UDK 534-8:620.178.3

Oprema in metode za ultrazvočno ugotavljanje utrujenosti kovin Equipment and Methods for Ultrasonic Fatigue Evaluation of Metals

ANTON PUŠKAR - OTOKAR BOKUVKA - GIANNI NICOLETTO - PETER PALČEK

Predstavljena je nova oprema za ultrazvočno karakterizacijo utrujenosti materialov. Z njo lahko ovrednotimo odzive materiala, ki obsegajo utrujenost zaradi velikega in majhnega števila nihajev, akumuliranje poškodb in pojavljanje razpok zaradi nihajnih obremenitev ter širjenje razpok blizu meje utrujenosti. Navedeni so rezultati, ki so bili dobljeni za različna jekla, kakor tudi ugotovitev o frekvenčni odvisnosti utrujenostnega odziva.

A new equipment for the ultrasonic fatigue characterization of materials is presented. The material responses that can be evaluated range from high-cycle fatigue to low-cycle fatigue, from damage accumulation and crack initiation due to cyclic loading to near-threshold fatigue crack propagation. Typical results obtained in different steels are presented along to an assessment of a frequency-dependent fatigue response.

0 UVOD

Preizkušanje materialov na utrujenost z uporabo ultrazvočnih frekvenc izkazuje določene prednosti, kakor so zmanjšan preizkuševalni čas, varčevanje z energijo in novo znanje o obnašanju materiala [1],[2]. Do sedaj so ga uporabljali na materialih, ki so bili obremenjeni znotraj elastičnega področja, z namenom, da ugotovijo trajne utrujenostne lastnosti. Tu se bomo ukvarjali s karakterizacijo odziva materiala v elasto-plastičnem področju, kakor ga nakazujeta nihajna napetostno-deformacijska krivulja in nizkonihajna utrujenostna krivulja ter z učinkovanjem frekvence na odziv materiala. Preizkusni spremenljivki sta temperatura in asimetrija ciklične obremenitve, za kateri vemo, da imata zato od frekvence odvisne utrujenostne lastnosti.

Običajno gradijo ultrazvočno utrujenostno preizkuševalno opremo za določanje ene lastnosti materiala (tj. trajno utrujenost in mejno utrujenost kakor ju določa Wöhlerjeva krivulja). Namen tega prispevka je predstaviti posebno opremo, ki je bila projektirana in razvita za celovito ultrazvočno utrujenostno preizkušanje (KAUP), in pokazati njene zmogljivosti pri določanju različnih lastnosti, ki so povezane z mehanskim obnašanjem materialov.

1 KRATEK OPIS SISTEMA KAUP

Slika 1 shematsko prikazuje preizkuševalni sistem. Sestavlja ga več gradnikov: pretvornika (1,1'), ojačevalnika (2,2'), vpenjala (3,3') in vzorec (4). Dolžina vsakega dela je določena po pogoju

0 INTRODUCTION

Fatigue testing of materials using ultrasonic frequencies has shown distinct advantages such as reduced testing time, energy saving, new knowledge of material behavior, [1], [2]. So far it has been performed on materials stressed within the elastic range to obtain long-life fatigue properties. The characterization of the material response in the elastic-plastic range as indicated by the cyclic stress-strain curve and the low cycle fatigue curve will be dealt with in addition to work devoted to the assessment of frequency effects on material response. Temperature and load cycle asymmetry are testing variables which are known to result in frequency-dependent fatigue properties.

Utrasonic fatigue testing equipment has been usually developed to determine a single material property (i.e. long life fatigue and fatigue limit as given by a Wöhler's curve). The aim of this paper is to present a special equipment designed and developed for complex ultrasonic fatigue (KAUP), [3], and to demonstrate its capabilities in the determination of various properties associated to the mechanical behavior of materials.

1 BRIEF DESCRIPTION OF KAUP SYSTEM

A schematic representation of the testing system is shown in Fig. 1. It is made of several components: transducers (1,1'), boosters (2,2'), concentrators (3,3') and the specimen (4). The length of each part of the system is defined on the basis of the resonance condition, i.e. it is



Sl. 1. Shematski prikaz za vsestransko preverjanje utrujenosti pri ultrazvočni frekvenci Fig. 1. Schematic representation of the equipment for complex fatigue testing at ultrasonic frequency

resonance, torej je enaka eno in polkratniku karakteristične valovne dolžine nihanja, ki je določena z razmerjem med hitrostjo zvoka v materialu in vzbujevalno frekvenco. Oblike in mere različnih gradnikov lahko izbiramo in načrtujemo z uporabo enačb iz [2]. Ustrezno načrtovanje resonantnega sistema glede na izbrano amplitudno območje vzbujevalnega nihanja zagotavlja, da so vsi gradniki ciklično obremenjeni znotraj elastičnega območja materialov, iz katerih so izdelani. Tega pogoja ni treba no upoštevati v osrednjem delu preizkušanca, kjer lahko vsilimo mikroplastične in elastoplastične deformacije, da bi se pojavila utrujenostna poškodba. Obliko in mere vzorca lahko določimo, če postopamo po [2]. O koristnih preračunih poroča vir [4].

equal to an integer and a half times the characteristic wavelength of the vibration given by the ratio between the velocity of sound in the material and the frequency of excitation. Shapes and sizes of the various components can be selected and designed using the equations given in [2]. Appropriate design of the resonant system with reference to the selected amplitude range of the exciting vibration ensures that the components are cyclically stressed well inside the elastic range of the constituent materials. This condition needs not to be respected in the central portion of the test specimen where microplastic and elastic-plastic strains can be imposed to induce fatigue damage. Shape and dimensions of the specimen can be determined following the approach of [2], while useful calculations are reported in [4].

