

GIGACYKLOVÁ ÚNAVA KONŠTRUKČNÝCH MATERIÁLOV

GIGACYCLE FATIGUE OF CONSTRUCTION MATERIALS

Otakar BOKŮVKA, František NOVÝ, Marián ČINČALA¹, Ludvík KUNZ²

Abstrakt

Autori v práci uvádzajú pôvodné poznatky o únavovej rezistencii vybraných konštrukčných materiálov v oblasti veľmi vysokého počtu cyklov zaťažovania ($10^7 < N < 10^{10}$ cyklov) zisťovanej pri vysokofrekvenčnom zaťažovaní (frekvencii zaťažovania $f \approx 20$ kHz, teplota $T = 20 \pm 10$ °C, asymetrii cyklu $R = -1$).

Kľúčové slová: konštrukčné materiály, gigacyklová únava, vysokofrekvenčné zaťažovanie.

Abstract

Authors in this work present original knowledge about fatigue resistance of selected construction materials in the region of very high numbers cycles of loading ($10^7 < N < 10^{10}$ cycles) determined at high frequency cyclic loading (frequency of loading $f \approx 20$ kHz, temperature $T = 20 \pm 10$ °C, load ratio $R = -1$).

Keywords: construction materials, gigacycle fatigue, highfrequency loading.

ÚVOD

Degradácia konštrukčných materiálov spôsobená únavou je vážnym problémom inžinierskej praxe, viac ako 90 % všetkých prevádzkových lomov sú lomy únavové [1, 2]. Únave konštrukčných materiálov tak v oblasti nízkokycklovej (Manson - Coffin) ako aj v oblasti vysokocycklovej (Wöhler) je preto už viac ako 150 rokov venovaná oprávnená pozornosť [2, 3].

Koncepcia hodnotenia odolnosti voči únave, hodnotenie únavovej životnosti ($\sigma_a = f(N)$) v oblasti vysokocycklovej je založená na experimentálnom určovaní medze únavy σ_c pri vzťahnom počte $N = 2 \cdot 10^6 \div 10^7$ cyklov (platí pre ocele a liatiny), to znamená na koncepcii trvalej únavovej pevnosti, bezpečnom namáhaní za hranicou $N = 10^7$ cyklov [4, 5]. Realita je však iná. K lomom únavou u konštrukčných materiálov dochádza ďaleko za hranicou $N = 10^7$ cyklov, amplitúda cycklického napätia σ_a ďalej klesá s rastúcim počtom zaťažujúcich cyklov N a koncepcia trvalej únavovej pevnosti, bezpečného namáhania nezodpovedá skutočnej, súčasnej realite [6, 7]. Rešpektujúc vyššie uvádzané skutočnosti sa významné svetové experimentálne pracoviská veľmi významne venujú degradácii konštrukčných materiálov spôsobenej únavou za hranicou $N = 10^7$ cyklov, zvyčajne v oblasti od $N = 10^7$ cyklov do $N = 10^{10}$ cyklov zaťažovania, hovorí sa o gigacycklovej únave. Intenzívne sú diskutované otázky fyzikálnej podstaty medze únavy a existencie medze únavy (najvyšší výkmit napätia pri určitom strednom napätí, ktorý súčiastka alebo konštrukcia vydrží bez porušenia po teoreticky neobmedzený počet cyklov), degradačné mechanizmy pri veľmi nízkych hodnotách amplitúdy plastickej deformácie, šírenie krátkych únavových trhlin extrémne nízkymi rýchlosťami, úloha inklúzií, pórov, dlhých hraníc zrn,

¹ prof. Ing. Otakar BOKŮVKA, PhD., Ing. František NOVÝ, PhD., Ing. Marián ČINČALA, PhD., KMI SjF, Žilinská univerzita v Žiline, otakar.bokuvka@fstroj.utc.sk

² prof. RNDr. Ludvík KUNZ, CSc., Ústav fyziky materiálov AV ČR, kunz@ipm.cz

Lektoroval: prof. Ing. Marián BURŠÁK, PhD., KNoM, HF TU v Košiciach, marian.bursak@tuke.sk

povrchová a podpovrchová iniciácia únavových trhlín, existencia viacerých vetví na krivke závislosti $\sigma_a = f(N)$ atď. [8, 9, 10].

