

Utrujanje s končnim številom nihajnih obremenitev do loma

UDK 66q.14.018.8:53q.43
ASM/SLA SS, Q7j

Janez Zvokelj



Na Metalurškem inštitutu smo z nabavo novega preizkuševalnega stroja INSTRON dobili možnost preizkušanja materialov pri dinamičnih obremenitvah. Krmilni in registracijski sistemi tega stroja nam z veliko natančnostjo omogočajo tudi izvajanje preizkusov utrujanja s končnim številom nihajev do loma. Nekaj začetnih ugotovitev in rezultatov, ki smo jih dobili pri tovrstnem preizkušanju avstenitnega jekla vrste Prokron 1, je obravnavano v predloženem članku.

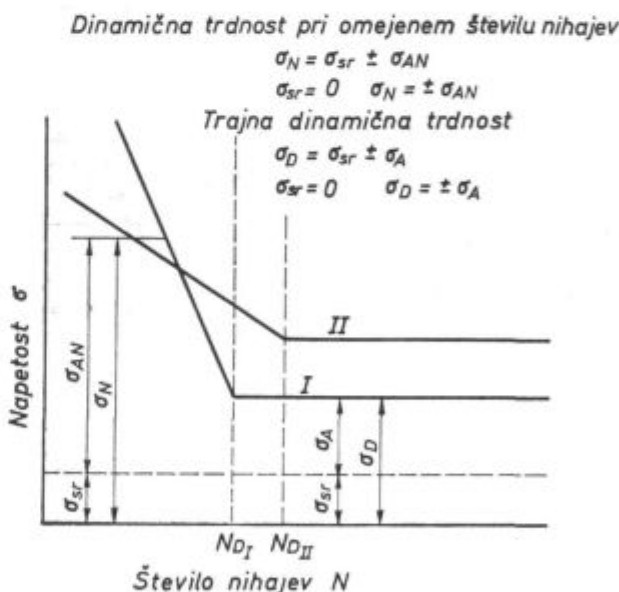
UVOD

Kadar se po daljši ali krajši dobi trajanja nepričakovano zlomi konstrukcijski del, ki je bil v uporabi izpostavljen enakomernim ali sunkovitim menjajočim se obremenitvam, pripisujemo vzrok za nastanek loma utrujenosti materiala. Posledice lomov so večje ali manjše materialne škode, posebej pa nam ostaja v zavesti, kadar terjajo lom tudi človeška življenja, kot se to dogaja pri poškodbah na prevoznih sredstvih, zlasti v letalskem prometu.

Lom zaradi utrujenosti nastopi kot posledica številnih faktorjev: od osnovnih mehanskih lastnosti materiala pa vse do konstrukcijske zasnove in izvedbe delov ali sklopov, preko katerih se prenašajo dinamične obremenitve v uporabi. Zato je seveda najbolj ustrezno preizkušati kritične dele in sklope neposredno, ob čim vernejšem simuliranju predvidenih obremenitev in razmer, ki jim bo konstrukcija izpostavljena v uporabi. S pomočjo modernih pripomočkov: računalnikov, krmilnih in merilnih sistemov, lahko vedno v večji meri vršimo takšna programirana preizkušanja, vendar je njihova cena visoka. S tem klasična preizkušanja mehanskih lastnosti materialov pri dinamičnih obremenitvah niso potisnjena v ozadje. Njihova vrednost ostaja, ker nam dajo osnovne karakteristike o ponašanju materialov pri dinamičnih obremenitvah, ki jih konstruktor že lahko upošteva. Preizkušanja so tudi izredno raznolika že glede na vrsto in predznak napetosti,

frekvenco itd., zelo primerna pa so nadalje za raziskovanje vplivov posameznih parametrov, tudi različnih zunanjih faktorjev.

Mehanski preizkusi materialov pri dinamičnih obremenitvah so izvedeni z enakomernim cikličnim ali vsaj z variabilnim obremenjevanjem, ki se ciklično ponavlja. Za varnost konstrukcije, ki je v uporabi izpostavljena dinamičnim obremenitvam pri različnih razmerah, nas zanima število sunkov ali ciklov, ki jih material izdrži bodisi do zloma, bodisi ob čimvečji statistični verjetnosti brez porušitve. Izkaže se, da je število nihajev do zloma (ob upoštevanju vrste in predznaka napetosti) odvisno od velikosti ciklične napetosti. Ta odnos je poznan kot Wöhlerjeva krivulja (sl. 1). Diagram z Wöhlerjevo krivuljo lahko delimo na dva dela glede na število nihajev do zloma: v območje napetosti, kjer pride do loma po končnem številu



Slika 1
Wöhlerjevi krivulji (shematično) dveh materialov, ki se razlikujeta po trajni dinamični trdnosti (σ_D) in dinamični trdnosti pri omejenem številu nihajev (σ_N).

Fig. 1
S — N curves (schematically) of two materials with various fatigue strengths (σ_D) and fatigue strengths at limited number of cycles (σ_N).