Vzdolž osi resonančnega sistema poiščemo točki X in Y, kjer je amplituda nihanja (A na sl. 1) enaka nič: sistem lahko na teh točkah priključimo na podporno strukturo naprave. Na ultrazvočno izmenično obremenitev lahko dodamo statičen vlek, tlak ali nizkofrekvenčno nihajno obremenitev, tako da relativno premaknemo priključna mesta z mehanskimi, hidravličnimi ali elektromehanskimi napravami. Zagotovimo lahko zahtevne preizkuševalne razmere, kakor je npr. srednja obremenitev.

Sledi kratek opis naprave: pretvornik (1) je povezan z ultrazvočnim generatorjem z avtomatskim frekvenčnim uravnalnikom (5). Z generatorjem upravlja avtotransformator (6), napravo (7) pa vključimo v električno zanko, da bi lahko spremljali dejansko resonančno frekvenco.

Električni signal iz generatorja (5) vodimo na piezokeramične ploščice pretvornika (1). Ko se frekvenca električnega signala iz generatorja (5) približa resonančni frekvenci sistema, milivoltmeter (9) meri povečevanje električnega signala, ki ga ugotavlja merilno zaznavalo (8). Uglasitev generatorjeve frekvence z resonančno frekvenco sistema nastane, ko milivoltmeter (9) doseže maksimum. Potem, ko se je začelo obremenjevanje avtomatskega uravnalnika (5) prek povratne zveze, je generatorjeva frekvenca enaka resonančni frekvenci, kakor jo meri frekvenčni števec (7). Zato, da bi registrirali rablieno električno moč Pe, lahko na električno zanko pretvornika priključimo visokofrekvenčni vatmeter. Kadar komponent (1'), (2') in (3') ne uporabliamo. lahko na prosti konec preizkušanca (11) priključimo zaznavalo amplitude nihanja. Z opremo TESA (12) lahko ta premik merimo z natančnostjo 0,1 µm. Ker pa smo med električnim signalom iz (9) in amplitudo, ki jo zaznava (12), ugotovili linearno odvisnost, med preizkušanjem običajno razbiramo le odmerke milivoltmetra. Dejansko deformacijo, ki ji je izpostavljen osrednji del preizkušanca, lahko določimo z uporabo merilnega lističa (13), kompenzatorja merilnega lističa (14), visokofrekvenčnega mostička DISA (15) in selektivnega nanovoltmetra (16). Med preizkusi in teoretičnimi preračuni povečevalnega faktorja napetosti zaradi oblike in mer preizkušanca smo ugotovili dobro povezavo. Zaradi zanemarljive spremembe frekvence na začetku in koncu preizkusa (tj. 50 Hz spremembe v primerjavi z značilno 20 kHz preskusno frekvenco) lahko število nihajev posredno določimo s kronometrom(17).

Along the axis of the resonant system, locations such as X and Y are identified where the amplitude of vibration, (A in Fig. 1), is zero: the system can be connected at these points to the supporting structrure of the apparatus. Static tension, compression or low-frequency cyclic stressing can be superimposed to the ultrasonic push-pull loading by relatively displacing the attachment points with mechanical, hydraulic or electro-mechanical devices. Complex testing conditions such as a mean stress can be achieved.

A brief description of the apparatus follows: the transducer (1) is connected to the ultrasonic generator with an automatic (automotive) frequency equalizer (5). The generator is controlled by the autotransformer (6) and the device (7) is inserted in the electrical circuit to monitor the actual resonance frequency.

The electrical signal from the generator (5) is supplied to the piezo-ceramic disks of the transducer (1). When the frequency of the electrical signal from the generator (5) approaches the resonance frequency of the system, the millivoltmeter (9) measures the increase in electrical signal picked up by the amplitude sensor (8). Tuning of the generator frequency to the resonance frequency of the system is attained when the millivoltmeter (9) reaches a maximum. After starting the loading of the automatic equalizer (5) by backward-binding connection, the frequency of the generator is maintained equal to the resonance frequency of the system as measured by the frequency counter (7). The high-frequency wattmeter (10) can be connected to the electric circuit of the transducer to record the absorbed electric power, P_{e} . When the components (1'), (2') and (3') are not used, a sensor of the amplitude of vibration can be attached to the specimen free-end, (11). This displacement can be measured to an accuracy of 0,1 µm by a TESA equipment (12). However, since a linear relationship between the electrical signal of (9) and the amplitude picked up by (12) has been observed, only millivoltmeter readings are normally taken during tests. The actual strain imposed to the central portion of the specimen can be determined with a strain gauge (13), a strain gauge compensator (14) and a high frequency bridge DISA (15) and the selective nanovoltmeter (16). A good correlation between experiments and theoretical calculations of the strain magnification factor due to shape and dimensions of the specimen has been obtained. Due to the negligible frequency change between beginning and end of experiment (i.e. 50 Hz change compared to the characteristic 20 kHz testing frequency) the number of cycles elapsed can be indirectly determined with a chronometer (17).