Experimentálnym problémom zisťovania únavovej životnosti pri nízkofrekvenčnom zaťažovaní ($f < 200$ Hz) v oblasti veľmi vysokého počtu cyklov zaťažovania je však čas potrebný k získaniu výsledkov. Ako vhodné, v súčasnosti a perspektívne používané, sa preto javia metódy a postupy vysokofrekvenčného cyklického zaťažovania s pracovnými frekvenciami $f \approx 20 \div 23$ kHz, Tab. 1 [1, 7, 11, 12]. Prínosom je predovšetkým významná časová úspora vlastných skúšok na únavu.

Závislosť doby skúšky na únavu od použitej frekvencie zaťažovania

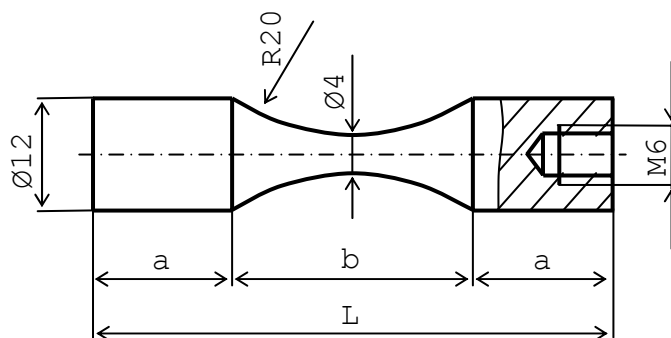
Tabuľka 1

Zaťaženie \ Cykly	$N = 10^7$	$N = 10^8$	$N = 10^9$	$N = 10^{10}$
Nízkofrekvenčné (50 Hz)	≈ 2,3 dňa	≈ 23 dní	≈ 230 dní	≈ 6,3 roka
Vysokofrekvenčné (20 kHz)	≈ 9 min.	≈ 90 min.	≈ 15 hod.	≈ 6,2 dňa

V predloženej práci sú uvádzané výsledky o únavovej životnosti $\sigma_a = f(N)$ zisťovanej vo vybraných konštrukčných materiáloch pri vysokofrekvenčnom cyklickom zaťažovaní ($f = 20$ kHz, $T = 20 \pm 10$ °C, $R = -1$) v oblasti veľmi vysokého počtu cyklov zaťažovania ($10^7 < N < 10^{10}$ cyklov).

EXPERIMENTY

Únavová životnosť, závislosť $\sigma_a = f(N)$ bola zisťovaná vo vybraných materiáloch, v Mg-zliatinách AZ31 a AZ91 [14], v mikrolegovanej oceli E700TS [15], ultrajemnozrnej meď [16] a v ADI (Austempered Ductile Iron) liatine [17]. Z dodaných materiálov boli odobraté skúšané vzorky, následne navrhnuté (rešpektujúc odporúčania Salamu a Lameranda [12]) a trieskovým obrábaním vyrobené skúšané tyče, ktorých obecný tvar a rozmery sú uvedené na obr. 1. Celková dĺžka skúšaných tyčí sa pohybovala od 50 do 80 mm. Skúšané tyče boli v pracovnej časti ($\phi 4$ mm) brúsené a leštené s cieľom čo najviac eliminovať vplyv povrchu na výsledné únavové charakteristiky. Skúšané tyče po návrhu, výrobe a ciachovaní spĺňali požadované rezonančné podmienky. Vlastné únavové skúšky boli realizované na skúšobnom zariadení KAUP-ŽU Žilina [1, 11] pri vysokofrekvenčnom cyklickom zaťažovaní sínusového charakteru, striedavý súmerný ťah – tlak ($R = -1$), pri frekvencii $f = 20$ kHz a teplote $T = 20 \pm 10$ °C (intenzívne chladenie cirkulujúcou vodou s inhibítormi [13]).