J. Zvokelj, dipl. ing. metalurgije, samostojni raziskovalec na Metalurškem inštitutu

nihajev in v območje napetosti, pri katerih lom ne bo nastal tudi po neomejenem številu cikličnih obremenitev. Najvišja napetost, ki jo material izdrži brez loma, je dinamična trdnost materiala (σ_D). Po izkušnjah je statistična verjetnost, da se material ne bo prelomil po neomejenem številu nihajev, dosežena že pri naslednjem številu nihajev N_D :

mehka jekla	$N_D = 10 \cdot 10^6$
trša jekla	$N_D = 3 \cdot 10^6$
Cu in Cu zlitine	$N_D = 50 \cdot 10^6$
lahke kovine	$N_D = 30-100 \cdot 10^6$

Slika 1 nam prikazuje shematično dve Wöhlerjevi krivulji, ki se razlikujeta med seboj tako po območju, kjer pride do loma po končnem številu nihajev, kot po velikosti trajne dinamične trdnosti.

Wöhlerjevo krivuljo izdelamo ponavadi s 6—10 preizkušanci, zato ne more biti statistično zanesljiva. Kadar določujemo samo trajno dinamično trdnost, se poslužujemo drugih načinov; Na Metalurškem inštitutu uspešno uporabljamo metodo »stopnic«, za kar je potrebno 15—20 preizkušancev, s tem pa je tudi ugotovljena vrednost trajne dinamične trdnosti bolj statistično in zanesljivo določena.

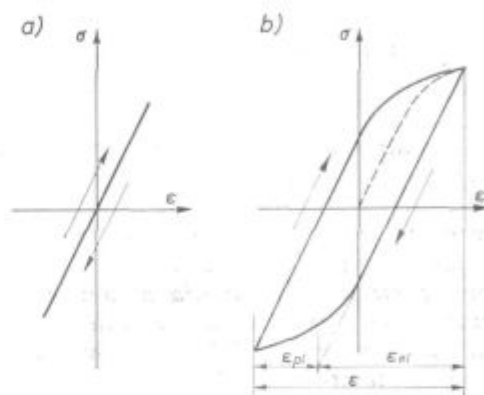
Vendar je tudi območje napetosti, kjer pride do loma po končnem številu nihajev, zanimivo za oceno lastnosti preizkušanih materialov. Znano je, da lom zaradi utrujenosti sicer nastane navidez nenadoma, z nasilnim lomom, v resnici pa se postopoma širi iz neke začetne razpoke, dokler se nosilni prerez preizkušanca ali konstruktivnega dela toliko ne zmanjša, da aplicirana sila povzroči preobremenilno napetost na preostalem preseku. Zato je za oceno lastnosti materiala pomembno vedeti, po kolikšnem številu nihajev se je razpoka začela, oziroma kolikšno število nihajev od nastanka razpoke je bilo potrebno za zlom materiala. V strokovni literaturi najdemo zato Wöhlerjeve krivulje dopolnjene še s takoiimenovano črto začetka poškodbe. Vendar je treba pripomniti, da so konkretni rezultati v literaturi zelo redki in da so prikazi bolj ali manj shematski, kajti metode za takšno določevanje so poredne in zato tudi ne povsem neoporečne.

Obstajajo pa drugi načini vrednotenja, zlasti na podlagi histereznih pojavov odnosa med obremenilno napetostjo in raztezki v toku obremenilnega ciklusa, ki so specifični za področje, kjer pride do loma po končnem številu nihajnih obremenitev.

UTRUJANJE S KONČNIM ŠTEVILOM NIIHAJEV DO LOMA (Low Cycle Fatigue)

Pri dinamičnih obremenitvah pride redno do loma po končnem številu nihajnih obremenitev, kadar so amplitude cikličnih napetosti višje, kot

je elastično območje preizkuševanega materiala. Zato nastajajo v ciklusu obremenjevanja poleg elastičnih tudi plastične deformacije. Odnos med silo in deformacijo ne sledi več Hookovem zakonu (sl. 2 a), ampak je izražen zaradi plastičnih in anelastičnih pojavov v značilni obliki histerezne zanke (sl. 2 b). Z dovolj natančnimi merilniki sil in raztezkov te sočasne odvisnosti lahko registramo.



Slika 2

Odnos med napetostjo (σ) in deformacijo (ϵ) pri izmeničnem nihanju napetosti:
 a) v elastičnem področju
 b) v plastičnem področju
 ϵ_{pl} — delež plastične deformacije
 ϵ_{el} — delež elastične deformacije

Fig. 2

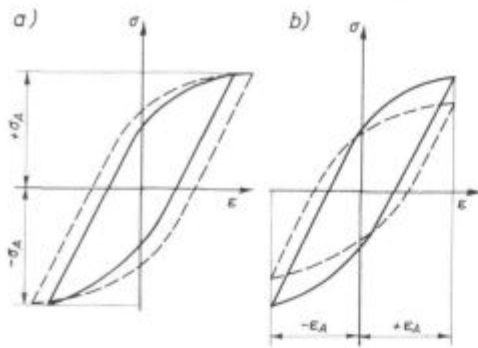
Stress (σ) — strain (ϵ) relationship in alternating stresses:
 a. elastic region
 b. plastic region
 ϵ_{pl} — portion of plastic deformation
 ϵ_{el} — portion of elastic deformation

Preizkušanje utrujanja pri amplitudah napetosti, pri katerih pride do loma po končnem številu nihajev, so v zadnjem času vse bolj pogosta. V angleški literaturi jih označujejo s terminom Low Cycle Fatigue (LCF), rusko »malociklovaja ustalost«, kratico LCF zasledimo tudi v nemških člankih. Po naše bi bil primeren izraz: utrujanje s končnim številom nihajev do loma.