Nad določenimi velikostmi napetosti in deformacij se osrednji del preizkušanca segreva. Preskuse pri konstantni temperaturi lahko opravljamo pri prisiljnem hlajenju preizkušanca z vodo ali metilnim alkoholom. Podobno lahko opravljamo preizkuse pri temperaturah v območju med -160 °C in 800 °C, če vstavimo osrednji del sistema v peč, v zamrzovalni element ali v posodo, pripojeno koncentratorjema (3, 3'), kjer je am-plituda nihanja A enaka nič. Če ni elementov (1'), (2') in (3'), lahko obliko vpenjala (3) spremenimo, tako da povečamo razdaljo med pretvornikom (1) in preizkušancem (4) ter preizkušanec vstavimo v izbiralni elektronski mikroskop, jedrski reaktor ali v različna druga okolja in tako odpremo različna dodatna področja uporabe sistema KAUP.

2 UPORABA SISTEMA KAUP

V tej točki predstavljamo načela, ki jih uporabljamo pri določanju različnih utrujenostnih lastnosti kovin z opremo KAUP, skupaj s tipičnimi rezultati za različna jekla. Značilnice materialov vsebujejo visokofrekvenčni utrujenostni odziv in utrujenostno mejo (združena v Wöhlerjevi krivulji) in nizkofrekvenčni utrujenostni odziv (ciklično krivuljo napetost- deformacija in Manson-Coffinovo obstojnostno krivuljo). Nadalje je raziskan razvoj utrujenostne poškodbe v odvisnosti od njenega začetka (ker je povezana z notranjim dušenjem) in njena razširitev do zloma (v obliki utrujenostnih razpok).

2.1 Wöhlerjeva krivulja

Ta vrsta informacije je koristna za izbiro materiala in za načrtovalni postopek "obremenitev - doba trajanja". Število preizkušancev, kakovost obdelane površine, preizkusne razmere itn. lahko določimo v skladu s poljubnim nacionalnim ali mednarodnim standardom. Električni signal iz (9), ki ga med preskusom zapisujemo, primerjamo z amplitudo nihanja pretvornika in z obremenitvijo na osrednjem delu preizkušanca (4), [4]. Priporočljivo je zvezno zapisovanje je dejanske resonančne frekvence frx. Določanje utrujenostne meje s preizkusno frekvenco 20 kHz ima za posledico ustavitev preizkušanja pri številu nihajev, ki je odvisno od preizkovanega materiala: pri snoveh s prostorsko centrirano kubično rešetko 108 nihajev, za ploskovno centrirano kubično rešetko in za heksagonalno gosto rešetko pa 2×10^8 nihajev.

Slika 2 prikazuje rezultate tipičnih utrujnostnih preizkusov. Material je italijansko nizkolegirano konstrukcijsko jeklo (38NiCrMo4 - UNI 5332-64), katerega kemična sestava in mehanske lastnosti so navedene v preglednicah 1 in 2. Material je bil izpostavljen naslednji toplotni obdelavi: kaljenju v olju pri 850 °C in popuščanju pri 600 °C. Gladki preizkušanci (tj. z referenčnim

Above certain stress and strain levels, the central part of the specimen heats up. Test at constant temperature can be run by forced cooling of the specimen with water or methylalcohol. Similarly, tests at temperatures ranging from -160 °C to 800 °C can be performed by inserting the central part of the system in an oven, a cryogenic element or in a vessel flanged at the concetrators (3.3') where the amplitude of the vibration, A, is zero. In the absence of elements (1'), (2') and (3'), the shape of concentrator (3) can be changed to increase the distance between transducer (1) and specimen (4) so that the specimen can be inserted into a scanning electron microscope, into a nuclear reactor or in different environments thus opening additional fields of application to the KAUP system.

2 APLICCATIONS OF KAUP SYSTEM

This part of the paper presents the principles used in the determination of various fatigue properties of metals with the KAUP equipment along with typical results on several steels. The material characteristics include both the high cycle fatigue response and the fatigue limit (summarized in the Wöhler's curve), and the low cycle fatigue response (cyclic stress-strain curve and the Manson-Coffin life curve). Furthermore the evolution of the fatigue damage is investigated in terms of its initiation (as associated to internal damping) and its propagation to failure (in the form of fatigue cracks).

2.1 Wöhler's curve

This type of information is useful for material selection and stress-life design approaches. Number of specimens, quality of surface finish, testing conditions etc. can be defined according to any national or international standard. Experimentally, the electrical signal of (9), which is recorded during the test, is correlated to the amplitude of the vibration of the transducer and to the applied stress in the central portion of the specimen (4), [4]. Continuous recording of the actual resonance frequency, f_{rx} , is recommended. Determination of the fatigue limit at a 20 kHz testing frequency involves test interruption at a number of cycles which depends on the material investigated: 10⁸ cycles are conventionally used in materials with b.c.c. lattices and 2×10^8 cycles for f.c.c. and h.c.p. lattices.