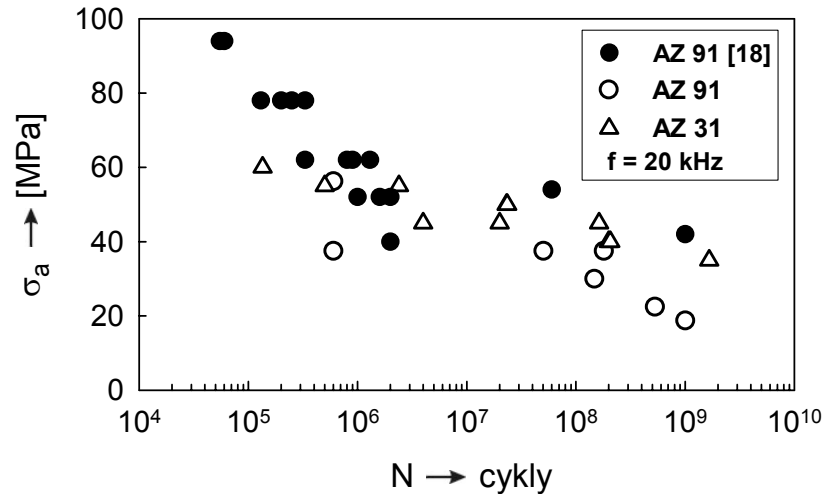


Obr.1 Tvar a rozmery skúšaných tyčí

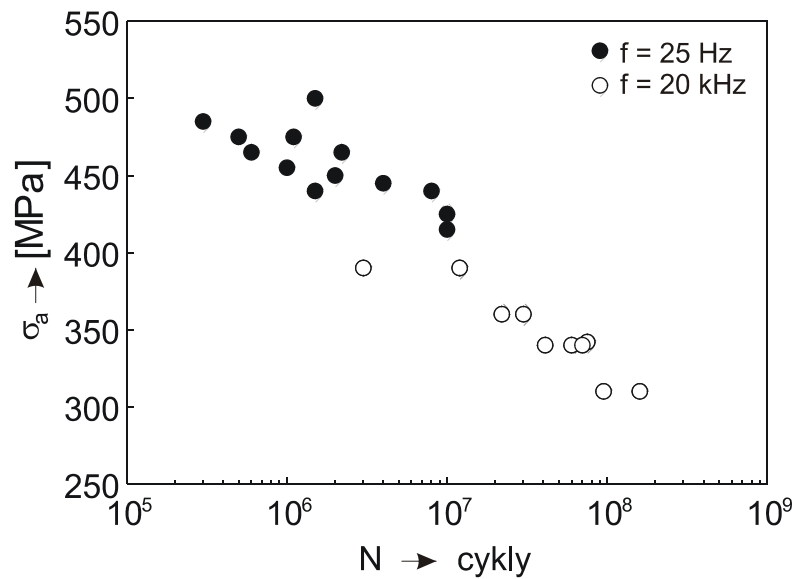
VÝSLEDKY A ICH DISKUSIA

Únavová životnosť, závislosť $\sigma_a = f(N)$, vybraných konštrukčných materiálov, zisťovaná pri vysokofrekvenčnom cyklickom zaťažovaní v oblasti veľmi vysokého počtu cyklov zaťažovania je uvedená na obr.2 až obr.5.

