

<https://doi.org/10.24867/JPE-1989-06-001>

ORIGINALNI NAUČNI RAD

K. GERIĆ\*, Dj. DROBNJAK\*\*

## STVARANJE ZAMORNE PRSKOTINE NA ZAREZIMA

### Rezime

*Ispitivano je stvaranje zamorne prskotine na dva mikrolegirana dvofazna čelika. Parametar  $\Delta K/\sqrt{\rho}$  predstavlja uticaj zarezna na stvaranje zamorne prskotine. Kritična vrednost ovog parametra zavisi od poluprečnika zarezna. Uticaj zarezna može da se definiše i proizvodom faktora koncentracije naprezanja pri zamaranju  $K_F$  koji zavisi i od dubine i od poluprečnika vrha zarezna, i nominalnog naprezanja  $\Delta\sigma$ . U ovom slučaju ne postoji zavisnost od zarezna.*

*Uslov da dodje do otvaranja prskotine koja ne raste definisan je u ovom radu za čelik mikrolegiran vanadijumom i niobijumom i za čelik mikrolegiran niobijumom.*

## FATIGUE CRACK INITIATION AT NOTCHES

### Summary

*The fatigue crack initiation behaviour of two micro alloyed dual phase steel has been studied. The parameter  $\Delta K/\sqrt{\rho}$  was used to normalize data concerning crack initiation at the notches. The crack initiation threshold seem to depend on notch tip radius. The fatigue concentration factor  $K_F$ , which depends on sharpness, notch depth and applied stress range is used to estimate the notch effect. This parameter satisfactory predicts notch sensitivity. The condition for non propagating cracks are determined for microalloyed vanadium niobium and niobium containing steel.*

\* Gerić mr Katarina, dipl.ing. asistent, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, Vladimira Perića Valtera 2.

\*\* Djordje dr Drobnjak, redovni profesor, Tehnološko-metalurški fakultet, 11000 Beograd, Karnegijeva 4.

## 1. U V O D

Zarezi predstavljaju koncentrator naprezanja. Odnos između maksimalnog elastičnog naprezanja u korenu zareza  $\sigma_{\max}$  i nominalnog naprezanja  $\sigma_{\text{nom}}$  određuje geometrijski faktor koncentracije naprezanja,  $K_T = \sigma_{\max}/\sigma_{\text{nom}}$ . Za eliptične zarez koncentrador naprezanja jednak je (1):

$$K_T = 1 + 2 \sqrt{\frac{a}{\rho}} \quad (1)$$

gde je:  $a$  - veće poluosa elipse (mm)

$\rho$  - poluprečnik vrha zareza (mm)

Ispitujući uticaj zareza, Barsom i McNicol [2, 3] su definisali parametar za stvaranje zamorne prskotine  $\Delta K/\sqrt{\rho}$ . Ako se broj ciklusa naprezanja potreban za stvaranje zamorne prskotine prikaže u zavisnosti od ovog parametra za uzorke sa različitim poluprečnikom zareza, dobijene vrednosti ovog parametra pri velikom broju ciklusa naprezanja ( $10^6$  ciklusa) približavaju se jednoj tzv. kritičnoj vrednosti parametra za stvaranje zamorne prskotine  $(\Delta K/\sqrt{\rho})_{\text{th}}$ , koji ne zavisi od poluprečnika zaobljenja vrha zareza [2, 3]. Ova vrednost se koristi slično kao konvencionalna granica zamora (dinamička čvrstoća). Za manju vrednost od kritičnog parametra neće doći do stvaranja zamorne prskotine.

