

Experimentální Analýza Napětí 2007

THE THERMOGRAPHY METHOD OF FATIGUE LIMIT MEASUREMENT TERMOGRAFIKÉ MĚŘENÍ MEZE ÚNAVY MATERIÁLU

Milan Honner¹, Pavel Litoš², Petra Vacíková³

Abstract: Příspěvek představuje dvě varianty termografické metody měření meze únavy materiálu, které umožňují stanovit mez únavy v relativně krátkém čase na malém počtu vzorků. První část příspěvku je věnována principu metod spočívajícím v měření projevu tepla vzniklého v důsledku plastické deformace zkoušeného materiálu, které se významně liší při zatěžování pod a nad mezí únavy materiálu. Druhá část ukazuje příklad realizace metody včetně výsledků měření teplot a vyhodnocení meze únavy ocelového vzorku. Stanovená mez únavy pro zkušební ocelový vzorek se přitom shoduje s hodnotou určenou klasickými postupy.

Keywords: termografie, mez únavy

1. Úvod

V provozu jsou strojní součásti často vystaveny dlouhodobému opakujícímu se proměnnému namáhání. V průběhu cyklického zatěžování dochází v materiálu ke kumulaci plastické deformace, která se v závěru procesu projeví růstem makroskopické trhliny a únavovým lomem.

Kritériem odolnosti materiálu proti opakovanému mechanickému namáhání je mez únavy, vyjádřená amplitudou napětí σ_C , které materiál vydrží teoreticky při nekonečném počtu kmitů. V praxi je to napětí, při kterém zkušební tyč vydrží základní počet kmitů N_C pro stanovení meze únavy. Pro ocel, litinu, měď a její slitiny $N_C = 10^7$, pro lehké kovy a jejich slitiny $N_C = 10^8$ opakování. Pro zkoušky únavy kovů platí ČSN 42 0363.

Příspěvek navazuje na teoretické i experimentální zahraniční práce [1] - [8], které se zabývají problematikou využití termografie k určení meze únavy materiálu. Navrženy byly dvě modifikace termovizní metody, které nabízí stanovení meze únavy v krátkém čase na malém počtu vzorků (teoreticky pouze pomocí jednoho vzorku, neboť metoda je nedestruktivní) a určení kritického místa, kde dojde k únavovému lomu. Jedná se vyhodnocení meze únavy z rychlosti ohřevu (metoda 1) a ze změny teplotního trendu (metoda 2).

Cílem experimentálních prací bylo ověření teoretických předpokladů použitelnosti metod prostřednictvím jejich praktické realizace a určení meze únavy vzorku materiálu, jehož mez únavy byla předem známa. Dílčím cílem bylo rovněž ověření možnosti použití standardního termovizního systému pro měření teplotních polí při únavových zkouškách.

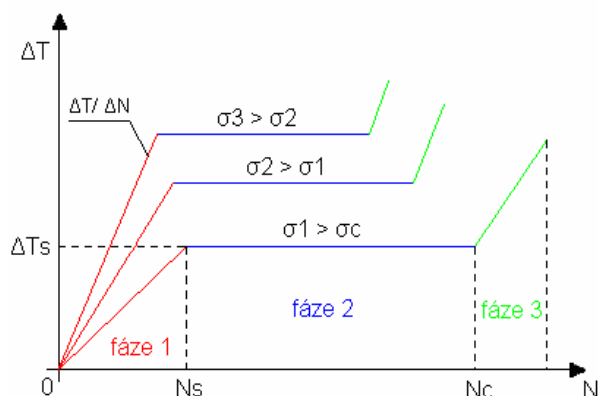
¹ Doc. Ing. Milan Honner, Ph.D., Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377421088, kl. 114, e-mail: honner@ntc.zcu.cz

² Ing. Pavel Litoš, Ph.D., Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377421088, kl. 114, e-mail: palitos@ntc.zcu.cz

³ Ing. Petra Vacíková, Západočeská univerzita v Plzni, Univerzitní 22, 306 14 Plzeň, tel.: +420 377421088, kl. 114, e-mail: pvacikov@ntc.zcu.cz

2. Princip metod

Princip metody spočívá v měření tepla vzniklého v důsledku plastické deformace zkoušeného materiálu. Teplotní pole zatěžovaného vzorku je posuzováno po zatížení od jednoho do několika tisíc cyklů při dané frekvenci a různých napětích. Tento teplotní průběh je rostoucí funkcí použitého napětí a frekvence. Pokud je materiál zatěžován napětím nad mezí únavy, dochází k lokálnímu nárůstu teploty, který má specifický průběh (obr. 1): její nárůst (fáze 1), ustálení na téměř konstantní hodnotě (fáze 2, „stacionární“ teplota) a rychlý nárůst bezprostředně před selháním součásti (fáze 3).



