

E xperimentální 2007

A nalýza 2007

N apětí

TORQUE MACHINE FIT FOR HIGH CYCLE FATIGUE OF MATERIAL TESTING

TORZNÍ STROJ PRO ZKOUŠENÍ VYSOKOCYKLOVÉ ÚNAVY MATERIÁLU

Jan Fuxa¹, František Fojtík,² Rostislav Kubala³

Abstract: The paper deals with a new configuration of testing machine fit for high-cycle fatigue tests in torsion and/or with the combination of the torsion loading with axial tension / compression force. The proposed conception is based on the idea to load the specimens by amplitude of the torque, which is the consequence of dynamic inertia effects of a balance wheel. The axial tension / compression force is deduced by double-acting hydraulic cylinder. Series of experiment was carried out after well adoption of the mechanical system. S-N curve of chosen material has been obtained. On this S-N curve the new strength fatigue criterion was verified. The specimens were loaded also by the combination of the torque amplitude together with a constant axial tension force in following experiments. On those results the new strength criterion was applied as well.

Keywords: testing machine, fatigue, multi-axial strength criterion, approximations

1. Úvod

Ve snaze stanovit konstanty vyvíjeného multiaxiálního kritéria pevnosti jsme navrhli, zpracovali výrobní výkresy a po výrobě smontovali a uvedli do chodu speciální torzní stroj [1, 4], který umožňuje zatěžovat zkušební vzorky časově proměnným krouticím momentem, případně v kombinaci s volenou, konstantní hodnotou osově – tahové nebo tlakové – síly.

2. Vyvození zátěžných účinků

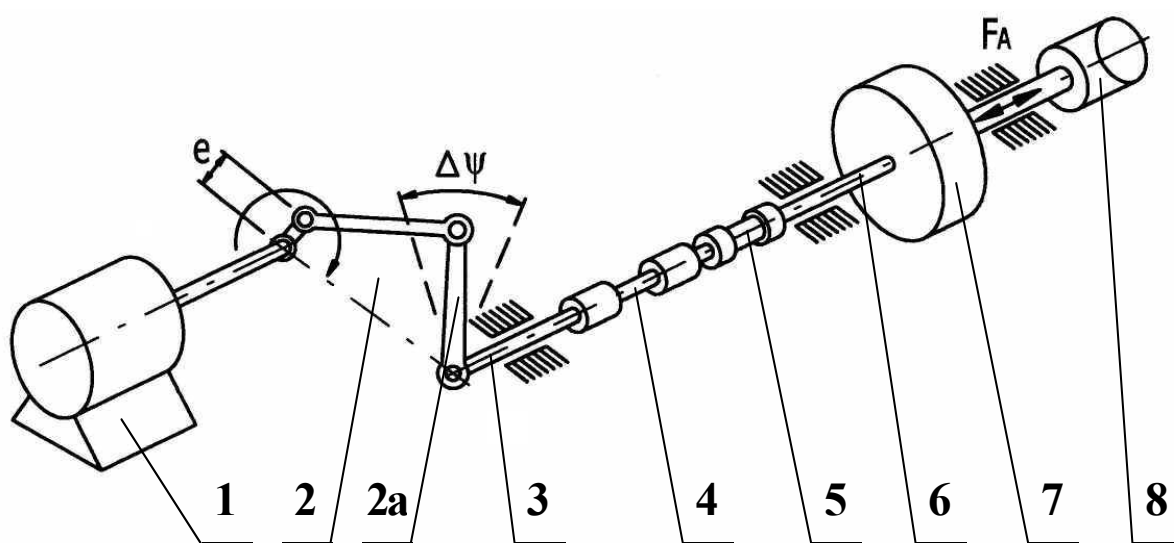
Na obr. 1 je znázorněno kinematické schéma *zkušebního stroje*. Asynchronní elektromotor 1 pohání čtyřkloubový mechanismus 2, jehož vahadlo 2a je spojeno s hnací hřídelí 3, k níž je upevněna jedna strana zkušebního vzorku 4, zatímco jeho druhá strana je spojena se snímačem krouticího momentu a osově síly 5. Tento snímač je pevně spojen s hnanou hřídelí 6, nesoucí skládaný setrvačnick 7. Hydraulický válec 7 může do systému vnášet osovou sílu.

