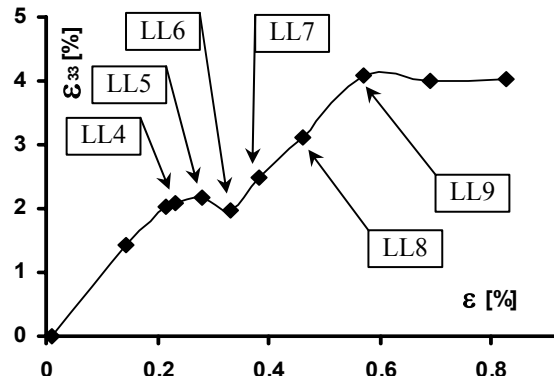


**Obr. 8:** Vývoj poškození, související s vývojem intenzity povrchové deformace pro vzorek CC. Každý pár obrázků odpovídá jedné zatěžovací hladině, kde horní snímek je výsledkem měření metodou XRDD (poškození), dolní pak optickou metodou MIE (deformace). V okamžiku, kdy se objevil první nárůst trhliny, došlo k mírné relaxaci elastických deformací, což je snadno patrné při porovnání posledních dvou zatěžovacích hladin. Snímky mají měřítko v mm. Všechny mají rozměr 3x2.5 mm. Souřadnice [0,0] odpovídá čelu vyjiskřené trhliny. Hranice vybarvených oblastí reprezentují úroveň objemového podílu dutin, resp. intenzity deformace v procentech, dle škál na pravé straně.

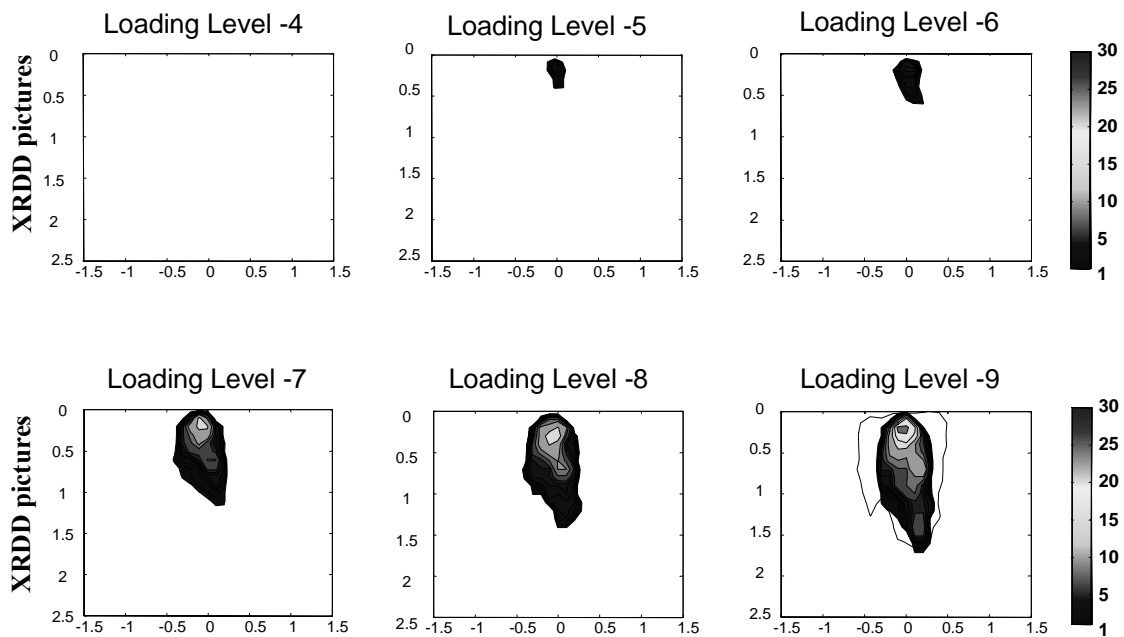




Obr. 9: Experimentálně zjištěná závislost zatěžovací síla-řídící prodloužení, vzorek CC.



Obr. 10: Experimentálně zjištěná závislost kontrakce-řídící prodloužení, vzorek S. Oproti vzorku CC se v závislosti objevila ještě výraznější diskontinuita, kontrakce na LL6 dokonce poklesla.



