

PROCJENA NAPONSKOG STANJA I BROJA CIKLUSA DO NASTANKA PUKOTINE U NOSEĆIM VALJCIMA ROTACIONE PEĆI ZA KLINKERE

PREDICTION OF THE STRESS AND NUMBER OF CYCLES TO CRACK INITIATION IN SUPPORT ROLLERS OF CEMENT KILN

Alma Žiga, dipl. inž. maš.
Mašinski fakultet,
Univerzitet u Zenici,
Zenica

REZIME

Nosivi valjci rotacione peći za pečenje klinkera izloženi su cikličnom naprezanju, pri čemu u određenim okolnostima: povećan koeficijent trenja ili smanjena površina kontakta, dolazi do stvaranja plastične deformacije materijala blizu površine i stanja tzv. plastične stabilizacije materijala ili nakupljanja plastičnih deformacija. Vremenom dolazi do pojave niskocikličnog zamora i pojave pukotina. Određenim modelima za predviđanje nastanka pukotine može se prognozirati broj ciklusa, odnosno vrijeme eksploatacije valjka do nastanka pukotine.

Analiza naponskog stanja u nosivom valjku pri određenim radnim uslovima kao i procjena radnog vijeka do nastanka pukotine može biti vrijedna informacija mašinskoj službi koja je zadužena za održavanje rotacione peći za klinkere.

Ključne riječi: broj ciklusa do nastanka pukotine, zamor kod kontakta kotrljanja.

SUMMARY

The support rollers of cement kiln are subjected to cyclic loads, under which, when certain circumstances are met: high coefficient of friction or reduced area of contact, plastic deformation would be created on surface or below. Cyclic plastic deformation would bring to plastic shakedown or ratcheting. During time, this would create low-cycle fatigue and crack initiation. Number of cycles, i.e. the time of exploitation for crack initiation can be predicted by a critical plane theory.

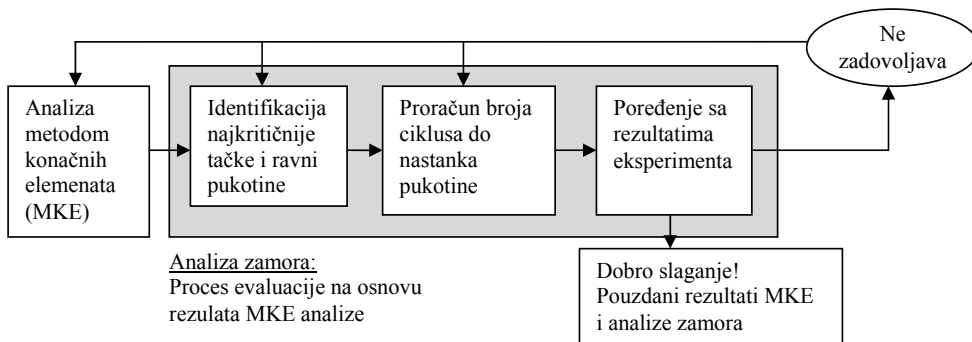
The stress analysis in support roller under certain working condition and evaluation of the working period to crack initiation could be valuable information for the maintenance service of cement kiln.

Keywords: number of cycles for crack initiation, rolling contact fatigue.

1. UVOD

Noseći valjci rotacione peći izloženi su cikličnom naprezanju usljed kontakta kotrljanja sa prstenovima peći. Kod kontakta kotrljanja u gornjim slojevima materijala javlja se složeno naponsko stanje sastavljeno od perioda zatezanja, smicanja i na kraju pritiska. Za takva tzv. višeosna, neproporcionalna naponska stanja kao najpodesniji model za procjenu broja ciklusa do nastanka pukotine pokazao se model istraživača: Jiang i Sehitoglu. Oni su definisali tzv. parametar zamora FP koji se izračunava za sve ravni u svakoj tački koja se nalazi u zoni

kontakta, tokom jednog ciklusa opterećivanja. Ovaj model koristi se u velikom broju radova koji tretiraju zamor kod kontakta kotrljanja. Najveći broj istraživanja posvećen je zamoru kod vagonkog točka ili šine [1]. Algoritam postupka procjene prikazan je na slici:

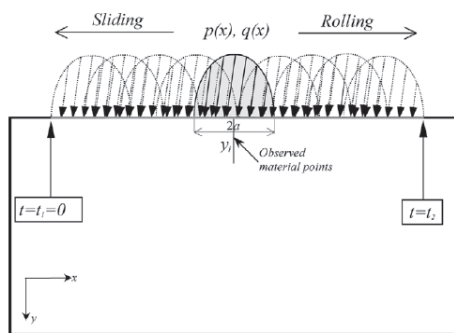


Slika 1. Strategija za procjenu vijeka zamora do nastanka pukotine[1]

Na osnovu rezultata numeričke analize određuje se kritična tačka i ravan. Kada se nađe kritična ravan, određuje se broj ciklusa do nastanka pukotine i rezultati se porede sa eksperimentom. Pretpostavljajući da su rezultati eksperimenta pouzdani i da numerički rezultati pokazuju ne zadovoljavajuće slaganje, FE (finite element) model i proces procjene se kritički preispituje i ažurira sve dok se ne postigne zadovoljavajuće slaganje. Kada se FE model i analiza zamora kalibrišu, oni se mogu lako koristiti za primjere bez fizičkog eksperimenta.

2. KONCEPT KRITIČNE RAVNI

Nastanak pukotine usljed zamora podrazumijeva pojavu pukotine koja obuhvata 3 do 5 zrna materijala, približno oko 0,5 mm. Da bi se primjenila prethodno opisana strategija potrebno je imati numerički model tijela koje je izloženo kontaktu kotrljanja. Vremenski ciklus nanošenja opterećenja sastoji se od Hertzovog paraboličkog pritiska sa ili bez trenja:



Slika 2. Pokretni Hertzov parabolični pritisak sa trenjem [2]

Modeli su najčešće ravni (2D) modeli. Pri tome se u svim elementima jednog poprečnog presjeka prati promjena naponskog stanja (s_x, s_y, s_z, t_{xz}) tokom kretanja opterećenja. Rezultati numeričke analize služe za nalaženje elementa u kome će biti najveća vrijednost parametra zamora FP u toku jednog ciklusa opterećivanja. Pri tome se koristi rotacija tenzora napona i deformacija da bi se odredio položaj ravni sa FP_{max} :

$$FP_{\max} = \left(\langle \sigma^{\max} \rangle \frac{\Delta \varepsilon}{2} + J \Delta \tau \cdot \Delta \gamma \right)_{\max} = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \varepsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad \dots(1)$$

Ideja je da se za nekoliko tačaka, na vertikalnoj osi, u zoni kontakta, za svaki položaj ravni, odredi: raspon promjene ugaone deformacije D_γ , raspon promjene tangencijalnog napona D_τ , raspon promjene linearne deformacije D_ε i maksimalna vrijednost pozitivnog normalnog napona s^{\max} tokom jednog ciklusa opterećivanja. Za koeficijent J uzima se vrijednost $J=0,2$ (uticaj smičućeg napona i deformacije na pojavu pukotine).