Obr. 1. Teplotní průběh při únavovém testu s napětím σ nad mezí únavy σ_c , N je počet cyklů, ΔT teplotní nárůst vzhledem k počáteční teplotě, ΔT_s je stacionární teplota a $\Delta T/\Delta N$ počáteční rychlost vzrůstu teploty

Všechny termografické metody vyhodnocení meze únavy vychází z hodnot parametru ΔT_s („stacionární“ teplota) nebo $\Delta T/\Delta N$ (rychlost počátečního teplotního vzrůstu) nebo ze změny průběhu teploty (ΔT) vzhledem k použitému napětí σ . U materiálů, kde disipace tepla je nízká (např. hliníkové slitiny), se zkoumají další složky (první a druhá harmonická) teplotního signálu.

V praxi se používají dvě metody vyhodnocení meze únavy z průběhu teploty cyklicky zatěžovaného vzorku. Použitá frekvence je vyšší než 5 Hz (obvykle 20 – 100 Hz), neboť s vyššími frekvencemi je dosaženo vyššího teplotního nárůstu – lepšího signálu [3].

V průběhu testování se zaznamenává teplotní pole termovizí. Analýza naměřených dat se provádí po nalezení tzv. „horké zóny“ – oblasti, kde dochází k nejvyššímu nárůstu teploty. Veškeré parametry jsou pak vyhodnocovány vzhledem k této oblasti. Jednotlivé testy způsobují pouze zanedbatelné poškození uvnitř vzorku vzhledem k jejich délce (počet cyklů pro jednotlivý krok obvykle do $N = 20000$). Proto je možné použít pro vyhodnocení meze únavy pouze jediný vzorek.

2.1 Metoda 1 – vyhodnocení meze únavy z rychlosti ohřevu

První metoda („Metoda 1“, [2, 8]) spočívá v provedení několika testů (kroků o konstantní amplitudě) při napětích vyšších než mez únavy σ_c . Každý test je ukončen po dosažení stacionární teploty (fáze 2), což odpovídá zhruba 10% celkové životnosti součásti při daném zatížení. V případě, kdy je mez únavy vyhodnocována z rychlosti ohřevu zkoušeného vzorku ($\Delta T/\Delta N$), je možné vzorek zatěžovat jen po dobu nezbytně nutnou pro dosažení dostatečně dlouhé lineární oblasti nutné pro vyhodnocení parametru $\Delta T/\Delta N$. První test je proveden při zátěži blízko předpokládané meze únavy. Při dalších testech se zátěž postupně zvyšuje k předpokládané mezi kluzu. Lineární extrapolací funkcí amplitudy napětí $\Delta T_s = f(\sigma)$ nebo $\Delta T/\Delta N = f(\sigma)$ k jejich nulové hodnotě je získána mez únavy (viz. obr. 2), kterou lze tedy z makroskopického hlediska definovat jako napětí, pro které se teplotní nárůst nebo jeho rychlost blíží nule. Tato metoda byla ověřena pro ocel, litinu, kompozity a hliníkové slitiny (přehled v [8]).

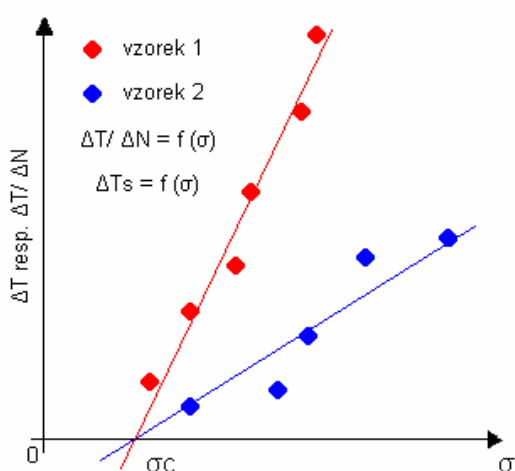
2.2 Metoda 2 – vyhodnocení meze únavy ze změny teplotního trendu