Z rozměrů částí čtyřkloubového mechanismu, z nastavení otáček asynchronního elektromotoru (frekvenčním měničem) a při zvolení excentricity e plyne časově proměnné úhlové zrychlení vahadla 2a, které v závislosti na momentu setrvačnosti připojených součástí (zejména na hodnotě momentu setrvačnosti skládaného setrvačnicku 7) vyvolá ve zkušebním vzorku časově proměnné smykové napětí.

¹ prof. Ing. Jan Fuxa, CSc., Katedra pružnosti a pevnosti, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: +420 597 324 412, e-mail: jan.fuxa@vsb.cz

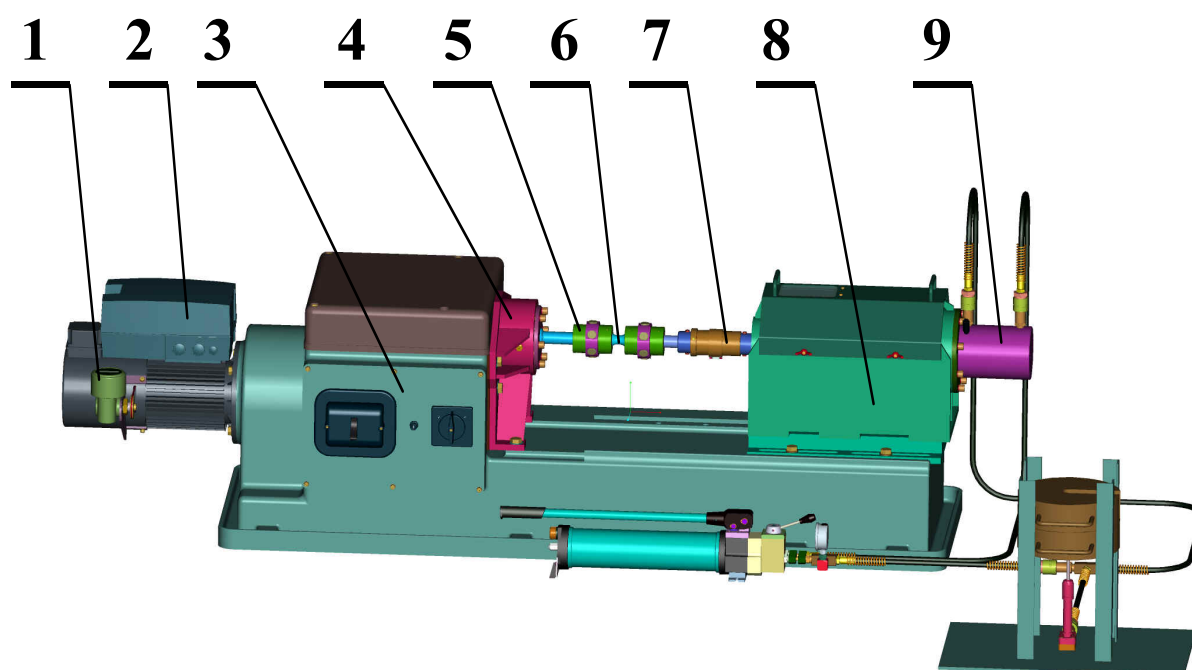
² Ing. František Fojtík, Katedra pružnosti a pevnosti, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: +420 597 323 290, e-mail: frantisek.fojtik@vsb.cz

³ Ing. Rostislav Kubala, CSc., Katedra pružnosti a pevnosti, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava - Poruba, tel.: +420 597 323 495, e-mail: rostislav.kubala@vsb.cz



