

Pojavi pri malocikličnem utrujanju nizkoogljivega jekla na področju naravnega tečenja

Low Cycle Fatigue Phenomena in Low Carbon Steel in the Region of Yielding Elongation

J. Žvokelj*¹

UDK: 620.178.3:669.15-194.2

ASM/SLA: Q7, CNg



Pri izdelavi ciklične σ - ϵ_n krivulje za nizkoogljivo jeklo z velikim raztezkom naravnega tečenja smo ugotovljali nekatere značilnosti med začetnimi izmeničnimi obremenitvami. V področju naravnega tečenja opazimo pri malih amplitudah raztezka mehčanje, pri večjih amplitudah pa utrjanje jekla od prvega nihaja dalje. Pri tem je delež nehomogene deformacije enak dvojni amplitudi raztezka.

Determining the cyclic σ - ϵ_n curve for a low carbon steel with a large yielding elongation, the author studied some characteristic phenomena occurring during initial alternating loading. In the yielding range softening could be observed at small strain amplitudes and hardening at larger strain amplitudes from the first cycle onwards. In this case the size of the nonhomogeneous deformation was equal to the double amplitude of elongation.

UVOD

S pojmom malociklično utrujanje (angl. low cycle fatigue) označujemo področje dinamičnih obremenitev, pri katerih pride do porušitve že po manjšem številu nihajnih obremenitev. Na klasičnem Wöhlerjevem diagramu, s katerim prikazujemo število nihajnih obremenitev do loma v odvisnosti od amplitude dinamične napetosti, ga imenujemo področje časovne dinamične trdnosti, za razliko od trajne dinamične trdnosti, ki jo predstavlja mejna napetost, ko preide Wöhlerjeva krivulja v asimptoto in pod katero naj bi material že trajno vzdržal nihajno obremenitev.^{1,2}

Posebna značilnost področja malocikličnega utrujanja je v tem, da nastajajo med obremenjevanjem v materialu poleg elastičnih tudi plastične deformacije, zaradi česar zasledimo pri tovrstnih preskušanjih še vrsto spremljajočih pojavov, kot so utrjanje, mehčanje, relaksacija, Bauschingerjev efekt in podobno.

Preizkušanja na področju malocikličnega utrujanja izvajamo z majhnimi frekvencami, zato lahko registramo soodvisnost obremenitev in deformacij. Pri izmeničnem obremenjevanju predstavlja ta odnos značilna histerezna zanka (Slika 1). Preizkušanja se izvajajo lahko s krmiljenjem amplitude obremenitve, vendar so za interpretacijo pojavov prikladnejša preizkušanja s krmiljenjem amplitude raztezkov, kar velja še zlasti za preskušanja pri povišanih temperaturah. V dvojnolagaritemskih koordinatah je odnos med amplitudo plastičnega raztezka in številom nihajev do zloma premica in ga matematično lahko izrazimo s Coffin-Mansonovo enačbo.³

Za osnovno presojo ponašanja materiala pri malocikličnem utrujanju se izdelata takoimenovana ciklična σ - ϵ_n krivulja, ki je ena od osnov za računalniško obdelavo ugotavljanja življenjske dobe konstrukcijskega dela pri

INTRODUCTION

The term low-cycle fatigue is used for the region of dynamic loadings where failure occurs at a low number of cycles. In the classical Wöhler's diagram representing the number of cycles to failure against the amplitude of dynamic stress, this region is that of time fatigue strength as contrasted to that of fatigue strength represented by limit stress when Wöhler's curve approaches the asymptote and under which a material should develop a fatigue resistance to cyclic loading.

A special feature of the low-cycle fatigue range is the occurrence of not only elastic but also plastic strains in material under loading. As a result in this kind of testing one can find a series of accompanying phenomena such as hardening, softening, relaxation, Bauschinger's effect and similar.

