

Măsurători de histereză, temperatură și rezistență pentru caracterizarea comportării metalelor la oboseală

Hysteresis, temperature and resistance measurements for the characterisation of the fatigue behaviour of metals

P. Starke, F. Walther, D. Eifler

University of Kaiserslautern, Institute of Materials Science and Engineering, Germany

Cuvinte cheie

Măsurători ale histerezei tensiune-deformație mecanică, măsurători ale temperaturii și rezistenței electrice, comportamentul la oboseală, calculul duratei la oboseală, încărcarea în serviciu, metale, microstructură.

Keywords

Mechanical stress-strain hysteresis measurements, Temperature and electrical resistance measurements, Fatigue behaviour, Fatigue life calculation, Service loading, Metals, Microstructure

1. Introducere

Calcularele credibile ale duratei la oboseală necesită cunoașterea aprofundată a comportării la oboseală și a mecanismelor fundamentale de oboseală. În această cercetare, pentru o evaluare detaliată a răspunsului materialului la încărcarea ciclică, au fost luate în considerare amplitudinea deformării plastice [1] determinate în măsurătorile de histereză tensiune-deformație, cât și schimbările induse de deformație în temperatură, datorită energiei disipate [2-4] și în rezistența electrică [5-7]. Procesele ciclice de înmuiere și călire influențează densitatea de defecte și ulterior rezistența electrică specifică într-o manieră caracteristică. Toate valorile măsurate depind de modificările la nivel de microstructură cauzate de deformarea plastică ciclică și reprezintă în egală măsură starea de oboseală reală. În particular, pentru condițiile care conduc la deformări plastice ușoare sub încărcare ciclică, realizarea măsurătorilor de înaltă precizie ale temperaturii și ale rezistenței electrice aduce informații adiționale utile despre comportarea efectivă la oboseală. În plus, datele despre oboseala mecanică, termică și electrică menționate anterior pot fi utilizate ca parametri de intrare pentru metoda "PHYBAL" de calcul a duratei de oboseală, bazată pe ecuațiile generalizate ale lui Morrow [8] și Basquin [9].

2. Material

Tratamentul de încălzire al oțelului SAE 4140 (42CrMo4) constă în austenitizarea la 840°C și călirea în ulei, urmată de durificarea la 550°C pentru 120 min. Compoziția chimică corespunde la DIN-EN 10083-1 [10]. Tabelul 1 rezumă proprietățile monotone selectate ale stării materialului studiat.

În imaginile microstructurilor obținute de la microscopie electronică cu scanare (SEM) și cu transmisie (TEM) carburile fin dispersate de Fe₃C sunt localizate la limitele de grăunți și în interiorul feritei din grăunți (figura 1).

3. Montaj experimental

Pentru măsurarea amplitudinii deformației plastice $\varepsilon_{a,p}$ determinate în ciclurile de histereză tensiune-deformație mecanică a

1. Introduction

Reliable fatigue life calculations require the comprehensive knowledge of the fatigue behaviour and the underlying fatigue mechanisms. In this investigation, for the detailed evaluation of the material response to cyclic loading the plastic strain amplitude [1] determined in stress-strain hysteresis measurements as well as the deformation-induced changes in temperature due to dissipated energy [2-4] and in electrical resistance [5-7] were considered. Cyclic softening and hardening processes influence the defect density and subsequently the specific electrical resistance in a characteristic manner. All measured values depend on microstructural changes caused by cyclic plastic deformation and represent the actual fatigue state in equal manner. In particular for loading and material conditions leading to slight plastic deformation under cyclic loading, the application of high-precision temperature and electrical resistance measurements yield additional helpful information about the effective fatigue behaviour. Furthermore, the above mentioned mechanical, thermal and electrical fatigue data can be used as input parameters for the physically based fatigue life calculation method "PHYBAL" on the basis of generalised Morrow [8] and Basquin [9] equations.

2. Material

The heat treatment of the SAE 4140 (42CrMo4) steel consists of austenising at 840°C and quenching in oil, followed by tempering at 550°C for 120 min. The chemical composition corresponds to DIN-EN 10083-1 [10]. Table 1 summarises selected monotonic properties of the investigated material condition.

In scanning (SEM) and transmission electron (TEM) micrographs fine dispersed Fe₃C carbides are located at the boundaries and inside the ferrite of the grains (Figure 1).

3. Experimental Setup

For the measurement of the plastic strain amplitude $\varepsilon_{a,p}$, determined in mechanical stress-strain hysteresis loops, an

Comportare la oboseală

fost utilizat un extensometru. Variația temperaturii ΔT a fost măsurată cu un termocuplu la mijlocul lungimii de măsurat (T_1) și două termocupluri (T_2 și T_3) la axele montate pe suportul elastic.

Table 1: Proprietăți monotone

Limita de curgere	Rp0.2	[MPa]	960
Rezistența la tracțiune	Rm	[MPa]	1051
Raportul limita de curgere la rezistența la tracțiune	Rp0.2/Rm		0.92
Deformația la rupere	A5	[%]	16
Gătuirea	Z	[%]	55

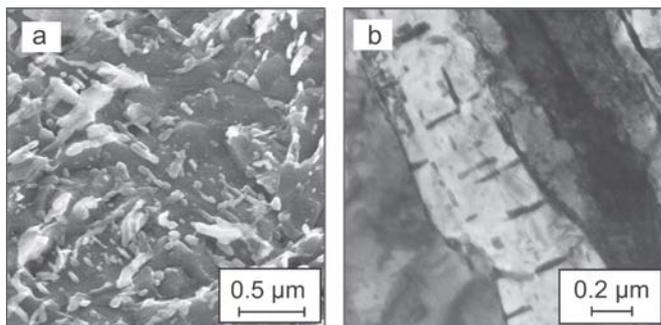


Figura 1. Microstructuri SEM (a) și TEM (b)/
Figure 1. SEM (a) and TEM (b) micrographs

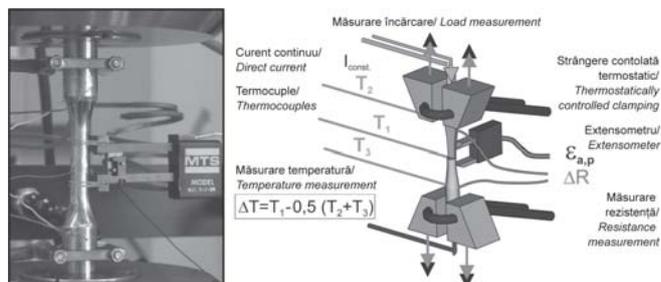


Figura 2. Montaj experimental/
Figure 2. Experimental setup

Pentru măsurarea rezistenței electrice a fost fixată câte o sursă de curent continuu la ambele axe iar ΔR a fost măsurată cu două fire sudate prin puncte la separarea dintre lungimea de măsurat și axe (figura 2), cf. [10-12].

