

## Neki aspekti raslojavanja prevlaka

U keramičkim prevlakama na metalnoj osnovi uopšteno se javljaju značajni pritisni naponi koji su posledica razlike u koeficijentima termičkog širenja pri formiranju prevlake. Jedan od glavnih oblika razaranja prevlaka je ivično raslojavanje. Kod idealno krutih interfejsa, ivično raslojavanje je tesno povezano sa Modom II loma prslina na interfejsu. Biće pokazan uticaj trenja klizanja i hrapavost razdvojenih površina na povećanje žilavosti loma. U radu će biti korišćen model stacionarnog ivičnog raslojavanja u uslovima moda II koji kombinuje uticaje trenja i hrapavost između prevlake i osnove. Ovaj model se koristi da bi se ocenilo da li trenje i hrapavost utiču na povećanje žilavosti loma koje su primećene u eksperimentima nađenim u literaturi. Pomenuti model biće razmatran na osnovu koncepta mehanike loma na interfejsu i uz pomoć programskog paketa Mathematica.

**Ključne reči:** ivično raslojavanje prevlake, Mod II, žilavost loma, prslina na interfejsu, hrapavost, Mathematica

### 1. UVOD

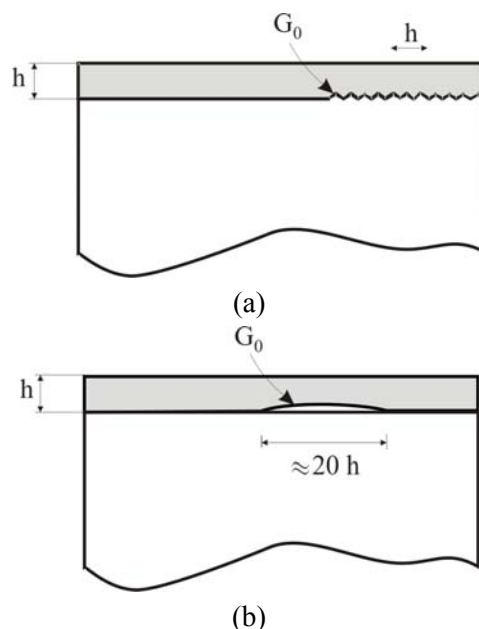
Mnoge tehnike dobijanja prevlaka za posledicu imaju zaostale napone koji mogu da dovedu do njenog razaranja. U keramičkim prevlakama na metalnoj osnovi, uopšteno se javljaju značajni pritisni naponi. Ovi naponi su posledica razlike u koeficijentima termičkog širenja prevlake i osnove, kada se komadi hlade sa temperature na kojoj se dobijaju. Sistemi kod kojih se sreću ovi problemi su prevlake otporne na habanje i keramičkim toplotnim izolatorima. Dva najčešća oblika razaranja tankih prevlaka izloženih pritisku su ivično raslojavanje i bubrenje i šematski su prikazani na slici 1.

Elastična energija po jedinici površine  $G_0$ , koje može da izazove raslojavanje određena je:

$$G_0 = \frac{(1 - \nu^2) \sigma^2 h}{2E}, \quad (1)$$

gde su:  $E$  i  $\nu$  - Young-ov modul elastičnosti i Poisson-ov koeficijent prevlake,  $h$  - debljina prevlake,  $\sigma$  - homogeni pritisni dvosni prednapon u prevlaci. Za prvu aproksimaciju,  $G_0$  je takođe i energija koja može da pokrene interfejsnu prslinu kod bubrenja. Prosečna veličina greške neophodna da bi se iniciralo bubrenje je oko  $20 h$ . Veličina greške za početak raslojavanja koja počinje sa ivice prevlake i razara unutrašnjost osnove je od  $1$  do  $2 h$  [1]. Ovo navodi na zaključak da je ivično raslojavanje više verovatno nego bubrenje. Stvarnost je međutim, drugačija. Kod većine sistema, primarni oblik razaranja je bubrenje koje počinje na ivici prevleke.

