

## Istraživanje dejstva korozije na dinamičku čvrstoću kod nekih konstrukcionih čelika

Dejstvom korozije spoljna površina metala postaje hrapava tako da dolazi do smanjenja čvrstoće kao posledica dejstva zarez. Ovome treba dodati da nastavljeno dejstvo korozije izgriza duboke i oštre zarez u metalu od čega nastaju sitne pukotine koje omogućuju još dalje prodiranje korozije. Zbog ovoga dinamička čvrstoća uz istovremeno dejstvo korozije jako opada tako da može dovesti do zamornog loma, što je pokazano u radu . Isto tako nije moguće uspostavljanje bilo kakve kvalitativne ili kvantitativne zakonitosti između dinamičke čvrstoće, dejstva korozije uostalom što važi i za dejstvo korozije i kod neopterećenog metalnog elementa. Ovo se mora u svakom pojedinom slučaju ispitati.

**Ključne reči:** zamaranje materijala, dinamička čvrstoća, dejstvo korozije, promenljivo opterećenje, konstrukcioni čelici

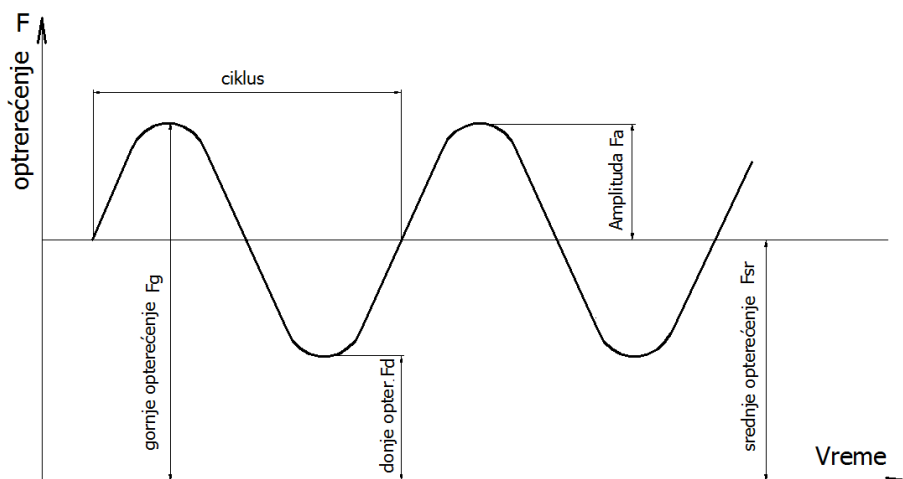
### 1. UVODNA RAZMATRANJA

Dinamička ispitivanja uopšte mogu da se izvođe zatezanjem, pritiskivanjem, savijanjem i uvijanjem i to na epruvetama konstantnog ili promenljivog preseka. Isto tako ispitivanja se mogu proširiti i na odgovarajuća ispitivanja konstrukcionih elemenata i sklopova, [1, 2].

Svrha ovakvih ispitivanja je dobijanje podataka o ponašanju i svojstvima metala izloženih zamaranju. Pri ovome, pod zamaranjem se podrazumeva pojava postepenog razaranja materijala usled dugotrajnog dejstva promenljivih opterećenja.

### 2. OPTEREĆENJE CIKLUSI I NAPONI

Opterećenje koje se menja periodično, približno je po sinusoidnom zakonu. Ovako opterećenje može se u opštem slučaju shvatiti kao superpozicija nekog stalnog srednjeg opterećenja i nekog kolebljivog opterećenja (slika 1). Pod ciklusom se podrazumeva najmanji deo funkcije opterećenje – vreme, koji se periodično ponavlja dok je frekvencija broj ciklusa u jedinici vremena, [3, 4]. Karakteristične vrednosti opterećenja u ciklusu su: gornje opterećenje, donje opterećenje, srednje opterećenje, dok je amplituda apsolutna vrednost polovine algebarske razlike gornjeg i donjeg opterećenja, slika 1.