Tovrstna preizkušanja so zanimiva predvsem pri kovinskih materialih z neizrazito mejo plastičnosti, kjer je prehod iz elastičnega v plastično področje neopazen, saj definiramo mejo elastičnosti že na podlagi merljive plastične deformacije. Zlasti so pomembna pri povišanih temperaturah, kjer nihanje napetosti ne povzročamo samo z menjajočimi se mehanskimi silami, pač pa lahko nastajajo v materialu nihanja napetosti zaradi oviranega temperaturnega raztezanja ob nihanjih temperature.

Prav zato imamo dva načina izvajanja, oziroma krmiljenja preizkusov: s stalno amplitudo napetosti ali s stalno amplitudo raztezka (sl. 3).

Zaradi plastičnih deformacij med obremenjevanjem v posameznih ciklih se lahko material utruje, razmehča, ali pa je njegovo ponašanje



Slika 3

Krmiljenje dinamičnih preizkusov:
 a) s stalno amplitudo napetosti ($\pm \sigma_A$)
 b) s stalno amplitudo raztezka ($\pm \epsilon_A$)

črtkani krivulji označujeta spremembe med preizkušanjem

Fig. 3

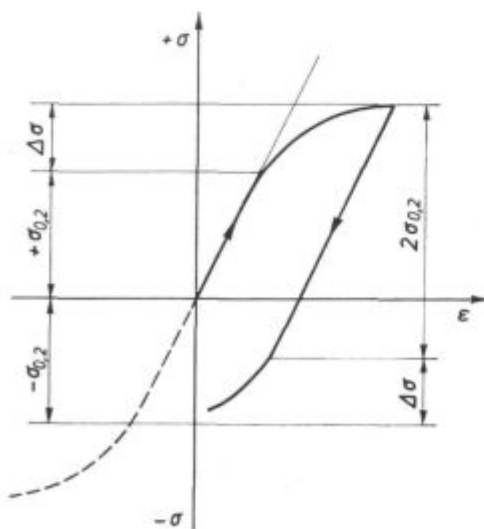
Monitoring fatigue tests:

a. constant stress amplitude ($\pm \sigma_A$)
 b. constant strain amplitude ($\pm \epsilon_A$)

Dashed lines represent variations during testing.

nevtalno. Razmehčanje materiala se odraža pri krmiljenju s stalno amplitudo napetosti z večanjem raztezka in s tem širine histerezne zanke (sl. 3 a, črtkana krivulja), pri krmiljenju s stalno amplitudo raztezka pa z nižanjem napetosti, pri kateri je dosežena amplituda deformacije (sl. 3 b). Pri utrjevanju materiala so pojavi obratni. Preizkusi se vršijo pri zmernih frekvencah, ker bi se zaradi plastičnih deformacij v preizkušancu preveč ogreli.

Pri preizkušanju z izmeničnim variiranjem napetosti je treba računati, da nastopi pri prvem nihanju izrazit Bauschingerjev efekt (sl. 4): pri obremenitvi z nasprotnim predznakom napetosti se meja elastičnosti oz. meja plastičnosti močno zniža v primerjavi s prvotno. Pri nadaljnjih ciklih



Slika 4

Shematični prikaz Bauschingerjevega efekta

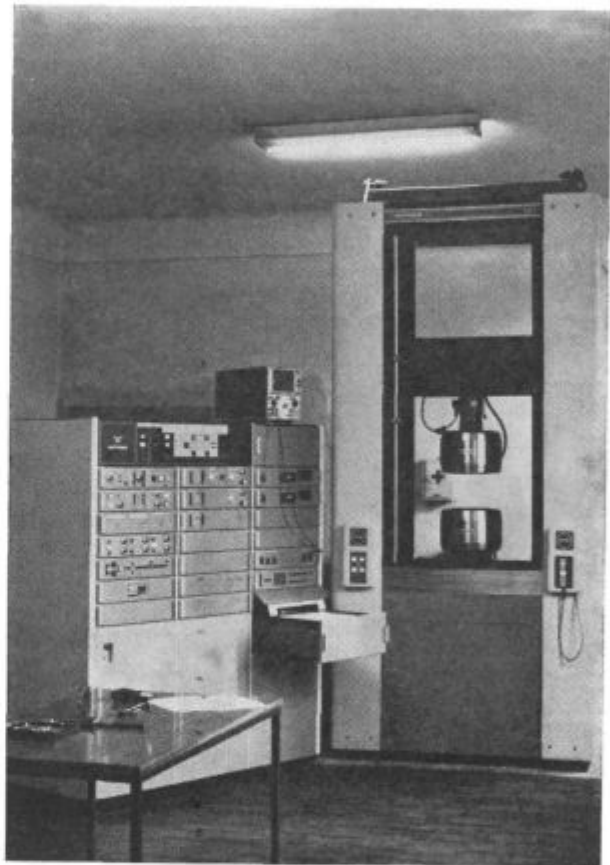
Fig. 4

Schematic representation of the Bauschinger effect

se to ponavlja, tako da se oblikuje zaključena histerezna zanka. Za izvajanje preizkusov se lahko poslužujemo predpisov ASTM in GOST.