Adresa autora: Tehnički fakultet, Bor, Vojske Jugoslavije 12



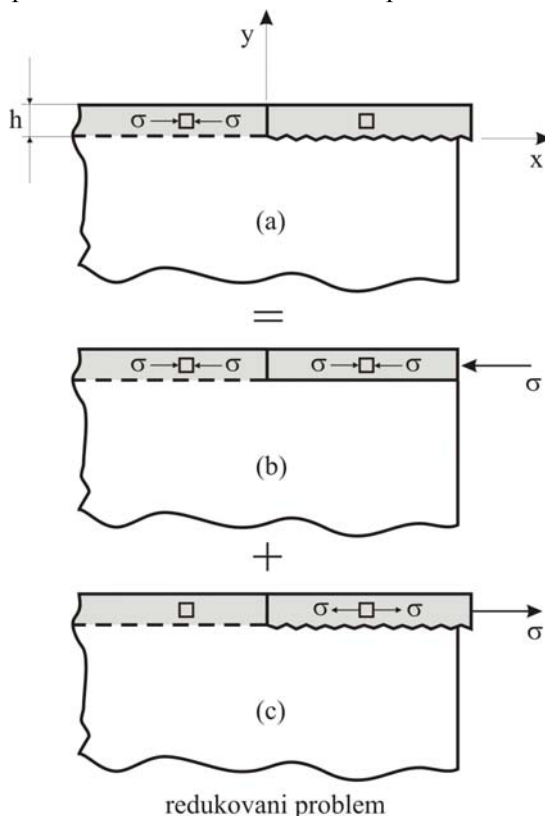
Slika 1 - Šematski prikaz ivičnog raslojavanja (a) i bubrenja (b).

Postoji više razloga zašto je ivično raslojavanje ređe nego što se očekuje. Ivično raslojavanje se odvija po Mod II loma, gde je prevlaka izložena pritisnom opterećenju. A poznato je da Modu II odgovara najveća vrednost žilavosti interfejsa. S druge strane, bubrenje se dešava u uslovima mešovitog moda, ali se približava uslovima Moda II kako se raslojavanje širi i zaustavlja [2]. Dodatno ovde postoje spoljni uticaji koji prate ivično raslojavanje a koji doprinose povećanju žilavosti, [3]. Trenje klizanja je jedan od takvih uticaja. Drugi uticaj, koji će se ovde posmatrati je uticaj hrapavosti površine na raslojavanje prevlake, kada ona klizi preko osnove. Kako se površine prslina

nastale raslojavanjem premeštaju, sile zbog hrapavosti površina otvaraju interfejs prevlaka-osnova. Posledica otvaranja su normalni naponi na interfejsu koji su veći od onih koji postoje u slučaju kada su površine idealno glatke. Ovo opet vodi većem rasipanju trenja i stvaranju prepreka ispred vrha prsline. Istovremeno, ovo otvaranje vrha prsline dovodi do pojave Mod I faktora intenziteta napona. Većina razorenih interfejsa ima karakterističnu hrapavost. Ovde će biti pokazano da klizanje trenjem i otvaranje usled hrapavosti treba posmatrati u kombinaciji a ne odvojeno. Takođe će biti pokazano da male hrapavosti imaju značajan uticaj na Mod II žilavost prevlake čija se debljina meri mikronima.

2. FORMULACIJA PROBLEMA

Posmatra se problem ivičnog raslojavanja prevlake u uslovima stabilne ravnoteže. Prevlaka debljine  $h$ , modula klizanja  $\mu_f = E/(2(1+\nu))$ , spojena je sa osnovnim materijalom velike debljine koji ima iste elastične karakteristike. Spoj je izložen homogenom zaostalom pritiskom naponu. Predpostavlja se da je prevlaka idealno spojena sa osnovom duž polovine svoje dužine a da je potpuno odvojena od osnove duž druge polovine. U uslovima ravanskog stanja deformacije, problem se svodi na dvodimenzionalni. U ovom slučaju prevlaka je izložena homogenom pritiskom opterećenju daleko ispred vrha interfejsne prsline, dok je potpuno rasterećena daleko iza vrha prsline.

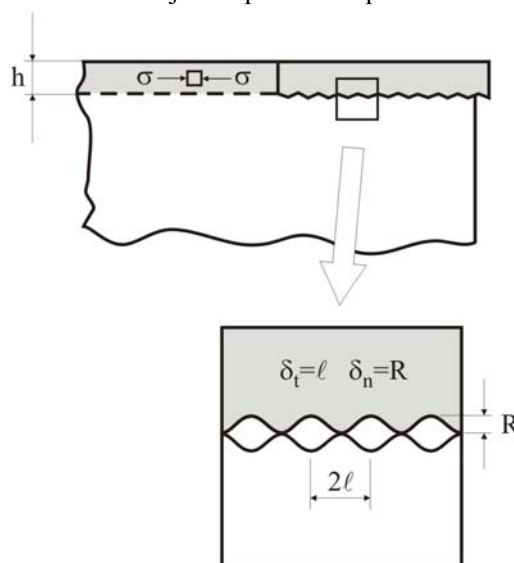


Slika 2 - Princip superpozicije

Koristeći se principom superpozicije, prikazanim na slici 2, problem koji se razmatra, slika 2(a), može da se razloži na problem prikazan na slici 2(b) i redukovani problem prikazan na slici 2(c), [3].