Koeficijenti u drugom dijelu izraza imaju sljedeća značenja:

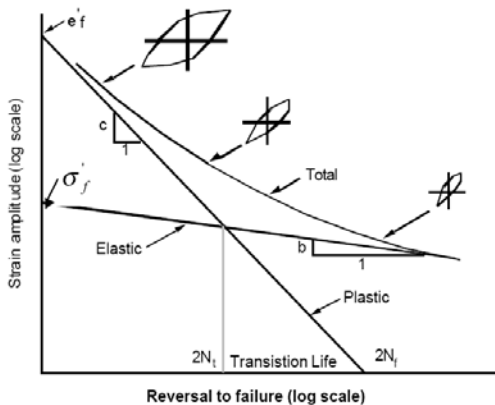
e_f' - koeficijent duktilnosti pri zamoru kod aksijalnog naprezanja

s_f' - koeficijent čvrstoće pri zamoru kod aksijalnog naprezanja

b – eksponent čvrstoće pri zamoru

c – eksponent duktilnosti pri zamoru

Ovi koeficijenti određuju se na osnovu ispitivanja: amplituda linearne deformacije – broj ciklusa do loma (na engleskom: ε -N, strain-life ili fatigue life). Ovim ispitivanjem dobiva se dijagram na slici 3:



Slika 3. Kriva amplituda linearne deformacije-broj ciklusa do loma (strain-life curve)



Slika 4. Deformacijom kontrolisani eksperiment (ASTM E 606)

Pri malim amplitudama deformacije, histerezna kriva ima uzak oblik, što znači da je u ukupnoj deformaciji mali udio plastične deformacije. Sa većim vrijednostima amplitude deformisanja, manji je broj ciklusa do pojave loma i veći je udio plastične deformacije te histerezna kriva ima širi oblik.

Da bi se dobila kriva potrebno je oko desetak epruveta (slika 4), od kojih se svaka ispituje sa različitim rasponom amplitude deformacije (raspon se kreće od 0,5% do 7%). Svaka epruveta je izložena simetričnom aksijalnom opterećenju, pri čemu se kontroliše promjena amplitude deformacije (strain-controlled experiments). Eksperiment traje do loma pri čemu se bilježi broj ciklusa $2N_f$.

Na osnovu dobivenih tačaka $\left(\frac{\Delta \varepsilon_i}{2}, 2N_{fi} \right)$ povlači se kriva oblika:

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} (2N_f)^b + \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad \dots(2)$$

koristeći nelinearnu regresiju u softveru npr. Mathematica i pri tome se određuju potrebni koeficijenti i eksponenti: $\sigma_f', \varepsilon_f', b, c$.

3. MODEL MATERIJALA

Softver Abaqus za analizu naponskog stanja pri cikličnoj promjeni opterećenja zahtijeva da se unesu parametri izotropnog i kinematskog očvršćavanja materijala. Naime, pri cikličnom opterećivanju, materijal ima drugačiju krivu napon-deformacija u području plastičnosti, nego kod monotonog opterećivanja. Neki materijali očvršćavaju, neki omekšavaju zavisno od vrste materijala, termičke obrade i raspona promjene deformacije. Model materijala mora da uzme u obzir sljedeće fenomene: Baušigerov efekat, ciklično očvršćavanje sa plastičnom stabilizacijom, progresivno nakupljanje plastičnih deformacija, relaksaciju srednjeg napona.

Kada se pojednostavljuje ponašanje materijala i zanemaruje kinematsko očvršćavanje, koristi se jednostavan matematički izraz za ponašanje materijala (Ludwik power law):

$$s = s_y + k \times (e_p)^m \quad \dots(3)$$

gdje je:

s_y - početni napon tečenja materijala,

k, m - parametri plastičnog očvršćavanja,

e_p - plastični dio deformacije.

U modelima sa kinematskim očvršćavanjem, centar površine tečenja pomjera se u koordinatnom sistemu glavnih napona (slika 6). Dodatno, kada se koristi model sa nelinearnim izotropno/kinematskim očvršćavanjem, opseg površine tečenja može rasti ili se smanjivati zbog izotropne komponente. Ove osobine dozvoljavaju modeliranje neelastičnih deformacija u metalima koji su izloženi cikličnoj promjeni opterećenja ili temperature, što rezultira značajnim neelastičnim deformacijama i niskocikličnim zamorom.