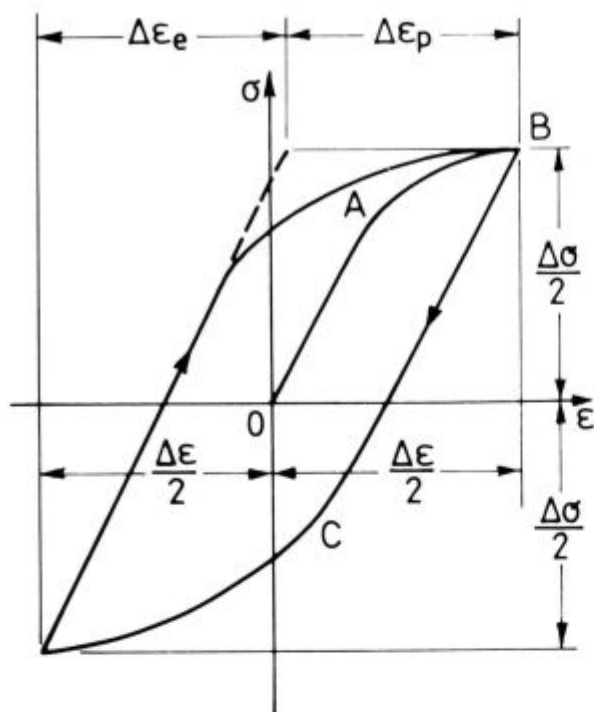
In the low-cycle fatigue region tests are performed at low frequencies so that the stress-strain relationship can be recorded. At alternating load this relationship can be represented by a hysteresis loop (Figure 1). Tests can be performed in stress controlled conditions, however, for the interpretation of the phenomena tests in strain controlled conditions seems to be more appropriate, which is especially true for tests at elevated temperature. On the log-log coordinates, the relationship between the plastic strain amplitude and the number of cycles to failure is represented by a straight line, and can be mathematically expressed by Coffin-Manson equation.

To be able to judge the behaviour of material in low-cycle fatigue, the so-called cyclic σ - ϵ_n curve is usually defined serving as a basis for computer processing of data offering information about the life time of a structural part under non-uniform cyclic loading, (Figure 2). This curve is similar to a static tensile curve except that on the abscissa strain amplitude (ϵ_n) is indicated. The tests are carried out under alternating dynamic load, and for the particular points on the curve stress in tension is registered at the maximum amplitude of a given strain in tension.

* Janez Žvokelj, dipl. ing. met. SŽ-Metalurški inštitut Ljubljana, Lepa pot 11, 61000 Ljubljana

** Originalno objavljeno: ŽEZB 24 (1990) 1

*** Rokopis sprejet: november 1989



Slika 1:

Odnos med napetostjo (σ) in deformacijo (ϵ) pri izmenični obremenitvi

ϵ_{el} — delež elastične deformacije
 ϵ_{pl} — delež plastične deformacije

Fig. 1:

Stress (σ) versus strain (ϵ) in alternating load cycles

ϵ_{el} — amount of elastic strain
 ϵ_{pl} — amount of plastic strain

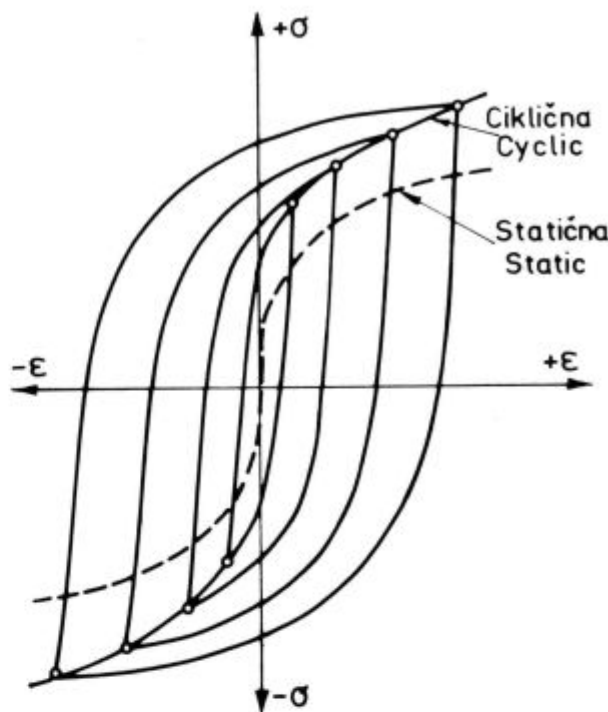
neenakomernih nihajnih obremenitvah (Slika 2). Podobna je statični natezni krivulji, le da na absciso nanašamo amplitudo raztezka (ϵ_a). Preizkušanje izvajamo z izmeničnim dinamičnim obremenjevanjem, za posamezne točke krivulje pa registriamo napetost v nategu pri maksimalni amplitudi dane deformacije v nategu.