Medjutim, po mišljenju drugih autora [4,5] navedeni parametar ne može da definiše stvaranje prskotine na vrhu zareza. Zato su predložili drugi prilaz prema kome se prskotina na zarezu stvara zbog lokalne ciklične plastičnosti nastale usled visokog naprezanja na vrhu zareza, dubine  $\epsilon = 0,13 \sqrt{D \cdot \rho}$  (2)

Prskotina se stvara kada se dostigne naprezanje

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{K_f} \quad (3)$$

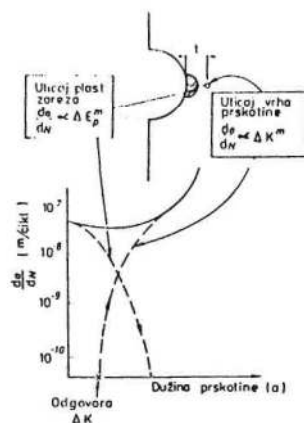
gde su:  $D$  i  $\rho$  - dubina i poluprečnik zaobljenja vrha zareza

$\sigma_0$  - dinamička čvrstoća (uzorak bez zareza)

$K_f$  - faktor koncentracije naprezanja pri zamaranju, koji je jednak:

$$K_F = \left| 1 + 7,69 \sqrt{\frac{D}{\xi}} \right|^{1/2} \quad (4)$$

Kada prskotina poraste, izlazi van uticaja polja zareza u polje mnogo manjeg intenziteta naprezanja sl. 1. Prskotina nastavlja sa rastom samo ako je faktor intenziteta naprezanja veći od kritičnog parametra za rast zamorne prskotine.



Sl. 1.

Postoje različita mišljenja o postojanju kritičnog parametra za stvaranje zamorne prskotine, koji po jednim autorima predstavlja konstantu materijala [2,3] i zavisi samo od vrste materijala, a po drugim autorima zavisi i od geometrije zareza [4,5]. Cilj ovog rada je da odredi kritični parametar za stvaranje zamorne prskotine i da doprinese razjašnjavanju uticaja zareza na stvaranje zamorne prskotine.

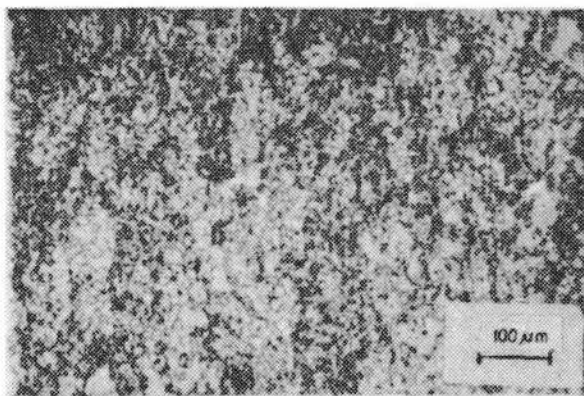
## 2. EKSPERIMENTALNI RAD

### Materijal

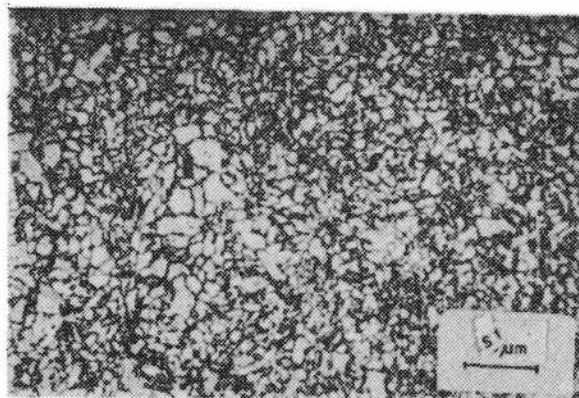
Za ispitivanje je korišćen mikrolegirani čelik sa vanadijumom i niobijumom (0,083% C; 1,44% MN; 0,33% Si; 0,006% S ; 0,011%P; 0,072% V; 0,045% Nb) i legiran niobijumom (0,11%C; 0,87%Mn; 0,17% Si; 0,02%S; 0,05%P; 0,043%Nb. Mikrolegirani čelici su termički obradjeni zagrevanjem u dvofaznoj oblasti na 800°C, pa kalje-

ni u ulju na 250°C, a zatim kaljen u vodi. Dobijena je dvofazna fentno martenzitna struktura sl. 2 i 3. čelik legiran V i Nb ima sitnije zrno od čelika legiranog Nb. Udeo martenzita kod čelika legiranog V i Nb je oko 15%, a kod čelika legiranog Nb je oko 10%.