Utrujanje jekla Prokron 12

Navajamo nekaj rezultatov in ugotovitev o utrjevanju s končnim številom nihajev do loma, ki smo jih dobili pri preizkušanju avstenitnega jekla vrste Prokron 12. Preizkušanja so bila izvedena na novem preizkuševalnem stroju INSTRON (sl. 5), na katerem nam krmilni in registracijski sistemi omogočajo izvajanje takšnih preizkusov z veliko natančnostjo in zanesljivostjo.



Slika 5

Preizkuševalni stroj INSTRON na Metalurškem inštitutu

Fig. 5

INSTRON testing machine in the Institute of Metallurgy

Preizkuševano jeklo Prokron 12 ima v gašenem stanju naslednje mehanske lastnosti:

meja elastičnosti	$\sigma_{0,02} = 117 \text{ N/mm}^2$
meja plastičnosti	$\sigma_{0,2} = 188 \text{ N/mm}^2$
trdnost	$\sigma_M = 553 \text{ N/mm}^2$
raztezek	$\delta_5 = 58 \%$
kontrakcija	$\psi = 84 \%$

Meja elastičnosti je bila določena v skladu s predpisi GOST kot napetost, ki daje po razbremenitvi 0,02 % trajnega raztezka. Za preizkušanja

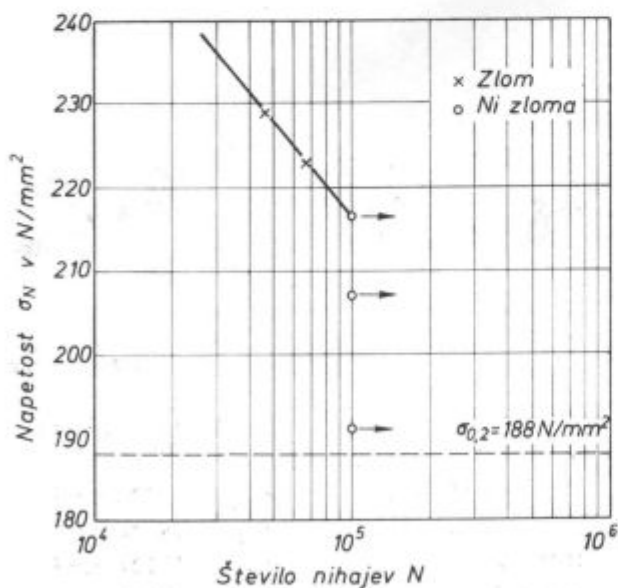
nja smo izbrali cilindrični preizkušane c premera 10 mm z mersko dolžino 50 mm. Večino preizkusov smo izvajali pri konstantni amplitudi napetosti (sile), nekatere pa tudi pri konstantni amplitudi raztezka. Za registracijo raztezkov imamo dinamični ekstenzometer z mersko dolžino 25 mm in območjem pomika $\pm 2,5$ mm. Odnose sile in raztezka (histerezne krivulje) smo registrirali na koordinatnem regulatorju, ki je vgrajen v preizkuševalnem stroju. Frekvenca preizkušanja je bila 30 nihajev na minuto, histerezne zanke pa smo zarisavali pri frekvenci 1 nihaj na minuto.

Določevali smo dinamično trdnost jekla (σ_N) za 10^5 nihajev. Preizkušanj za določevanje dinamične trdnosti za 10^6 nihajev nismo izvajali, ker so zaradi nizke frekvence preizkušanja predolgotrajna. Dinamične trdnosti za 10^4 nihajev pa nam ni uspelo določiti, ker se pri visokih amplitudah napetosti, ki bi povzročile lom v tako kratkem času, že v prvem nihaju ob zanihanju v tlak preizkušanci rahlo uvijejo in so zaradi tega preizkusi popačeni.

Rezultati preizkušanj so grafično prikazani na sl. 6. Dinamična trdnost (σ_N) za 10^5 nihajev pri čisti izmenični obremenitvi ($\sigma_{sr} = 0$) je pri 216 N/mm^2 , kar je za približno 15 % višje od meje plastičnosti preizkuševanega jekla.