Obr. 11: Vývoj poškození u vzorku s okrajovou trhlinou S. Měřítká jsou stejná jako pro vzorek CC, obr. 8. Poslední snímek na zatěžovací hladině 9 odpovídá okamžiku, kdy se poprvé prodloužila vyjiskřená trhlinka. Vnější kontura v zatěžovací hladině 9 odpovídá zóně poškození u vzorku CC na zatěžovací hladině 12, obr. 8. Dosah oblasti poškození před čelem trhliny byl u obou vzorků v okamžiku nárůstu trhliny téměř shodný. Oblast poškození byla u vzorku S ovšem více soustředěna okolo roviny trhliny. Objemový podíl dutin byl v tomto okamžiku o něco nižší, než v případě vzorku CC (srovnej se zatěžovací hladinou 12, obr. 8).

## 9. Literatura

1. Tvergaard, V.: "Material Failure by Void Growth to Coalescence". *Advanced in Appl. Mech.*, Vol. 27 (1990) pp. 83-150.
2. Vavřík, D.; Jakůbek, J.; Ponchut, C.; Pospíšil, S.; Visschers, J.; Zemánková, J.: „First tests of Medipix-1 pixel detector for X-ray dynamic Defectoscopy“. Contribution to the conference "3rd International Workshop on Radiation Imaging Detectors", Italy, Sardinia, Orosei, 23-27 September 2001. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A487/1-2* (July 2002) pp. 216-223.
3. Vavřík, D.; Jakůbek, J.; Pospíšil, S.; Visschers, J.; Zemánková, J.: "X-ray dynamic defectoscopy: A way to study damage processes". *Proceedings of the 14th European Conference on Fracture, Cracow, Poland, Sept.8-13, 2002, ISBN 1 901537 35 8, Vol. III*, pp. 485-494.
4. Jakůbek, J.; Vavřík, D.; Pospíšil, S.; Visschers, J.: "Resolution and stability tests of Medipix-1 pixel detector used for X-ray dynamic Defectoscopy". Contribution to the conference "4rd International Workshop on Radiation Imaging Detectors", Netherlands, Amsterdam, October, 2002, to be published in *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A*.
5. B. Mikulec: "Single photon detection with semiconductor pixel arrays for medical imaging applications". PhD thesis, University of Vienna, Austria, June 2000, CERN-Thesis-2000-021 (<http://documents.cern.ch/archive/electronic/cern/preprints.thesis/thesis-2000-021.pdf>).
6. M.G.Bisogni, M.Campbell, M.Conti, P.Delogu, M.E.Fantacci, E.H.M.Heijne, P.Maestro, G.Magistrati, V.M.Marzulli, G.Meddeler, B.Mikulec, E.Pernigotti, V.Rosso, C.Schwarz, W.Snoeys, S.Stumbo, J.Watt: "Performance of a 4096 pixel photon counting chip", SPIE's 43rd Annual Meeting, San Diego, California, July 19-24, 1998, *SPIE Proceedings, Vol. 3445* (1998) 298-304 and CERN-EP/98-162.
7. Vavřík, D.: "Optical Identification of Surface Plastic Zone Shape and Size near Crack Tip", Ph.D. Thesis, Czech Technical University, Prague, 1999.
8. G. Bardelloni, E. Bertolucci, A.L.J. Boerkamp, D. Calvet, M. Conti, M. Maiorino, P. Russo, J.L. Visschers: "A New Read-out System for an Imaging Pixel Detector", *Proc. of the IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, Lyon, France, October 15-20 (2000) ISBN 0-7803-6503-8*, pp. 57-60.
9. <http://www.cern.ch/MEDIPIX/>
10. P. J. Sewenhuijsen: "Current trends in obtaining deformation data from grids", *Experimental Techniques*, May/June 1993, pp. 22.-26.
11. Zemánková, J. a kol.: "Termodynamická identifikace nestabilit při statickém zatěžování těles s defekty", závěrečná výzkumná zpráva, grant GA ČR 106/95/1433, ITAM CAS Praha, 1998.