Valorile măsurate $\epsilon_{a,p}$, ΔT și ΔR sunt reprezentate în funcție de numărul de cicluri N pe curba deformației ciclice, a temperaturii și a rezistenței electrice pentru a caracteriza comportarea la oboseală datorată încărcării cu amplitudine constantă.

Testele de oboseală sub tensiune axială controlată au fost efectuate la temperatură ambientală cu o frecvență de $f = 5$ Hz pe sisteme de testare servohidraulice. În testele cu creșterea încărcăturii (LIT) și în cele cu amplitudinea constantă (CAT) s-au utilizat un raport de încărcare $R = -1$ și funcții triunghiulare încărcare-timp.

Pentru testele cu încărcare în serviciu (SLT) s-au aplicat spectrul lateral [13-14] de încărcare Carlos (standardul pentru încărcarea vagoanelor) preluat din industria automobilelor, cât și o nouă procedură de test [10-11], dezvoltată la Institutul de Știința Materialelor și Inginerie de la Universitatea din Kaiserslautern (figura 3). În spectrul de încărcare Carlos [13-14] au fost introduse periodic secvențe scurte de măsurare cu o

extensometer was used. The change in temperature ΔT was measured with one thermocouple in the middle of the specimen gauge length (T_1) and two thermocouples (T_2 and T_3) at the elastically loaded specimen shafts. For electrical resistance measurements a DC-power supply was fixed at both specimen shafts and ΔR was measured with two wires spot welded at the transition of the gauge length and the shafts (Figure 2), cf. [10-12].

Table 1: Monotonic properties

Yield strength	Rp0.2	[MPa]	960
Tensile strength	Rm	[MPa]	1051
Yield to tensile strength ratio	Rp0.2/Rm		0.92
Ultimate strain	A5	[%]	16
Reduction in area	Z	[%]	55

The measured values $\epsilon_{a,p}$, ΔT and ΔR are plotted versus the number of cycles N in cyclic deformation, temperature and electrical resistance curve to characterise the fatigue behaviour under constant amplitude loading.

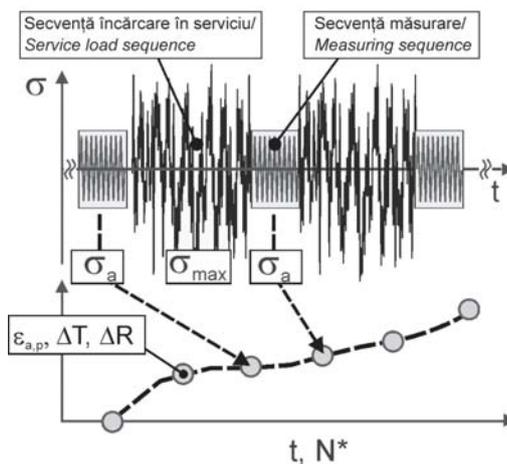


Figura 3. Schema pentru testele cu încărcare în serviciu/
Figure 3. Test scheme for service load tests, schematic

Axial stress-controlled fatigue tests were performed at ambient temperature with a frequency of $f = 5$ Hz on servohydraulic testing systems. In load increase tests (LITs) and constant amplitude tests (CATs) a load ratio of $R = -1$ and triangular load-time functions were used. For service load tests (SLTs) the standardised Carlos (Car loading standard) lateral [13-14] load spectrum from automotive industry and a new test procedure [10-11], developed at the Institute of Materials Science and Engineering at the University of Kaiserslautern, was applied (Figure 3). Short measuring sequences with a stress amplitude σ_a of about 80 % of the endurance limit of the material condition investigated were periodically inserted into the Carlos [13-14] load spectrum.

The average $\epsilon_{a,p}$, ΔT and ΔR values of each constant amplitude (measuring) sequence are plotted as function of the number of cycles N^* in cyclic curves, similarly as commonly practised for constant amplitude tests. Consequently, the fatigue behaviour and the proceeding fatigue damage under service loading can be described and evaluated on the basis of cyclic deformation ($\epsilon_{a,p}-N^*$), temperature ($\Delta T-N^*$) and electrical resistance ($\Delta R-N^*$) curves. The short constant amplitude

amplitudine a tensiunii σ_a de aproximativ 80% din limita de rezistență a stării materialului studiat

Valorile mediei $\varepsilon_{a,p}$, ΔT și ΔR pentru fiecare secvență (de măsurare) de amplitudine constantă sunt reprezentate ca funcții ale numărului de cicluri N^* în curbele ciclice, la fel cum se procedează în testele cu amplitudine constantă. În consecință, comportarea la oboseală și deteriorările provocate de oboseală în urma încărcării cu sarcina pot fi descrise și evaluate pe baza curbelor deformației ciclice ($\varepsilon_{a,p}-N^*$), ale temperaturii ($\Delta T-N^*$) și ale rezistenței electrice ($\Delta R-N^*$). Secvențele scurte de amplitudine constantă cu o porțiune a spectrului de încărcare de aproximativ 6% sunt incluse în N^* . S-a dovedit că inserarea secvențelor de amplitudine constantă nu cauzează deteriorări de oboseală suplimentare.

4. Rezultate

4.1. Comportarea la oboseală la încărcarea cu amplitudine constantă și la încărcarea în serviciu

Din testele cu amplitudine constantă, unde tensiunea are amplitudinea $520 \text{ MPa} \leq \sigma_a \leq 660 \text{ MPa}$ rezultă un număr de cicluri până la cedare N_f între $3,9 \cdot 10^4$ și $1,4 \cdot 10^6$. O amplitudine a tensiunii de $\sigma_a = 490 \text{ MPa}$ duce la $2 \cdot 10^6$ cicluri fără cedare. Curbele deformației ciclice (a), ale temperaturii (b) și rezistenței electrice din figura 4 arată o înmuiere ciclică continuă până la cedare. Acestea subliniază faptul că schimbările induse de deformație în temperatură și în rezistența electrică pot fi utilizate în mod echivalent pentru caracterizarea detaliată a oboselii ca măsurători aplicate convențional ale amplitudinii deformației plastice [10-12]. Cu creșterea amplitudinii tensiunii, cresc și valorile $\varepsilon_{a,p}$, ΔT și ΔR iar durata de funcționare N_f scade.