Tvrdoća čelika legiranog V i Nb je 170 HV<sub>30</sub>, a zatezna čvrstoća 650 MPa, a tvrdoća čelika legiranog Nb je 150 HV<sub>30</sub>, a zatezna čvrstoća 530 MPa.



Sl. 2. Mikrostruktura čelika mikrolegiranog niobijumom i vanadijumom



Sl. 3. Mikrostruktura čelika mikrolegiranog niobijumom

### Uzorci

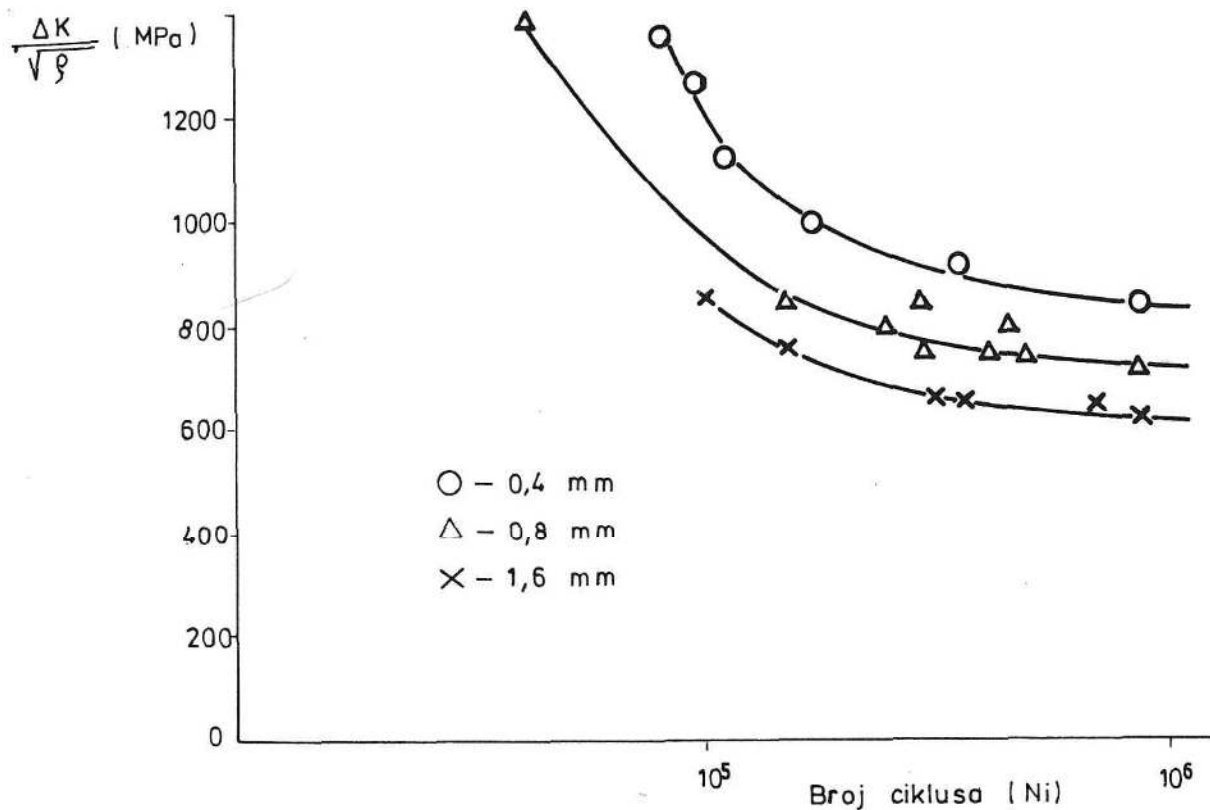
Korišćeni su uzorci za savijanje u tri tačke pravougaonog preseka debljine 7,5 i 12,5 mm sa zarezom. Zarezi su isecani elektroerozionim postupkom dubine 5 mm, a poluprečnik zaobljenja vrha zareza je bio 0,4 mm, 0,8 mm i 1,6 mm.

Ispitivanje je vršeno naizmenično promenljivim opterećenjem visokofrekventnim pulzatorom savijanjem u tri tačke, odnos opterećenja  $P_{\min}/P_{\max} = 0,2$ .