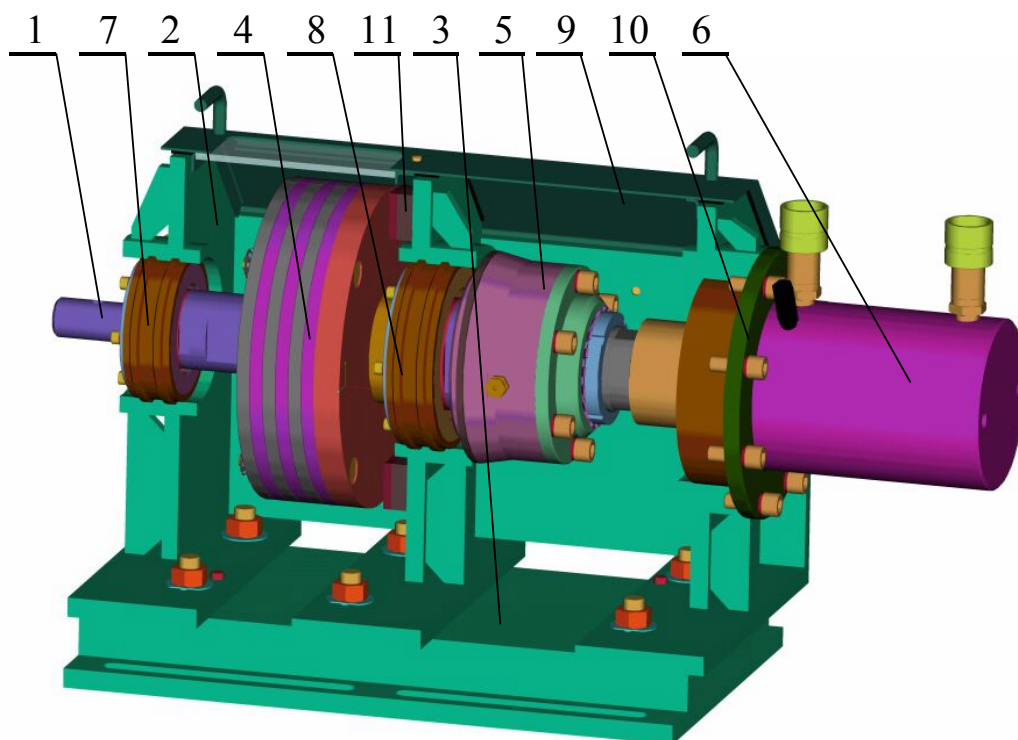
Obr. 1. Kinematické schéma torzního stroje

3. Konstrukční uspořádání zkušebního stroje



Obr. 2 . Torzní stroj

V obr. 2 značí: 1 – čítač počtu cyklů, 2 – asynchronní elektromotor řízený funkčním měničem, 3 – převodová skříň se čtyřkloubovým mechanismem, 4 – upínací hlava, 5 – upínací kleština, 6 – zkušební vzorek, 7 – tenzometrický snímač krouticího momentu a osově síly, 8 – měřicí ústrojí se skládaným setrvačníkem, 9 – hydraulický válec s agregátem pro vyvození konstantní osově síly.



Obr. 3. Měřicí ústrojí

V Obr. 3 značí: 1 – hřídel, 2 – měřicí skříň, 3 – základna skříň, 4 – skládaný setrvačnick, 5 – axiální převodník, 6 – dvojčinný hydraulický válec, 7, 8 – ložisková pouzdra, 9 – kryt měřicí skříně, 10 – víko válce, 11 – brzdná lamela.