Slika 1 - Karakteristične veličine opterećenja u ciklusu

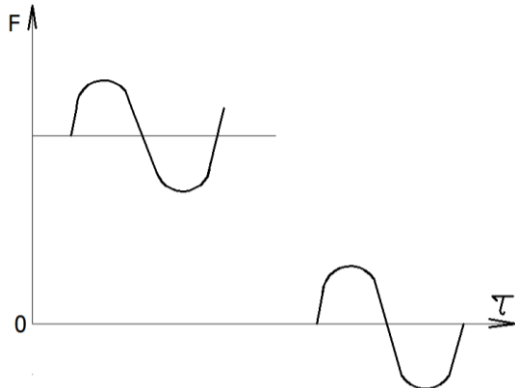
Adresa autora: <sup>1</sup>Tehnološki fakultet Zvornik, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Republika Srpska

Primijeno za publikovanje: 13. 07. 2014.

Prihvaćeno za publikovanje: 21. 09. 2014.

Kod promenljivog opterećenja javljaju se dva slučaja i to: jednosmerno i naizmenično opterećenje. Kod prvog se veličina menja u toku vremena bez promene predznaka a kod drugog se veličina i predznak menjaju u toku vremena (slika 2). Poseban slučaj naizmeničnog promenljivog opterećenja

nastaje kada je srednje opterećenje jednako nuli tj. kada su apsolutne vrednosti gornjeg i donjeg opterećenja jednake – simetrično naizmenično opterećenje.



Slika 2 - Karakteristični slučajevi jednostrano promenljivog i naizmenično promenljivog opterećenja u dijagramu opterećenje – vreme

Napon predstavlja specifično opterećenje u nekoj tački poprečnog preseka epruvete ili konstrukcionog dela. Pri ovome normalni napon  $\sigma$  je napon u pravcu normale na površinu preseka. Normalni napon pri zatezanju je pozitivan a pri pritiskivanju negativan. Postoji i tangencijalni napon koji se javlja u ravni preseka.

Karakteristične vrednosti napona u ciklusu su (slika 3), [2-10]:

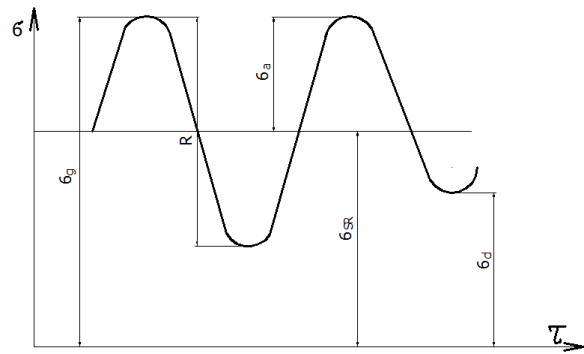
Gornji napon:  $\sigma_g$

Donji napon:  $\sigma_d$

$$\text{Srednji napon: } \sigma_{sr} = \frac{\sigma_g + \sigma_d}{2} \quad (1)$$

$$\text{Amplituda napona: } \sigma_a = \frac{\sigma_g - \sigma_d}{2} \quad (2)$$

$$\text{Raspon napona: } R = \sigma_g - \sigma_d = 2 \cdot \sigma_a \quad (3)$$



Slika 3 - Karakteristične veličine u dijagramu napon – vreme

### 3. KARAKTERISTIČNE VELIČINE PRI ISPITIVANJU ZAMARANJEM

Kao najvažnije veličine smatraju se [5,6,11-14]:

a) Broj ciklusa  $n$  je broj ciklusa do određenog momenta posmatranja

b) Broj ciklusa do loma  $N$  je broj ciklusa koje ispitivana epruveta izdrži do pojave pukotine

