

**URČENÍ KRITICKÉ SÍLY U TRHLINY VE SVARU****DETERMINATION OF CRITICAL FORCE FOR CRACK IN WELD JOINT**František Plánička, Vlastimil Vacek<sup>1</sup>**Abstract:**

*This paper deals with a critical force determination for a crack in weld joint. Experimental moire method was used for stress state determination in the crack vicinity. Strain energy density was chosen as a criterion of unstability of the crack.*

**Key Words:**

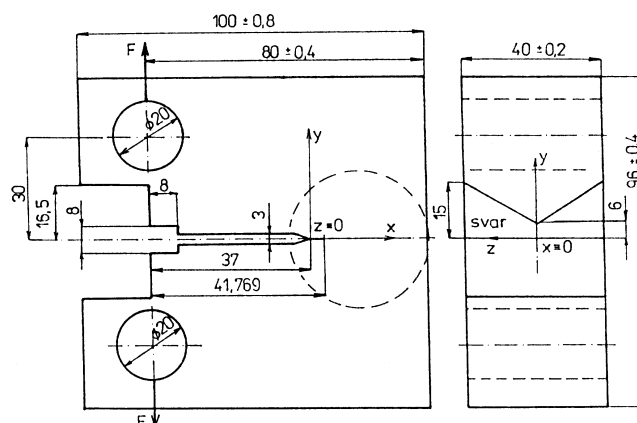
Experimental moire method, strain energy density criterion, critical stress, crack stability.

**1. Úvod**

Z hlediska mechaniky lomu jsou svarové spoje komplikovaným případem vzhledem k materiálové nehomogenitě v okolí trhliny ve svaru. V oblasti svaru se vyskytují dva materiály – základní materiál a svarový kov. Přejechod mezi nimi tvoří tepelně ovlivněná zóna se zcela odlišnými mechanickými vlastnostmi.

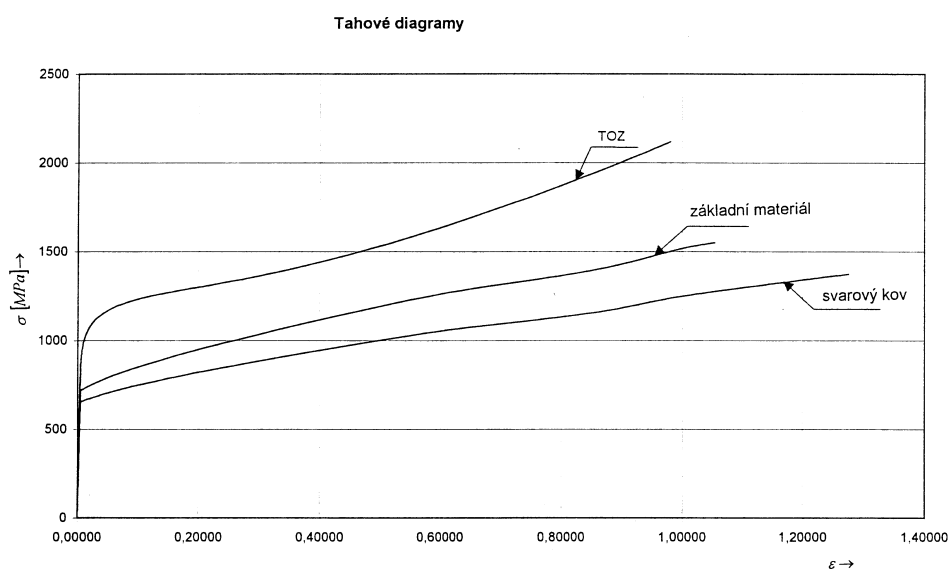
Při řešení problémů lomové mechaniky se stále ve větší míře uplatňuje modelování pomocí metody konečných prvků (MKP). Zde pro orientaci při tvorbě modelu a pro analýzu výstupu má velký význam ověřování takto získaných výsledků vhodnou experimentální metodou. Uvedený problém byl řešen ve spolupráci s Univerzitou v Mariboru ve Slovinsku. Analýza polí deformace a napjatosti byla provedena pro CT zkušební těleso, obr. 1. Zkušební tělesa a pracovní diagramy poskytla Univerzita v Mariboru. Z obrázku je zřejmé, že trhlina se nacházela v teplotně ovlivněné zóně na hranici mezi základním materiálem a svarovým kovem.