Typical fatigue test results are presented in Fig. 2. The material is an Italian lowalloy structural steel (38NiCrMo4 - UNI 5332-64) whose chemical composition and mechanical properties are reported in Tabs. 1 and 2, respectively. The material underwent the following heat treatment: quenched in oil at 850°C and tempered at 600°C. Smooth hourglass specimens (i.e. reference



Sl. 2. Primerjava utrujenostnih krivulj ugotovljenih na gladkih preizkušancih pri nizkih in visokih frekvencah

Fig. 2. Comparison of fatigue curves determined on smooth specimens tested at low and high frequencies

premerom 6 mm, s K_t = 1,05, fino brušena površina) in preizkušanci z zarezo (tj. 1 mm globoka slepa luknja s premerom 1 mm v preizkušancih) so bili izdelani iz iste šarže. Utrujenostni preizkusi so potekali pri visoki frekvenci, (tj. pri 20 kHz in 18 °C) in pri izmenični obremenitvi ($R = \sigma_{min}/\sigma_{maks} = -1$) z uporabo sistema KAUP [5], in pri nizkih frekvencah (pri izmenični obremenitvi pri 200 Hz in pri torzijskem upogibu pri 50 Hz [6]). Slika 2 prikazuje Wöhlerjevi krivulji za gladke preizkušance pri nizki frekvenci pri torzijskem upogibu in ultrazvočni izmenični obremenitvi. Slika 3 kaže Wöhlerjevi krivulji za preizkušance z zarezo, preverjene za izmenično obremenitev pri 200 in 20 kHz.

Pogled na sliko 2 kaže, da je pri ultrazvočni frekvenci meja utrujenosti za približno 24% višja kakor pri nizki frekvenci, če uporabimo do ustavitve preizkusa isto število nihajev (tj. 10^7 nihajev). Po drugi strani pa, če preizkuse pri visokih frekvencah ustavimo pri 2×10^8 nihajih (kakor smo priporočili zgoraj), je ustrezna meja utrujenosti le za 7% višja od njene nizkofrekvenčne različice. diameter 6 mm, $K_t = 1.05$, surface finishing: fine ground) and notched specimens (i.e. a 1 mm deep, 1 mm in diameter blind hole in the hourglass specimens) were machined from the same heat. Fatigue tests were run at high frequency (i.e. 20 kHz at 18 °C) and in push-pull ($R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ = = -1) using KAUP, [5], and at low frequencies (in push-pull at 200 Hz and in rotating bending at 50 Hz [6]). The Wöhler's curves for smooth specimens tested at low frequency in rotating bending and ultrasonic push-pull are shown in Figure 2. The Wöhler's curves for the notched specimens tested in push-pull at 200 and 20 kHz are shown in Figure 3.

Inspection of Figure 2 shows that at ultrasonic frequency the fatigue limit is approx. 24% higher than at low frequency if the same number of cycles to test interruption (i.e. 10^7 cycles) is used. On the other hand if tests at high frequency are interrupted at 2×10^8 (as previously recommended), the corresponding fatigue limit is only 7% higher than its low-frequency counterpart.

Jeklo Steel	С	Ni	Cr	Mo	Mn	Si	Р	Al
38NiCrMo4	0,42	0,83	0,92	0,14	0,8	0,38	21.5	HM S
Želez. tirnica A Rail steel A	0,78	of Stype	1,1	insega	1,25	0.7	0,15	dat
Želez. tirnica B Rail steel B	0,55	til ata	erestov	2010	0,75	0.15	max.	thent
Želez. tirnica B Rail steel B	0,80				1,40	0,50	0.05	
Jeklo za prirobnice Fitting steel	0,1	0,08	0,09	inte	1,45	0.31	0,019	0,08
		1					the second second	

Preglednica 1: Kemična sestava jekel (v utežnih odstotkih) Table 1: Chemical compositions of steels (in weight percent)

Preglednica 2: Mehanske lastnosti jekel Table 2: Mechanical properties of steels

Jeklo	R	Rs	A5	Z	KCV	
Steel	MPa	MPa	%	%	J/mm ²	
38NiCrMo4	980	750	14	of metals	75	
Želez. tirnica A Rail steel A	min. 1079	i Vidadre oskor Ud ¹	min. 6	ar	lano (noise noise	
Želez. tirnica B Rail steel B	min. 935	ev do zio	min. 9	ed in the N se ruligation	Chier's ci levelie st	
Jeklo za prirobnice Fitting steel	464	Vadalije je	39	71.8	158,8	



in visokih frekvencah Fig. 3. Comparison of fatigue curves determined on notched specimens tested at low and high frequencies

Pogled na sliko 3 kaže, da je meja utrujenosti vzorcev z zarezo pri 20 kHz za 5,6% višja kakor pri 200 Hz. Ta dejstva nakazujejo, da ustrezno izvedeno ultrazvočno preizkušanje utrujenosti lahko uporabimo kot hitro in učinkovito tehniko za določanje meje utrujenosti. Nagibi področij končne dobe trajanja na obeh slikah nakazujejo različne odzive pri visokih in nizkih frekvencah, pri čemer se največja razlika pojavlja pri preizkušancih z zarezo.