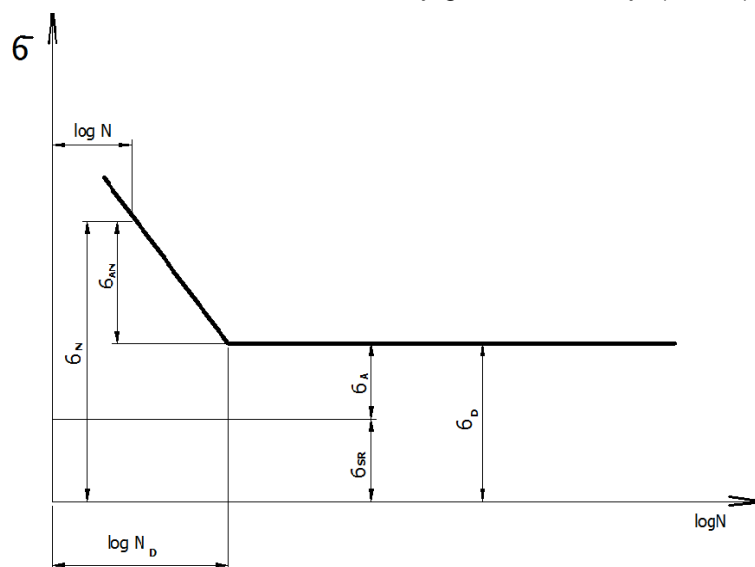
c) Dinamička izdržljivost (dinamička čvrstoća) za  $N$  ciklusa  $\sigma_N$  u opštem slučaju predstavlja napon sastavljen od zbira srednjeg napona  $\sigma_{SR}$  i najveće amplitude napona  $\sigma_{AN}$  pri kome epruveta izdržava  $N$  ciklusa do loma (slika 4). Određuje se iz dijagrama zamaranja i izražava se na dva načina:

$$1. \sigma_N = \sigma_{SR} \pm \sigma_{AN} \quad (4)$$

gde  $\sigma_{SR} + \sigma_{AN}$  predstavlja gornji granični napon, a  $\sigma_{SR} - \sigma_{AN}$  donji granični napon

2. Kao vrednost gornjeg graničnog napona, uz naznačenje srednjeg napona

d) Granični broj ciklusa  $N_D$  predstavlja najmanji broj ciklusa posle koga ne nastaje lom ni pri neograničenom broju ciklusa. Određuje se iz dijagrama zamaranja (slika 4).



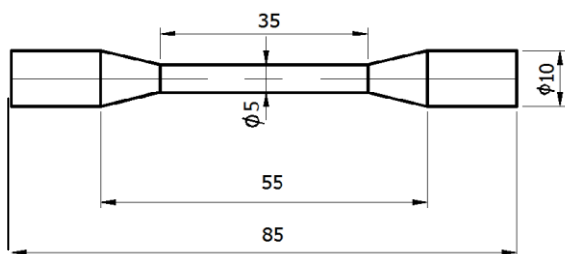
Slika 4 - Dijagram zamaranja

#### 4. USLOVI ISPITIVANJA

Oblik i dimenzije epruvete za normalna ispitivanja propisuju se odgovarajućim standardima u zavisnosti od svrhe i načina ispitivanja zamaranjem. Umesto epruvete mogu se upotrebiti i sami konstrukcioni delovi. Postupak obrade epruvete ne sme da promeni strukturu ni osobine materijala, [7, 8, 15].

Naročitu pažnju treba obratiti kvalitetu hrapavosti površina epruvete, pošto pri zamaranju većina lomova počinje na slobodnoj površini epruvete. Broj epruveta potreban za jedno ispitivanje može biti vrlo različit u zavisnosti od podataka koji se traže, [9, 10, 16].

Sve epruvete upotrebljene za jedno ispitivanje moraju biti potpuno identične u pogledu materijala, oblika, dimenzija i obrade, [2, 6, 17]. Učvršćenje epruvete u čeljusti za ispitivanje zamaranjem treba da bude izvedeno pažljivo da epruveta u toku ispitivanja ne bi bila izložena dopunskim opterećenjima ili vibracijama. Jedan od oblika epruvete koji se često koristi za dinamička ispitivanja prikazan je na slici 5.



Slika 5 - Epruveta za ispitivanje

Način opterećenja zavisi od vrste naprezanja i propisuju se odgovarajućim standardima za pojedine postupke. Način opterećenja mora biti podjednak za sve epruvete u toku jednog ispitivanja.

Kod normalnog jednostepenog ispitivanja, srednje opterećenje je konstantno za sve epruvete a amplitude se stepenasto smanjuju od jedne epruvete do druge. Frekvencija se tako odabira da se izbegne preterano zagrevanje epruvete u toku ispitivanja.

#### 5. TOK ISPITIVANJA

Epruvete se izlažu promenljivim opterećenjima do pojave vidljive pukotine ili do potpunog loma, [10, 11, 18, 19].