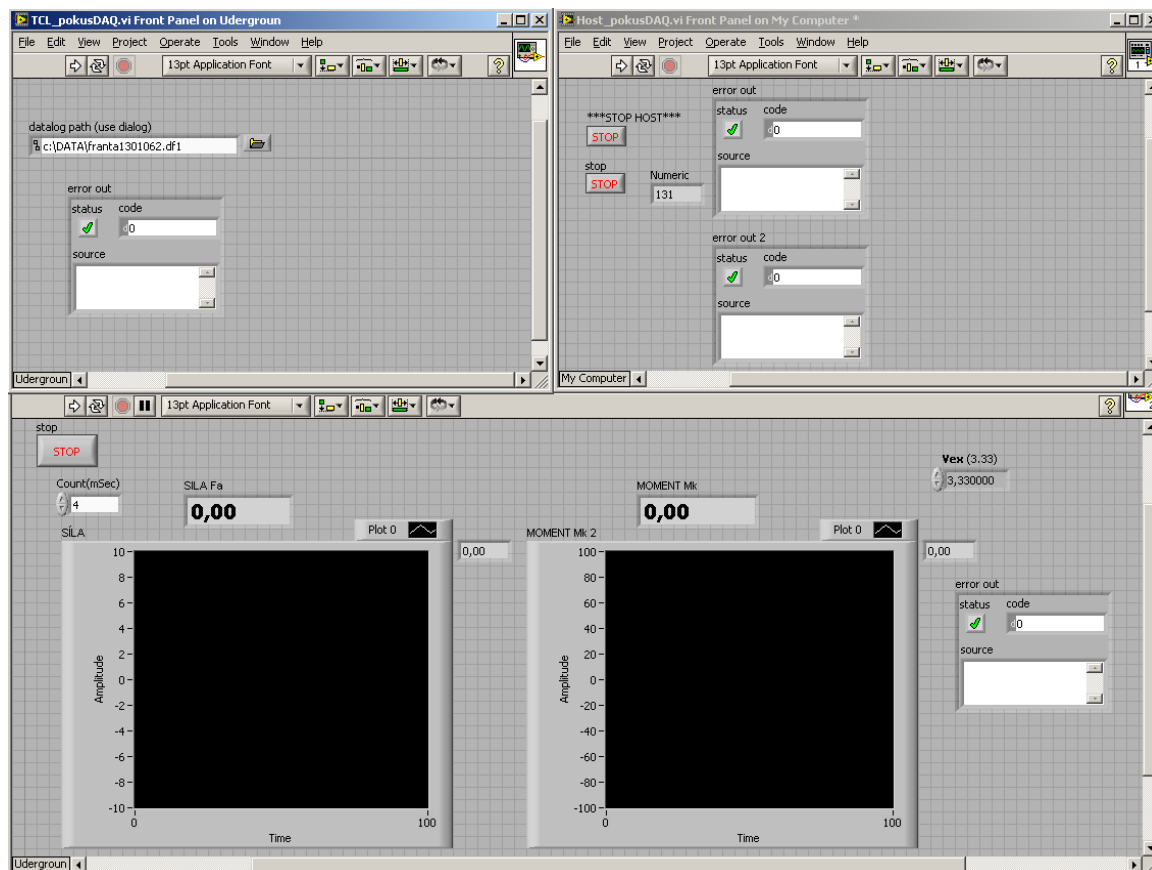
Mezi ložiskovými pouzdry a měřicí skříní byla navržena mezera, která byla při montáži zaplněna "tekutým kovem" fy Loctite. Montáž probíhala při vyváženém zavěšení rotačních částí, s následnou kontrolou souososti - viz obr. 4.



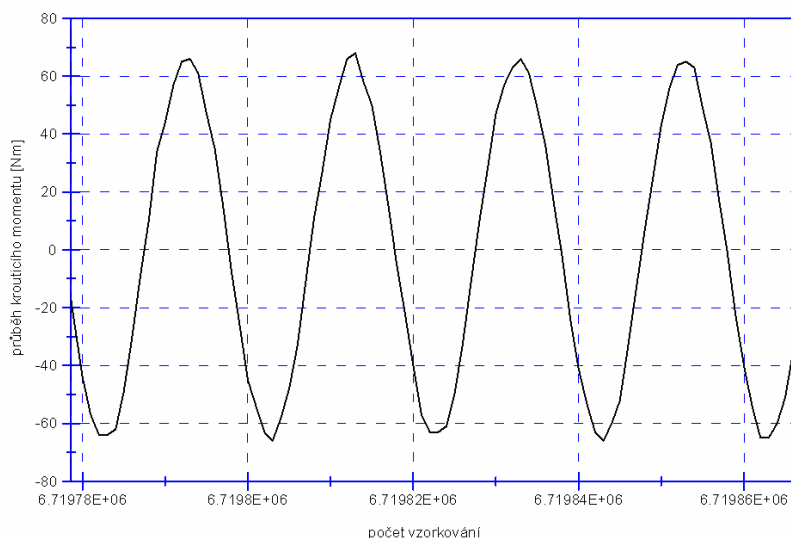
Obr. 4. Montáž rotačních částí měřicího ústrojí

4. Snímání a ukládání dat

Hodnoty krouticího momentu a osově síly jsou průběžně snímány a ukládány do paměti PC. Pro řízení a sběr dat je zpracován SW s užitím grafického programovacího jazyka v prostředí LabVIEW - viz [2]. Vzhled obrazovky řídicího počítače je patrný z obr. 5, záznam průběhu krouticího momentu je uvedený na obr. 6.