Druhá metoda („Metoda 2“, [4 – 7]) vychází z předpokladu, že mez únavy odpovídá prahové hodnotě napětí, kdy dochází k prudkému zrychlení nárůstu teploty zatěžovaného vzorku. Nárůst teploty (při stanoveném počtu opakování a frekvenci) je pozvolný do určitého napětí, kdy dochází k prudkému zrychlení. Tento práh se shoduje velmi dobře s mezí únavy. Metoda je založena na odlišení tepelných jevů způsobených elastickou hysterezí od více výrazných jevů způsobených plastickou deformací projevující se nad mezí únavy.

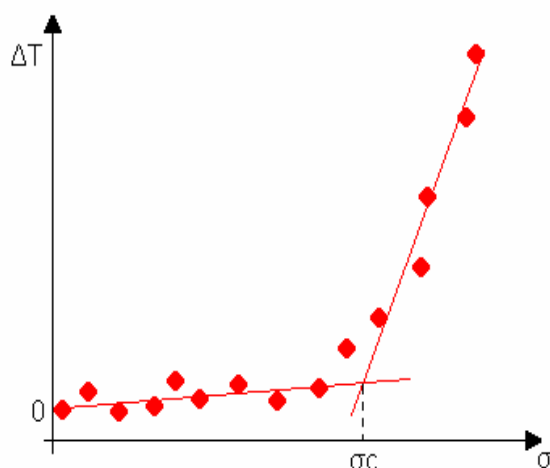
Postupné krokové zatěžování začíná s napětím pod předpokládanou mezí únavy. Počet použitých kroků (různých napětí) bývá alespoň devět, přičemž přinejmenším čtyři pod mezí únavy. Délka každého kroku se pohybuje obvykle v rozmezí $N = 10000 - 20000$ opakování. Délka kroku je obvykle zvolena tak, aby vždy bylo dosaženo stacionární teploty.

Z naměřených teplot (teplota na počátku, v půlce nebo na konci každého kroku vzhledem k použitému napětí) lze graficky (obr. 3) nebo iterací určit mez únavy σ_C zkoušeného materiálu.

Metoda je založena na absolutních spíše než relativních hodnotách teploty. Toto činí metodu citlivou na různé rušivé vlivy, jako je např. změna teploty prostředí, odvod tepla upínacími čelistmi aj.



Obr. 2. Vyhodnocení meze únavy „Metodou 1“



Obr. 3. Vyhodnocení meze únavy ze změny teplotního trendu (Metoda 2)

3. Příklad aplikace metod

3.1 Celkové uspořádání experimentu

Pro realizaci termografického měření meze únavy byl použit plochý vzorek známých vlastností, aby mohla být posouzena přesnost metody. Zkoušeným materiálem byla ocel 11523.1 s mezí únavy $\sigma_C = 240$ MPa.

Vzorek byl zatěžován v tahu-tlaku pomocí přístroje INSTRON 8502 s frekvencí 10 Hz. Použité napětí se nacházelo v rozmezí 190 – 290 MPa.

Průběh ohřevu vzorku byl měřen termovizí ThermoCAM SC2000. Termovize byla připojena k notebooku pro záznam dynamického teplotního pole. Teplotní pole bylo snímáno s frekvencí 1 Hz. Pro zvýšení emisivity měřeného povrchu byla na vzorek nanесena vrstva barviva s vysokou emisivitou.

Fotografie z experimentu prováděného na pracovišti Centra diagnostiky materiálů Ústavu termomechaniky Akademie věd České republiky je na obr.4.