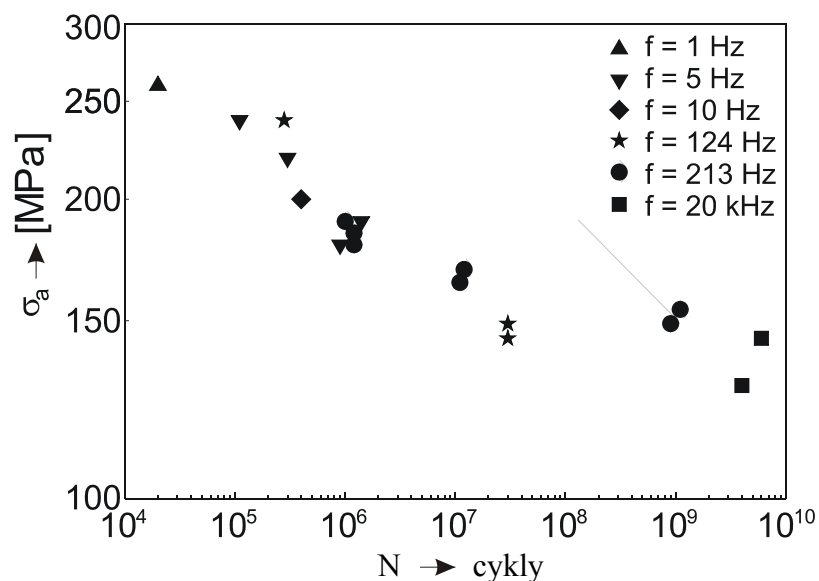
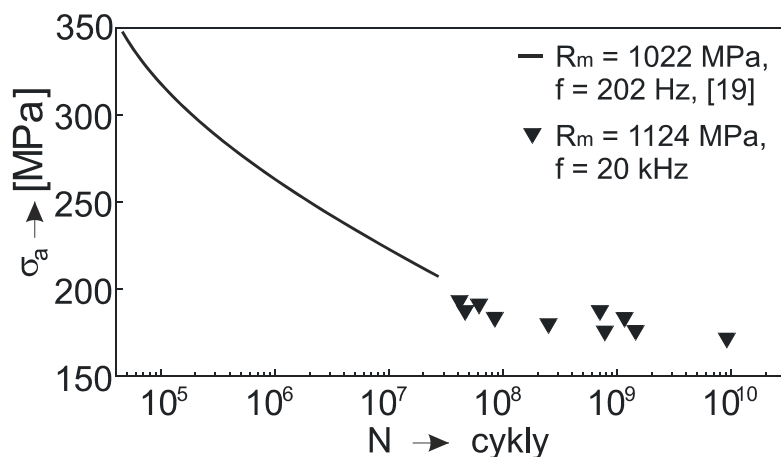
U všetkých skúšaných materiálov bol zaznamenaný pokles amplitúdy cyklického napätia σ_a s rastúcim počtom cyklov N do porušenia za hranicou $N = 10^7$ cyklov, pričom $\Delta\sigma_a$ bolo v rozmedzí od $\Delta\sigma_a = 20$ MPa do $\Delta\sigma_a = 40$ MPa. Táto skutočnosť je v súlade s prácami [6-16].



Obr.2 Závislosť $\sigma_a = f(N)$, Mg-zliatiny AZ31 a AZ91



Obr.3 Závislosť $\sigma_a = f(N)$, mikrolegovaná oceľ E700TS

Obr.4 Závislosť $\sigma_a = f(N)$, ultrajemnozrnná meďObr.5 Závislosť $\sigma_a = f(N)$, ADI liatina

