

MOŽNOSTI VYUŽITÍ INFRATECHNIKY PŘI VÝZKUMU PLASTIFIKACE TENKOSTĚNNÝCH OCELOVÝCH PRVKŮ

1. Úvod

Výzkum vzniku a postupu plastifikace tenkostěnných prvků, zejména při opakovaném nebo dynamickém zatěžování, vyžaduje experimentální techniky umožňující plošné sledování povrchu zkoumaného tělesa, nejlépe bezkontaktním způsobem. Tyto požadavky splňují optické metody a z nich, vzhledem k nutnosti experimentovat s prvky z reálných konstrukčních materiálů, především metody termografické analýzy napětí, využívající měření infračerveného záření emitovaného tělesem. Prakticky jsou užívány dvě principiálně odlišné metody - termovizní, založená na měření absolutních teplot povrchu tělesa a technika obvykle nazývaná zkratkou SPATE (Stress Pattern Analysis by Measurement of Thermal Emission), založená na měření teplotních změn na povrchu tělesa při jeho dynamickém zatěžování. Obě metody vyžadují speciální měřicí a vyhodnocovací techniku.

2. Základní teoretické vztahy

Rychlost změny teploty souvisící s rychlostí vývinu tepla v důsledku mechanické práce je popsána pro isotropní materiál rovnicí:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho_0 C_d} \left(\frac{dQ}{dt} + K \nabla^2 T \right), \quad (1)$$

kde T ... absolutní teplota

t ... čas

ρ_0 ... hustota nedeformovaného materiálu

C_d ... specifické teplo při konstantní pružné deformaci

Q ... teplo generované v bodě zájmu

K ... tepelná vodivost

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2 T}{\partial x \partial x}$$

Při cyklickém zatěžování s dostatečně vysokou frekvencí, (obvykle mezi 3 a 50 Hz), převládají adiabatické podmínky, tepelný gradient je velmi malý a tudíž může být zanedbán v rovnici (1) člen $(K \nabla^2 T)$. Při cyklickém plastickém zatěžování se dQ/dt skládá z vratné, (ve smyslu termodynamickém), termoelastické složky a nevratné termoplastické složky (podle 1).

$$\frac{dQ}{dt} = - \frac{1}{3} \alpha T (3\lambda + 2\mu) \dot{E}_{ee} - S_{i\alpha} \left(\frac{S_{i\alpha}}{2\mu} - \dot{e}_{i\alpha} \right), \quad (2)$$

kde $(\dot{}) = d/dt$

α ... koeficient lineární tepelné roztažnosti

λ, μ ... Laméovy konstanty

E_{ee} ... hydrostatické přetvoření

e_i ... deviatorická složka tenzoru přetvoření

s_i ... deviatorická složka napětí

Při cyklickém zatěžování první člen v rovnici (2) osciluje,

druhý je kumulativní a vede ke zvýšení teploty tělesa. Nevratná složka je úměrná energii plastické práce W_p

$$\left. \frac{dQ}{dt} \right|_{\text{nevratná}} = \frac{dW_p}{dt} \quad (3)$$

a závisí tudíž na tvaru a velikosti hysterezní smyčky zkoušeného materiálu.

Konstanta $\alpha/\varphi_c = K_m$ bývá nazývána termoelastická konstanta a dosahuje pro běžné materiály hodnot:

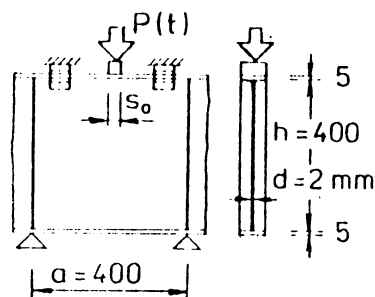
ocel	$3,5 \cdot 10^{-12} \text{ (Pa}^{-1}\text{)}$
hliník	$8,8 \cdot 10^{-12} \text{ (Pa}^{-1}\text{)}$
epoxidová pryskyřice	$6,2 \cdot 10^{-12} \text{ (Pa}^{-1}\text{)}$

3. Zkoušky využití termovize

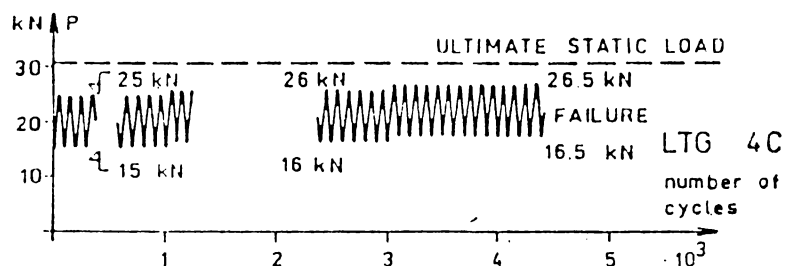
3.1 Opakované zatěžování - cyklická plasticita

Zkoušky při opakovaném (pulsujícím) zatěžování byly provedeny na plochem vzorku z měkké oceli a na tenkostěnných panelech zatěžovaných břemenem soustředěným na části okraje. Plochý vzorek o zatěžované délce 150 mm, šířce 20 mm a tloušťce 2 mm byl zatěžován cyklicky v elektrohydraulickém stroji INSTRON tak, že maximální průhyb uprostřed vzorku při tlakovém namáhání dosahoval hodnoty cca 20 mm, (poloměr křivosti cca 12 mm).