Ker nastopajo med obremenjevanjem z izmeničnim predznakom (nateg—tlak—nateg—tlak itd.) poleg elastičnih tudi plastične deformacije v materialu, je treba pri vsakem zanihanju z nasprotnim predznakom računati z Bauschingerjevim efektom, sicer pa je ciklično obremenjevanje z izmenično napetostjo izraženo s tipično histerezo krivuljo.^{4,5}

Med prvimi cikli izmeničnega obremenjevanja pa se pojavljajo dodatne značilnosti. Nekateri materiali se mehčajo, nekateri utrjajo, lahko pa se ponašajo tudi popolnoma nevtrarno. Mehčanje ali utrjanje zaznamo na registriranih histereznih zankah. Zato lahko posamično točko neodvisne napetosti dani amplitudi na ciklični σ - ϵ_a krivulji določimo šele takrat, ko dosežemo stabilno histerezo zanko. Običajno je to po 100 nihajih ali pa po polovičnem številu nihajev do zloma.

Pojavi pri prvih cikli izmeničnega obremenjevanja so nas posebej zanimali.

Primer utrjanja in mehčanja 9% Ni jekla z različno vsebnostjo zadržanega avstenita je bil že objavljen,^{6,7} v članku pa prikazujemo pojave pri začetnem cikličnem obremenjevanju nizkoogljivega jekla v območju deformacij naravnega tečenja.



Slika 2:

Statična in ciklična σ - ϵ krivulja (pri utrujanju materiala)

Fig. 2:

Static and cyclic σ - ϵ curve (cyclic hardening)

Since during alternating loading (tension—compression—tension—compression etc) the material experiences elastic and also plastic strains, it is necessary to consider the possibility of the Bauschinger effect in each reversal, however, in general cyclic loading with alternating stress can be expressed by a typical hysteresis curve.^{4,5}

The first cycles of alternating loading are characterised also by the occurrence of some other phenomena. Thus some materials experience softening, some hardening, and others can behave in quite a neutral way. Softening and hardening can be noted on the hysteresis loops. Therefore a particular point of stress corresponding to a given amplitude on the cyclic σ - ϵ_a curve can be determined only when a stable hysteresis loop is achieved. This usually happens after 100 cycles or at 50% of the number of cycles to failure.

The author's special interest was focussed on the phenomena occurring in the first cycles of alternating load.

The results of an investigation on hardening and softening phenomena in a 9% Ni-steel with a varying content of residual austenite have already been published^{6,7}. In this paper, the author pays attention to the phenomena which occur in the initial cycles of loading a low-carbon steel in the region of yielding elongation.

PHENOMENA IN LOW-CARBON STEEL WITH EXCESSIVE YIELDING

Plastic deformation of a low-carbon steel begins following the mechanism of yielding. The first Lüders bands occur at the higher yield point $R_{0.01}$. Subsequent non-homogeneous deformation occurs at the lower yield point $R_{0.2}$ without any hardening before the steel

POJAVI PRI NIZKOOGLIJČNEM JEKLU Z IZRAZITIM NARAVNIM TEČENJEM

Nizkoogljive jeklo se začne plastično deformirati po mehanizmu naravnega tečenja. Pri zgornji meji tečenja R_{eH} (naravni meji plastičnosti) se sprožijo prve Lüdersove črte, nadaljnja nehomogena deformacija pa poteka pri spodnji napetosti tečenja (R_{eL}) brez utrjanja, preden se jeklo začne pri nadaljnji deformaciji spet utrjevati. Naravno tečenje lahko doseže tudi več kot 2 % raztezka. Večina starejših raziskav ponašanja nizkoogljivega jekla pri cikličnem obremenjevanju sloni na rezultatih, ki so bili izvedeni s krmiljenjem amplitude napetosti. Posebej zanimive so ugotovitve, da se lahko sproži nehomogena deformacija (Lüdersove črte) že pri amplitudah napetosti tik pod zgornjo napetostjo tečenja.^{8,9} Pri preizkusih, krmiljenih z amplitudo napetosti, pa se pri jeklih z naravnim tečenjem enostavno preskoči področje naravnega tečenja, ker le-ta poteka pri nižji napetosti, kot je zgornja napetost tečenja, pri kateri se ta deformacija sproži.