Stvaranje zamorne prskotine na vrhu zareza praćeno je optički, pomoću mikroskopa. Kao trenutak stvaranja prskotine registrovan je broj ciklusa kada je prskotina dostigla dužinu od 0,25 mm od vrha zareza. Za svaki uzorak je korišćen drugi opseg opterećenja da bi se dobio broj ciklusa za stvaranje zamorne prskotine.

## 3. REZULTATI

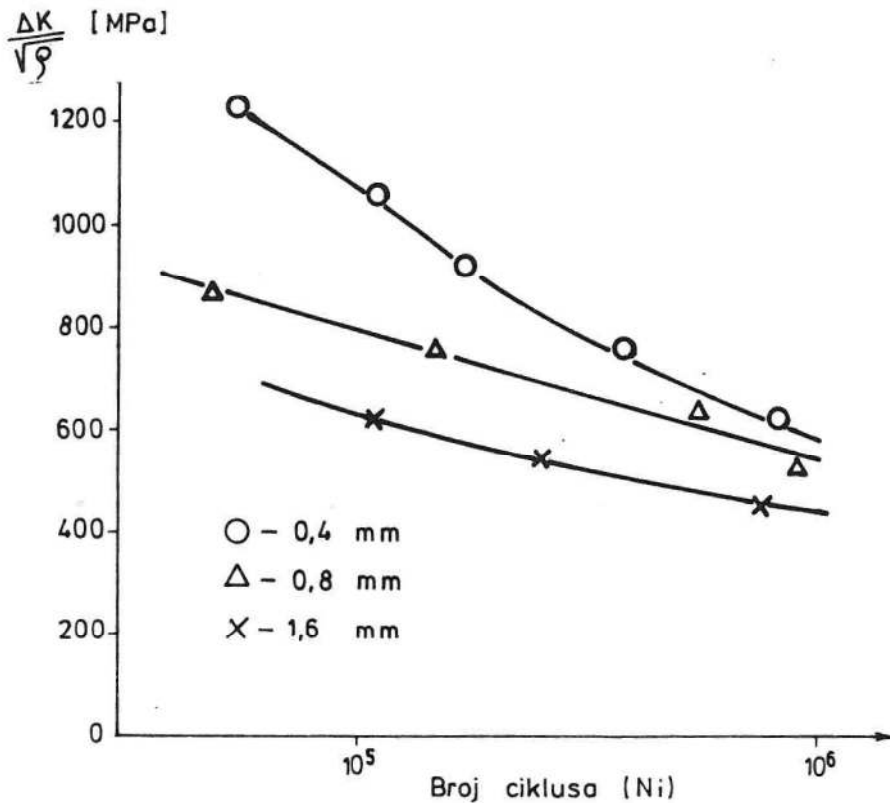
Uticaj poluprečnika zaobljenja vrha zareza na zavisnost broja ciklusa za stvaranje zamorne prskotine ( $N_i$ ) od parametra za stvaranje zamorne prskotine  $\frac{\Delta K}{\sqrt{\rho}}$  prikazan je na sl. 4. za dvo-fazni čelik, legiran vanadijumom i niobijumom a na slici 5. za mikro čelik legiran niobijumom.



Sl. 4. Zavisnost broja ciklusa za stvaranje zamorne prskotine od parametra  $\Delta K/\sqrt{\rho}$  za čelik legiran vanadijumom i niobijumom

Broj ciklusa da se stvori zamorna prskotina povećava se smanjenjem parametra  $\frac{\Delta K}{\sqrt{\rho}}$ . Za veći poluprečnik zaobljenja vrha zareza pri istom parametru ( $\frac{\Delta K}{\sqrt{\rho}}$ ), potreban je manji broj ciklusa za stvaranje.

