

OPTICAL MEASUREMENT OF SURFACE DISPLACEMENTS IN THE VICINITY OF CRACK TIP

J. Valach^{*}, D. Vavřík^{*}, J. Bryscejn^{*}, J. Jakůbek^{**}

Summary: Combined optical method for measurement of three displacement fields on flat specimens is described and applied for the evaluation of surface deformation of flat aluminum alloy specimen with central crack in tensile tests. The method utilizes two optical methods – Coded Photometry Stereo and the method of Interpolated Ellipses allowing the measurement to be performed simultaneously making it favourable for dynamical tests.

1. Úvod

S nárůstem výpočetního výkonu se stávají samozřejmostí stále složitější simulace chování konstrukcí a materiálů založené nejen na fenomenologickém popisu konstitivními rovnicemi, ale též zahrnující jevy vyplývající z atomární struktury látek. Experimentální metody musí reagovat na tento pokrok a pokračovat ve svém vývoji využitím všech dostupných prostředků, včetně nasazení počítačově podporovaných metod pro záznam a zpracovnání experimentálních dat. Role experimentálních metod zůstává nezpochybnitelná ve studiu a modelování nelineárních jevů a roste s rozměry a složitostí zkoumaného tělesa.

Pro úplný popis nelineárních dějů provázejících vznik zóny poškození v okolí napěťového koncentrátoru během zatěžování houževnatých vzorků je zapotřebí znát všechny tři složky pole posunutí ve sledované oblasti. K rozlišení procesů zapojených do těchto procesů je výhodné současně monitorovat vnitřek tělesa radiograficky a povrch optickými metodami. Tento příspěvek se zabývá měřením 3D polí posunutí v několika etapách zatěžování vzorku až do vzniku trhliny, popisuje užitou metodu a diskutuje výsledky.

2. Popis aplikované měřící metody

Zavedené optické metody jsou obvykle vhodné buď pro měření posunutí v rovině, nebo mimorovinného posunutí, a proto k úplnému popisu stavu povrchu je zapotřebí vhodně kombinovat. Navrhovaný a použitý postup spojuje měření mimorovinných posunutí metodou "Kódované fotometrické stereo" (CPS) s měřením posunutí v rovině pomocí "Metody interpolovaných elips" (MIE). Výhodou kombinovaného přístupu pro je jednoduchost, škálovatelnost a nenákladnost.

Jádrem CPS metody pro rekonstrukci topografie povrchu je přímý vztah mezi pozorovaným jasem studované plošky povrchu a jejím sklonem vůči směru kolimovaného osvětlení a pozorování či záznamu. CPS vychází z metody publikované v (Woodham 1980 a Kim & Park 1998). Ze známé konfigurce sestavy je potom možné vytvořit pro celou studovanou část povrchu "mapu normál", která zase slouží jako vstupní data pro rekonstrukci topografie povrchu. Tato rekonstrukce, jež je v podstatě řešením okrajové úlohy definované

^{*} Ing. Jaroslav Valach, PhD., Ing. Daniel Vavřík, PhD., Ing. Jan Bryscejn, Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, Prosecká 76, 190 00 Praha 9, Tel.: +420-286882121, Fax: +420-286884634, Email: <u>valach@itam.cas.cz</u>. ^{**} Ing. Jan Jakůbek, Ústav technické fyziky, ČVUT, Horská 3a/22, 128 00 Praha 2

_____ Engineering Mechanics, Svratka 2006, #301

systémem parciálních diferenciálních rovnic určených mapou normál, probíhá na základě waveletové transformace popsané v (Kovesi 2003), kde je dostupný i zdrojový kód. Výsledkem transformace je výškový popis povrchu vzorku určený až na multiplikativní faktor, který lze odvodit pomocí kalibračního tělíska na povrchu vzorku. Inovativnost CPS spočívá v současném pořízení tří scén (které jsou nutné pro jednoznačný popis sklonů ve dvou navzájem kolmých směrech povrchu a jeho odstínu, označovaného též jako albedo) založeném na užití osvětlení povrchu červeným, zeleným a modrým světly rozmístěnými kolem vzorku do jednoho obrázku v digitálním fotoaparátu využívajícím ukládání informací o barvách pomocí rozkladu scény obdobnými barevnými kanály tzv. Bayerovským filtrem. Ve srovnání s fotogrammetrickými metodami určení výšek, jejichž přesnost klesá se zmenšujícími se paralaxami elementů povrchu, chyba měření u CPS je nezávislá na vzdálenosti k objektu, ze které se měření provádí. Na obrázku 1 je představena fotografie povrchu vzorku a axonometrický pohled na rekonstruovaný povrch se stínováním zdůrazněnou topografií.