Pri naših preizkusih, ki smo jih izvedli s krmiljenjem reztzkov, pa smo lahko opazovali pojave v tem zanimivem področju nehomogene deformacije.

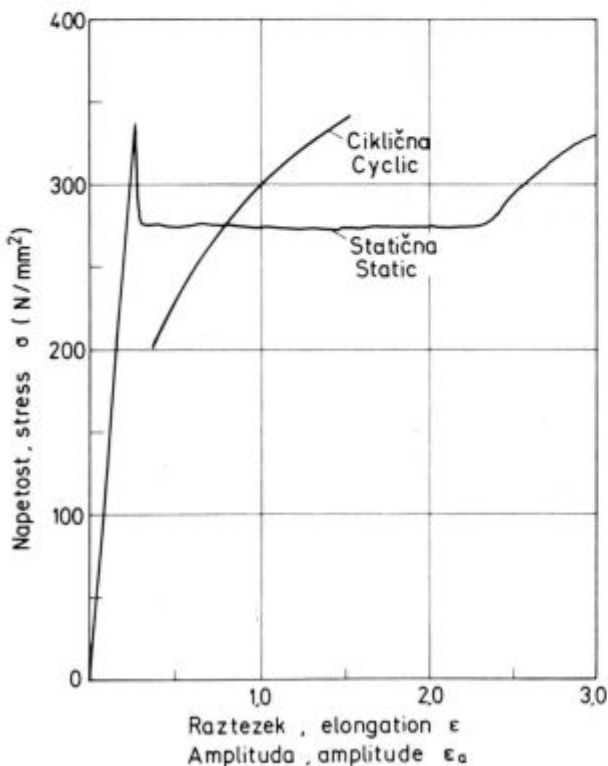
Za preizkuse smo izbrali jeklo z izredno nizkim ogljikom z izrazito naravno napetostjo tečenja (naravno mejo plastičnosti). Pri statičnem nateznem poskusu je imelo veliko razliko med zgornjo in spodnjo napetostjo tečenja ($R_{eH} = 335 \text{ N/mm}^2$ in $R_{eL} = 260 \text{ N/mm}^2$) ter široko območje raztezka naravnega tečenja brez utrditve ($\epsilon_{nt} = 2,4 \%$).

Izvedeni so bili preizkusi z izmeničnim obremenjevanjem s krmiljenjem amplitude raztezka v stopnjah od $\epsilon_a = \pm 0,2 \%$ do $\epsilon_a = \pm 1,2 \%$. Pri vsakem preizkusu smo registrirali histerezne zanke začetnih nihajev. Frekvenca

starts hardening again as a result of further deformation. Yielding can reach an elongation of 2 %. The majority of older investigations dealing with the behaviour of low-carbon steel under cyclic loading had been based on stress-controlled testing. Some of the particularly interesting findings have been that non-homogeneous deformation (Lüders bands) can occur already at the stress amplitude immediately below the higher yield point.^{8,9} In the sting steels with yielding as their characteristic feature in stress-controlled conditions the yield region is simply left out since yielding occurs at a lower stress point than that of the higher yield stress at which this deformation starts.

The tests reported in this paper were carried out in strain-controlled conditions. In this way, it was possible to examine the phenomena in this interesting region of non-homogeneous deformation.

In the tests a steel with an extremely low content of carbon with excessive yielding was used. Subjected to static tension, the steel displayed a big difference