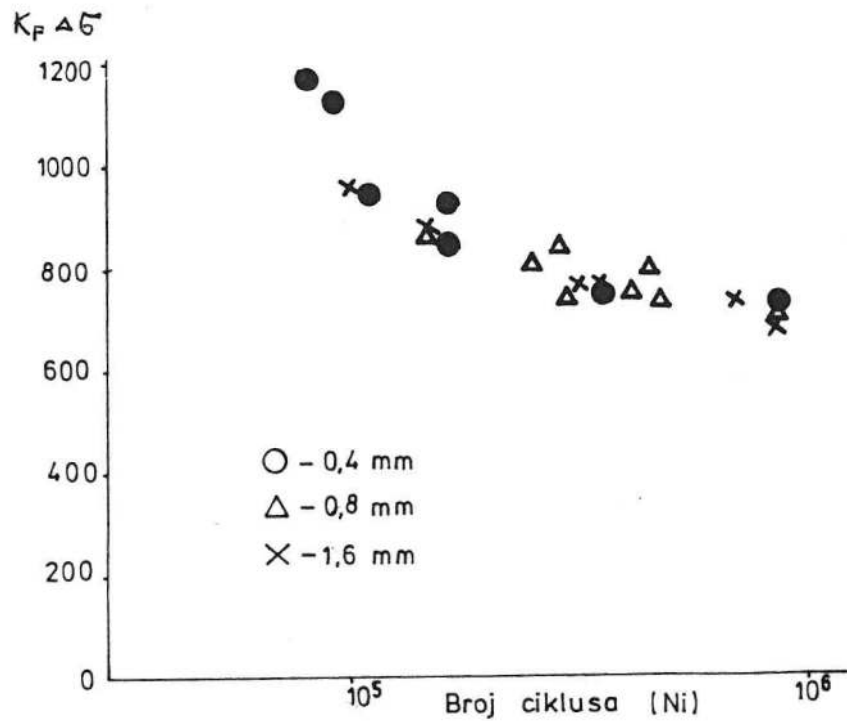
Kritični parametar za  $(\frac{\Delta K}{\sqrt{\rho}})_{th}$  pri  $10^6$  ciklusa opada sa 830 MPa na 720 MPa i 630 MPa sa povećanjem zareza od 0,4 mm na 0,8 mm i 1,6 mm za dvofazni čelik legiran vanadijumom i niobijumom. Za čelik legiran niobijumom dobijena vrednost kritičnog parametra za stvaranje zamorne prskotine za poluprečnik zaobljenja vrha zareza od 0,4 mm iznosi 600 MPa, za 0,8 mm iznosi 520 MPa, a za 1,6 mm iznosi 410 MPa.



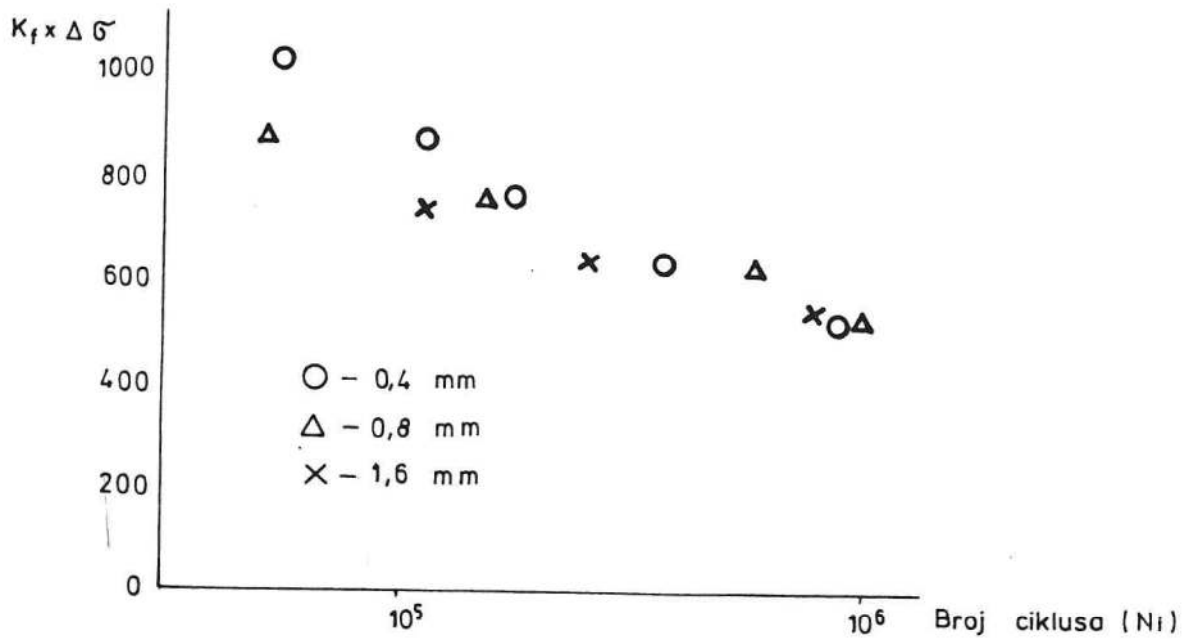
Sl. 5. Zavisnost broja ciklusa za stvaranje zamorne prskotine od parametra  $\Delta K/\sqrt{\rho}$  za čelik legiran niobijumom