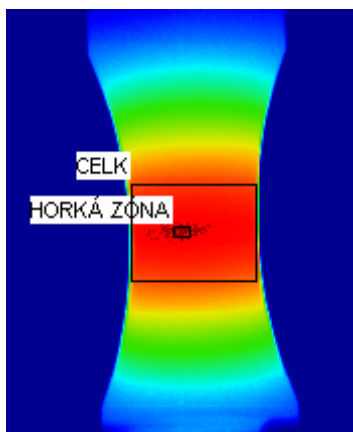


Obr. 4. Experimentální uspořádání termografické metody měření meze únavy ocelového vzorku

3.2 Termovizní měření

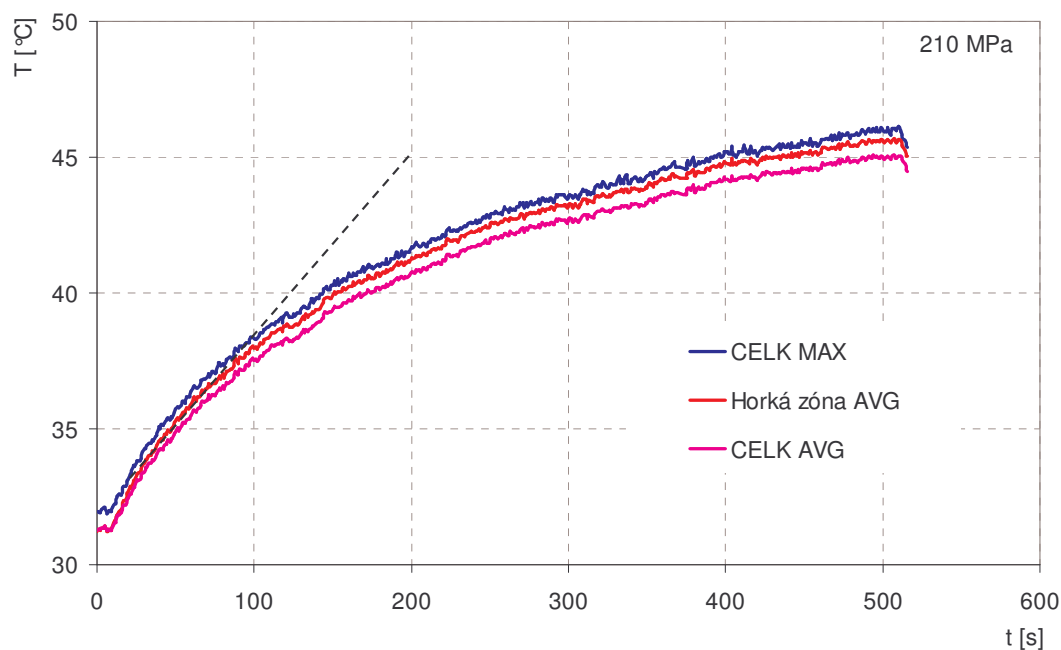
Na obr. 5 je zobrazen termogram měřeného vzorku a vyhodnocované oblasti. Vyhodnocována byla:

- průměrná teplota z „horké zóny“ – nejteplejší oblasti na vzorku,
- průměrná teplota (CELK AVG) z oblasti vymezející celou střední, zúženou část vzorku,
- maximální teplota (CELK MAX) z oblasti vymezející celou střední, zúženou část vzorku.



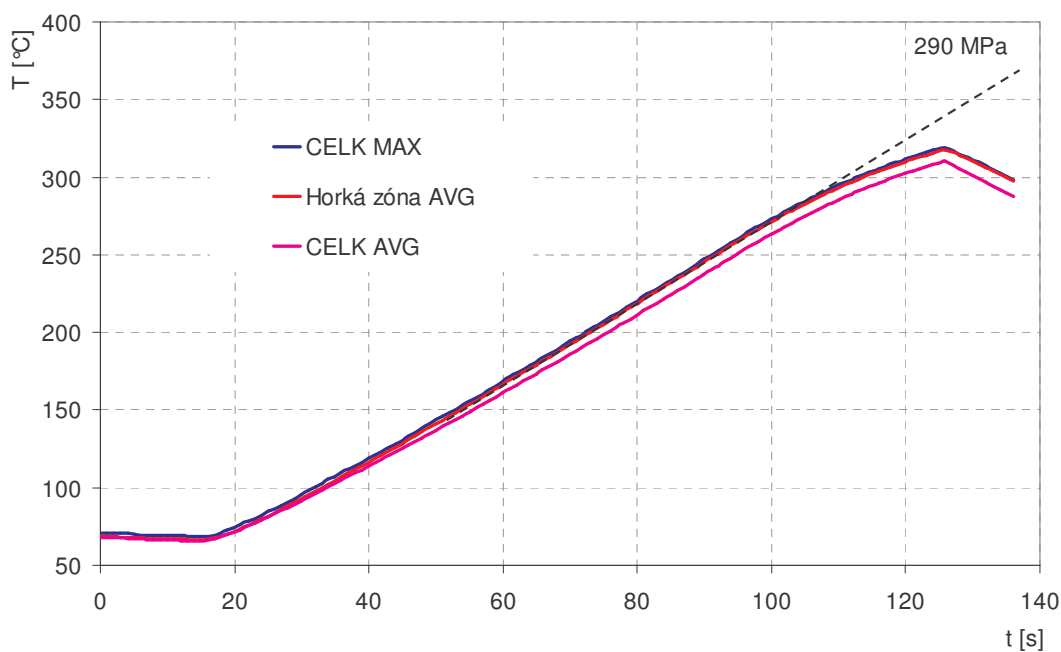
Obr. 5. Termogram měřeného ocelového vzorku s vyznačenými oblastmi, kde byl vyhodnocován průběh teploty při cyklickém zatěžování