Za jedno ispitivanje zadržava se srednji napon konstantan a amplituda napona se smanjuje stepenasto od jedne do druge epruvete i registruje broj ciklusa  $N$  pri kome je došlo do prskanja epruvete. Ovo smanjenje amplitude napona vrši se do one vrednosti pri kojoj se epruveta ne lomi ni pošto je izdržala granični broj ciklusa  $N_D$ .

Pošto se vrednost graničnog broja ciklusa  $N_D$  ne zna unapred to se pri ispitivanju zamaranjem primenjuje uvek neki veći broj ciklusa koji sa dovoljnom sigurnošću premašuje vrednost graničnog broja ciklusa.

Ovaj broj ciklusa iznosi:

$10 \cdot 10^6$  za obične konstrukcione čelike

$100 \cdot 10^6$  za čelike koji se ispituju pod dejstvom korozije

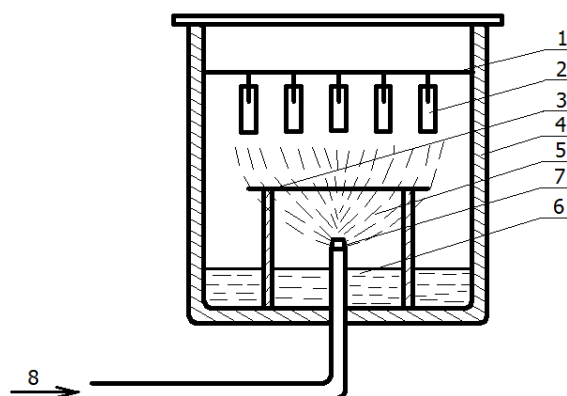
U nekim slučajevima ne postoji dinamička izdržljivost  $\sigma_D$  pa stoga ne postoji ni granični broj ciklusa.

Ako u nekoj epruveti dođe do promene pojave prskotina usled grešaka materijala ili obrade, odgovarajuće rezultate ispitivanja treba odbaciti.

#### 6. ISPITIVANJE POD DEJSTVOM KOROZIJE

Za razliku od normalnih ispitivanja zamaranjem koja se vrše u vazduhu i na temperaturi oko  $20^\circ\text{C}$ , čest slučaj ispitivanja je kada okolina igra bitnu ulogu. Takav slučaj je i ispitivanje zamaranjem uz dejstvo korozije.

Ispitivanja pod dejstvom korozije su vremenski duga. Da bi se vreme ispitivanja smanjilo, pojačava se dejstvo korozije tako što će stvoriti jako nečista atmosfera povećanjem koncentracije korodirajućeg sredstva iznad stvarne u pogonu. U konkretnom slučaju korišćen je aparat za ispitivanje korozije prskanjem rastvora soli veće koncentracije (slika 6). Ispitivanje se izvodi na taj način što se metalne epruvete izlažu prskanju vrelim rastvorom kuhinjske soli u trajanju od nekoliko časova. Nakon toga epruvete se ispituju zamaranjem prema ranije datoj proceduri.

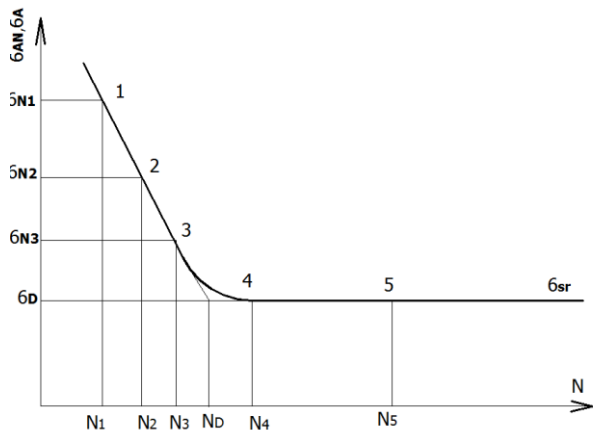


Slika 6 - Šematski prikaz aparata za ispitivanje korozije prskanjem rastvorom soli

#### 7. DIJAGRAM ZAMARANJA

Podaci dobijeni ispitivanjem zamaranjem, dati u zapisniku o ispitivanju, prikazuju se dijagramima zamaranja, [11-20].