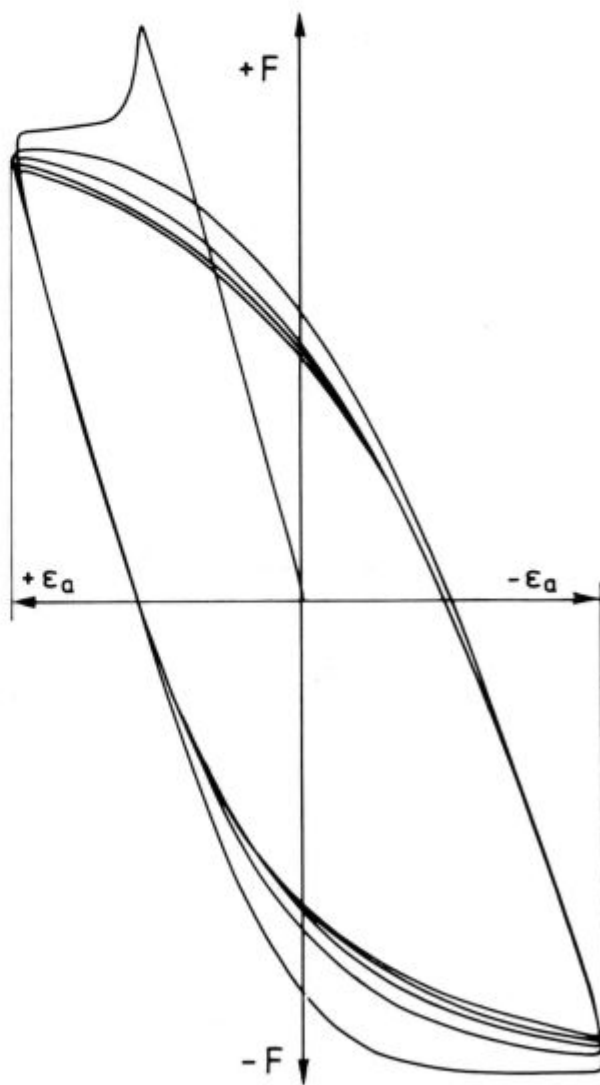


Slika 3:

Statična in ciklična σ - ϵ krivulja nizkoogljivega jekla

Fig. 3:

Static and cyclic σ - ϵ curve for a low carbon steel.



Slika 4:

Zapis začetnih nihajev cikličnega utrujanja nizkoogljivega jekla: amplituda raztezka $\epsilon_a = \pm 0,4 \%$

Fig. 4:

Initial cycles of cyclic fatigue of low carbon steel: strain amplitude $\epsilon_a = \pm 0,4 \%$.

nihanja je bila 0,1 Hz pri preizkusih, ki smo jih izvedli do loma, pri preizkusih, ki smo jih prekinili po 100 nihajih, pa 0,01 Hz.

Na diagramu na **sliki 3** sta prikazana skupno statična in ciklična σ - ϵ_a krivulja. Za ciklično krivuljo smo vzeli soodvisno napetost vsakokratni amplitudi pri polovičnem številu nihajev do zloma.

Pri amplitudah do raztezka do približno $\epsilon_a = \pm 0,6\%$ poteka ciklična σ - ϵ_a krivulja pod statično krivuljo, pri večjih amplitudah raztezka pa se dvigne nad plato spodnje napetosti tečenja.

To pomeni, da se pri nizkih amplitudah jeklo mehča, pri višjih pa utrjuje.

Detaljneje nam prikazujejo pojave zapisi začetnih nihajev za vsako amplitudo raztezka. Primer za amplitudo $\epsilon_a = \pm 0,4\%$ je na **sliki 4**. Na zapisu histerezne zanke imamo na ordinati silo v nategu in tlaku, na abscisi pa amplitudo raztezka. V nadaljevanju na sliki histerezne zanke niso bile registrirane, ampak le sprememba maksimalne sile v nategu v odvisnosti od števila nihajev.

Pri prvi obremenitvi v nategu se lepo vidi padec sile od zgornje sile tečenja do vrednosti, ki je približno enaka vrednosti spodnje sile tečenja pri statičnem nateznem preizkusu. V danem primeru, t. j. pri nizkih amplitudah raztezka, pa se z vsakim izmeničnim nihajem pojavlja mehčanje, ki preide celo pod vrednost sile spodnje napetosti tečenja.

Prikaz utrujanja in mehčanja v odvisnosti od amplitude raztezka med obremenjevanjem do 100 nihajev je na **sliki 5**. Pri vrednosti amplitude raztezka $\epsilon_a \geq \pm 0,7\%$ dobimo najprej utrjanje, nakar mehčanje in ponovno utrjanje, pri vrednosti amplitude nihanja nad $\epsilon_a = \pm 1\%$ pa nastopi utrjanje že od drugega nihaja dalje.