<sup>1</sup> Prof. Ing. František Plánička, CSc., [planicka@kme.zcu.cz](mailto:planicka@kme.zcu.cz), č.tel.:019-7491131, Ing. Vlastimil Vacek, CSc., [vacek@kme.zcu.cz](mailto:vacek@kme.zcu.cz), č.tel.: 019-7491276, katedra mechaniky, Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň.



Obr. 1

Pracovní diagramy skutečné napětí – skutečná deformace základního materiálu, svarového kovu a teplotně ovlivněné zóny jsou uvedeny v obr. 2.



Obr. 2

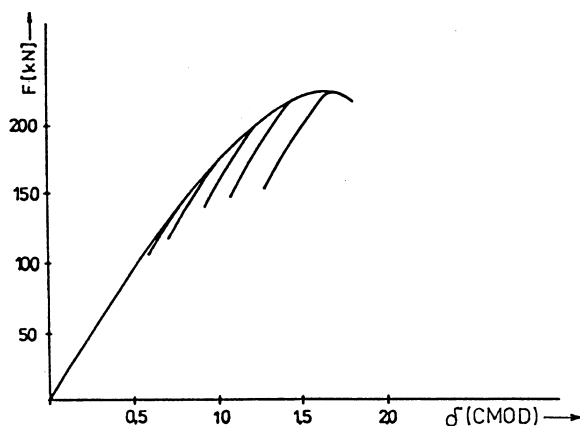
Hodnoty skutečné deformace v oblasti plastických deformací byly určeny z podmínky konstantního objemu. Mechanické vlastnosti daného kompozitu jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1

| Materiál                  | $R_e, (R_p 0,2)^* \text{ [MPa]}$ | $R_{m_s} \text{ [MPa]}$ | $10^{-5} \cdot E \text{ [MPa]}$ |
|---------------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------------|
| Základní materiál NN 70 A | 710                              | 1551                    | 2.09                            |
| Svarový kov               | 649                              | 1374                    | 2.08                            |
| Teplotně ovlivněná zóna   | 935 *                            | 2132                    | 2.10                            |

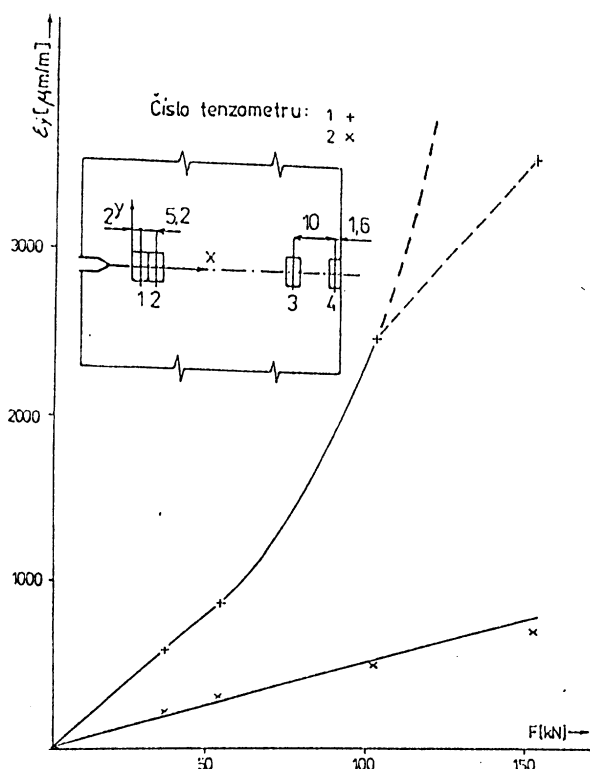
## 2. Experimentální analýza

Zkušební tělesa byla v trhacím stroji MTC zatěžována stupňovitě do porušení. Diagram zatěžující síla – rozevření trhliny  $\delta$  (CMOD) je pro první těleso uveden na obr. 3.