Obr. 1 Monochromatizovaná vstupní fotografie pořízená experimentálním zařízením (vlevo) a axonometrický pohled na rekonstruovanou topografii povrchu zdůrazněnou simulovaným bočním nasvětlením

CPS metodu doplňuje metoda interpolovaných elips (MIE) určená ke stanovení posunutí v rovině vzorku (Vavrik & Zemankova 2004). Tato posunutí jsou zjišťována sledováním deformací hexagonální mřížky nanesené na povrch vzorku. Šestice do kruhu uspořádáných bodů se zatížením deformuje a protáhne v elipsu, z jejíchž hlavních os lze snadno vyčíst směry a velikosti hlavních deformací. Výhoda uspořádání měřících bodů do šestic vyplývá z možnosti odhadu chyby určení rovinných přetvoření a větší robustnosti výpočtu.

3. Experimentální část

Experimentální sestava kombinuje přesné tahové zařízení s radiografickým zobrazovacím zařízením založeným na detektoru Medipix a optickou sestavou pro měření povrchových deformací. Tato sestava je detailně popsána v příspěvku #296 na jiném místě tohoto sborníku. Jak vyplývá ze dříve provedených experimentů, je vznik zóny intenzivního poškození provázen jednak vznikem zóny plastické deformace (Vavrik et al. 2003), tak charakteristickým zpožděním v rozvoji oblasti, kde dochází ke kontrakci (Vavrik & Zemankova 2004). Zatěžovací zařízení a optickou část experimentální sestavy znázorňuje obrázek 2.

2



Obr. 2 Pohled na zatěžovací rám a popis komponent optické části experimentální sestavy



Obr. 3 Zatěžovací diagram experimentu s vyznačenými posuny, ve kterých bylo provedeno vyhodnocení povrchových posunutí (etapa 1-3)



Obr. 4 Tři etapy zatěžování vzorku a jim odpovídající vstupní data a vyhodnocená pole posunutí. Údaje definující rozměry sledované oblasti i škály posunutí jsou v mm.

Zatěžován byl plochý vzorek s vyjiskřenou trhlinou vyrobený z vysoce houževnaté hliníkové slitiny, na který byla souměrně vzhledem k rovině trhliny nanesena technikou fotorezistu hexagonální měřící mřížka o velikosti bodů 0,1mm a rozteči 0,2mm. Vzorek byl jednoose namáhán pohybem čelistí zatěžovacího zařízení až do přetržení. V průběhu zatěžování byla prováděna měření ve stavech určených body na zatěžovací křivce. Pro účely tohoto příspěvku byly z přibližně deseti měřených vybrány tři stavy vzorku charakterizující reprezentativně přetvárné procesy vzorku, volbu těchto stavů ilustruje obrázek 3.

4. Výsledky, diskuze, závěr

Kombinovaná optická metoda spojující metodu CPS a MEI byla úspešně použita pro studium posunutí na povrchu zkušebního tělesa. Obrázek 4 představuje souhrnnou reprezntaci výsledků vyhodnocení polí posunutí na povrchu vzorku ve třech zvolených etapách. Aplikací metody byla stanovena délka a tvar trhliny, přičemž zjištěná asymetrie rekonstruované topografie povrchu vůči rovině trhliny indikuje odchýlení postupu trhliny od původního směru. Rozsah zóny poškození vyplývající z topografie povrchu je v souladu se zjištěními provedenými na základě radiografických metod. Další rozvoj metody se v současné době ubírá směrem užšího provázání radiografického měření s měřením povrchových přetvoření s cílem získat spolehlivé indikátory jevů probíhajících v průběhu zatěžování nejen na povrchu ale i pod povrchem, pro jejich spolehlivé rozlišení.

5. Poděkování

Tato práce vznikla za podpory grantu 106/04/0567 GA ČR, Výzkumného projektu AV0Z20710524 a také částečně projektu Histoclean EVK4-CT-2002-30011 EK.

6. Literatura

Vavrik, D., Jakubek, J., Pospisil, S. & Visschers, J. (2003) Non-destructive Observation of Damage Processes by X-Ray Dynamic Defectoscopy, *Proceedins of the 9th International Conference on the Mechanical Behaviour of Materials*, Switzerland, Geneva, May 25-29. Vavrik, D. & Zemankova, J. (2004) Crack Instability in Ductile Materials Analyzed by the Method of Interpolated Ellipses, *Experimental Mechanics*, Vol. 44, 327-335, ISSN: 0014 4851

Woodham, R. J. (1980) Photometric method for determining surface orientation from multiple images, *Optical Engineering*, 19, 139-144.

Kim, B.-H. & Park, R.-H. (1998) Multi-image photometric stereo using surface approximation by Legendre polynomials, *Patter Recognition*, 31, 1033-1047.

Kovesi, P. D. (2003): MATLAB functions for computer vision and image analysis, 1996-2003. http://www.csse.uwa.edu.au/~pk/Research/MatlabFns/.