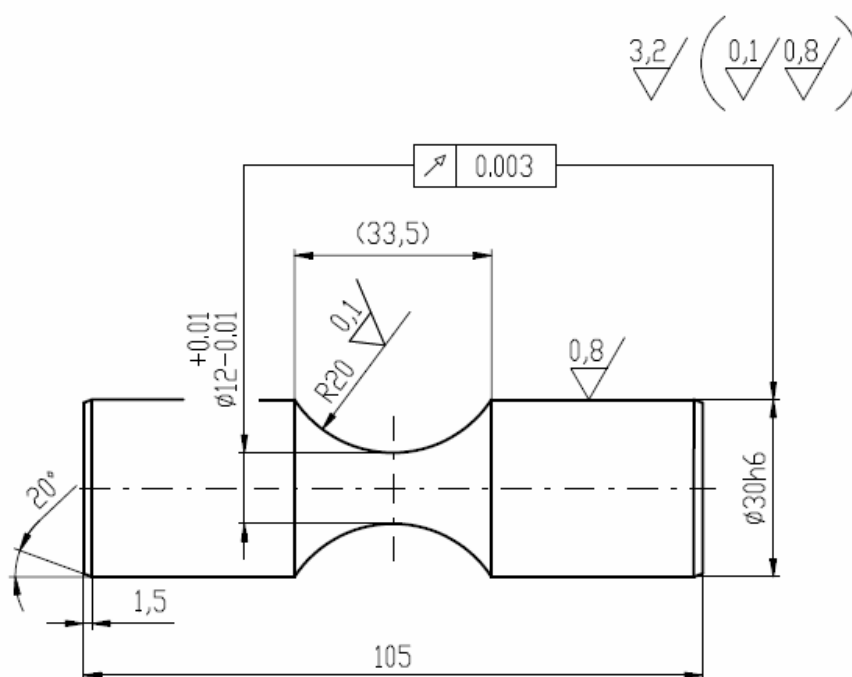
Obr. 5. Čelní panel



Obr. 6. Záznam průběhu krouticího momentu

5. Střídavé kroucení

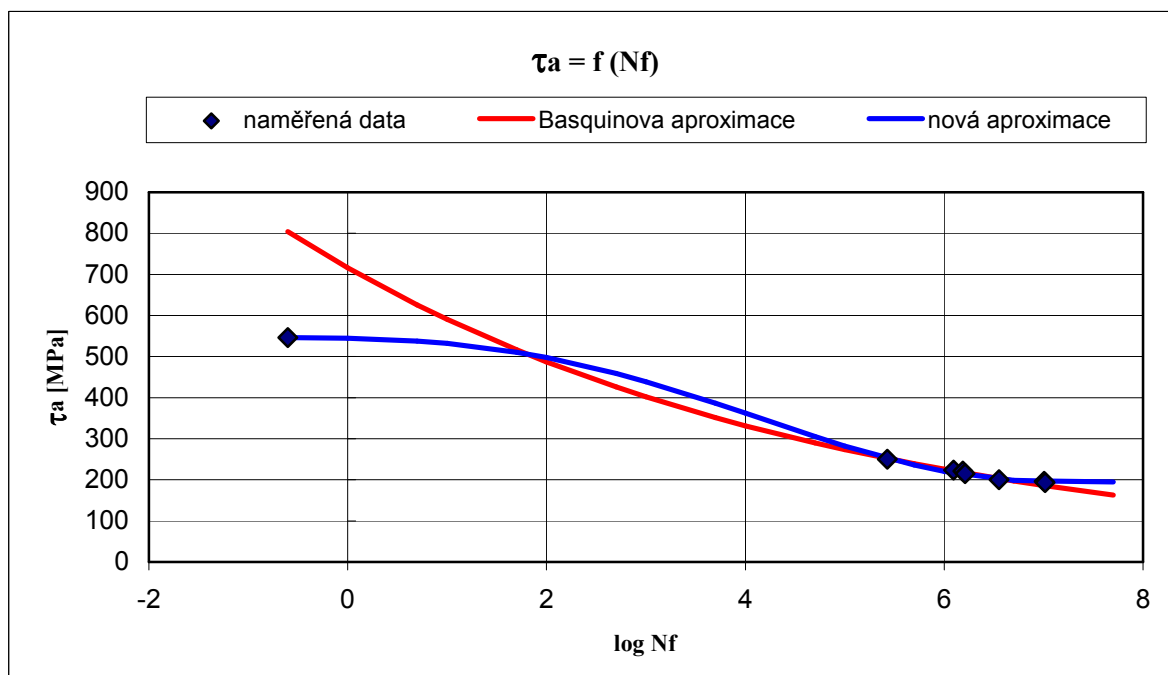
Zkušební vzorky tvaru podle obr.7, zhotovené z oceli 11 523, byly zatěžovány střídavým krouticím momentem. Výsledky jsou shrnuty v tab.1. V obr. 8 jsou znázorněny změřené body a vykresleny křivky Basquinovy aproximace (1) a Fuxovy aproximace (2). Bod porušení při statickém kroucení byl změřen v naší laboratoři na rekonstruovaném trhacím stroji, doplněném o možnost kroucení [6].