Obr. 3

Zkušební těleso bylo postupně přitěžováno a na každém stupni zatížení odlehčeno cca o 30%. Z takto získaného záznamu (v obrázku je uvedeno několik stupňů) byla ze změny poddajnosti zkušebního tělesa v pružném stavu, vlivem stabilně se šířící trhliny, určena kritická síla  $F_k = 150 \text{ kN}$ , při které došlo ke stabilnímu šíření trhliny.

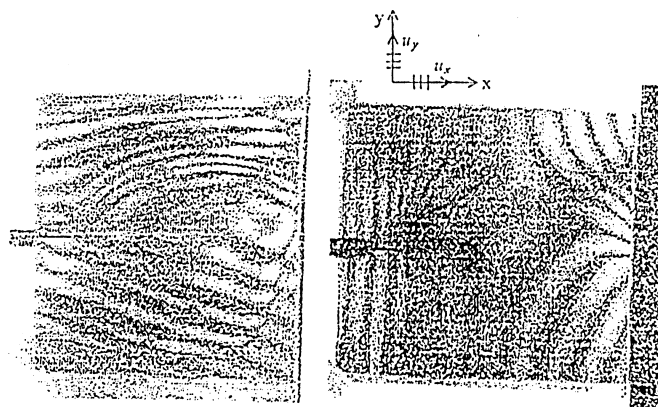


Obr. 4

První analýza polí složek deformace  $\epsilon_x$  a  $\epsilon_y$  v rovině trhliny na povrchu zkušebního tělesa byla provedena elektrickou odporovou tenzometrií. Byly použity fóliové snímače LY 11 0,6/120 a měřicí ústředna UGR 60 (od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik) pracující v dialogu s počítačem. Umístění snímačů v blízkosti hrotu trhliny je zřejmé z obrázku 4, kde jsou také uvedeny naměřené hodnoty složky deformace  $\epsilon_y$  v závislosti na zatěžovací síle pro dva snímače nejbližší ke hrotu trhliny. Odtud je zřejmé, že v oblasti přilehlé hrotu trhliny došlo v místě snímače č. 1 (nejblíže k hrotu trhliny) při zatížení kolem 70 kN ke vzniku plastických deformací, které při zatížení 100 kN dosáhly takové hodnoty, že došlo k odtržení snímače. Proto v případě dalšího zkušebního tělesa bylo pro analýzu polí deformace použito metody moire.

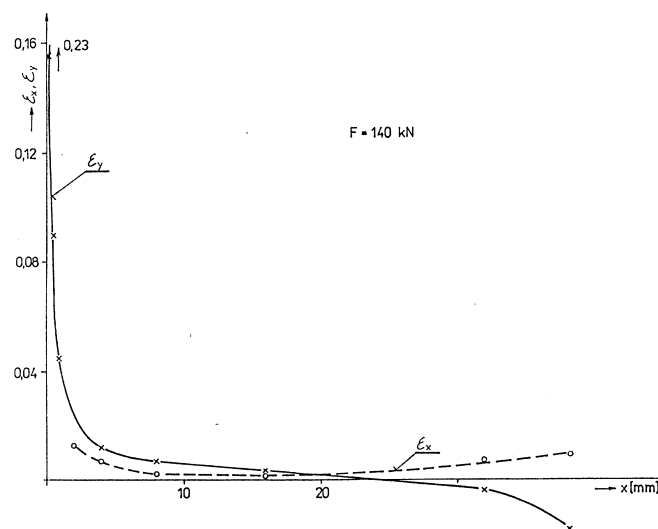
Na povrch tělesa byla nalepena mřížka dodávána společností VISHAY Measurement Group. Mřížka byla nalepena dodaným dvousložkovým lepidlem předepsanou technologií. Zvolena byla ortogonální mřížka s parametrem  $p=0,0508$  mm (500 čar/palec). Obraz vzniklých polí moire pruhů pro jednotlivé stupně zatěžování byl snímán kamerou a pomocí A/D převodníku ukládán do paměti počítače.