2.2 Nihajni diagram napetost - raztezek

Kadar nas zanima elastično-plastična utrujenost, je treba podati več zasnov in definicij. V [7] je pokazano, da lahko vrednost amplitude plastičnega raztezka ε_{ap} in amplitude napetosti σ_{a} določimo iz amplitude celotnega raztezka ε_{at} , iz spremembe elastičnega modula dE/E in samega elastičnega modula E kakor izhaja iz naslednjih obrazcev:

Inspection of Figure 3 shows that the fatigue limit of the notched specimens at 20 kHz is 5,6 % higher than at 200 Hz. This evidence suggests that properly conducted ultrasonic fatigue testing could be used as a quick and efficient technique for fatigue limit determination. The slopes of the finite life regions in both Figures indicate different responses at high and low frequencies with the greatest difference observed in the notched specimens.

2.2 Cyclic stress strain curve

When the elastic-plastic fatigue response is concerned, several concepts and definitions need to be given. It has been shown in [7] that the value of the plastic strain amplitude, ε_{ap} , and of the stress amplitude, σ_a , can be determined from the total strain amplitude, ε_{at} from the change in modulus of elasticity dE/E, and from the modulus of elasticity E, itself as follows:

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon_{at} \frac{dE}{E}$$
 (1).

$$\sigma_a = E \varepsilon_{at} \left(1 - \frac{dE}{E} \right) \tag{2}$$

Vrednost dE/E za različne σ_a lahko določimo iz zveznega zapisa dejanske resonančne frekvence sistema f_{ro} na začetku in f_{rx} med preizkusom. Lahko dokažemo, da velja:

The value of dE/E at different σ_{a} can be determined from the continuous recording of the actual resonance frequency of the system at the beginning, f_{ro} , and during the test, f_{rx} . It can be demonstrated that.

The actual values of f_{ro} and f_{rx} are affected

The σ_a and ε_{ap} at half life (i.e. $N_f/2$) as

ed to the treshold $\approx (5)$,

also by changes in temperature and magnetic field

in ferro-magnetic materials. These factors must be accounted for in the evaluation of the modulus

obtained with different specimens can be related

$$\frac{E_{do}}{(r_o)^2} = -\frac{E_{dx}}{(f_{rx})^2}$$
(3)

and

$$\frac{dE}{E} = \frac{E_{do} - E_{dx}}{E_{do}}$$
(4)

of elasticity and its variations.

using the form:

Na dejanske vrednosti f_{ro} in f_{rx} vplivajo tudi spremembe temperature in magnetnega polja v feromagnetnih materialih. Te dejavnike je treba upoštevati pri izračunu elastičnega modula in njegovih spreminjanj.

an increase in applied atreases and strains that

Tedaj lahko povežemo σ_a in ε_{ap} pri polovični dobi trajanja (tj. pri Nf/2), kakor smo ju bili ugotovili z uporabo različnih vzorcev, z naslednjim obrazcem:

$$\sigma_a = K(\varepsilon_{ap})^{n'}$$

kjer sta K koeficient nihajne trdnosti in n' eksponent nihajnega utrjanja.

where K is the cyclic strength coefficient and n'the cyclic hardening exponent.

2.3 Manson-Coffinova predstavitev utrujenostne dobe trajanja

Podatke, ki jih dobimo iz rešitve enačb (1) in (2), lahko uporabimo pri Manson-Coffinovi formulaciji utrujenostne dobe trajanja:

$$\sigma_{a} = \sigma'_{f} (2N_{f})^{b}$$
(6),

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_{f} (2N_{f})^{c}$$
(7),

kjer so: d'f - koeficient utrujenostne napetosti, ki ga dobimo z ekstrapoliranjem utrujenostne krivulje do prvega polovičnega nihaja, b - eksponent utrujenostne krivulje, 2'r - utrujenostni žilavostni koeficient, ki ga dobimo z ekstrapolacijo do prvega polovičnega nihaja, c - eksponent utrujenostne krivulje po enačbi (7).

Prvi avtor je posredoval novo enačbo za ovrednotenje utrujenostne dobe trajanja, ki se glasi:

E

Eat

kjer so P parameter utrujenostne poškodbe, $H_{\mathbf{x}}$ koeficient kopičenja utrujenostne poškodbe, ki je podan z ekstrapolacijo do prvega polovičnega nihaja in $H_x = \sigma'_f / (E_{dx} \varepsilon'_f)$, mali h pomeni eksponent kopičenja utrujenostne poškodbe. Uporaba sistema KAUP in te metode analize omogočata celoten utrujenostni opis materiala v malonihajnem režimu.