Položaj površine tečenja u koordinatnom sistemu glavnih napona definisan je Ziegler-ovim zakonom, kome se dodaje član $g a \dot{\varepsilon}^p$ da bi se postigla nelinearnost:

$$\dot{\alpha} = C \dot{\varepsilon}^p \frac{1}{\sigma_0} (\sigma - \alpha) - \gamma \alpha \dot{\varepsilon}^p \quad \dots(4)$$

Gdje je: a "back stres" tenzor koji definiše centar površine tečenja, $\dot{\varepsilon}^p$ je inkrementalna promjena ekvivalentne plastične deformacije, $\dot{\alpha}$ inkrementalna promjena "back stress" tenzora, C i g su parametri materijala. C je početni modul kinematskog očvršćavanja, dok parametar g određuje brzinu promjene kojom opada modul kinematskog očvršćavanja sa porastom plastične deformacije.

Veličina površine tečenja (tj. komponenta izotropnog očvršćavanja) u AF (Amstrong i Frederick) modelu plastičnosti je definisana jednačinom:

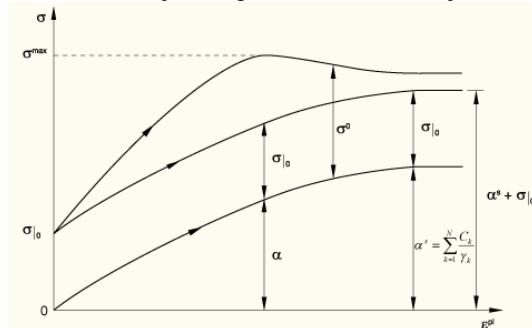
$$R = R_0 + Q_A \left(1 - \exp(-b \times \bar{\varepsilon}^p) \right) \quad \dots(5)$$

gdje je: R trenutna veličina poluopsega površine tečenja, R_0 je napon tečenja pri nultoj plastičnoj deformaciji, Q_A, b su parametri materijala i $\bar{\varepsilon}^p$ je akumulirana, ekvivalentna plastična deformacija. Q_A je maksimalna promjena veličine površine tečenja, dok b definiše brzinu kojom se veličina površine tečenja mijenja kako se razvijaju plastične deformacije.

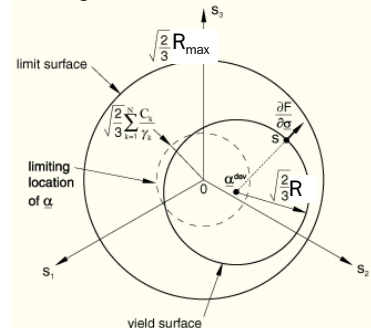
Razvoj kinematskih i izotropnih komponenta očvršćavanja prikazan je na slici 5 za slučaj jednoosnog opterećenja i na slici 6 za slučaj višeosnog opterećenja.

Da bi se odredili parametri kinematskog i izotropnog očvršćavanja materijala: Q_A, b, C, g koriste se podaci jednoosnog, simetričnog, deformacijom-kontrolisanog, cikličnog eksperimenta. U eksperimentu se koristi epruveta po standardu ASTM E 606 (slika 4),

modula elastičnosti E i Poasonovog koeficijenta μ . Usvaja se raspon deformacije prema očekivanom rasponu pri kontaktu kotrljanja, npr. $\Delta \epsilon = 1,5\%$. Pri jednom eksperimentu kalibrišu se obje komponente očvršćavanja: kinematska i izotropna.