U dijagramu zamaranja kao ordinata nanose se dinamičke izdržljivosti ili amplitude napona uz naznačenje srednjeg napona a kao apscisa odgovarajući brojevi ciklusa do loma. Iz praktičnih razloga usvojicemo da su podele i na ordinati i na apscisi logaritamske. Tačke unesene na osnovu rezultata iz zapisnika i dijagram zamaranja spajaju se u kontinualnu krivu. Svakom ispitivanju sa određenim konstantnim srednjim naponom odgovara po jedna kriva linija – dijagram zamaranja (slika 7). Granični broj ciklusa  $N_D$  određuje se grafički prema istoj slici u preseku kose i horizontalne linije u dijagramu. Očigledno na apscisi je nanosena logaritamska podela. Karakteristične eksperimentalne tačke su 1, 2, 3, 4 i 5.



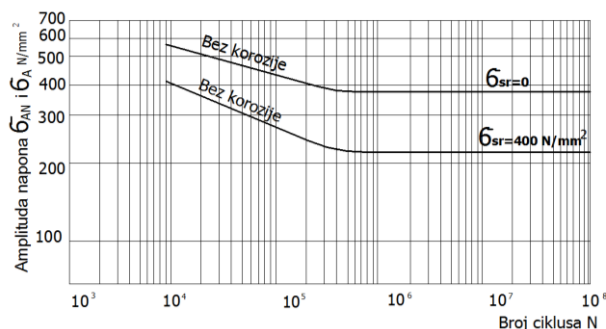
Slika 7 - Dijagram zamaranja sa karakterističnim eksperimentalnim tačkama

## 8. MAŠINA ZA ISPITIVANJE

Ispitivanja u radu, izvedena su na hidrauličnoj mašini sa pulzatorom. Za razliku od kidalice sa mehaničkim pogonom ova mašina ima poseban pogonski komandni uređaj. U njemu je smeštena pumpa visokog pritiska za ostvarenje potrebnog statičkog opterećenja, dinamometar za merenje opterećenja, kao i uređaj za crtanje dijagrama sila – deformacija. Za dinamička ispitivanja pogon se ostvaruje preko pulzatora smeštenog u zasebno kućište iza mašine. Pulzator se pokreće elektromotorom a glavni njegov element je cilindar sa klipom. Frekvencija klipa se reguliše promenom broja obrtaja motora. Klipni prostor pulzatora povezan je širokom cevi sa pogonskim cilindrom mašine. Tako se ostvaruje promena opterećenja u istom ritmu u kome i klip pulzatora oscilira. Kada mašina radi sa pulzatorom na drugom komandnom uređaju mogu se očitati maksimalna i minimalna sila pri dinamičkom opterećenju, ukupan broj promena opterećenja i željeni broj promena opterećenja u jedinici vremena. Pre nego što se pređe na ispitivanje silom promenljive vrednosti potrebno je izvršiti izbor opterećenja.

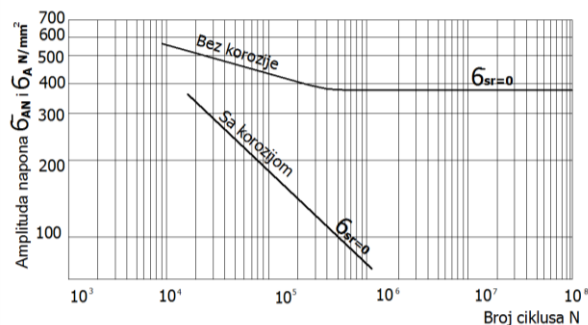
## 9. REZULTATI EKSPERIMENTA

Prema proceduri prikazanoj u prethodnim promenljivima, za konstrukcioni čelik Č.0545, za slučaj kada nema dejstva korozije, za dve vrednosti srednjeg napona, na slici 8 prikazan je dijagram zamaranja.