Curbele deformație ciclică (a), temperatură (b) și rezistență electrică (c) pentru încărcarea în serviciu cu spectrul de încărcare standardizat Carlos lateral sunt reprezentate în Figura 5. Tensiunea maximă σ_{\max} a variat între 900 și 1050 MPa. În secvențele inserate periodic de amplitudine constantă amplitudinea tensiunii $\sigma_a = 400 \text{ MPa}$ a fost utilizată pentru măsurarea $\varepsilon_{a,p}$, ΔT și ΔR .

Prin creșterea tensiunii maxime, amplitudinea deformației plastice, temperatura și rezistența electrică cresc mai devreme și ating valori maxime mai mari. În consecință, durata la oboseală scade. La fel ca la încărcarea cu amplitudine constantă, comportarea la oboseală la încărcarea în serviciu se caracterizează printr-o înmuiere ciclică consistentă. Testul încărcării în serviciu (SLT) cu $\sigma_{\max} = 900 \text{ MPa}$ s-a oprit fără cedare după $2 \cdot 10^6$ cicluri, adică 20 de repetări ale spectrului Carlos.

4.2. Calculul duratei la oboseală la încărcarea cu amplitudine constantă și la încărcarea cu sarcină

Pentru estimarea rezistenței la oboseală cu un singur specimen, s-au realizat teste de creștere a încărcării (LIT) începând de la o amplitudine inițială a tensiunii de $\sigma_{a,\text{start}} = 100 \text{ MPa}$, mărită în trepte de $\Delta\sigma_a = 20 \text{ MPa}$ la fiecare $\Delta N = 9 \cdot 10^3$ cicluri.

În LIT panta curbei DR-N variază de la o creștere liniară la una exponențială până la $\sigma_{a,\text{LIT}} = 480 \text{ MPa}$. Astfel, această amplitudine a tensiunii care duce la o schimbare a pantei valorilor răspunsului materialului, poate fi folosită ca o primă estimare a limitei de rezistență la oboseală [2]. Eroarea apare în nivelul de încărcare $\sigma_a = 680 \text{ MPa}$. În comparație cu limita de rezistență la oboseală $\sigma_{a,\text{CAT}} = 490 \text{ MPa}$ determinată în testele cu amplitudine constantă (CAT) până la $N = 2 \cdot 10^6$ cicluri (figura 4), există un factor excelent de conformitate $\sigma_{a,\text{LIT}}$ împărțit la $\sigma_{a,\text{CAT}}$ cu 98 %. Trebuie

sequences with a portion of the load spectrum of about 6 % are included in N^* . It was proved that the insertion of the constant amplitude sequences do not cause any additional fatigue damage.

4. Results

4.1. Fatigue behaviour under constant amplitude loading and service loading

Constant amplitude tests with stress amplitudes $520 \text{ MPa} \leq \sigma_a \leq 660 \text{ MPa}$ result in numbers of cycles to failure N_f between $3.9 \cdot 10^4$ and $1.4 \cdot 10^6$. The stress amplitude $\sigma_a = 490 \text{ MPa}$ leads to $2 \cdot 10^6$ cycles without failure. The cyclic deformation (a), temperature (b) and electrical resistance (c) curves in Figure 4 show continuous cyclic softening until failure and underline that deformation-induced changes in temperature and electrical resistance can be equivalently used for detailed fatigue characterisation as conventionally applied plastic strain amplitude measurements, cf. [10-12]. With increasing stress amplitude the $\varepsilon_{a,p}$, ΔT and ΔR values increase and the lifetime N_f decreases.

Cyclic deformation (a), temperature (b) and electrical resistance (c) curves for service loading with the standardised load spectrum Carlos lateral are plotted in Figure 5. The maximum stress σ_{\max} was varied between 900 and 1050 MPa. In the periodically inserted constant amplitude sequences the stress amplitude $\sigma_a = 400 \text{ MPa}$ was used for $\varepsilon_{a,p}$, ΔT and ΔR measurements.

With increasing maximum stress the plastic strain amplitude, temperature and electrical resistance values increase earlier and reach higher maximum values. The fatigue life consequently decreases. Analogous to constant amplitude loading, the fatigue behaviour under service loading is characterised by consistent cyclic softening. The service load test (SLT) with $\sigma_{\max} = 900 \text{ MPa}$ was stopped without failure after $2 \cdot 10^6$ cycles, i.e. 20 repeats of the Carlos spectrum.

4.2. Fatigue life calculation under constant amplitude loading and service loading

Load increase tests (LITs) starting at a stress amplitude of $\sigma_{a,\text{start}} = 100 \text{ MPa}$ with a stepwise increase of $\Delta\sigma_a = 20 \text{ MPa}$ each $\Delta N = 9 \cdot 10^3$ cycles were performed to estimate the endurance limit with one single specimen. In Figure 6a the stress amplitude and the change in electrical resistance are plotted versus the number of cycles.

In the LIT the slope of the $\Delta R-N$ curve changes from linear to exponential increase at $\sigma_{a,\text{LIT}} = 480 \text{ MPa}$. Thus, this stress amplitude leading to a changing slope of the material response values can be used as a first estimation of the endurance limit, cf. [2]. Failure occurs in the load level $\sigma_a = 680 \text{ MPa}$. In comparison to the endurance limit $\sigma_{a,\text{CAT}} = 490 \text{ MPa}$ determined in constant amplitude tests (CATs) until $N = 2 \cdot 10^6$ cycles (Figure 4), there is an excellent accordance factor $\sigma_{a,\text{LIT}}$ divided by $\sigma_{a,\text{CAT}}$ of about 98 %. It has to be pointed out that for new materials or material conditions only one LIT is sufficient for a first estimation of the endurance limit and for the selection of appropriate stress amplitudes for CATs.