2.4 Notranje dušenje in sprememba elastičnega modula

Ker se notranje dušenje hitro zvečuje s povečevanjem delujočih napetosti in deformacij [9], ne moremo uporabiti opreme za merjenje notranjega dušenja v materialih, ki so obremenjeni precej pod mejo utrujenosti (tj. VTP-A [10]). Po drugi strani pa sistem KAUP, ki sloni na energetskem načelu, omogoča, da določimo notranje dušenje v materialu, ki ga preizkušamo visoko nad mejo utrujenosti. Zmogljivost P_s je določena z energijo, ki jo dovajamo sistemu, in ki jo merimo z visokofrekvenčnim vatmetrom (10). Vatmeter (10) lahko registrira vzbujano električno zmogljivost Pe s pretvornikom (1'). Tedaj je notranje dušenje določeno z:

in

2.3 Manson-Coffin fatigue lifetime representation

Data obtained by solving Eqs. (1) and (2) can also be used in the Manson-Coffin formulation of the fatigue lifetime:

$$\sigma_{a} = \sigma'_{f} (2N_{f})^{b}$$
(6),

$$\varepsilon_{ap} = \varepsilon'_{f} (2N_{f})^{c}$$
(7),

where σ_f is the fatigue strength coefficient obtained by extrapolating the fatigue curve to the first half cycle, b is the exponent of the fatigue curve, ε'_{f} is the fatigue ductility coeficient obtained by extrapolation to the first half cycle and c is the exponent of the fatigue curve given by equation (7).

The first author submitted a new equation for the evaluation of the fatigue lifetime in the form:

$$\frac{\varepsilon_{at}}{\varepsilon_{ap}} = \frac{E}{dE} = P = H_X (2N_f)^h \tag{8},$$

where P is the fatigue damage parameter, $H_{\rm x}$ is a fatigue damage accumulation coefficient given by the extrapolation to the first half cycle and $H_x = \sigma'_{\epsilon} / (E_{dx} \epsilon'_{f})$ while h is the fatigue damage accumulation exponent. Use of the KAUP and of this method of analysis allows the complete fatigue characterization of a material in the low-cycle regime.

2.4 Internal damping and the change in modulus of elasticity

Since internal damping rapidly increases with an increase in applied stresses and strains [9], equipment for measuring internal damping in materials stressed well bellow the fatigue limit (i.e. VTP-A [10]) cannot be used. On the other hand, the KAUP system which is based on the energy principle, makes it possible to determine internal damping in a material tested well above the fatigue limit. The performance P_s is determined from the power supplied to the system measured by the high frequency wattmeter (10). The wattmeter (10) can record the excited electrical performance P_e with the transducer (1'). Then the internal damping is given as:

$$\frac{1}{\pi} = \frac{\delta}{\pi} = \frac{\Psi}{2\pi}$$
(9)
and

$$\Psi = \frac{P_s - P_e}{W f_{rw}}$$

Q-

(10),

Qali logaritmični pojemek nihanja δ ali relativno razsipano energijo Y materiala dobimo iz merjenja teh veličin.

kjer je: soone candi lo se edi la s

Enačba (3) kaže postopek za določanje trenutnega elastičnega modula. Spremembo elastičnega modula dE/E lahko določimo po obrazcu:

 $E_{dx} \varepsilon_a^2$ and the element of the ending of the ending of the end of the W = W stics are river in Tabell and 3 storage it with

2

 Q^{-1} or the logarithmic decrement of vibration, δ , or the relative dissipated energy, Ψ , of the material are obtained from the measurement of these characteristics.

(11)ae'r preuladniosh Lin 2, smo preiz

(12), določitev naslednjih mi

where: a called and det eddaodt inscritte

Eq. (3) shows a method for the determination of the actual dynamic modulus of elasticity. The change in modulus of elasticity dE/E can be obtained as follows:

$$\frac{dE}{E} = M \frac{\left| f_{ro}^2 - f_{rx}^2 \right|}{f_{ro}^2}$$
(12),

kjer je M faktor, ki je povezan z dinamičnim obnašanjem mase resonančnega sistema, in ga lahko izločimo z uporabo enačbe (3).

2.5 Začetek utrujenostne poškodbe

Električni signal iz zaznaval (8, 8') ne vsebuje zgolj podatkov o osnovni frekvenci, temveč tudi o višjih harmonskih frekvencah, posebej, če se v osrednjem delu preizkušanca pojavljajo mikroplastične deformacije. Če je izločevalni nanovoltmeter (16) priključen na milivoltmeter (9), je mogoče določiti razmerje med amplitudo kakšne višje harmonske komponente Ah in amplitude osnovne komponente A_o . Odvisnost $\log (A_h/A_o)$ od logoa lahko odkrije začetek mikroplastične deformacije v materialu med preizkusom.