Vyššie hodnoty (až $\Delta\sigma_a = 200$ MPa) boli namerané u povrchovo spevnených ocelí a najmä u materiálov vysokých pevností ako sú napr. ocele menovitého použitia (ocle na ložiská, pružiny, atď.). K iniciácii únavového poškodenia a následne k lomom únavou dochádzalo tak z povrchu ako aj z vnútra skúšaných tyčí, pričom u liatych materiálov (Mg-zliatiny, ADI liatina) únavové trhliny prednostne iniciovali na mikroskopických zlievarenských chybách (póry, mikropóry, stiahnutiny, mikroťahnutiny). Vnútorne defekty štruktúry, póry, stiahnutiny, inklúzie, ale aj grafitické častice, dlhé hranice zŕn vhodne orientované, veľmi malé zrná, atď. významne, negatívne ovplyvňujú únavovú životnosť v gigacyklovej oblasti zaťažovania [6-10,14, 17, 18]. Únavová životnosť, závislosti $\sigma_a = f(N)$ majú kontinuálny charakter (obdobne práce Bathiasa et al. [7,21]), nebolo zaznamenané tzv. plató, resp. dvojstupňový [10], či trojstupňový [9] charakter

krivky životnosti. Kontinuálny charakter závislosti je preukázaný aj v porovnaní výsledkov nízkofrekvenčné vs. vysokofrekvenčné cyklické zaťažovanie, obdobne ako v prácach [20, 21]. Neprejavil sa výrazne vplyv frekvencie na únavové charakteristiky. Výsledky sú rovnaké, prípadne medza únavy σ_c (pri $N = 10^7$ cykloch) je len mierne vyššia. Vysvetlenie možno nájsť v skutočnosti, že pri vysokofrekvenčnom cyklickom zaťažovaní sú pri stanovovaní únavovej životnosti v oblasti gigacyklovej únavy resp. pri určovaní rýchlosti šírenia sa únavových trhlín v blízkoprahovej oblasti veľmi nízke hodnoty amplitúdy plastickej deformácie vrátane nízkej rýchlosti jej rastu. Deformačné a lomové charakteristiky sú si podobné pri nízkych a vysokých frekvenciách skúšania [22]. S ohľadom na inžiniersku prax, návrh a použitie vhodného materiálu pre súčiastky, konštrukcie, sú údaje o medzi únavy σ_c (stanovené do $N = 10^7$ cyklov) nadhodnotené, vyššie. Túto skutočnosť je potrebné rešpektovať pri optimálnom návrhu predovšetkým tam, kde sa predpokladá použitie konštrukčného materiálu v gigacyklovej oblasti cyklického zaťažovania, skutočné hodnoty σ_a sú totiž nižšie.

ZÁVERY

Na základe získaných výsledkov o únavovej životnosti vybraných konštrukčných materiálov v oblasti veľmi vysokého počtu cyklov zaťažovania zisťovaných pri vysokofrekvenčnom zaťažovaní je možné konštatovať tieto skutočnosti:

- vysokofrekvenčné cyklické zaťažovania s pracovnými frekvenciami ($f \approx 20$ kHz) je vhodným experimentálnym nástrojom k zisťovaniu únavovej životnosti v oblasti veľmi vysokého počtu cyklov zaťažovania ($10^7 < N < 10^{10}$ cyklov),
- amplitúda aplikovaného cyklického napätia σ_a klesala s rastúcim počtom cyklov N za hranicou $N = 10^7$ cyklov u všetkých skúšaných experimentálnych materiálov,
- pokles amplitúdy cyklického napätia σ_a za hranicou $N = 10^7$ cyklov bol v sledovaných oblastiach veľmi vysokého počtu cyklov zaťažovania cca $\Delta\sigma_a = 20 \div 40$ MPa,
- lomy únavou boli pozorované u všetkých skúšaných experimentálnych materiálov v celom sledovanom intervale veľmi vysokého počtu cyklov zaťažovania ($10^7 < N < 10^{10}$ cyklov),
- iniciácia porušenia únavou bola pozorovaná tak z povrchu ako aj z vnútra (v objeme, pod povrchom) skúšaných tyčí,
- nebol zaznamenaný významný vplyv frekvencie zaťažovania, výsledky (nízkofrekvenčné cyklické zaťažovanie) kontinuálne nadväzujú s dobrou zhodou na získané výsledky (vysokofrekvenčné cyklické zaťažovanie),
- konvenčne zisťovaná medza únavy σ_c (pri $N = 2 \cdot 10^6 \div 10^7$ cyklov) je nadhodnotená voči získaným výsledkom za hranicou $N = 10^7$ cyklov (získané hodnoty σ_a sú nižšie), čo je negatívne zistenie predovšetkým pre materiály (súčiastky, konštrukcie), u ktorých sa predpokladá spoľahlivá bezporuchová činnosť v oblasti veľmi vysokého počtu cyklov zaťažovania.