According to the physically based fatigue life calculation method "PHYBAL", developed at the Institute of Materials Science and Engineering at the University of Kaiserslautern, besides one load increase test two constant amplitude tests

Comportare la oboseală

evidențiat faptul că pentru materialele noi sau pentru stările noi ale materialelor este suficient un singur LIT pentru o primă estimare a limitei de rezistență la oboseală și pentru selectarea celor mai potrivite amplitudini ale tensiunii pentru CAT.

were performed with stress amplitudes slightly above $\sigma_{a, LIT}$ and slightly below the stress amplitude, which leads to failure in the LIT. In Figure 6b the electrical resistance curves of both CATs, characterised by continuous cyclic softening, are given until

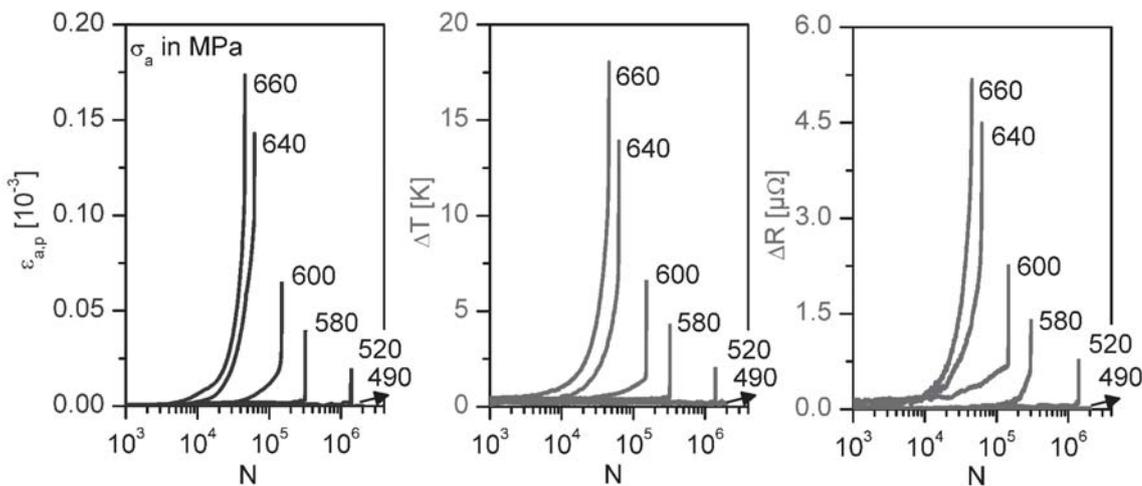


Figura 4. Curbele deformație ciclică (a), temperatură (b) și rezistență electrică (c) pentru încărcarea cu amplitudine constantă/
Figure 4. Cyclic deformation (a), temperature (b) and electrical resistance (c) curves for constant amplitude loading

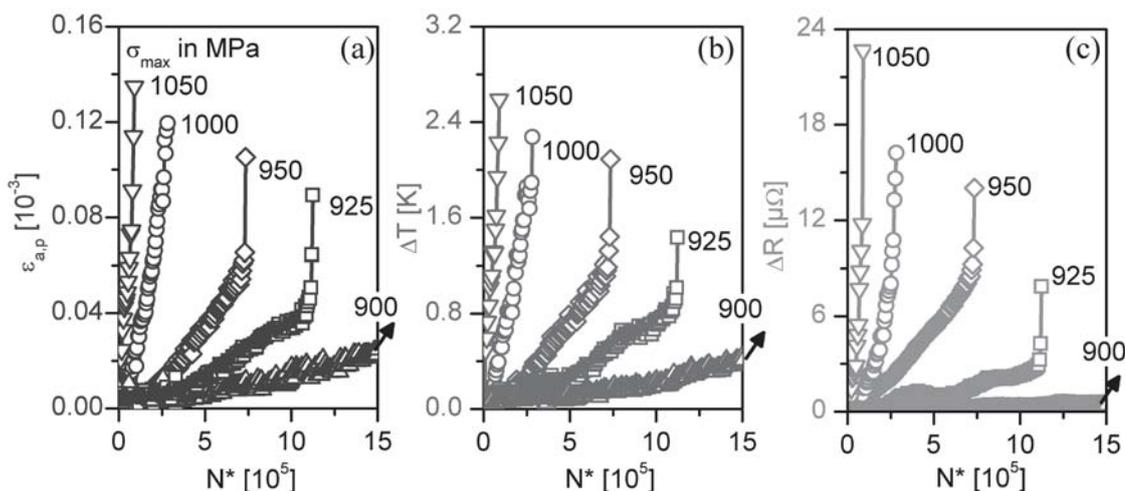


Figura 5. Curbele deformație ciclică (a), temperatură (b) și rezistență electrică (c) pentru încărcarea în serviciu
Figure 5. Cyclic deformation (a), temperature (b) and electrical resistance (c) curves for service loading

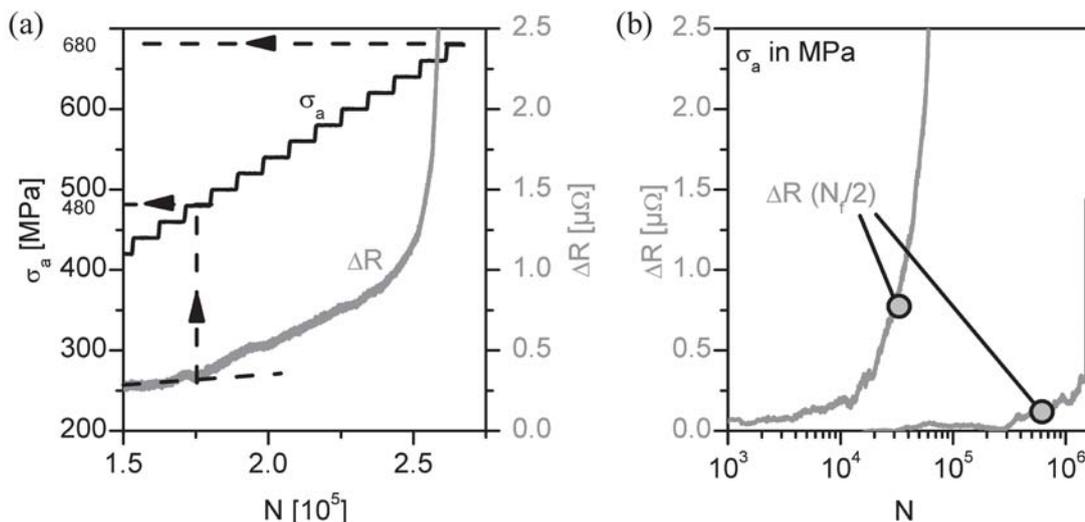


Figura 6. Schimbarea rezistenței electrice într-un test cu creșterea încărcării (a) și în teste cu amplitudine constantă (b)/
Figure 6. Change in electrical resistance in a load increase test (a) and in constant amplitude tests (b)