Obr. 7. Zkušební vzorek C

Zkušební vzorek	Amplituda napětí τ_a [MPa]	Počet cyklů	Poznámky
1	250	$2,678 \cdot 10^5$	
2	224	$1,238 \cdot 10^6$	
3	221	$1,5397 \cdot 10^6$	
4	215	$1,62 \cdot 10^6$	
5	200,5	$3,547 \cdot 10^6$	
6	196	$1,0103 \cdot 10^7$	Vzorek neporušen
7	193	$1,0356 \cdot 10^7$	Vzorek neporušen
8	546	0,25	

Tab. 1. Změřené hodnoty při střídavém kroucení oceli 11523



Obr. 8. W - křivka a její aproximace

Basquinova aproximace:

$$\tau_a = \tau_f \cdot (2N_f)^b, \quad (1)$$

kde τ_f (= 758,75 MPa) je únavová pevnost a b (= -0,0836) je exponent únavové pevnosti.

Fuxova aproximace [3]:

$$\tau_{aF} = (\tau_f + \tau_c)/2 + (\tau_f - \tau_c)/2 \cdot \cos\{\pi \cdot [\log(4 \cdot N_f)/\log(4 \cdot N_c)]^{a_1}\}, \quad (2)$$

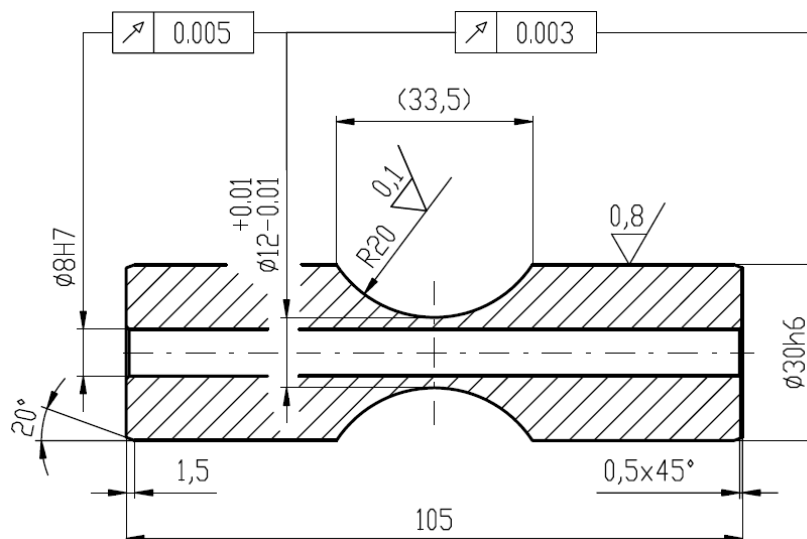
pro N_f v intervalu $[1/4; N_c]$ a τ_{aF} v intervalu $[\tau_f; \tau_c]$.

τ_f (=546 MPa) je hodnota skutečné pevnosti ve smyku, τ_c (=197 MPa) je napětí na mezi únavy ve smyku, N_c (=9418890) je počet cyklů na mezi únavy, a_1 (=1,324) je konstanta, τ_{aF} značí mezní amplitudu napětí při střídavém kroucení. N_f je mezní počet cyklů do iniciace trhliny.