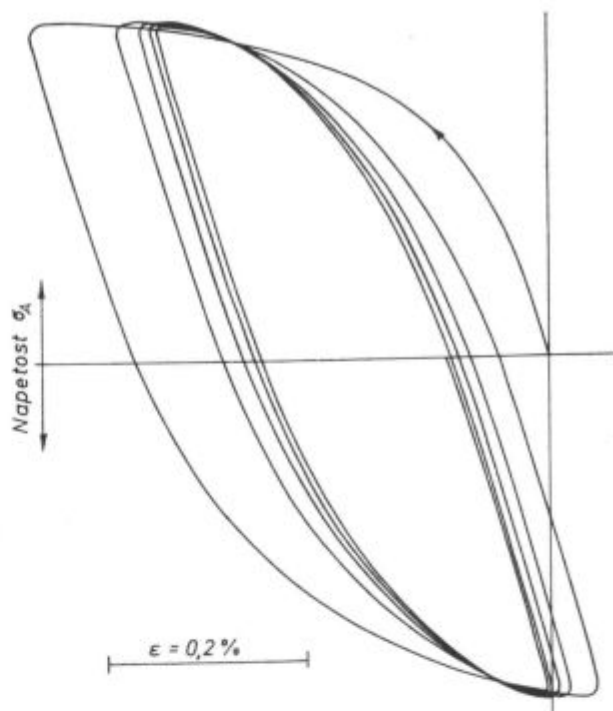
Pri vsakem preizkusu smo registrirali histerezne zanke prvih petih nihajev, nato pa po pet nihajev po 10^3 , 10^4 in 10^5 nihajih, v kolikor se preizkušane c že preje ni prelomil.

Na sl. 7 prikazujemo histerezne zanke prvih petih nihajev pri preizkušanju z amplitudo napetosti $\pm 210 \text{ N/mm}^2$, kar je višje od meje pla-



Slika 6 Grafični prikaz dinamičnih trdnosti pri omejenem številu nihajev za jeklo Prokron 12.

Fig. 6 Graphical presentation of fatigue strengths at limited number of cycles for Prokron 12 steel.



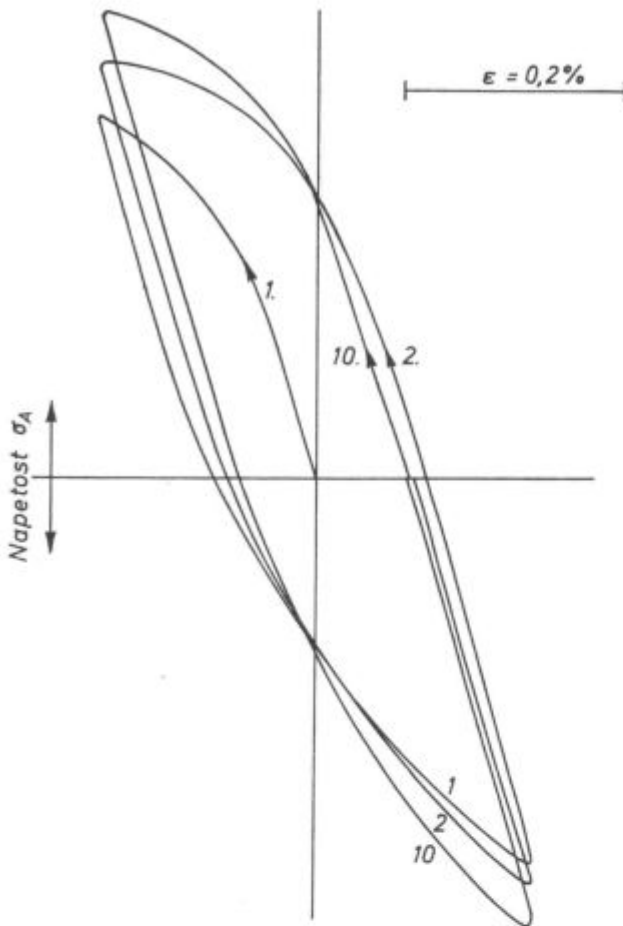
Slika 7 Spremembe histerezne zanke (začetni nihaji) pri stalni amplitudi napetosti.

Fig. 7 Variations of the hysteresis loop (initial cycles) at the constant stress amplitude.

stičnosti jekla. Pri prvem delu nihaja v nategu je bila dosežena trajna deformacija 0,3 %. Kljub izrazitemu Bauschingerjevemu efektu pa je v delu nihaja v tlaku plastična deformacija manjša. Histerezna zanka se pri naslednjih nihajih hitro oži, kar je posledica močne utrditve materiala med cikličnim obremenjevanjem. Po 5000 nihajih znaša širina plastične deformacije le še okrog 0,1 %. Preizkušane c se po 10^5 nihajih ni prelomil.

Zmanjševanje širine histerezne zanke v toku preizkušanja pomeni, da se je material med cikličnim obremenjevanjem utrdil. Ta pojav nam še lepše prikazuje preizkusi utrujanja s krmiljenjem amplitude raztezkov. Na sl. 8 je prikazan primer, kjer je znašala amplituda raztezkov $\pm 0,2$ %, pri čemer sta deleža elastičnega in plastičnega raztezka (shematska razlaga je prikazana na sl. 2b) slučajno skoraj enaka. Utrditev materiala, ki se odraža s povečanjem napetosti, ki je potrebna pri naslednjih nihajih za enak raztezek, je najbolj izrazita pri prvih nihajih, vendar tudi kasneje ne preneha. Pri tem preizkusu ima Buschingerjev efekt klasično obliko.

Z večanjem amplitude napetosti se povečuje začetna širina histerezne zanke, je pa zaradi večjih plastičnih deformacij tudi utrditev jekla Prokron 12 večja, kar pomeni hitreje oženje histerezne zanke v odvisnosti od števila nihajev. To je prikazano na sl. 9 in sicer za različne amplitude napetosti.