Na obr. 6 je zobrazen ohřev vzorku při použitém napětí $\sigma = 210$ MPa. Rychlost nárůstu teploty byla vyhodnocována pro $N \in \langle 300, 700 \rangle$, kdy se teplota zvýšila o cca 3 °C.



Obr. 6. Časový průběh teploty vzorku při cyklickém zatěžování napětím 210 MPa a frekvencí 10 Hz

Na obr. 7 je zobrazen ohřev vzorku pro napětí $\sigma = 290$ MPa. Rychlost ohřevu byla vyhodnocována v lineární oblasti $N \in \langle 650, 950 \rangle$, kdy se vzorek ohřál o cca 80 °C.



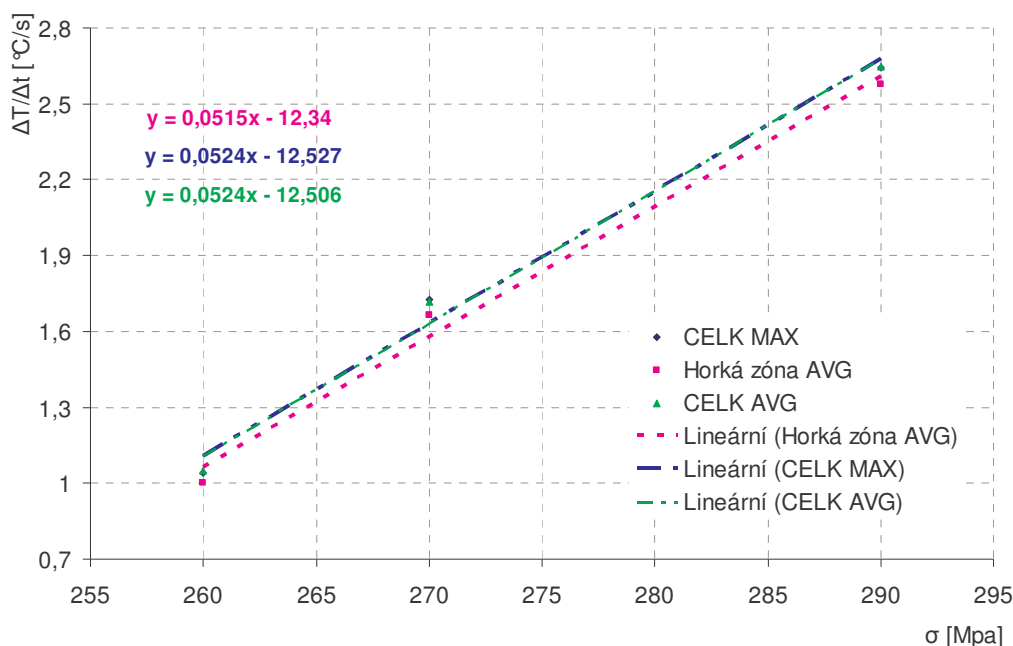
Obr. 7. Časový průběh teploty vzorku při cyklickém zatěžování napětím 290 MPa a frekvencí 10 Hz