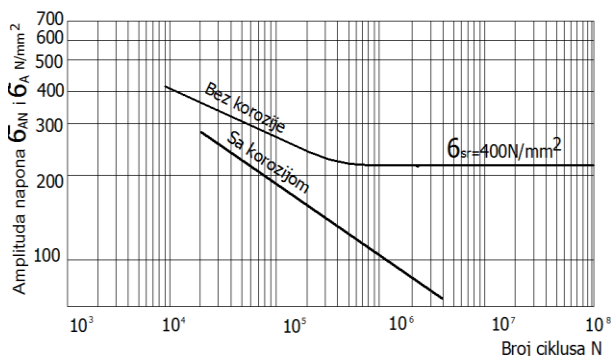
Slika 8 - Dijagram zamaranja za konstrukcioni čelik Č.0545 pri različitim vrednostima srednjeg napona

Na slici 9 prikazani su rezultati ispitivanja istog materijala kao na slici 8., pri srednjem naponu ravnom nuli za slučaj dejstva korozije. Radi poređenja rezultata na istom dijagramu je prikazana zavisnost sa slici 8 (za slučaj kada nema dejstva korozije).



Slika 9 - Dijagram zamaranja za čelik Č.0545 pri dejstvu korozije ( $\sigma_{SR} = 0$ )

Na slici 10 dat je dijagram zamaranja, za isti materijal i to bez korozije i pri dejstvu korozije, ali pri srednjem naponu  $\sigma_{sr} = 400 \text{ N/mm}^2$ .



Slika 10 - Dijagram zamaranja za čelik Č.0545 pri dejstvu korozije ( $\sigma_{SR} = 400 \text{ N/mm}^2$ )

Amplituda napona u zavisnosti od broja ciklusa u logaritamskim koordinatama biće:

$$\log \sigma_{AN} = a + b \cdot \log N \quad (5)$$

smenom  $Y = \log \sigma_{AN}$   $X = \log N$ , zavisnost (5) prelazi u:

$$Y = a + b \cdot X \quad (6)$$

Za četiri eksperimentalne tačke prema slici 9 pri  $\sigma_{SR} = 0$  biće:

$$\begin{aligned} \log 100 &= a + b \cdot \log 30 \cdot 10^6 \\ \log 200 &= a + b \cdot \log 10^6 \\ \log 300 &= a + b \cdot \log 12 \cdot 10^4 \\ \log 400 &= a + b \cdot \log 25 \cdot 10^3 \end{aligned} \quad (7)$$

Koristeći odgovarajući računarski program, rešenje sistema jednačina (7) biće:

$$a = 3,4693, b = -0,1959$$

odnosno, zamenom u (6):

$$Y = 3,4693 - 0,1959 \cdot X \quad (8)$$

Prelaskom u logaritamske koordinate prema (5) biće konačno:

$$\log \sigma_{AN} = 3,4693 - 0,1959 \log N \quad (9)$$

Na isti način, za tri eksperimentalne tačke za isti konstrukcioni čelik pri  $\sigma_{SR} = 400 \text{ N/mm}^2$  biće:

$$\begin{aligned} \log 100 &= a + b \cdot \log 1,1 \cdot 10^6 \\ \log 200 &= a + b \cdot \log 0,8 \cdot 10^5 \\ \log 250 &= a + b \cdot \log 3 \cdot 10^4 \end{aligned} \quad (10)$$

Rešenje sistema (10) biće:

$$a = 3,5511, b = -0,2564$$

odnosno u logaritamskim koordinatama:

$$\log \sigma_{AN} = 3,5511 - 0,2564 \cdot \log N \quad (11)$$

## 10. ZAKLJUČAK

Ispitivanja dinamičke čvrstoće, kako bez korozije tako i pod dejstvom korozije, su dugotrajna i zahtevaju posebnu pripremu i određenu tehniku samog ispitivanja: izbor naprezanja, izbor epruvete i broj epruveta, izbor srednjeg i amplitudnog napona, izbor frekvence. Mašina koja će se koristiti za ispitivanje mora se prethodno proveriti i osposobiti za dugotrajan rad. U radu je primenjen postupak sa relativno malim brojem epruveta kako bi se smanjili troškovi eksperimenta.

Dijagram zamaranja za konstrukcione čelike kako za slučaj bez dejstva tako i sa dejstvom korozije pogodno je prikazati u logaritamskim koordi-

natama. Kada ne postoji dejstvo korozije, dinamička čvrstoća (dinamička izdržljivost) koja predstavlja graničnu vrednost napona pri kojoj ne dolazi do loma pri ispitivanju na zamor, bez obzira na broj ponovljenih opterećenja, kao što je pokazano određuje se iz dijagrama pomoću horizontalne prave. Ovo važi za proizvoljni srednji napon koji se unapred definiše. Logaritamske koordinate omogućuju da se precizno odredi najmanji odnosno granični broj ciklusa  $N_D$  nakon koga ne može doći do loma.