Conform metodei "PHYBAL" de calcul a duratei la oboseală pe baza fizice, dezvoltate la Institutul de Știința Materialelor și Inginerie de la Universitatea Kaiserslautern, au fost realizate, pe lângă un test cu creșterea încărcăturii, și două teste cu amplitudine constantă. Acestea au avut amplitudinea tensiunii puțin sub și puțin peste $\sigma_{a, LIT}$, ceea ce duce la eroare în LIT. În figura 6b sunt prezentate până la eroare curbele rezistenței electrice pentru ambele CAT, caracterizate printr-o înmuiere ciclică continuă. Valorile ΔR la jumătatea duratei de viață ($N_f/2$) sunt marcate cu simboluri pline (●).

În continuare, este explicată în detaliu metoda "PHYBAL", care duce la o scădere substanțială a timpului și a costurilor în comparație cu calculul experimental convențional al lui Woehler și al curbelor duratei la oboseală. Conform metodei "PHYBAL" sunt necesare doar datele $\varepsilon_{a,p}$, ΔT sau ΔR de la un LIT și de la două CAT pentru calculul duratei de viață.

Ecuția Morrow în formă generalizată (Ec. 1) permite descrierea relației dintre amplitudinea tensiunii σ_a și valorile măsurate $M = \varepsilon_{a,p}$, ΔT sau ΔR pentru diferite nivele de încărcătură ale unui LIT sau a diferitelor CAT la un număr definit de cicluri (ex. jumătatea duratei de viață $N_f/2$). Coeficientul de durificare ciclică K' și exponentul de durificare ciclică n' , cunoscuți de la descrierea relației σ_a - $\varepsilon_{a,p}$, sunt înlocuiți în formularea generalizată prin K'_M , respectiv n'_M . Indicele M indică faptul că această ecuație poate fi aplicată pentru toate valorile măsurate M:

$$\sigma_a = K' \cdot (\varepsilon_{a,p})^{n'} \rightarrow \sigma_a = K'_M \cdot (M)^{n'_M} \quad (1)$$

Ecuția Basquin poate fi exprimată la fel ca Ec. 1, utilizând coeficientul de rezistență la oboseală $\sigma'_{f,M}$ în loc de σ'_f și exponentul de rezistență la oboseală b_M în loc de b (Ec. 2):

$$\sigma_a = \sigma'_f \cdot (2 N_f)^b \rightarrow \sigma_a = \sigma'_{f,M} \cdot (2 N_f)^{b_M} \quad (2)$$

Conform lui Morrow, exponentul de rezistență la oboseală b_M poate fi calculat utilizându-se exponentul de durificare ciclică n'_M (Ec. 3):

$$b = \frac{-n'}{5 n' + 1} \rightarrow b_M = \frac{-n'_M}{5 n'_M + 1} \quad (3)$$

Cu exponentul de durificare ciclică n'_M (Ec. 1) și cu exponentul de rezistență la oboseală b_M (Ec. 3) și cu relația σ_a - N_f a unui CAT, se determină coeficientul de rezistență la oboseală $\sigma'_{f,M}$ (Ec. 2) iar curba S-N poate fi calculată. (Ec. 4):

$$N_f = 0.5 \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_{f,M}} \right)^{\frac{1}{b_M}} \quad (4)$$

S-a demonstrat că datele despre oboseală rezultate de la un test cu mărirea încărcăturii și de la două teste cu amplitudine constantă permit calcularea corectă a duratei la oboseală a materialelor metalice [10-11]. Mai jos este ilustrat calculul curbei Woehler utilizând modificarea indusă de deformație rezistenței electrice. Calculul se poate face în exact același mod utilizându-se amplitudinea deformației plastice sau modificarea temperaturii.

Ca exemplu, în figura 7a curba ciclică tensiune-rezistență măsurată în testul cu mărirea încărcării (figura 6a) este reprezentată ca valorile medii DR (○ LIT_{exp.}) pentru $500 \text{ MPa} \leq \sigma_a \leq 640 \text{ MPa}$. Suplimentar este reprezentată variația rezistenței electrice la $N_f/2$ (● CAT_{exp.}) pentru ambele teste cu amplitudinea constantă de $\sigma_a = 500$ și 640 MPa (Figura 6b). Raportul Q(M) dintre valorile măsurate ale celor două CAT și nivelurile corespunzătoare de încărcătură ale LIT a fost

failure. The ΔR values at half lifetime ($N_f/2$) are marked with filled symbols (●).

In the following, the "PHYBAL" method, which leads to a substantial reduction of time and costs compared to the conventional experimental determination of Woehler and fatigue life curves, is explained in detail. For fatigue life calculation according to "PHYBAL" only $\varepsilon_{a,p}$, ΔT or ΔR data of one LIT and two CATs are necessary.

The Morrow equation in generalised formulation (Eq. 1) allows to describe the relation between the stress amplitude s_a and the measured values $M = \varepsilon_{a,p}$, ΔT or ΔR for different load levels of a LIT or different CATs at a defined number of cycles, e.g. half lifetime $N_f/2$. The cyclic hardening coefficient K' and the cyclic hardening exponent n' , well known from the description of the σ_a - $\varepsilon_{a,p}$ relation, are substituted in generalised formulation by K'_M and n'_M , respectively. The subscript M indicates that this equation is applicable for all measured values M:

$$\sigma_a = K' \cdot (\varepsilon_{a,p})^{n'} \rightarrow \sigma_a = K'_M \cdot (M)^{n'_M} \quad (1)$$

The Basquin equation can be expressed in a similar way to Eq. 1 with the fatigue strength coefficient $\sigma'_{f,M}$ instead of σ'_f and the fatigue strength exponent b_M instead of b (Eq. 2):

$$\sigma_a = \sigma'_f \cdot (2 N_f)^b \rightarrow \sigma_a = \sigma'_{f,M} \cdot (2 N_f)^{b_M} \quad (2)$$

According to Morrow the fatigue strength exponent b_M can be calculated with the cyclic hardening exponent n'_M (Eq. 3):

$$b = \frac{-n'}{5 n' + 1} \rightarrow b_M = \frac{-n'_M}{5 n'_M + 1} \quad (3)$$