3.3 Vyhodnocení meze únavy

Z naměřených průběhů povrchové teploty pro jednotlivá napětí byla vyhodnocována rychlost ohřevu $\Delta T/\Delta N$ resp. $\Delta T/\Delta t$. A to v lineární oblasti maximálního vzrůstu teploty. Nebylo uvažováno prvních 100 cyklů z důvodů náběhu zatěžovací lavice do zvoleného pracovního režimu. Nebyly také uvažovány nestandardní průběhy teplot při zatěžování vzorků napětím 250 MPa a 280 MPa, které mohly být způsobeny neustáleným chodem zatěžovací lavice. Rychlost ohřevu byla vyhodnocována z oblastí vyznačených na obr. 5. Výsledky jsou uvedeny v tab. 1. Uvedené hodnoty meze únavy byly určeny „Metodou 1“ – vynesené rychlosti ohřevu pro jednotlivá napětí byly proloženy přímkou. Princip vyhodnocení je uveden na obr. 8. Mez únavy byla získána vynesením této přímky na x-ovou osu – tedy pro rychlost ohřevu $\Delta T/\Delta t = 0$ °C/s (vyhodnocení rovnice regrese pro $y = 0$).

Napětí [MPa]	$\Delta T/\Delta t$ [°C/s]		
	Horká zóna AVG	CELK AVG	CELK MAX
290	2.645	2.578	2.648
270	1.725	1.666	1.718
260	1.040	1.002	1.048
Mez únavy [MPa]	239	240	239
Skutečná mez únavy [MPa]	240		

Tab. 1. Zjištěné závislosti rychlosti ohřevu vzorku pro zvolené hodnoty zatěžovacího napětí a vyhodnocení meze únavy



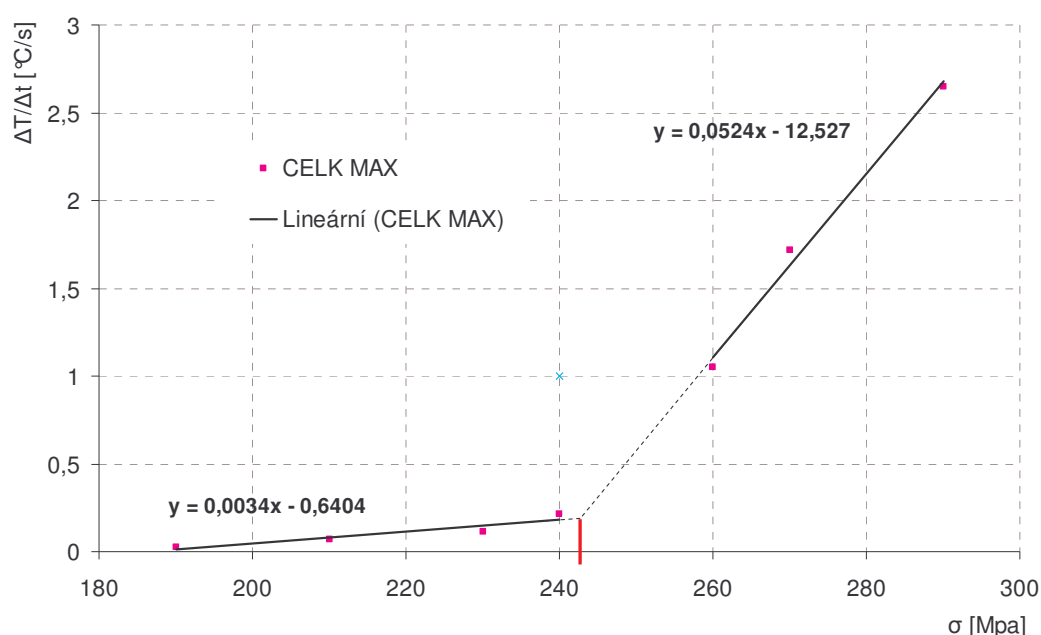
Obr. 8. Rychlost nárůstu teploty vzorku v závislosti na zatěžovacím napětí - vyhodnocení meze únavy z rychlosti ohřevu

Jelikož dochází pod mezí únavy k výraznému poklesu rychlosti ohřevu, byla mez také určena nalezením napětí, kdy dochází k změně trendu rychlosti ohřevu. Princip odpovídá „Metodě 2“, avšak nevychází se z stacionární teploty ΔT_s nebo ohřevu vzorku ΔT_N po zvoleném počtu kroků, ale stále ze $\Delta T/\Delta t$, neboť dosažení stacionární teploty by vyžadovalo vyšší počet cyklů (delší dobu experimentu) a určení teplotního nárůstu za daný počet cyklů by

vyžadovalo shodné chování zatěžovací lavice pro všechna testovaná σ . Rychlosti ohřevu pro všechna měřená napětí a určená mez únavy jsou uvedeny v tab. 2. Způsob vyhodnocení je zobrazen na obr. 9.