Pojav mehčanja utrujanja pri manjših amplitudah in utrjanja pri večjih amplitudah raztezka si razlagamo s tem, da se pri majhnih amplitudah raztezka sproži majhno število Lüdersovih zdrsov in je preostali del, na katerem merimo amplitudo raztezka, nedeformiran. Po nekaterih mnenjih^{8,9} naj bi imeli pri takšnem stanju dislo-

between the higher and the lower yield point ($R_{pH} = 335 \text{ N/mm}^2$ and $R_{pL} = 260 \text{ N/mm}^2$) and a broad region of yielding elongation without hardening ($\epsilon_{nt} = 2,4\%$).

The tests were carried out under the alternating load in strain controlled conditions in steps from $\epsilon_a = \pm 0,2\%$ to $\epsilon_a = \pm 1,2\%$. In each test, hysteresis loops of initial cycles were registered. The cycle frequency was 0.1 Hz in tests to failure and 0.01 in tests interrupted after 100 cycles.

In the graph in **Figure 3** the static and cyclic σ - ϵ_a curves are presented together. For the cyclic curve, the stress corresponding to each particular amplitude was taken at 50% of the number of cycles to failure.

At the strain amplitude of up to approximately $\epsilon_a = \pm 0,6\%$, the cyclic curve runs below the static curve while at higher amplitudes it increases over the level of the low yield stress. This shows that at lower amplitudes the steel undergoes softening and at higher amplitudes hardening.

These phenomena are illustrated in detail by the registrations of initial cycles for each strain amplitude. The amplitude of $\epsilon_a = +0,4\%$ is shown as an example in **Figure 4**. On the ordinate force in tension and compression is indicated and on the abscissa the strain amplitude. In the figure hysteresis loops were not registered only the change of maximum force in tension against the number of cycles.

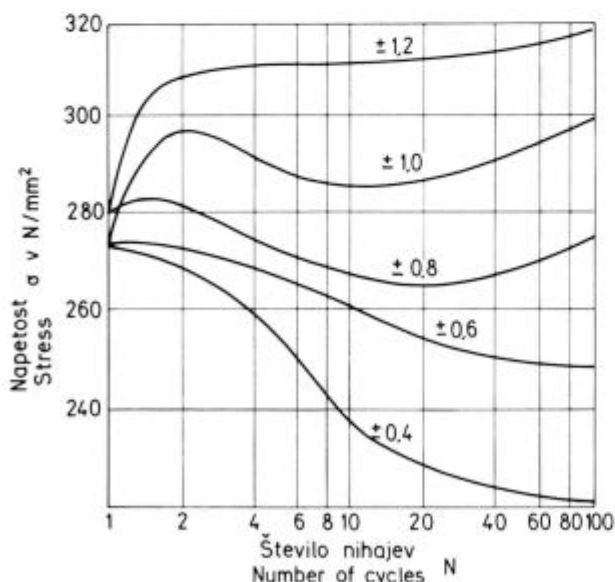
At the first load in tension one can easily see the drop in force from the high yield down to the value which is approx. equal to that of the lower yield force in static tensile tests. In a given example, i. e. at low strain amplitudes, at each alternating cycle the material experiences softening which continues even below the value of the force of the low yield stress.

An example of hardening and softening in dependence upon strain amplitude for the steel under cyclic loading is given in **Figure 5**. At a strain amplitude of $\epsilon \geq \pm 0,7\%$ the material first experiences hardening, then softening and again hardening, while at an amplitude of more than $\epsilon_a = \pm 1\%$ it experiences hardening as early as from the second cycle onwards.

The occurrence of softening-hardening at smaller amplitudes and hardening at larger strain amplitudes can be explained by the fact that at the former a small number of Lüders bands are induced and the remaining part on which the strain amplitude is measured does not experience deformation. According to some researchers^{8,9} in this case dislocation should be uniformly distributed in volume while at larger amplitudes Lüders bands would probably be induced on several locations hindering each other. As a result dislocations pile up in groups and for this reason each new cyclic strain occurs at an increase in stress.