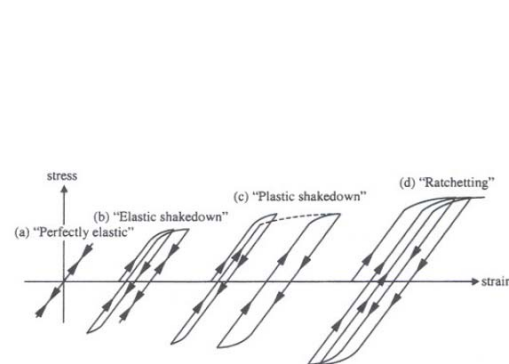
Slika 5. Jednoosno očvršćavanje u nelinearnom izotropnom/kinematskom modelu [3]



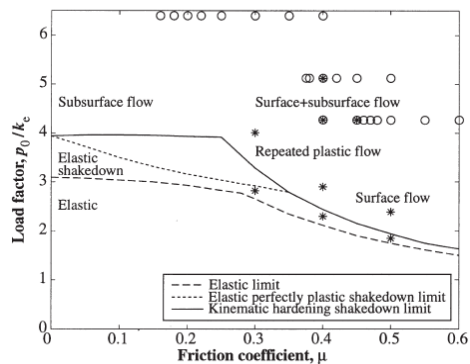
Slika 6. Trodimenzionalna slika očvršćavanja u nelinearnom izotropnom/kinematskom modelu [3]

3.1 Odgovor materijala prilikom cikličnog opterećivanja

Tokom cikličnog opterećivanja materijala može doći do: a) potpuno elastičnog ponašanja materijala, b) elastične stabilizacije materijala c) plastične stabilizacije materijala d) progresivnog nakupljanja plastičnih deformacija (slika 7). Odgovor materijala zavisi od radnih uslova: odnosa p_0/k_e (p_0 maksimalni kontaktni pritisak, k_e tečenje materijala pri smicanju) i od koeficijenta trenja dvije površine u kontaktu. Slika 8 predstavlja mapu stabilizacije feritno-perlitnog čelika za šine i očekivano ponašanje materijala za date radne uslove. Na osnovu očekivanog odgovora materijala, može se predvidjeti položaj tečenja materijala i u tom području FE modela prilagoditi veličinu mreže konačnih elemenata.



Slika 7. Odgovor materijala [1]



Slika 8. Mapa stabilizacije feritno-perlitnog čelika za šine [1]

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana strategija za procjenu broja ciklusa do pojave pukotine. Prvo mora postajati numerički model sa pokretnim kontaktnim opterećenjem. Rezultati numeričke analize, tokom jednog ciklusa opterećivanja, koriste se da se odredi kritična tačka i položaj kritične ravni. To je ravan za koju se dobije maksimalna vrijednost parametra zamora FP , koristeći rotaciju tenzora napona i deformacija. Na osnovu vrijednosti FP_{max} i poznatih parametara krive: amplituda deformacije-broj ciklusa do loma, procjenjuje se broj ciklusa do pojave pukotine.

Da bi se dala validnost rezultatima i kalibrisao numerički model, potrebno je sprovesti eksperiment. Za zamor kod kontakta kotrljanja koristi se eksperiment sa dva diska. Testovi sa dva diska omogućuju ubranu studiju nastanka pukotine usljed kontakta kotrljanja pod laboratorijski kontrolisanim uslovima. Diskovi su obično radijusa 22,5 mm i njihova debljina je 8 mm. Diskovi se postave u nizu i obrtanje se prekida nakon određenog broja ciklusa kako bi se izmjerila tvrdoća i plastična deformacija u blizini površine. Za svaki prekinuti test, izmjeri se ugao smicanja na mikrostrukтури deformisanog materijala, kako bi se odredila plastična deformacija materijala uz kontaktnu površinu. Prekinuti testovi se koriste kako bi se odredio broj ciklusa da nastanka pukotine.

5. LITERATURA

- [1] Jonas W. Ringsberg: Rolling Contact Fatigue of Railway Rails with Emphasis on Crack Initiation, doctor dissertation, Goteborg, Sweden, 2000.
- [2] M. Šraml, J. Flašker, I. Potrč: Numerical procedure for predicting the rolling contact fatigue crack initiation, International Journal of Fatigue, 2003.
- [3] ABAQUS v6.9 Pawtucket, RI: Hibbit Karlsson and Sorensen, Inc.; 1998.