Tenkostěnné panely ze serie zkušebních těles LTG byly zatěžovány pulsujícím tlakovým zatížením v servohydraulickém stroji MTS při řízení velikosti síly až do jejich ztráty únosnosti. Detaily geometrických a materiálových charakteristik panelu LTG 4C jsou uvedeny na obr. 1



Obr. 1



Obr. 2

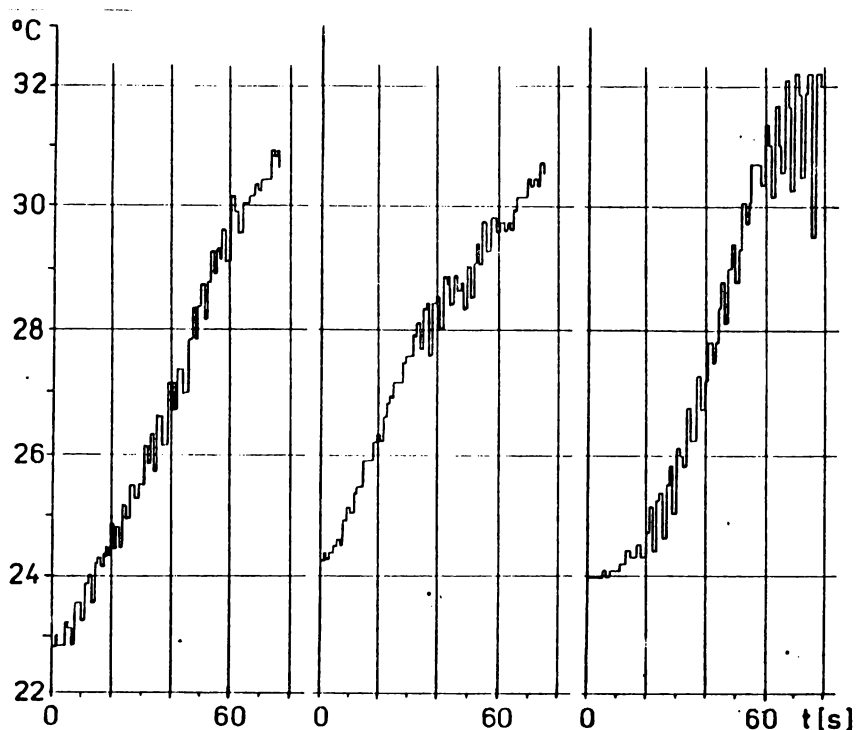
Pro zatěžování byla použita sinusoidální proměna síly při frekvenci 3 Hz a jednotlivé zatěžovací stupně jsou patrné z obr. 2.

3.2 Použité měřicí a vyhodnocovací zařízení

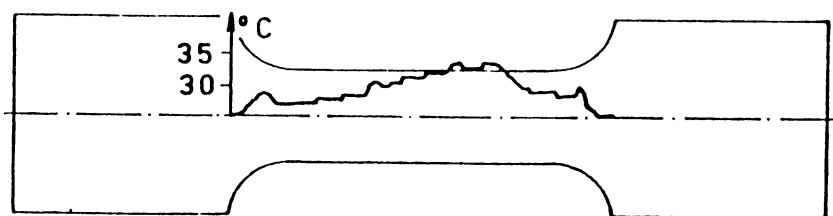
Pro měření tenkostěnných prvků byla použita termovizní souprava AGEMA 782 SWB. Tento systém, pracující v reálném čase (s obrazovou frekvencí 25 Hz) je schopen zobrazit rozložení teplotního pole na povrchu měřeného tělesa v teplotním rozsahu 20° až 1600° C s rozlišovací schopností $0,1^{\circ}$ C (při teplotě měřeného tělesa 30° C), a to při zobrazení 100 bodů na řádek a 280 řádků na termovizní obraz.

3.3 Získané výsledky a jejich zhodnocení

Při cyklickém namáhání tenkostěnných prvků dochází k dobře měřitelnému vývinu tepla těsně před zhroutením prvku. Obr. 3 ukazuje růst povrchové teploty plochého vzorku (popsaného výše) v závislosti na čase, obr. 4 rozdělení teplot v podélném řezu vzorkem.