Napětí [MPa]	$\Delta T/\Delta t$ [°C/s]		
	Horká zóna AVG	CELK AVG	CELK MAX
290	2.645	2.578	2.648
270	1.725	1.666	1.718
260	1.040	1.002	1.048
240		0,193	0.216
230		0,11	0.115
210		0,066	0.069
190		0,0253	0.026
Mez únavy [MPa]	-	243	242
Skutečná mez únavy [MPa]	240		

Tab. 2. Zjištěné závislosti rychlosti ohřevu vzorku pro zvolené hodnoty zatěžovacího napětí a vyhodnocení meze únavy



Obr. 9. Rychlost nárůstu teploty vzorku v závislosti na zatěžovacím napětí - vyhodnocení meze únavy ze změny trendu v rychlosti ohřevu vzorku

4. Závěr

Na základě analýzy publikovaných prací v oblasti použití termografie k určení meze únavy materiálu byla navržena a experimentálně realizována metoda termografického měření únavy. Metoda je založena na termovizním měření nárůstu teploty vzorku při cyklickém zatížení pod a nad mezí únavy materiálu.

Výsledky ukazují jednak možnost použití standardního termovizního systému pro měření teplotních polí vzorků při únavových zkouškách za předpokladu, že povrch měřeného vzorku je upraven povlakem o vysoké emisivitě.

Praktické zkušenosti dále ukazují, že pro vyhodnocení meze únavy z termovizního měření se jeví jako vhodná metoda založená na předpokladu lineárního nárůstu rychlosti ohřevu vzorku při cyklickém zatěžování nad mezí únavy. Metoda dává nepřesné výsledky, pouze pokud do vyhodnocování je zahrnuto napětí pod mezí únavy. Proto je vhodné vyhodnocovat $\Delta T/\Delta N$ pro napětí s dostatečně zřejmou lineární oblastí nárůstu teploty v čase.

Stanovená mez únavy pro zkoušený ocelový vzorek se shoduje s hodnotou určenou klasickými postupy. Metodu lze proto doporučit pro měření meze únavy materiálů s vysokou termoplastickou konstantou.

Poděkování: Příspěvek byl podpořen grantovým projektem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR pod označením MSM4977751302.

Literatura

- [1] Cura F., Curti G., Sesana R.: *A new iteration method for the thermographic determination of fatigue limit in steels*, International Journal of Fatigue 27, 2005, pp.453-459.
- [2] Fargione G., Geraci A., Rosa G.L., Risitano A.: *Rapid determination of the fatigue curve by the thermographic method*, International Journal of Fatigue 24, 2002, pp. 11-19.
- [3] Geraci A.L., Rosa L.G., Risitano A.: *Influence of frequency and cumulative damage on the determination of fatigue limit of materials using the thermal infrared methodology*, XV Symposium on Experimental Mechanics of Solids, Warsaw, 1996, pp. 306-17.
- [4] Luong M.P., Dang-Van K.: *Metal fatigue limit evaluation using infrared thermography*, Proc. Workshop Advanced infrared technology and applications, Capri (It.), pp. 245-253, 1994.
- [5] Luong M.P.: *Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique*, Mechanics of Materials 28, 1998, pp.155-163.
- [6] Luong M.P.: *Infrared thermography of fatigue in metals*, SPIE, vol. 1682, pp. 222-233, 1992.
- [7] Luong M.P.: *Infrared thermography scanning of fatigue in metals*, Nuclear Engineering and Design, vol. 158, pp. 363-376, 1995.
- [8] Rosa G.L., Risitano A.: *Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components*, International Journal of Fatigue 22, 2000, pp.65-73.