With the cyclic hardening exponent n'_M (Eq. 1) and the fatigue strength exponent b_M (Eq. 3) and with the σ_a - N_f relation of one CAT, the fatigue strength coefficient $\sigma'_{f,M}$ (Eq. 2) is determined and the S-N curve can be calculated (Eq. 4):

$$N_f = 0.5 \cdot \left(\frac{\sigma_a}{\sigma'_{f,M}} \right)^{\frac{1}{b_M}} \quad (4)$$

It was proved that already fatigue data of one load increase test and two constant amplitude tests enable a reliable fatigue life calculation of metallic materials [10-11]. Below, the calculation of the Woehler curve is illustrated by using the deformation-induced change in electrical resistance, but can be done in exactly the same manner by using the plastic strain amplitude or the change in temperature. Exemplarily, in Figure 7a the cyclic stress-resistance (σ_a - ΔR) curve measured in the load increase test (Figure 6a) is plotted as average ΔR values (○ LIT_{exp.}) for $500 \text{ MPa} \leq \sigma_a \leq 640 \text{ MPa}$. Additionally, for both constant amplitude tests at $\sigma_a = 500$ and 640 MPa (Figure 6b) the change in electrical resistance at $N_f/2$ (● CAT_{exp.}) is plotted. The ratio Q(M) between the measured values of the two CATs and the appropriate load levels of the LIT was determined by M_{CAT} divided by M_{LIT} . $Q(\Delta R)$ is 0.11 (0.65) for $\sigma_a = 500$ (640) MPa and for the stress amplitudes in-between linearly interpolated. Then the Morrow curve for constant amplitude loading (□ CAT_{calc.}) was calculated by multiplying all DR values of the LIT with the corresponding ratio Q(ΔR). The calculated Morrow curve can be described according to Eq. 1 with the cyclic hardening coefficient $K'_{\Delta R} = 650$ and the cyclic hardening exponent $n'_{\Delta R} = 0.09$. With

determinat ca M_{CAT}/M_{LIT} . $Q(\Delta R)$ este 0,11 (0,65) pentru $\sigma_a = 500$ (640) MPa și pentru amplitudinile tensiunii interpolate liniar. Apoi a fost calculată curba Morrow pentru amplitudine constantă (\square CAT_{calc.}), înmulțind toate valorile DR din LIT cu raportul corespunzător $Q(\Delta R)$. Curba Morrow calculată poate fi descrisă conform Ec. 1 cu ajutorul coeficientului de durificare ciclică $K'_{\Delta R} = 650$ și al exponentului de durificare ciclică $n'_{\Delta R} = 0,09$. Coeficientul de ductilitate la oboseală $\sigma'_{f, \Delta R} = 1355$ s-a calculat conform Ec. 2 pornind de la exponentul de ductilitate la oboseală $b_{\Delta R} = -0,07$ determinat din Ec. 3 și de la numărul de cicluri până la eroare de $N_f = 6,24 \cdot 10^4$ pentru CAT la

the fatigue ductility exponent $b_{\Delta R} = -0,07$ determined according to Eq. 3 and with the number of cycles to failure $N_f = 6,24 \cdot 10^4$ for the CAT at $\sigma_a = 640$ MPa, the fatigue ductility coefficient $\sigma'_{f, \Delta R} = 1355$ was calculated according to Eq. 2. Hence all parameters of the S-N curve are calculated, in this case for electrical resistance measurements. In [10] the fatigue life calculation method “PHYBAL” was also successfully applied for the quenched and tempered steel SAE 4140 on the basis of the plastic strain amplitude and the change in temperature.

As can be seen in Figure 7b, the experimentally determined lifetimes $N_{f, exp}$ of 23 constant amplitude tests (\circ) and the S-N

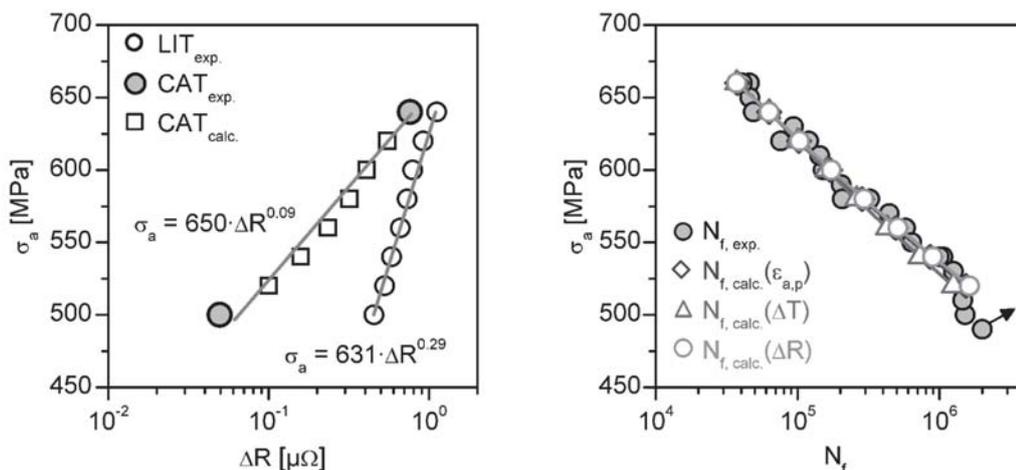


Figure 7. Curbele ciclice tensiune-rezistență (σ_a - ΔR) pentru un test cu creșterea încărcăturii (LIT_{exp.}), valorile ΔR la $N = N_f/2$ pentru două teste cu amplitudine constantă (CAT_{exp.}) și curba σ_a - ΔR calculată pentru încărcarea cu amplitudine constantă (CAT_{calc.}) (a) precum și compararea experimentală a duratelor de viață ($N_{f, exp.}$) și a curbelor S-N calculate pe baza $\epsilon_{a,p}$, ΔT și ΔR pentru încărcarea cu amplitudine constantă (b) /

Figure 7. Cyclic stress-resistance (σ_a - ΔR) curves for a load increase test (LIT_{exp.}), DR values at $N = N_f/2$ for two constant amplitude tests (CAT_{exp.}) and σ_a - ΔR curve calculated for constant amplitude loading (CAT_{calc.}) (a) as well as comparison of experimental lifetimes ($N_{f, exp.}$) and S-N curves calculated on the basis of $\epsilon_{a,p}$, ΔT and ΔR for constant amplitude loading (b)

$\sigma_a = 640$ MPa. Prin urmare, în cazul măsurării rezistenței electrice, toți parametri curbei S-N sunt calculați. În [10] metoda “PHYBAL” de calcul a duratei la oboseală a fost aplicată cu succes pentru oțelul călit și revenit SAE 4140 pe baza amplitudinii tensiunii plastice și a variației temperaturii.