Za slučaj dejstva korozije granični broj ciklusa  $N_D$  ne postoji, tako da se u logaritamskim koordinatama za celo područje ispitivanja dobija samo jedna prava linija kao funkcionalna zavisnost. Prema tome, za ovaj slučaj ne postoji ni dinamička čvrstoća, već amplituda napona naglo opada. Odatle sledi da je slučaj sa dejstvom korozije znatno nepovoljniji sa aspekta dinamičke izdržljivosti.

## LITERATURA

- [1] Hormuth K. (1986): Härtetabeilen, VEB, Leipzig
- [2] Eisenkobb F. (2001): Einführung in die Werkstoffkunde, VEB, Berlin
- [3] Avdeev B. A. (1995): Tehnika opredeleniya mehanisheskih svojstv materialov, Mashinostroenie, Moskva
- [4] Dondik I.T (1992): Mehanisheskie ispitaniya metallov, ANUSSR, Kiev
- [5] Nitschsche K. (1997): Ispitaniya metallov, Metalurgiya, Moskva
- [6] Rubashkin A.G. (1996): Laboratornue raboti po soprotivleniyu, materialov, VSH, Moskva
- [7] Vejbull V. (1994): Ustalosnie ispitaniya i analiz ih rezultatov, Mashinostroenie, Moskva
- [8] Vasić P., Arsenijević M., (1995), Ispitivanje materijala, Naučna knjiga, Beograd
- [9] Pantelić I. (2002): Osobine i ispitivanje metalnih materijala, Naučna knjiga, Beograd
- [10] Bahvalov G. (1994), Zashchita metallov ot korozii, Mashinostraenie, Moskva
- [11] Evans U. (1982): Precis de corrosion, KN, Paris
- [12] Kimov A. (1997): Teoriya i metodi isledovaniya korosii metalov, Mashinostrenie, Moskva
- [13] Esih I. (2003): Osnove površinske zaštite, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [14] Pavlović M., Stanojević D., Mladenović S. (2012): Korozija i zaštita materijala, Tehnološki fakultet, Zvornik

- [15] Bjegović D., Serdar M., Beričević A. (2009): Mehanizam korozije metala, Građevinski fakultet, Zagreb
- [16] Pierre R. R. (2000): Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, New York
- [17] G.Kobrin, (1998), Materials Selection, in ASM Handbook, Vol.13, Corrosion Ohio
- [18] Wranglen G., (2012), An Introduction to Corrosion and Protection of Metals, Inst. Metals, 9-14
- [19] Cramer S. D., Covino B.S. (2003): ASM Handbook Vol.13A, Corrosion, Fundamentals, Testing and Protection, ASM International, Materials Park, Ohio
- [20] B. Pejović, V. Mičić, M. Tomić (2012) Istraživanje uticaja karakterističnih parametara na kvalitet obrađene površine kod nekih nerđajućih čelika pri elektrohemijskoj strugarskoj obradi, Zaštita materijala 53 (4), 305-312.

## ABSTRACT

### INVESTIGATION OF CORROSION EFFECT ON THE DYNAMIC STRENGTH OF SOME STRUCTURAL STEELS

*By corrosion effect, the surface of the metal becomes so rough that there are reduction in metal strength as a consequence of nicking. It should be added that the continuing effects of corrosion produces deep and sharp notches in the metal. It causes tiny cracks that allow further penetration of corrosion. As results of this activities, the dynamic hardness by simultaneously highly corrosion effect substantially decreases so that it may lead to fatigue failure, as shown in this paper. It is also not possible to establish any qualitative or quantitative legality between dynamic strength and corrosion effects. This hold for the effect of corrosion on unloaded metal element. This must be tested in all chance.*

**Keywords:** *Fatigue of materials, dynamic strength, corrosion effects, variable load, structural steels.*

*Scientific paper*

*Received for Publication: 13. 07. 2014*

*Accepted for Publication: 21. 09. 2014.*