6. Střídavé kroucení a tah

Zkušební vzorky tvaru podle obr. 9, zhotovené z oceli 11 523, byly zatěžovány střídavým krouticím momentem a osovým tahem. Zkoušky byly provedeny tak, že každá série zkušebních vzorků byla zatěžována jinou konstantní hodnotou osového tahového napětí (vyvozenou hydraulickým válcem, napojeným na hydraulický agregát). Pro danou hodnotu tahového napětí byla v každé sérii zvolena počáteční amplituda smykového napětí, kterým byl zkušební vzorek zatěžován až do vzniku trhliny. Tato amplituda byla postupně snižována až na hodnotu, kdy vzorek vydržel 10^7 cyklů. Celkem byly provedeny čtyři série experimentů pro čtyři různé hodnoty osového tahového napětí. Výsledky těchto experimentů pro $N = 10^7$ cyklů jsou uvedeny v tab. 2.

Výsledky těchto zkoušek jsou zpracovány s užitím konjugovaného kritéria pevnosti [7] a znázorněny v obr. 10.



Obr. 9. Zkušební vzorek D

Zkušební vzorek	Tahové napětí [MPa]	Amplituda smykového napětí [MPa] pro $N = 10^7$ cyklů	Poznámky
1	109,8	154,2	Vzorek neporušen
2	160,4	139,5	Vzorek neporušen
3	228,4	120	Vzorek neporušen
4	309,5	104,7	Vzorek neporušen

Tab.2. Výsledky kombinovaného zatížení vzorku z oceli 11523

V obr. 10 jsou znázorněny změřené body a vykreslena křivka Fuxovy aproximace (3, 4, 5, 6).

$$\tau_{aF2} = (\tau_f^* + \tau_c^*)/2 + (\tau_f^* - \tau_c^*)/2 \cdot \cos\left\{ \pi \cdot \left[\log(4 \cdot N_f) / \log(4 \cdot N_c) \right]^{a_1} \right\}, \quad (3)$$

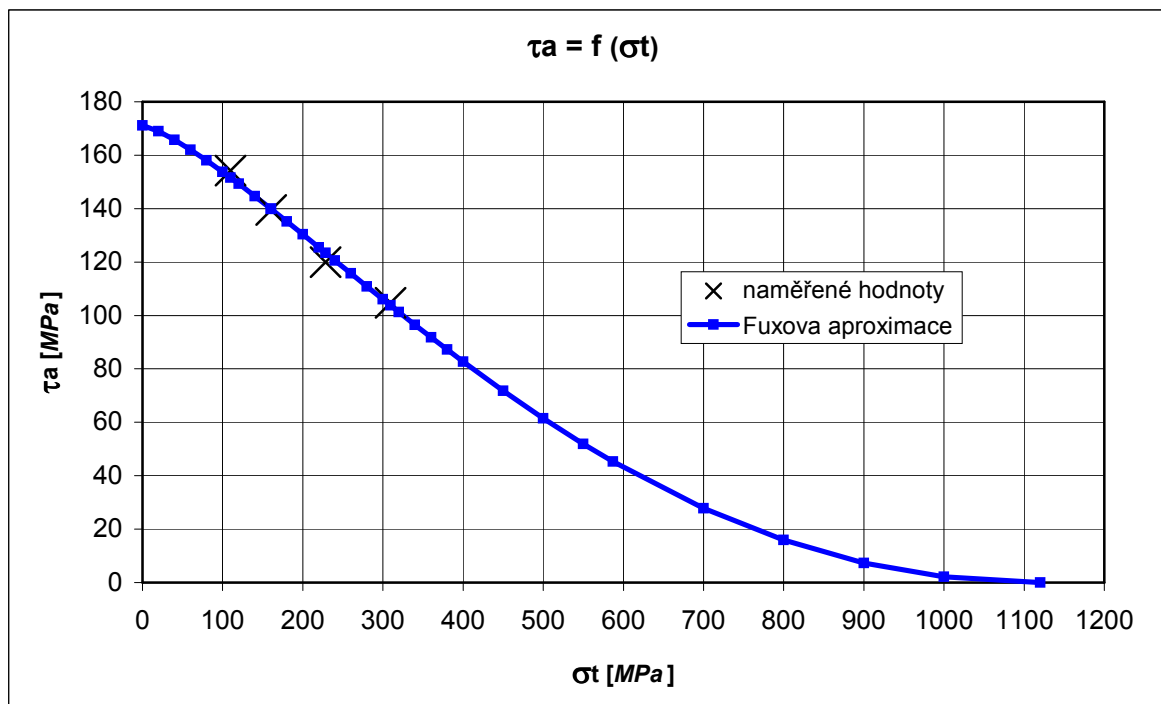
$$\tau_f^* = 1/\sqrt{3} \cdot \left((\sqrt{3} \cdot \tau_f)^2 - 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \tau_f \cdot B_o \cdot \sigma_t / 3 + \sigma_t^2 \cdot B_o^2 / 9 - \sigma_t^2 \right)^{1/2}, \quad (4)$$