Na slici 2(b) je pokazano da nema pomeranja prevlake u odnosu na osnovu. Ovo treba shvatiti tako da je prevlaka koja je izložena pritisku odvojena od osnove udaljenim pritiskim opterećenjem duž polovine svoje dužine ali tako da ostane na istom mestu. S obzirom da je pomeranje jednako nuli i faktor intenziteta napona je jednak nuli. Dakle, pomeranje i faktor intenziteta napona za posmatrani problem su identični pomeranju i faktoru intenziteta napona za redukovani problem. Tako da će u nastavku biti rešavan redukovani problem.

Predpostavlja se da postoji hrapavost na interfejsu između prevlake i osnove i da je ona relativno mala u odnosu na debljinu prevlake. Predpostavlja se takođe, da je hrapavost razdvojene interfejsne površine talasna, kao što je prikazano na slici 3. Veličina klizanja preko interfejsa odgovara polovini talasne dužine hrapavosti  $\ell$ , dok je rastojanje između dve razdvojene površine na interfejsu amplituda hrapavosti  $R$ .



Slika 3 - Normalno i tangencijalno pomeranje nastalo usled hrapavosti površine

Model hrapavosti može da se definiše kao, [3]:

$$\delta_n(s) = R(1 - e^{-\delta_t(s)/\ell}) \tag{2}$$

gde je  $\delta_n$  relativno normalno pomeranje dve površine, a  $\delta_t$  relativno tangencijalno pomeranje. Zadržava se pretpostavka Kulonovog trenja na interfejsu, tako da je trenje veliko u odnosu na  $\ell$  a malo u poređenju sa  $h$  u slučaju klizanja i da je:

$$\sigma_{xy}(x) = -\mu_f \sigma_{yy}(x) \quad x > 0. \tag{3}$$

Dakle, hrapav interfejs je zamenjen ravanskom prslinom gde su dve komponente pomeranja vrha prsline definisane jednačinom (2), a dve komponente opterećenja jednačinom (3).

Uslovi moraju biti zadati tako da budu u saglasnosti sa uslovima trenja, odnosno da je normalni napon iza vrha prsline nastale raslojavanjem pritisni i da je tangencijalno pomeranje monotono rastuća funkcija od rastojanja od vrha prsline. Ovi uslovi obezbeđuju da se klizanje dešava u uslovima stabilne ravnoteže.

Faktor intenziteta napona za Mod II u uslovima stanja stabilne ravnoteže za ivičnu delaminaciju bez trenja i hrapavosti definisana je izrazom, [3]:

$$K_{II}^0 = \sigma \sqrt{\frac{h}{2}}, \quad (4)$$

dok je brzina oslobađanja energije definisana jednačinom (1). Normalizujući ove dve jednačine i koristeći veze:

$$K_I = \frac{R}{\ell} K_{II} \text{ i } G = \frac{1-v^2}{E} (K_I^2 + K_{II}^2), \quad (5)$$

dobija se sledeći izraz za normalizovanu brzinu oslobađanja energije:

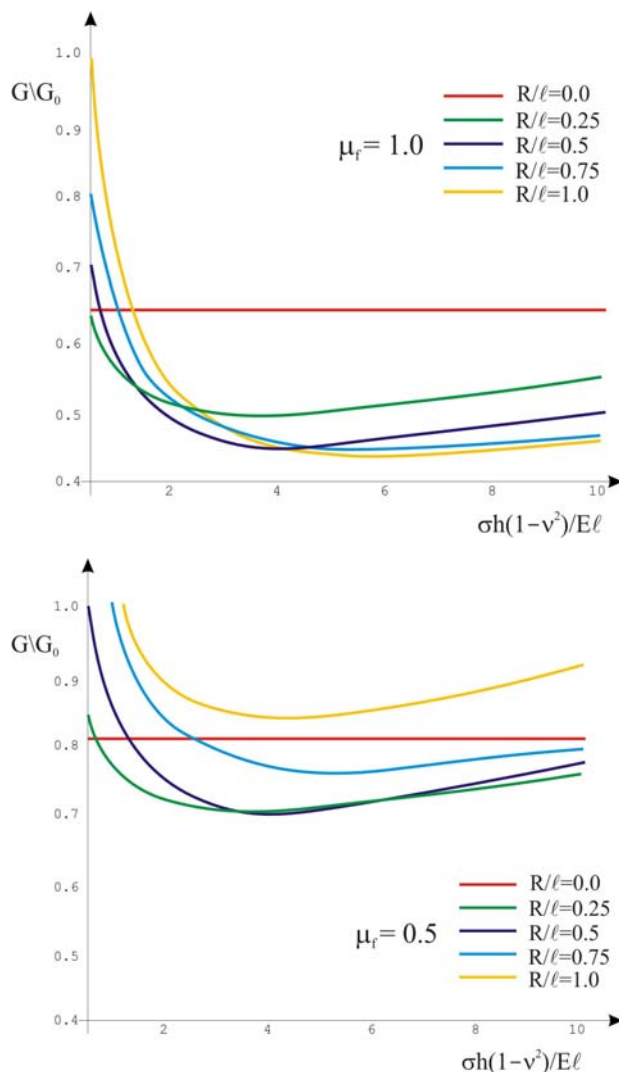
$$\frac{G}{G_0} = \left( \frac{K_{II}}{K_{II}^0} \right)^2 \left[ 1 + \left( \frac{R}{\ell} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

Normalizovani faktor intenziteta napona za Mod II je funkcija tri bezdimenziona faktora kako to pokazuje sledeća jednačina:

$$\frac{K_{II}}{K_{II}^0} = f \left( \frac{\sigma h(1-v^2)}{E\ell}, \frac{R}{\ell}, \mu_f \right). \quad (7)$$

### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

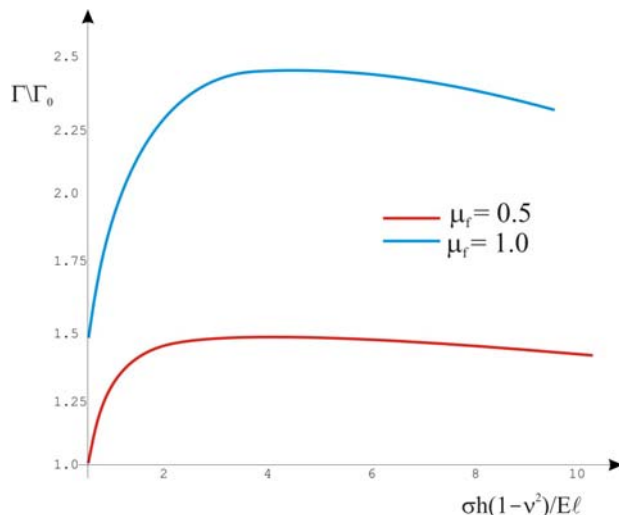
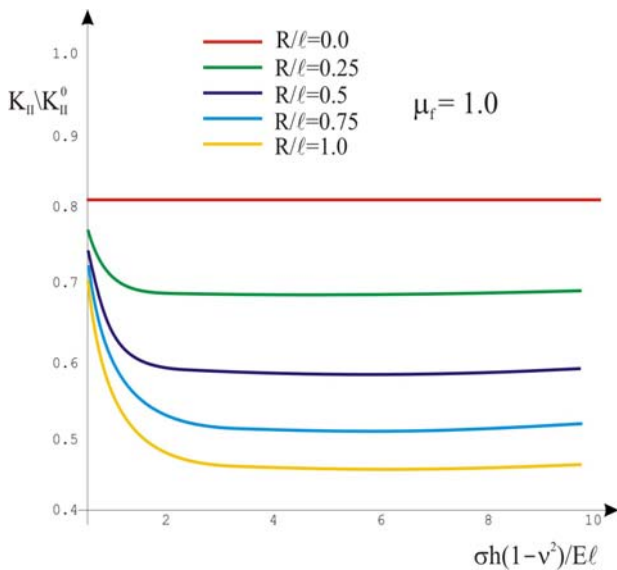
Uticaj trenja i hrapavosti na Mod II faktor intenziteta napona prikazan je na slici 4. Koristeći jednačinu (7) i pogodnosti koje pruža programski paket Mathematica u rešavanju numeričkih problema, na slici 4 su prikazani dijagrami  $K_{II}/K_{II}^0$  u funkciji od  $\sigma h(1-v^2)/E\ell$  za različite hrapavosti i dve vrednosti koeficijenta trenja. Kada postoji trenje a ne postoji hrapavosti, tj.  $R/\ell=0$ , normalizovani faktor intenziteta napona ne zavisi od debljine prevlake. Kada postoji i trenje i hrapavost, faktor intenziteta napona zavisi od  $\sigma h(1-v^2)/E\ell$ . Najveći uticaj hrapavosti je kada je  $\sigma h(1-v^2)/E\ell \approx 2$ .