Pole interferenčních pruhů pro složky vektoru posunutí  $\mathbf{u} = [u_x, u_y]^T$  pro zatížení zkušebního tělesa silou  $F=140$  kN jsou uvedeny v obrázku 5 (vlevo pro složku  $u_x$ , vpravo pro  $u_y$ ).



Obr. 5

Odtud je zřejmá vysoká koncentrace deformace u složky  $\varepsilon_y$  v oblasti přilehlé hrotu trhliny. Průběh složek deformace  $\varepsilon_x$  a  $\varepsilon_y$  pro zatížení silou  $F=140$  kN je uveden na obrázku 6.



Obr. 6

Ze změřených složek deformace byly aplikací deformační teorie plasticity určeny složky napětí. Odtud dostaneme

$$\sigma = D \varepsilon \quad (1)$$

kde pro náš případ v rovině trhliny, která je rovinou symetrie,  $\sigma = [\sigma_x, \sigma_y]^T$ ,  $\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y]^T$  je

$$D = \frac{E}{b_1^2 - b_2^2} \begin{bmatrix} b_1 & b_2 \\ b_2 & b_1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

kde složka deformace  $\varepsilon_z$  je funkcí složek  $\varepsilon_x$  a  $\varepsilon_y$ ,

$$\begin{aligned} b_1 &= 1 + \frac{2}{3} E \varphi \\ b_2 &= \mu + \frac{1}{3} E \varphi \end{aligned} \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{3 \varepsilon_{ek}}{2 \sigma_{ek}} - \frac{1 - \mu}{E} \quad (4)$$

Zde  $\mu$  je Poissonovo číslo,  $E$  modul pružnosti v tahu,

$$\varepsilon_{ek} = \frac{\sqrt{2}}{3} [(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2]^{1/2} \quad (5)$$

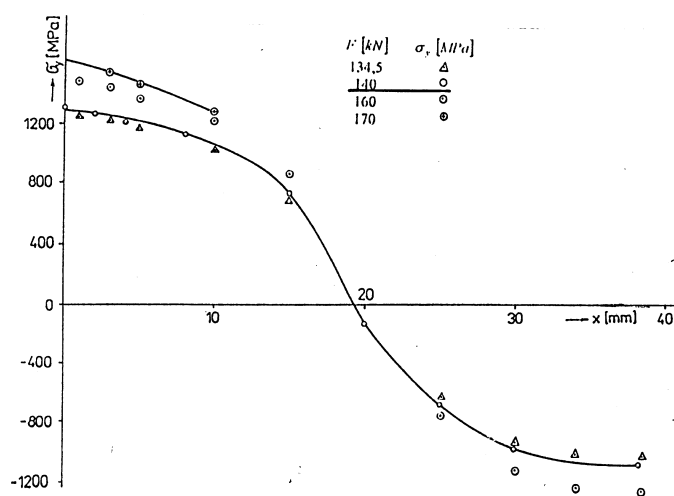
je ekvivalentní deformace.

Složku deformace  $\varepsilon_z$  lze určit z podmínky konstantního objemu  $\varepsilon_v = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0$ .

Odtud bude

$$\varepsilon_z = -\frac{\mu}{1 - \mu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y) \quad (6)$$