(4) je podmínka statické pevnosti při $N_f = 1/4$, kde konstanta B_o [5, 6] je rovna:

$$B_o = 3 \cdot (\sqrt{3} \cdot \tau_f / \sigma_f - 1), \quad (5)$$

$$\tau_c^* = \tau_c / 2 \cdot \left\{ 1 + \cos\left[\pi \cdot (\sigma_t / \sigma_f)^B \right] \right\} \text{ je podmínka pevnosti na mezi únavy } (N_f = N_c). \quad (6)$$

Ve vztazích (3 - 6) značí: σ_f hodnotu skutečné pevnosti v tahu, τ_f je hodnota skutečné pevnosti ve smyku, τ_c je napětí na mezi únavy ve smyku, N_c je počet cyklů na mezi únavy, a_1 je konstanta, B je konstanta, τ_{aF2} je mezní amplituda napětí, σ_t je (konstantní) tahové předpětí. N_f opět značí mezní počet cyklů do iniciace trhliny.



Obr. 10 Vliv středního tahového napětí na iniciaci trhliny.

7. Závěr

Byl stručně popsán nově vyvinutý torzní únavový zkušební stroj, vhodný pro stanovování konstant únavového kritéria pevnosti. Tento stroj využívá dynamický efekt setrvačníku k vytváření zátěžného krouticího momentu. Zkušební vzorky lze zatěžovat také kombinací časově proměnného krouticího momentu a konstantní tahové nebo tlakové osové síly.

Byly popsány výsledky vybraných experimentů, uskutečněných v podmínkách střídavého kroucení a dále kroucení v kombinaci s osovým tahovým předpětím. V prvním případě jsou výsledky využity pro popis W-křivky Basquinovou (1) a Fuxovou (2) aproximací, ve druhém případě jsou výsledky experimentu využity pro vyjádření kritéria pevnosti na mezi únavy (6). Z obr. 8 a 10 je patrná dobrá shoda nově navržených aproximací s experimentálními daty.

Poděkování: Autoři děkují GA ČR za finanční podporu projektu 101/04/0475, která umožnila vznik této práce.

Literatura

- [1] Fojtík, F. *Experimentální zařízení pro zkoušení víceosé únavy materiálu*, Disertační práce v oboru Aplikovaná mechanika, FS VŠB-TU Ostrava, 2007, 91

- [2] Fusek, M. *Univerzální zkušební stroj – experiment v oblasti valivého kontaktu*, In Applied Mechanics 2004, Bratislava, Slovak University of Technology in Bratislava, 2004, ISBN 80-227-2030-5.
- [3] Fuxa, J. *Výzkum kritérií únavové pevnosti kvaziizotropního materiálu namáhaného v podmínkách dvojosého napětového stavu*, Závěrečná zpráva, Projekt GAČR 101/99/1245, Ostrava, prosinec 2001.
- [4] Fuxa, J., Fojtík, F. *Zařízení pro kombinované namáhání zkušebních vzorků*, PUV – 2006 – 18319, Úřad průmyslového vlastnictví Praha.
- [5] Fuxa, J. *Strength Criterion Fit for Quasi-isotropic Statically Loaded Materials*, In: Proc. Fracture Damage of Structural Parts (Z. Bůžek & B. Strnadel eds), VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2004, pp.207-213, ISBN 80-248-0615-0.
- [6] Fuxa, J., Kubala, R. *Multi-axial Static Strength Criterion Fit for Ductile Quasi-isotropic Materials*, In 5th International Congress of Croatian Society of Mechanics, September, 21 – 23, 2006, Trogir/Split, Croatia, p. 75, 76, ISBN 953-9643-8-X
- [7] Fuxa, J., Kubala, R., Fojtík, F. *Idea of the Conjugated Strength Criterion*, In: Experimentální analýza napětí 2006, Červený Kláštor, Slovensko, 23.-26.5.2006, ISSN 1335-2393.