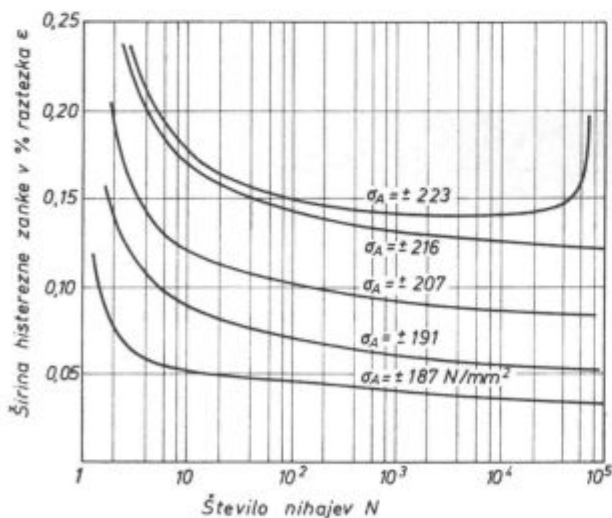


Slika 8

Spremembe histerezne zanke (začetni nihaji) pri stalni amplitudi raztezkov.

Fig. 8

Variations of the hysteresis loop (initial cycles) at the constant strain amplitude.



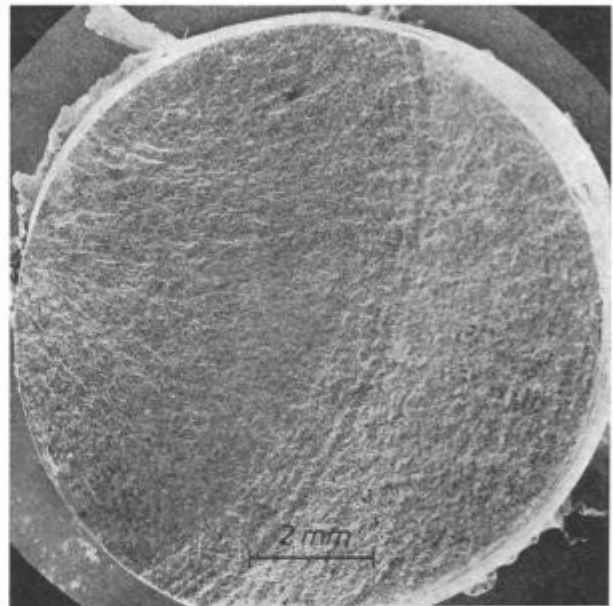
Slika 9

Širina histerezne zanke v odvisnosti od števila nihajev za razne amplitude napetosti.

Fig. 9

Width of the hysteresis loop depending on the number of cycles for various stress amplitudes.

Rezultatov je seveda premalo za kvantitativno oceno, vendar nam krivulje kažejo, da se širina histerezne zanke pri jeklu Prokron 12 zmanjšuje s številom izvršenih nihanj in to v začetnem delu tem bolj izrazito, čim višja je bila amplituda napetosti. Pri preizkušancu, kjer je prišlo do loma, se opazi večanje amplitudi raztezkov pri nihajih neposredno pred lomom. To je povsem razumljivo, saj se s širjenjem razpoke deformacija preizkušanca zaradi zmanjšanega preseka mora povečati. Izredna širina zadnjih deformacij pred lomom enega od naših preizkušancev je prikazana na sl. 10.