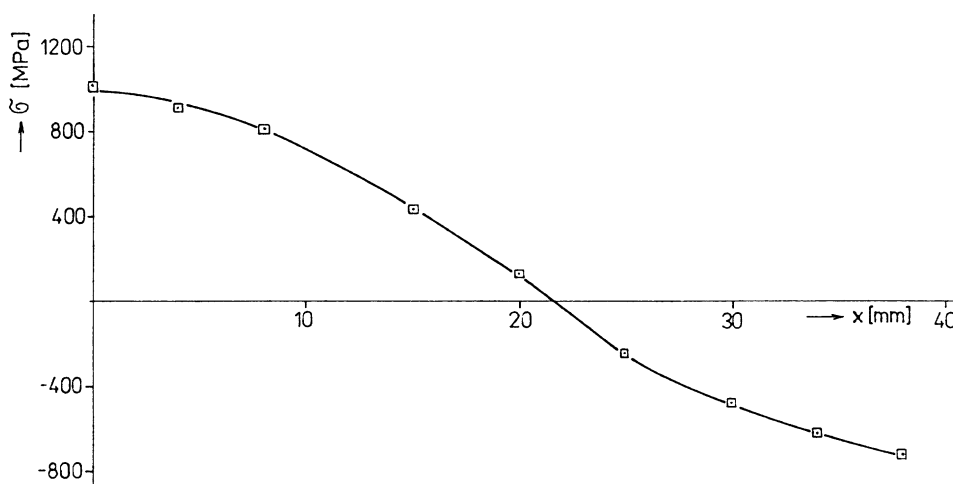
Na základě změřených složek deformace  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  pro dané zatížení lze pomocí rovnic (5) a (6) určit hodnotu ekvivalentní deformace  $\varepsilon_{ek}$  a pomocí ní pak z pracovního diagramu  $\sigma_{ek} = f(\varepsilon_{ek})$  odpovídající hodnotu ekvivalentního napětí  $\sigma_{ek}$ .



Obr. 7

V případě malých pružně plastických deformací je nutné uvažovat Poissonovo číslo jako funkci ekvivalentní deformace  $\varepsilon_{ek}$  a je potřeba použít iteračního postupu. V případě velkých plastických deformací je  $\mu = 0,5$ .

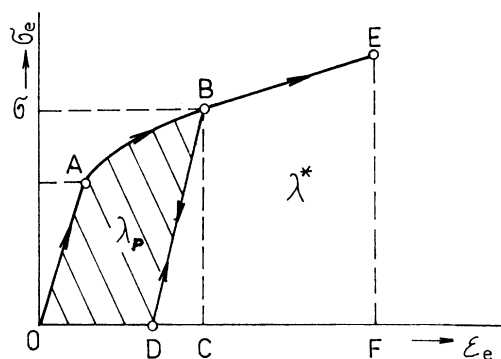
Průběh složky napětí  $\sigma_y$  pro mechanické vlastnosti tepelně ovlivněné zóny jsou pro zatěžovací sílu  $F=134,5$ ; 140; 160 a 170 kN uvedeny na obr. 7 a pro základní materiál pro  $F=140$  kN v obr. 8. Odtud je zřejmé, že v důsledku plastické deformace dojde k odbourání špiček napětí.



Obr. 8

### 3. Určení kritického napětí

V případě tvárného porušování materiálu při velkých plastických deformacích je vhodné kritérium hustoty deformační energie [1], [2], [3]. Toto kritérium je založeno na předpokladu, že v procesu iniciace a růstu trhliny se významná část energie spotřebuje na vznik a rozvoj plastických deformací. Uvažujeme pracovní diagram skutečné napětí – skutečná deformace (obr. 9)  $\sigma_{ek} = f(\varepsilon_{ek})$  [5].



Při překročení počáteční meze plasticity (např. stav B) nastává odlehčení a nové zatěžování podle přímky BD. K dosažení tohoto stavu je potřebná energie vyjádřená plochou OABC. Z této energie se část  $\lambda_p$ , reprezentovaná plochou OABD spotřebuje na rozvoj plastických deformací. Pro porušení zkušebního tělesa je pro uvedený materiál za daných podmínek (teplota, rychlost zatěžování) potřebná energie  $\lambda_c$  vyjádřená plochou OABEF. Po předběžném