2.6 Velikost razširjanja utrujenostne razpoke

Resonančna frekvenca sistema se spreminja s površino prereza vzorca. Kadar preizkušamo prizmatičen vzorec z razpoko znane oblike (tj. po debelini) in znanih mer z znano amplitudo obremenitve, je iz K-kalibracije mogoče določiti ΔK (tj. $\Delta K = (K_{\text{maks}} - K_{\text{min}})$, če je $K_{\text{min}} > 0$ ali $\Delta K = K_{\text{maks}}$, če je $K_{\text{min}} \leq 0$). Nepretrgano zapisovanje f_r in odvisnosti med resonančno frekvenco in dolžino razpoke, ki je bila določena vnaprej, omogoča, da določimo stopnjo širjenja razpoke pri danem ΔK . Tovrstne podatke lahko uporabimo za določitev parametrov Paris-Erdoganovega razmerja, ki velja pri srednjih stopnjah širjenja, kakor tudi vrednosti blizu meje, ki so povezane z močnostnim faktorjem mejne obremenitve ΔK_{th} , ki določa pogoje neširjenja razpok. Preizkuse te vrste lahko izpeljemo za različna razmerja R, če uporabimo KAUP.

where M is a factor related to the dynamic behaviour of the mass of resonating system and can be eliminated using eq. (3).

2.5 Fatigue damage initiation

The electrical signal from sensors (8, 8') contains not only the basic frequency information but also higher harmonic frequencies, especially when in the central part of the specimen some microplastic deformation occurs. When a selective nanovoltmeter (16) is connected to the millivoltmeter (9) it is possible to determine the ratio between the amplitude of some higher harmonic amplitude A_h and the basic frequency amplitude A_o . The dependence of the $log(A_h/A_o)$ from the logo, can reveal the microplastic deformation initiation in the material during the test.

2.6 Fatigue crack propagation rates

The resonance frequency of the system changes with specimen cross-section. When a prismatic specimen with a crack of known shape (i.e. through-the-thickness) and dimensions is tested under a known stress amplitude, it is possible to determine the applied ΔK (i.e. ΔK = $(K_{max} - K_{min})$ if $K_{min} > 0$ or $\Delta K = K_{max}$ if K_{min} \leq 0) from a K - calibration. The continuous recording of f_r and the correlation between resonance frequency and crack length determined apriori allows the determination of the crack growth rate at a given ΔK . Data of this type can be used to determine the parameters of the Paris-Erdogan relationship which holds at intermediate growth rates as well as the near threshold values associated to the treshold stress intensity factor, ΔK_{th} , which defines the conditions for nonpropagation of cracks. Tests of this type can be determined a different R-ratia using KAUP.

Primeri uporabe teh postopkov so predstavljeni na slikah 4 in 5. Jekli za železniški tirnici, katerih kemična sestava in mehanske lastnosti so podane v preglednicah 1 in 2, smo preizkusili z izmenično obremenitvijo (R = -1) pri 20 kHz in pri 18 °C [12]. S sistemom smo brez težav dosegli stopnje rasti razpoke do 10^{-13} m/nihaj. Prikazane so kot funkcija uporabljenega ΔK na sliki 4. Nelinearno prilagajanje modificiranega Paris-Erdoganovega razmerja: Examples of the use of these procedures are now presented in Figs. 4 and 5. Two rail steels whose chemical compositions and mechanical properties are given in Tabs. 1 and 2, respecitvely, were tested in push-pull (R=-1) at 20 kHz and at 18° C, [12]. Crack growth rates down to 10^{-13} m/cycle were readily achieved with the system and are shown as a function of the applied ΔK in fig. 4. Nonlinear fitting of a modified Paris-Erdogan relationship:

$$\frac{da}{dN} = C \left(\Delta K - \Delta K_{th}\right)^n \tag{13}$$

omogoča določitev naslednjih mejnih vrednosti: jeklo A: $\Delta K_{th} = 2,80$ MPa \sqrt{m} in jeklo B: $\Delta K_{th} = 3,62$ MPa \sqrt{m} . allowed the determination of the following threshold values: Steel A: $\Delta K_{th} = 2.80 \text{ MP } \sqrt{\text{m}}$ and Steel B: $\Delta K_{th} = 3.62 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$.



Sl. 4. Krivulje rasti utrujenostne razpoke za železniški tirnici, preizkušeni pri ultrazvočni frekvenci Fig. 4. Fatigue crack growth curves for two rail steels tested at ultrasonic frequency

Stopnje širjenja razpoke v analognih razmerah, vendar do velikosti 10^{-11} m/nihaj smo določili pri dveh preizkusnih temperaturah za jeklo, ki je namenjeno za plinovodne prirobnice. Pokazane so na sliki 5. O kemičnih in mehanskih lastnostih tega materiala govorita preglednici 1 in 2. Prilagajanje enačbe (13) podatkom s slike 5 je dalo $\Delta K_{th} = 4,83$ MPa \sqrt{m} pri 20 °C in $\Delta K_{th} =$ = 3,46 MPa \sqrt{m} pri 350 °C. Crack growth rates in analogous conditions, but only down to 10^{-11} m/cycle were determined at two test temperatures in a steel designed for gas-line fittings and are presented in Fig. 5. Chemical composition and mechanical properties of this material are also reported in Tabs. 1 and 2, respectively. Fitting of Eq. (13) to the data of Figure 5 yielded $\Delta K_{th} = 4.83$ MPa \sqrt{m} at 20 °C and $\Delta K_{th} = 3.46$ MPa \sqrt{m} at 350 °C.