Zavisnost broja ciklusa za stvaranje zamorne prskotine predstavljena je u zavisnosti od faktora koncentracije naprežanja pri zamaranju proračunatog prema izrazu (3) za mikro legiran čelik vanadijumom i niobijumom, sl. 6 i za čelik legiran niobijumom, sl. 7.

Za čelik mikrolegiran vanadijumom i niobijumom dobija se 710 MPa, a za čelik legiran niobijumom 540 MPa.

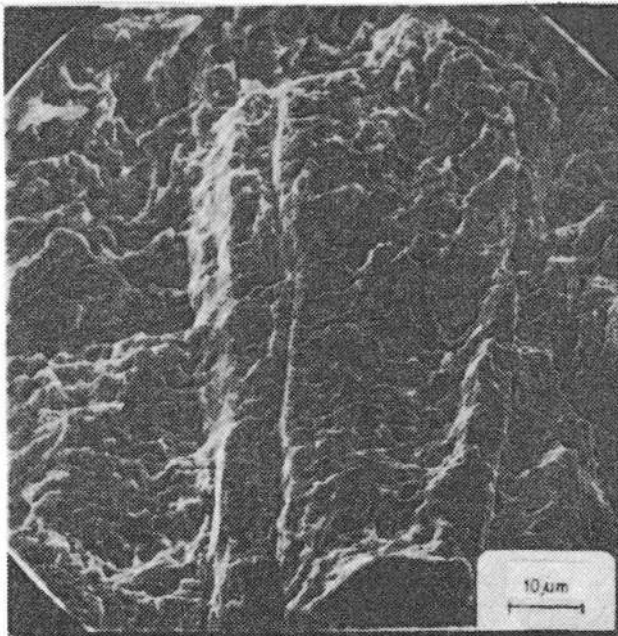


Sl. 6. Zavisnost broja ciklusa za stvaranje zamorne prskotine od faktora koncentratora zamaranja  $K_F \Delta \sigma$  za čelik legiran vanadijumom i niobijumom

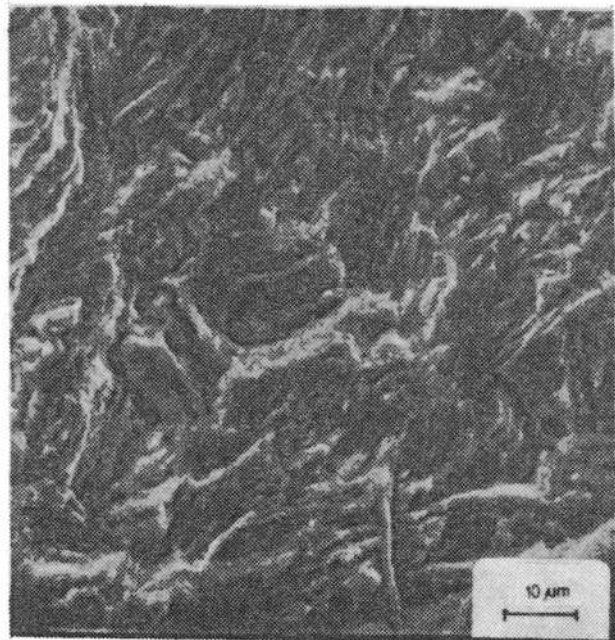


Sl. 7. Zavisnost broja ciklusa za stvaranje zamorne prskotine od parametra koncentratora zamaranja  $K_F \Delta \sigma$  za čelik legiran niobijumom

Prelomna površina blizu zareza odlikuje se smicajnim površinama, sl. 8. i 9.