Obr. 9  
nový

zatížení do stavu B a odlehčení dostáváme

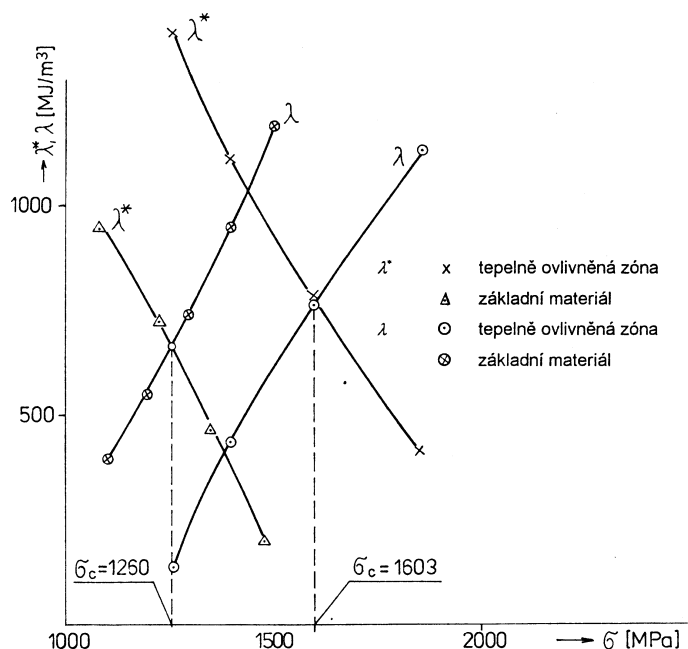
pracovní diagram DBE. Energie zbývající pro iniciaci a růst trhliny  $\lambda_c$  se zmenšila na  $\lambda^*$ . Ta je reprezentována plochou DBEF a lze ji vypočítat ze vztahu

$$\lambda^* = \lambda_c - \lambda_p \quad (7)$$

K iniciaci růstu trhliny dojde, jestliže lokální hustota deformační energie  $\lambda$ , stanovená z vypočteného napjatostně deformačního stavu na hrotu trhliny dosáhne hodnoty energie určené rovnicí (7). Kritérium hustoty deformační energie lze pak vyjádřit rovnicí

$$\lambda = \lambda^* \quad (8)$$

Toto kritérium bylo aplikováno na uvedené CT zkušební těleso. Grafické řešení pro případ tepelně ovlivněné zóny a základní materiál je uvedeno v obr. 10



Obr. 10

Odtud vyplývá, že pro tepelně ovlivněnou zónu je kritické napětí 1603 MPa. To odpovídá zatěžovací síle přibližně 170 kN. Ze změny pružné poddajnosti tělesa byla určena kritická síla 150 kN. Rozdíl obou výsledků je kolem 13%. Pro možnost porovnání je v diagramu uvedeno i řešení pro základní materiál, kdy kritické napětí vyšlo 1260 MPa.

#### 4. Závěr

Pro určení kritické síly pro stabilní růst trhliny nacházející se v tepelně ovlivněné zóně u CT zkušebního tělesa byla použita experimentální metoda moire a kritérium hustoty deformační energie. Výsledek byl porovnán s hodnotou kritické síly určené metodou změny pružné poddajnosti tělesa vlivem šíření trhliny. Rozdíl obou hodnot byl cca 13%. Touto experimentální metodou však lze kritickou sílu určit pouze ze stavu deformace a napjatosti na povrchu tělesa. Lze ji proto využít pro případ těles s rovinnou napjatostí. V případech

těles o větší tloušťce může porovnání výsledků experimentu a numerického řešení na povrchu tělesa napomoci k posouzení modelu pro numerický výpočet.

Práce byla uskutečněna za finanční podpory výzkumného záměru MSM 235200003.

## **REFERENCES:**

- [1] Sih, G., C.: Mechanics and Physics of Energy Density Theory, Theoretical and Applied Mechanics, 4, 1985
- [2] Gdoutos, E., E.- Papakaliatakis, G.: Crack Growth Initiation in Elastic – plastic Materials, International Journal of Fracture, 32, 1987
- [3] Plánička, F. – Vacek, V.: Determination of critical force for crack in weld joint, Proceedings of the 38<sup>th</sup> international conference on experimental stress analysis „EAN2000“, Třešť, Czech Republic, 2000(will be published)
- [4] Durelli, A., J. – Parks, V., J.: Moire analysis of strain, Prentice – Hall, 1970.