Slika 10

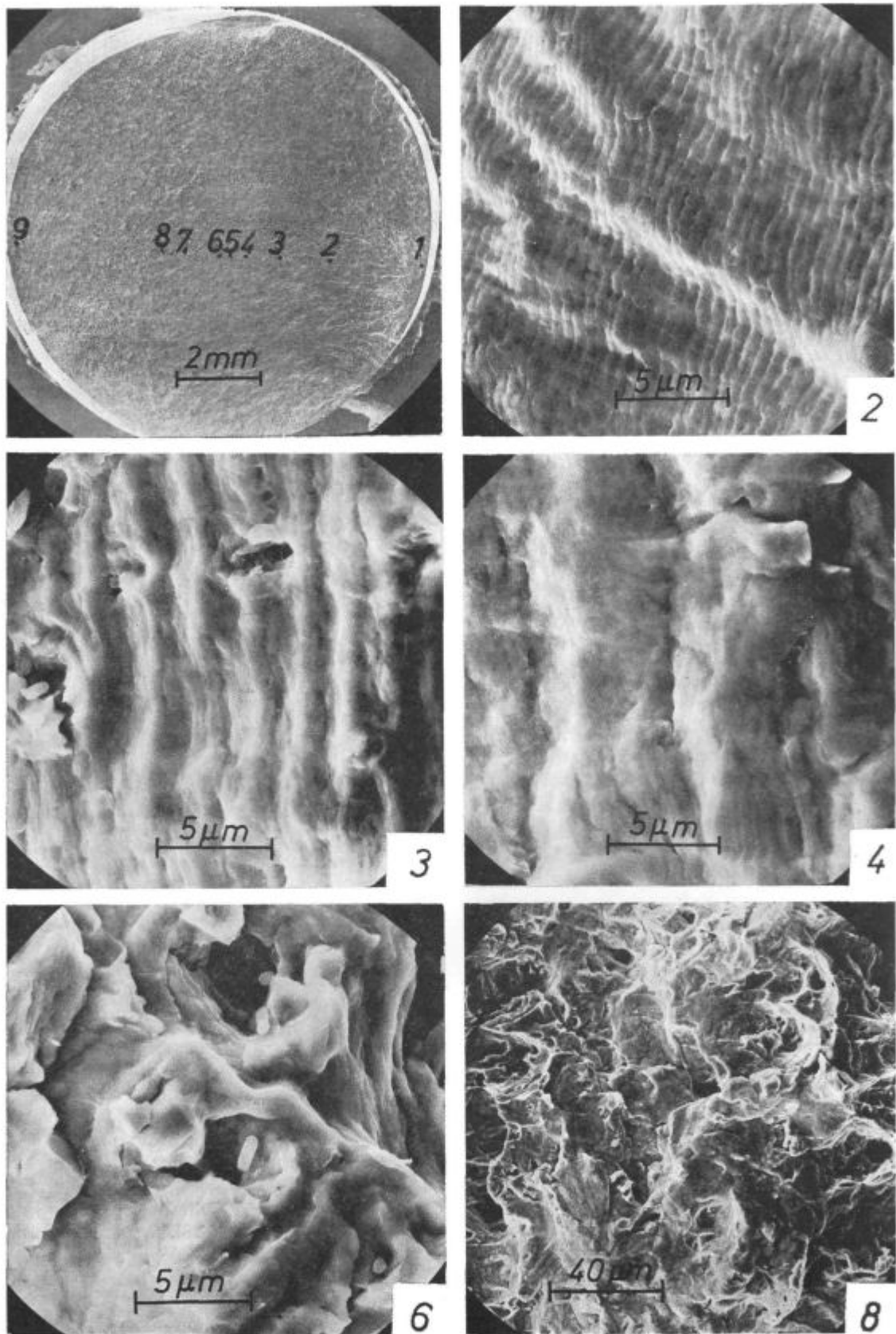
Prelom preizkušanca z vidnimi stopnjami deformacije pred zlomom.

Fig. 10

Fracture of the test piece with visible deformation stages before the destruction.

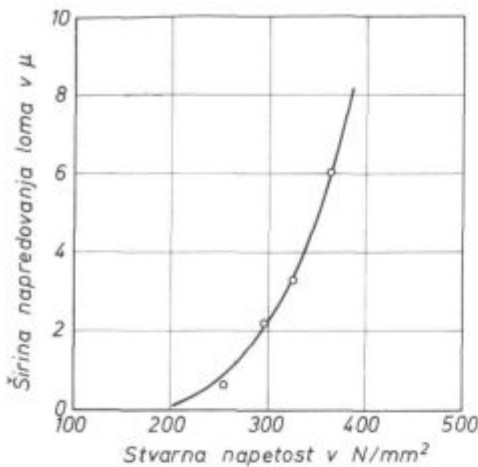
Mikrofraktofske preiskave lomov

Nekatere površine prelomov preizkušancev smo pregledali z elektronskim rastrskim mikroskopom. Na seriji slik prikazujemo karakteristike prelomne površine na mestih, ki so ustrezno označena na makroposnetku. Preizkušane se je prelomil po 68.000 nihajih, amplituda napetosti je znašala $\pm 230 \text{ N/mm}^2$. Iz sekvence slik je razvidno, kako se povečuje širina »letnic« ki so značilne za napredovanje loma od nihaja do nihaja. Medtem ko so do mesta št. 5 »letnice« izrazito vidne, pri čemer se od začetka razpoke na robu (1) proti notranjosti povečuje njihova širina, pa od mesta 6 dalje napredovanja razpoke izgubi svoje mikroskopske značilnosti. Prelom poteka v velikih korakih, po karakteristikah pa postaja plastičen, čeprav še ne z vsemi značilnostmi, kot je to na končnem delu preloma. Po makroskopskem videzu se začnejo zadnji nasilni lom med oznakama 7 in 8.



Slika 11
Mikrofraktografski posnetki prelomnih površin na različnih mestih preloma.
Fig. 11
Microfractographic pictures of fracture areas on various spots of the fracture.

Odnos med širino koraka razpoke in dejansko napetostjo v materialu zaradi zmanjšane preseka



Slika 12

Velikost stopnje napredovanja razpoke v odvisnosti od trenutne napetosti.

Fig. 12

Magnitude of crack propagation depending on the momentary stress.

skušamo prikazati na diagramu na sl. 12. V področju, kjer je velikost »letnic«, oziroma napredovanje razpoke možno izmeriti, je vendarle možno postaviti neko medsebojno odvisnost, kar bi nam omogočilo, da bi približno ocenili število nihajev od nastanka razpoke pa do zloma.

Glede na zadnji del preloma pa izračun pokaže, da je bila raztržna napetost, izračunana na zmanjšani preseki, 561 N/mm², kar je približno enako natezni trdnosti jekla Prokron 12 pri statičnem nateznem preizkusu.