Sl. 8. Prelomna površina na granici zareza - zamor za čelik V/Nb



Sl. 9. Prelomna površina na granici zareza - zamor za čelik sa Nb

#### 4. DISKUSIJA

Rezultati ispitivanja ukazuju da parametar  $(\frac{\Delta K}{\sqrt{\rho}})_{th}$  koji u sebi sadrži i uticaj zareza, zavisi od geometrije zareza, a ne samo od vrste materijala. Razlika između ovog parametra za najmanji i najveći poluprečnik zaobljenja vrha zareza iznosi oko 30% za čelik legiran vanadijumom i niobijumom, a za čelik legiran niobijumom 40%.

Objašnjenje za postojanje kritičnog parametra za stvaranje prskotine se zasniva [2,3] na verovatnoći stvaranja zamorne prskotine u plastično deformisanom području u korenu zareza. Verovatnoća stvaranja zamorne prskotine trebala bi da zavisi pre svega od deformisane zapremine. Kada se poluprečnik zaobljenja vrha zareza povećava, veća zapremina materijala je izložena visokom naprezanju na korenu zareza, pa bi trebala da bude veća verovat-



noća za stvaranje zamorne prskotine.

Pretpostavka i objašnjenje pomenutih autora da pri  $10^6$  ciklusa postoji kritični parametar za stvaranje zamorne prskotine koji više ne zavisi od zaobljenja zarez, ne može se u potpunosti prihvatiti. Pri razmatranju stvaranja zamorne prskotine mora se imati u vidu da se prskotina pri stvaranju nalazi u polju uticaja zarez, čija veličina zavisi od dubine zarez i poluprečnika zaobljenja vrha zarez (izraz 2) [4, 5], a da se intenzitet naprezanja u polju uticaja zarez povećava u skladu sa faktorom koncentracije naprezanja pri zamaranju  $K_f$  (izraz 4).

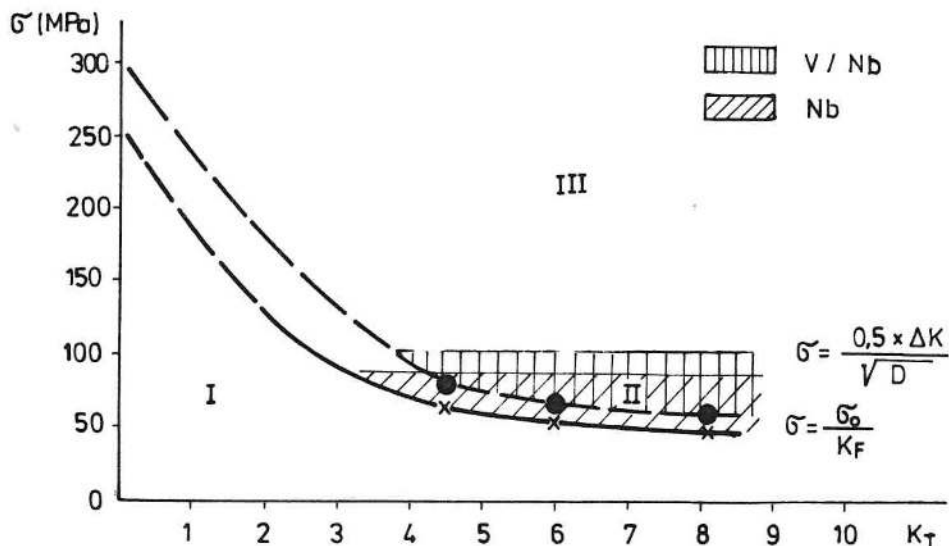
Kada se broj ciklusa za stvaranje zamorne prskotine predstavi u funkciji proizvoda nominalnog opsega naprezanja  $\Delta\sigma$  i faktora koncentracije naprezanja pri zamaranju, onda zavisi samo od vrste materijala, a ne zavisi od zarez parametra  $K_f\Delta\sigma$ .