The specimens from a series which was interrupted after 100 cycles were then subjected to a static tensile test. The purpose of this test was to find out the amount of the yielding elongation remaining after cyclic loading with a different strain amplitude. The results have shown that the remaining amount of yielding elongation is reduced by a value which is approx. equal to the double value of the strain amplitude. Therefore, in a specimen subjected to a load with a strain amplitude $\epsilon_a = \pm 1,0\%$ a subsequent static test did not reveal any amount of yielding.

This leads to the assumption that the region of non-homogeneous deformation is practically equal to the total width of the amplitude and that the deformation started in tension by Lüders bands and during the rever-



Slika 5:

Prikaz utrujanja in mehčanja v 100 nihajih pri različnih amplitudah raztezka

Fig. 5:

Hardening and softening in 100 cycles at different strain amplitudes.

kacije volumsko enakomerno porazdeljene, pri večjih amplitudah pa naj bi verjetno prišlo do sprožitve Lüdersovih zdrsov na več mestih in se zato med seboj ovirajo, dislokacije pa se grupirajo in kopičijo, zato vsaka nova ciklična deformacija nastane ob povečanju napetosti.

S preizkušanci iz serije, ki smo jo po 100 nihajih prekinili, smo napravili nato statični natezni preizkus. S tem smo želeli ugotoviti, kolikšen je preostanek raztezka naravnega tečenja po nihajnih obremenitvah z različno amplitudo raztezka. Rezultati so pokazali, da se je preostali delež raztezka naravnega tečenja zmanjšal za približno dvojno vrednost amplitude raztezka. Pri preizkušancu, ki je bil obremenjevan z amplitudo raztezka $\epsilon_a = \pm 1,0\%$, pa pri naknadnem statičnem preizkusu nismo več opazili deleža naravnega tečenja.

To pomeni, da je bilo področje nehomogene deformacije praktično enako celotni širini amplitude in se je deformacija s sproščanjem Lüdersovih zdrsov začela v nategu, pri obremenitvi z nasprotnim predznakom v tlaku pa so se sprostile nove Lüdersove črte na drugih mestih. S preizkusom, ki smo ga izvedli z enim nihajem v nategu in tlaku, nato pa izvedli natezni preizkus, smo to domnevo potrdili, saj se je tudi pri tem preizkušanju pokazalo, da se je delež raztezka naravnega tečenja zmanjšal za približno dvojno vrednost amplitude raztezka.

sal in compression new Lüders bands were induced on other location. This assumption was confirmed by a test which was carried out with one cycle in tension and compression followed by a subsequent tensile test since it has shown that the size of yielding elongation was reduced by a value approx. equal to the double value of the strain amplitude.

LITERATURA/REFERENCES

1. J. Žvokelj: Utrujanje s končnim številom nihajnih obremenitev do loma, *Železarski zbornik* 14 (1980), 1—2
2. J. Žvokelj: Ponašanje jekla pri utrujanju v območju časovne dinamične trdnosti, *Zbornik Moderne metode istraživanja specialnih čelika*, Metalburo Zagreb, 1980
3. G. E. Dieter: *Mechanical Metallurgie*, McGraw — Hill Book Company, 1986 (tretja izdaja)
4. R. Sowerby, D. K. Uko: A review of certain aspects of the Bauschinger effect in metals, *Materials Science and Engineering*, 41 (1979)
5. H.-D. Tietz, M. Dietz: Untersuchung zum Bauschinger-Effekt Neue Hütte, 22 (1977), 12
6. J. Žvokelj, F. Vodopivec: Influence of Austenite on Low Cycle Fatigue of a 9 % Ni Steel, *FATIGUE 84 — 2nd International Conference on Fatigue and Fatigue Threshold Birmingham — Conference Proceedings*, Vol III., S 1315-1322
7. J. Žvokelj: Malociklično zamiranje čelika, 3. Jugoslavenski simpozijum o metalurgiji, Beograd 1984. *Zbornik*, 697—700
8. P. Mayr: Grundlagen zum Verhalten bei Schwingender Beanspruchung; Anrissfreie Phase, Verhalten von Stahl bei schwingender Beanspruchung, Verlag Stahleisen M. B. H. Düsseldorf, 1978
9. D. Pilo, W. Reik, P. Mayr, E. Macherauch: Inhomogene Deformationsvorgänge in der einrissfreien Ermüdungsphase unlegierter Stähle, *Archiv für das Eisenhüttenwesen* 48, (1977) 11