Literatura

1. W. Dahl in sod.: Verhalten von Stahl bei schwingender Beanspruchung, Verlag Stahl Eisen M. B. H. Düsseldorf, 1978.
2. E. Siebel: Die Prüfung der metallischen Werkstoffe, II. izdaja, Springer-Verlag, Berlin, 1955.
3. G. E. Dieter: Mechanical Metallurgy, II. izdaja, Mc Graw-Hill, New York, 1977.
4. Predpisi GOST 10145-62, ASTM 600 T, JUS C.A4, 935
5. J. Zvokelj: Vrtilno-upogibni preizkusi konstrukcijskih jekel, Poročilo Metalurškega inštituta št. 216, 1973.

ZUSAMMENFASSUNG

Beim Ermüdungsversuch mit zeitlich begrenzter Schwingungsfestigkeit, das heisst bei kleiner Lastspielzahl, entstehen im Spannungscyklus elasto-plastische Verformungen. Im Koordinatensystem: Spannung-Verformung werden diese als Hysteresisschleifen registriert. Dieses Phänomen ist besonders bei den Metallstoffen mit einer nichtausgeprägten Streckgrenze interessant, zu denen auch austenitische Stähle gehören.

An dem Stahl Prokron 12, ist die Zeitschwingfestigkeit bei 10⁶ Schwingspiele bestimmt worden, und auch die begleitenden Erscheinungen sind registriert worden. Die Prüfungen sind an der neuen Prüfmaschine INSTRON durchgeführt worden.

Bei der gesteuerten Prüfung mit konstanter Amplitude

der Wechselspannungen sind die Änderungen der Breite der Hysteresisschleife in der Abhängigkeit von der Schwingspielszahl, und bei verschiedenen Spannungsamplituden, gemessen worden.

Mit dem Rasterelektronenmikroskop sind die Bruchflächen, die Risenausbreitung und die Eigenheiten der Bruchfläche, bis zum Bruch, untersucht worden. Es wird festgestellt, dass die Schrittweite eine parabolische Abhängigkeit von der tatsächlichen Spannung aufweist. Dem Aussehen nach kann ein ausgeprägter Ermüdungsbruch bis zu etwa 1/2 Durchmesser in die Tiefe bestimmt werden, später verwischen sich die mikroskopischen Eigenheiten des Ermüdungsbruches, wegen der grossen Schritte der Ausbreitung, immer mehr.

SUMMARY

In low cycle fatigue test i. e. with the limited number of cycles to the destruction, elasto-plastic deformations occur in the stress cycle. In the stress-strain coordinate system they are registered as hysteresis loops. These phenomena are especially interested in the metallic materials with unpronounced yield point like austenite steel.

Fatigue strength for finite life was determined for Prokron 12 steel at 10⁶ cycles. Accompanying phenomena were registered. Tests were made on the new Instron testing machine.

In the tests with monitored constant amplitude of alternating stresses the changes in the width of the

hysteresis loop depending on the cycle number and at various stress amplitudes were measured.

Fracture surfaces were observed in scanning microscope, and propagation of cracks, and the characteristics of the fracture surface to the destruction were analyzed. It was found that step width parabolically increases with the actual stress. The pronounced fatigue fracture can be determined to about one half diameter into the depth, later microscopic characteristics of the fatigue fracture are less evident because of greater steps of the crack propagation.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При появлении усталости в области временно ограниченной динамической нагрузки, т. е. с конечным числом колебаний до наступления разрыва, получаются между циклами напряжения эластично-пластические деформации, которые можно зарегистрировать как гистерезисные петли. Эти явления в особенности примечательны при металлах с недостаточно выраженным пределом пластичности, что характерно также для аустенитных сталей.

На стали марки Prokron 12 определяли динамическую длительную прочность при Ю⁵ колебаний и вели регистрацию сопутствующих явлений. Исследования выполнялись на новом приборе для испытания материала фирмы Inston.

При опытах управления с постоянной амплитудой перемен-

ного напряжения выполнялись измерения изменения ширины гистерезисной петли в зависимости от числа колебаний при различных амплитудах напряжения.

С растровым электронным микроскопом рассмотрены поверхности излома, наблюдали за расширением трещин и за характеристиками поверхности излома все до разрыва. Определили, что ширина шага увеличивается в параболической зависимости от фактического напряжения. По внешнему виду выработанный усталостный разрыв можно определить до 1/2 диаметра в глубину, затем микроскопические характеристики усталостного разрушения, вследствие ускоренного продвижения все более и более сглаживаются.

Odgovorni urednik: Jože Arh, dipl. inž. — Člani dr. Jože Rodič, dipl. inž., Franc Mlakar, dipl. inž., dr. Aleksander Kveder, dipl. inž., Edo Zagar, tehnični urednik

Oproščeno plačila prometnega davka na podlagi mnenja Izvršnega sveta SRS — sekretariat za informacije št. 421-1/172 od 23. 1. 1974

Naslov uredništva: ZPSŽ — Železarna Jesenice, 64270 Jesenice, tel. št. 81-341 int. 880 — Tisk: TK »Gorenjski tisk, Kranj