Za male dužine prskotine na oštrim zarezima  $l \ll D$  može se iz izraza  $\Delta K_{th} = 1,12\sigma\sqrt{\pi D}$  (ovo je standardni izraz za proračun faktora intenziteta naprezanja pri zatezanju ploče sa zarezom), pronaći minimalno nominalno naprezanje pri kome će doći do loma, a to je:

$$\sigma = \frac{0,5\Delta K_{th}}{\sqrt{D}} \quad (5)$$

Ako se predstavi primenjeno naprezanje u funkciji od faktora koncentracije naprezanja  $K_T$  (izraz 1) dobijamo tri oblasti: oblast I, gde se neće stvoriti prskotina, oblast II, gde će se stvoriti prskotina, ali neće rasti i oblast III, gde će doći do loma. Za zarez ispitivane u ovom radu dijagram zavisnosti naprezanja od faktora koncentracije naprezanja prikazan je na sl. 10. Naprezanje proračunato na osnovu kritičnog parametra za rast zamorne prskotine  $\Delta K_{th}$  (5) iznosi 103 MPa, odnosno 90 MPa za zarez dubine 5 mm, a  $\Delta K_{th}$  vrednost od 14,6 MPa $\sqrt{m}$  za čelik legiran vanadijumom i niobijumom i 12,8 MPa $\sqrt{m}$  za čelik i legiran niobijumom.

Odredjivanje veka trajanja za zarezani uzorak koji je pod dejstvom naprezanja većim od naprezanja pri kome prskotina ne raste, može da se izvrši tako što se odredi broj ciklusa za stva-



Sl. 10. Oblasti zamora u zavisnosti od zareza

ranje male prskotine dužine približno  $0,13 (D\rho)^{1/2}$  i onda izvrši integracija prema Parisovoj jednačini za rast zamorne prskotine.

Veća otpornost za zamor dobijena je za čelik legiran vanadijumom i niobijumom što je posledica uticaja legirajućih elemenata i taloženog ojačavanja za čelik mikrolegiran vanadijumom i niobijumom.

## 5. ZAKLJUČCI

1. Kritični parametar za stvaranje zamorne prskotine za čelik mikrolegiran vanadijumom i niobijumom za poluprečnik zaobljenja vrha zareza od 0,4 mm, 0,8 mm i 1,6 mm iznosi 830MPa, 720MPa, 630MPa, a za čelik legiran niobijumom 600MPa, 520 i 440MPa. Razlike koje se dobijaju za vrednost ovog parametra pokazuju da ovaj parametar ne određuje u potpunosti uticaj zareza oko vrha prskotine.

2. Faktor koncentracije naprezanja pri zamaranju  $K_F$  odnosno  $K_F \cdot \Delta\sigma$  definiše polje zareza tako da ova vrednost za čelik mi-

krolegiran vanadijumom i niobijumom iznosi 710 MPa a za čelik mikrolegiran niobijumom 530 MPa. Ovaj faktor zavisi samo od vrste materijala, a ne zavisi od zarezima.

3. Veće vrednosti kritičnog parametra za stvaranje zamorne prskotine, kao i faktora  $K_F \cdot \Delta\sigma$  se dobijaju za čelik mikrolegiran vanadijumom i niobijumom što je posledica mikrostrukture i veće zatezne čvrstoće.

## 6. L I T E R A T U R A

- [1] Frost, N.E., Harsh, K.J. and Pook L.P. Metal Fatigue, Oxford University Press, Oxford 1974.
- [2] Rolfe, S.T., and Barsom, J.M. Fracture and Fatigue control in structures, Prentice Hall, Englewood Cliffs, Nd., (1977), 215.
- [3] Barom, J.M. and McNicol, R.C., Fracture Toughness; and Slow-Stable Cracking, ASTM STP 559, (1974), 1983.
- [4] Smith, R.A. and Miller, K.J., Int. I. Mech.Sci., vol. 19, (1977), 11.
- [5] Smith, R.A. and Miller, K.J., Int. I.Mech. Sci., Vol. 20, (1978), 201.
- [6] Gerić, K. and Drobnjak, D.: 5<sup>th</sup> ECF, Lisabon (1984), 115.