După cum se observă în figura 7b, duratele de viață $N_{f, exp}$ determinate experimental din 23 de teste cu amplitudinea constantă (\circ) și curbele S-N calculate pe baza amplitudinii tensiunii plastice (\diamond), variația temperaturii (Δ) și variația rezistenței electrice (\circ) se potrivesc foarte bine. Este evident că această nouă metodă de calcul a duratei de viață necesită un singur test cu mărirea încărcăturii și două teste cu amplitudine constantă pentru calcularea precisă a curbelor Woehler, ducând la o mare economisire de timp și costuri comparativ cu determinarea convențională a curbelor Woehler.

În plus, abordarea “PHYBAL” a fost aplicată cu succes în testele de oboseală cu spectru de încărcare în serviciu. Prin urmare, în ecuațiile 1, 2 și 4 amplitudinea tensiunii σ_a trebuie substituită cu tensiunea maximă σ_{max} iar numărul de cicluri până la cedare N_f cu N_f^* .

Analog figurii 7b, determinarea curbelor duratei de viață la oboseală calculate utilizând datele referitoare la amplitudinea tensiunii plastice (\diamond), schimbarea temperaturii (Δ) și schimbarea rezistenței electrice (\circ) se potrivesc excelent cu curbele duratei de viață la oboseală determinate experimental (\circ) (figura 8). Există o singură diferență neglijabilă între duratele la oboseală calculate și cele experimentale pentru încărcarea Carlos.

curves calculated on the basis of the plastic strain amplitude (\diamond), the change in temperature (Δ) and the change in electrical resistance (\circ) agree excellently. It is evident that this new lifetime calculation method requires only one load increase test and two constant amplitude tests for the precise calculation of Woehler curves and leads to an enormous saving of time and costs compared to the conventional determination of Woehler curves.

Furthermore, the “PHYBAL” approach was successfully applied on fatigue tests with service load spectra. Therefore in Eqs. 1, 2 and 4 the stress amplitude σ_a has to be substituted for the maximum stress σ_{max} and the number of cycles to failure N_f for N_f^* , respectively.

Analogous to Figure 7b, the calculation of fatigue life curves with plastic strain amplitude (\diamond), change in temperature (Δ) and change in electrical resistance (\circ) data matches excellently with the experimentally determined fatigue life curves (\circ) (Figure 8). There is only a negligible scatter between calculated and experimental fatigue lives for Carlos loading.

Besides, excellent agreements between calculated and experimental Woehler curves and fatigue life curves were obtained for several aluminium and magnesium lightweight materials [15] as well as for railway wheel steels [11-12].

5. Conclusions

Plastic strain amplitude, change in temperature and change in electrical resistance measurements are equivalently suitable

De altfel, s-au obținut corelări foarte bune între curbele Woehler calculate și cele experimentale și curbele pentru durata de viață la oboseală, pentru mai multe materiale ușoare pe bază de aluminiu și magneziu [15], precum și pentru roțile de cale ferată, din oțel [11-12].

5. Concluzii

Măsurările amplitudinii deformației plastice, ale modificării temperaturii și ale schimbării rezistenței electrice sunt la fel de potrivite pentru caracterizarea comportării la oboseala cu încărcare de amplitudine constantă și cu încărcare în serviciu. Testele privind creșterea încărcării permit estimarea rezistenței la oboseală cu o singură probă. Cu ajutorul unei noi metode de testare, comportarea la oboseală și pierderile datorate oboselei datorită încărcării în serviciu pot fi descrise și evaluate pe baza curbelor de deformație ciclică, de temperatură și rezistență electrică.

Conform metodei "PHYBAL" de calcul a duratei la oboseală, sunt suficiente un test cu mărirea încărcăturii și două teste cu amplitudine constantă pentru un calcul exact al curbelor Woehler (S-N). Amplitudinile tensiunilor din cele doua teste cu amplitudine constantă sunt puțin deasupra limitei de rezistență la oboseală estimate în testul cu creșterea încărcării și puțin sub amplitudinea tensiunii, ceea ce duce la erori în testul cu creșterea încărcării. Curba Morrow pentru încărcarea de amplitudine constantă a fost calculată cu date mecanice, termice și electrice măsurate într-un test cu creșterea încărcării și în două teste cu amplitudine constantă. Curba Woehler (S-N) a fost calculată conform ecuației Basquin generalizate pornind de la numărul de cicluri până la eroare măsurat într-un test cu amplitudine constantă. Rezultatul a fost în deplină concordanță cu curba Woehler determinată în mod convențional. În același mod, metoda "PHYBAL" este potrivită pentru calculul curbelor duratei la oboseală datorită încărcării în serviciu.

Pe lângă toate acestea, s-au obținut o serie de concordanțe excelente între valorile calculate și cele experimentale ale duratelor de viață pentru materiale ușoare pe bază de aluminiu și magneziu, cât și pentru oțelurile folosite în căile ferate. Pentru o durată de aproximativ 2 zile pe material, metoda "PHYBAL" oferă o economie enormă de timp și costuri comparativ cu determinarea convențională a curbelor S-N, care necesită 30 de zile de teste cu amplitudine constantă la 5Hz și până la $2 \cdot 10^6$ cicluri.

Mulțumiri

Se mulțumește pentru susținere Fundației Germane de Cercetare

Bibliografie/ References

- [1] P Lukáš and M Klesnil, 'Cyclic stress-strain response and fatigue life of metals in low amplitude region', Mater. Sci. Eng. 11, pp 345-356, 1973.
- [2] D Dengel and H Harig, 'Estimation of the fatigue limit by progressively increasing load tests', Fatigue Fract. Eng. Mat. 3, pp 113-128, 1980.
- [3] F Currí, G Curti and R Sesana, 'A new iteration method for the thermographic determination of fatigue limit in steels', Int. J. Fatigue 27, pp 453-459, 2005.
- [4] G Meneghetti, 'Analysis of the fatigue strength of a stainless steel based on the energy dissipation', Int. J. Fatigue 29, pp 81-94, 2007.

to characterise the fatigue behaviour under constant amplitude loading and service loading. Load increase tests allow to estimate the endurance limit with one single specimen. By means of a new test procedure the fatigue behaviour and the proceeding fatigue damage under service loading can be described and evaluated on the basis of cyclic deformation, temperature and electrical resistance curves.