Obr. 3

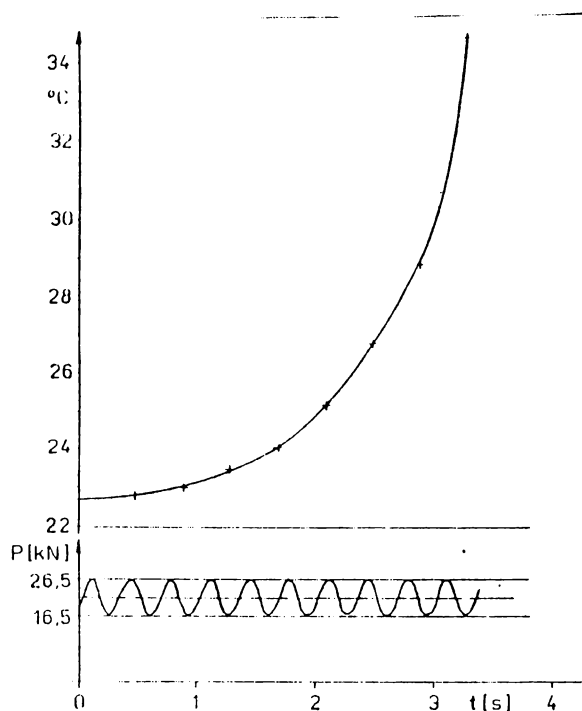


Obr. 4

Tenkostěnný panel se zhroutil přibližně po 1400 cyklech třetího zatěžovacího bloku vznikem plastického kloubu těsně pod zatěžovanou pásnicí (ve svislé vzdálenosti cca 10 mm od zatěžované pásnice). Růst teploty povrchu stěny pod břemenem v závislosti na čase je prezentován na obr. 5.

4. Závěr

Provedené experimenty potvrdily vhodnost využití infra-technik pro výzkum plastifikace tenkostěnných kovových prvků při cyklickém zatěžování. Detailně testovaná metoda měření absolutních teplot pomocí termovize je velmi dobře aplikovatelná pro kvalitativní popis vzniku a rozvoje mechanismu porušení plošných tenkostěnných prvků. U prvků namáhaných pul-



Obr. 5

mínkách jsou tyto změny nezávislé na zatěžovací frekvenci ω a jsou úměrné změnám součtu hlavních napětí v měřeném bodě tělesa (viz. rovnice 1). Speciální zařízení je schopné detektovat oscilace teploty řádu $0,001^{\circ}\text{C}$, což dává citlivost pro měření napětí v oceli řádu 1N/mm^2 . Systém umožňuje měřit napětí v ploše $0,5 \times 0,5 \text{ mm}$ a maximálně pole v prostorovém úhlu $25^{\circ} \times 25^{\circ}$. Frekvence zatěžování se může měnit od $0,5 \text{ Hz}$ do 20 kHz . Systém standardně měří a vyhodnocuje napětí pouze v elastické oblasti, i když je studována možnost měření teplotní odezvy při plastických deformacích. Tento přístup vyžaduje vyhodnocení naměřených údajů pomocí FFT, ale umožňuje na druhé straně oddělit elastická a plastická přetvoření ve složitých prvcích, což nedokáže žádná jiná experimentální metoda.

Přístrojové vybavení pro metodu SPATE je zatím v ČSSR nedostupné, ale první autor měl možnost se s metodou seznámit při krátkodobém pobytu v laboratoři firmy OMETRON v Londýně.

Seznam literatury: /1/ DILLON jr., O. W.: Coupled Termoplasticity, J. mech. Phys. Solids, Vol. 11, 1963, pp. 21-33
 /2/ DRDÁCKÝ M., NĚMEČEK J.: Možnosti využití infratechniky při experimentální analýze napětí, Zpráva ÚTAM, únor 1990

sujícím ohybem lze odlišit i tlakovou a tahovou oblast (viz. obr. 3 a 5). Existující měřicí technika není dostatečně rychlá, ani dostatečně citlivá pro měření elastických napětí. Určité zlepšení přináší použití rychlého záznamového zařízení BRUT (Brust Recording Unit) umožňující v reálném čase zaznamenávat infračervené obrazy s frekvencí až 25 Hz při čtvrtinové hustotě rozlišení (140×70). Mezní frekvence 25 Hz je dána skanovací rychlostí kamery.

Jedinou známou metodou využívající tepelné emise pro měření elastických napětí je metoda SPATE. Metoda je založena na měření změn absolutní teploty povrchu tělesa během zatěžovacího cyklu. Při adiabatických pod-