Práca bola čiastočne podporovaná projektmi VEGA č. 1/1077/04, APVT č. 20-012804 a SK 59/2006.

LITERATÚRA

- [1] BOKŮVKA, O. et al.: *Low and High Frequency Fatigue Testing*, EDIS ŽU Žilina, 2002, 100 s.
- [2] KUNZ, L.: *Experimentální stanovení únavových charakteristik materiálů*, EDIS ŽU Žilina, 2003, 81 s.
- [3] WÖHLER, A. Z.: Bauw. 8, 642, 1858, 10, 583, 1860, 13, 233, 1863, 16, 67, 1866, 20, 74, 1870. Engineering 11, 199, 1871
- [4] Skúška na únavu STN 42 0362. Základné pojmy a značky, STN 42 0363 Metodika skúšania
- [5] ASTM E 468-90 Standard Practice for Presentation of Constant Amplitude Fatigue Test Results for Metallic Materials
- [6] STANZL-TSCHEGG, S., MAYER, H.: In. Proc. Int. Conf. Fatigue in the Very High Cycle Regime, Vienna, Austria, 2001
- [7] BATHIAS, C., PARIS, P. C.: *Gigacycle Fatigue in Mechanical Practice*. M. Dekker, N. York, 2005
- [8] ASAMI, K., HIRONAGA, M.: J. Soc. Mat. Sci., Japan, Vol. 43, 1994, p. 12
- [9] NISHIJAMA, K., KANAZAWA, K.: *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 22, 1999, p. 601
- [10] MURAKAMI, Y. et al.: *Fatigue Fract. Engng., Mater. Struct.*, 22, 1999, p. 581
- [11] PUŠKÁR, A.: *Vysokofrekvenčná únava materiálov*, EDIS ŽU Žilina, 1997
- [12] SALAMA, K., LAMERAND, R. K.: *Ultrasonic Fatigue*, Met. Soc. AIME, N. York, 1982
- [13] HADZIMA, B., PALČEK, P.: *The electrochemical characteristics of AISI 316L steel in 0.9 % NaCl*. In.: Proc. of 22nd Int. Colloquium, Czestochowa University of Technology, Poland, Czestochowa 2005, pp. 215-220
- [14] NOVÝ, F., ZÚBEROVÁ, Z., BOKŮVKA, O.: In. Proc. VII. Miedz. Konf. Naukowa, Nowe techn. i osiag. w material. i inż. materialowej, Czestochowa, PL, 2006
- [15] BURŠÁK, M., BOKŮVKA, O., MAMUŽIČ, I., MICHEL, J.: *Metalurgia* 39, 2000, s. 243
- [16] KUNZ, L., LUKÁŠ, P., SVOBODA, M., BOKŮVKA, O.: *Materials Engineering*, 12, 3, 2005, s. 2
- [17] NICOLETTO, G., BOKŮVKA, O., COLLINI, L., KOPAS, P.: *Transaction of Famena*, 29, 2005, p. 9
- [18] MAYER, H. et al.: In. Proc. Magnesium 97, Israel, 1997
- [19] VĚCHET, S., KOHOUT, J., HANZLÍKOVÁ, K.: *Communications*, 2, 2004, p. 12
- [20] WANG, Q. Y. et al.: *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 22, 1999, p. 667
- [21] BATHIAS, C.: *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 22, 1999, p. 559
- [22] STANZL-TSCHEGG, S.: *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 22, 1999, p. 567