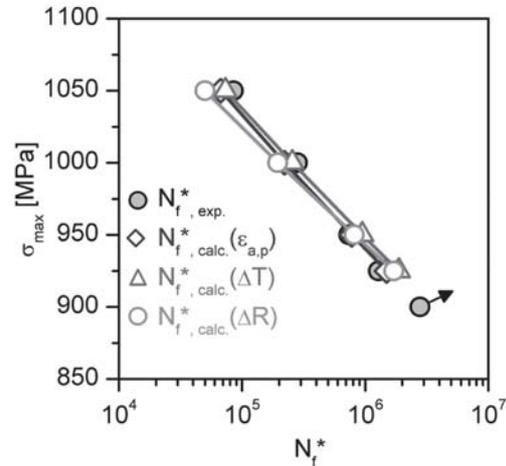


Figura 8. Comparația între duratele de viață experimentale ($N_{f^*, exp.}$) și curbele S-N calculate pe baza $\epsilon_{a,p}$, ΔT și ΔR pentru încărcarea Carlos /
Figure 8. Comparison of experimental lifetimes ($N_{f^*, exp.}$) and S-N curves calculated on the basis of $\epsilon_{a,p}$, ΔT and ΔR for Carlos loading

According to the fatigue life calculation method "PHYBAL" one load increase test and two constant amplitude tests are sufficient for the precise calculation of Woehler (S-N) curves. The stress amplitudes of the two constant amplitude tests are slightly above the endurance limit estimated in the load increase test and slightly below the stress amplitude, which leads to failure in the load increase test. With mechanical, thermal and electrical data measured in one load increase test and in two constant amplitude tests, the Morrow curve for constant amplitude loading was calculated. With the number of cycles to failure of one constant amplitude test, the Woehler (S-N) curve was calculated according to a generalised Basquin equation in excellent accordance with the conventionally determined Woehler curve. In the exact same manner the "PHYBAL" approach is suited for the calculation of fatigue life curves under service loading. Besides, excellent agreements between calculated and experimental lifetimes were obtained for several aluminium and magnesium lightweight materials as well as for railway wheel steels. With a total running time of about two days per material, the "PHYBAL" method yields an enormous saving of time and costs compared to the conventional determination of S-N curves, requiring about 30 days for constant amplitude tests at 5 Hz until $2 \cdot 10^6$ cycles.

Acknowledgments

The support of the German Research Foundation is gratefully acknowledged.



Comportare la oboseală

[5] J Polák, 'Electrical resistivity of cyclically deformed copper', Czech. J. Phys. B. 19, pp 315-322, 1969.

[6] J Charrier and R Roux, 'Evolution of damage fatigue by electrical measure on smooth cylindrical specimens', Nondestr. Test. Eval. 6, pp 113-124, 1991.

[7] B Sun and Y Guo, 'High-cycle fatigue damage measurement based on electrical resistance change considering variable electrical resistivity and uneven damage', Int. J. Fatigue 26, pp 457-462, 2004.

[8] J D Morrow, 'Cyclic plastic strain energy and fatigue of metals', ASTM-Internal Friction, Damping and Cyclic Plasticity, STP 378, pp 45-87, 1964.

[9] O H Basquin, 'The exponential law on endurance tests', Proceedings ASTM 10, 625-630, 1910.

[10] P Starke, F Walther and D Eifler, 'PHYBAL - A new method for lifetime prediction based on strain, temperature and electrical measurements', Int. J. Fatigue 28, pp 1028-1036, 2006.

[11] F Walther and D Eifler, 'Fatigue life calculation of SAE 1050 and SAE 1065 steel under random loading', Int. J. Fatigue 29, pp 1885-1892, 2007.

[12] F Walther and D Eifler, 'Cyclic deformation behavior of steels and light-metal alloys', Mater. Sci. Eng. A 468-470, pp 259-266, 2007.

[13] C Berger, K-G Eulitz, P Heuler, K-L Kotte, H Naundorf, W Schuetz, C M Sonsino, A Wimmer and H Zenner, 'Betriebsfestigkeit in Germany-An overview', Int. J. Fatigue 24, pp 603-625, 2002.

[14] C M Sonsino, 'Fatigue testing under variable amplitude loading', Int. J. Fatigue 29, pp 1080-1089, 2007.

[15] B Ebel-Wolf, F Walther, D Eifler, 'Cyclic deformation behaviour and lifetime calculation of the magnesium die-cast alloys AZ91D, MRI 153M and MRI 230D', Int. J. Mater. Res. 98, pp 117-122, 2007.

ISIM News



Buletin informativ editat de Centrul de Transfer Tehnologic CENTA al Institutului Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale - ISIM Timișoara.

În paginile **ISIM News** puteți găsi rubrici privind: realizările recente ale ISIM • programele ISIM de formare/certificare personală • realizările instituțiilor partenere ISIM, din țară și străinătate • calendarul manifestărilor științifice și tehnice din lume • noile standarde și reglementări tehnice din domeniu • cele mai recente apariții editoriale

ISIM News se distribuie gratuit specialiștilor în variantă electronică, prin e-mail, sau, la cerere, în variantă tipărită.

Pentru abonare completă și trimiteți talonul de mai jos (fax: 0256 200222, 492797).

ISIM News on line www.isim.ro/centa



Talon abonament

ISIM News

Buletinul informativ editat de ISIM Timișoara -
Centrul de Transfer Tehnologic în Sudură (CENTA)

Către,

CENTRUL DE TRANSFER TEHNOLOGIC ÎN SUDURĂ – CENTA-ISIM

Bv. Mihai Viteazul, nr. 30, 300222 Timișoara, Tel./Fax: 0256 2002227; 492797; e-mail: centa@isim.ro

Instituția/firma _____

Str. _____ Nr. _____

Oraș _____ Cod _____

Tel. _____ Fax _____ E-mail _____

Suntem interesați să primim buletinul informativ **ISIM-News**. Dorim să primim buletinul:

în format tipărit, pe adresa de mai sus, în atenția _____

în format electronic pe adresa de e-mail: _____

Data: _____

Semnătura

Abonament ISIM News