Sl. 5. Krivulje širjenja utrujenostne razpoke za jeklo, preizkušeno pri dveh temperaturah in ultrazvočni frekvenci

Fig. 5. Fatigue crack growth curves for a steel tested at two temperatures and at ultrasonic frequency

2.7 Preverjanje na utrujenost s simetričnim upogibom

Če premestimo preizkušanec (4) na prosti konec resonančnega sistema, ga lahko izpostavimo 20 kHz upogibnemu nihanju. Dolžina preizkušanca je celo in polkratnik valovne dolžine upogibnega nihanja. Pred preskusom moramo kalibrirati signal,

2.7 Fatigue testing under symmetric bending

A 20 kHz bending vibration can be applied to a prismatic specimen when the specimen (4) is replaced at the free end of the resonant system. The length of the specimen is an integer and a half times the wavelength of the bending vibration. Prior to testing, a calibration of the signal ki ga snemamo z milivoltmetra in ugotoviti največjo obremenitev na zunanjem vlaknu preizkušanca. Določanje Wöhlerjeve krivulje pri izmeničnem upogibu je posebej koristno za vrednotenje oplaščenih ali površinsko utrjenih materialov.

3 SKLEP

Nova oprema za vsestransko ultrazvočno utrujenostno preizkušanje različnih materialov v različnih razmerah in v tem prispevku predstavljene metode omogočajo ugotoviti: utrujenostne krivulje Wöhler-jeve vrste pri izmeničnem in nasprotnem upogibu, nihajne napetostno-deformacijske in malonihajne utrujenostne krivulje kakor tudi nove opredelitve za istovetenje utrujenostnih poškodb na temelju notranjega dušenja in sprememb elastičnega modula materiala. Na področju mehanike loma smo prikazali določanje stopenj širjenja utrujenostne razpoke in obseg močnostnega faktorja mejne obremenitve ΔK_{th} . Vse te podatke lahko dobimo ob srednjih obremenitvah z uporabo sistema KAUP. picked up by the millivoltmeter and the maximum stress on the outer fibre of the specimen should be obtained. The determination of a Wöhler's curve in reversed bending is especially useful for the evaluation of coated or surface-hardened materials.

3 CONCLUSION

A new equipment for complex ultrasonic fatigue testing of different materials under different conditions and the methods presented in this paper give the opportunity to evaluate: Wöhler-type fatigue curves in push-pull and reversed bending, cyclic stress-strain low-cycle fatigue curves, as well as and as well as new formulations for the identification of the initiation of fatigue damage based on internal damping and elasticity modulus variations of the material. In the field of fracture mechanics, the determination of the fatigue crack growth rates and the threshold stress intensity factor range ΔK_{th} have been demonstrated. All these information can be determined in the presence of a mean stress using the KAUP apparatus.

4 LITRATURA

4 REFERENCES

Proc. 1st Int. Conf. on Fatigue and Corrosion Up to Ultrasonic Frequency, Met. Soc. AIME, New York, 1982.
 Puškar, A.: The Use of High Intensity Ultrasonics, Elsevier, Amsterdam, 1982.

[3] Puškar, A.: Equipmentfor Complex Acoustic FatigueTesting, CzechoslovakPat 3362/90 (v slovaščini – in Slovak).

[4] Salama, K., R.K. Lamerand: Ultrasonic Fatigue, Met. Soc. AIME, New York, 1982, 109.

[5] Bokuvka, O., G. Nicoletto, A. Puškar, P. Palček: High frequency fatigue testing, Steel 38NiCrMo4, VSDS, Žilina, Tech. Rep. 1/91, 1991 (v češčini- in Czech).

[6] Nicoletto G.: neobjavljeni rezultati-unpublished results, 1991.

[7] Puškar, A.: Ultrasonics, London, maj 1982, 118.

[8] Puškar, A.: v Proc. of 10th Congress on Material Testing, GTE Budapest, 1991, 544.

[9] Puškar, A.: Microplasticity and Failure of Metallic Materials, Elsevier, Amsterdam, 1988.

[10] Puškar, A., P. Palček, P. Houba: Equipment for Shortening and High Accuracy Complex Acoustic Fatigue Testing Czechoslovak Pat. 3362/90 (v slovaščini - in Slovak).

[11] Puškar A., O. Bokuvka: Kov. mater., Vol. 17, No. 5, str. 570 (v slovaščini – in Slovak).

[12] Bokuvka O., G. Nicoletto: Fatigue Characterization of Rail Steels by Fracture Mechanics. Proc. 4th Int. Conf. Railways Vehicles, High Tatras, CSFR, 1991.

[13] Bokuvka O., A. Puškar, P. Palček, J. Mesko: Near-threshold fatigue crack growth in construction steels in Proc. 10th Congress on Material Teasting, GTE, Budapest, 1991, 499.

Naslova avtorjev: Aurhors' Addresses:

prof. dr. in dr. h.c. Anton Puškar, dipl. inž. s: doc. Otokar Bokuvka, dipl. inž. doc. Peter Palček, dipl. inž. Strojnicka fakulta, Vel' ky Diel, 01206 Žilina, Slovaška republika

Prof.Dr. Gianni Nicoletto. Dipl. ing. Universita degli studi di Parma Dipartimento di Ingegneria Industriale Viale delle Scienze, 43100 Parma, Italija