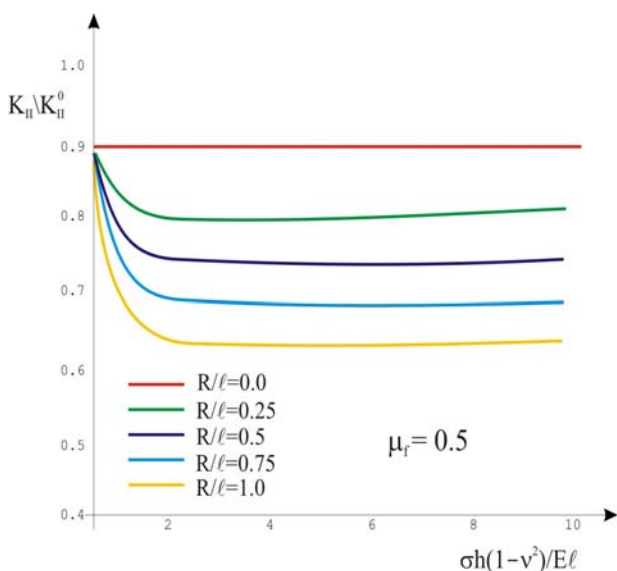
Slika 4 - Normalizovana Mod II faktor intenziteta napona

Uticaj trenja i hrapavosti na normalizovanu brzinu oslobađanja energije, za dve vrednosti  $\mu_f$  po jednačini (6), prikazan je na slici 5. Dijagrami su dobijeni korišćenjem programskog paketa Mathematica, jednačine (6) i integralnih jednačina datih u [3].

Kao što može da se vidi na slici 5, a za dovoljno malo  $\sigma h(1-v^2)/E\ell$ ,  $G/G_0$  je iznad granične nulte hrapavosti s obzirom na dominantni uticaj  $K_I$ . Za  $\mu_f = 0.5$ ,  $G/G_0$  prevazilazi graničnu nultu hrapavost za sve vrednosti  $\sigma h(1-v^2)/E\ell$  kada je  $R/\ell = 1$ . Međutim, to je prividno, s obzirom na veliku vrednost odnosa  $R/\ell$  i  $\sigma h(1-v^2)/E\ell$ , tako da kombinacija uticaja trenja i hrapavosti smanjuje  $G/G_0$  za oko dva puta u odnosu na slučaj kada se zanemaruje hrapavost. Za  $\mu_f = 0.5$  zatupljenje vrha prsline dešava se pri  $G/G_0 \approx 0.7$ , za nivo hrapavosti  $R/\ell \approx 0.5$  i  $\sigma h(1-v^2)/E\ell$ . Za  $\mu_f = 1$ , odgovarajuća vrednost je  $G/G_0 \approx 0.4$ .



Slika 6 - Normalizovana žilavost loma Moda II za  $R/\ell \approx 0.5$ .



Slika 5 - Normalizovana brzina oslobađanja energije

Smanjenje brzine oslobađanja energije, prikazano na slici 5, pruža mogućnost za dalje sagledavanje uticaja trenja i hrapavosti. Najjednostavniji mogući uslov širenja prsline je:

$$G = \Gamma_0, \tag{8}$$

gde je  $\Gamma_0$  energija razdvajanja interfejsa. Onda je žilavost moda II u uslovima stabilne ravnoteže,  $\Gamma \equiv G_0$ , gde je  $G_0$  brzina oslobađanja energije potrebna za raslojavanje prevlake definisana jednačinom (1). Na slici 6 prikazani su dijagrami normalizovane žilavosti  $\Gamma/\Gamma_0$ , koristeći rezultate prikazane na slici 5 za  $R/\ell \approx 0.5$ .

#### 4. ZAKLJUČAK

Rezultati prikazani u delu 3 pokazuju da kombinacija trenja i hrapavosti ima uticaj na žilavost loma Moda II i da oba uticaja treba uzeti u obzir kada se modelira raslojavanje prevlaka izloženih pritisnom opterećenju.

Rezultati pokazuju da je žilavost 2.5 puta veća od energija razdvajanja interfejsa. Intenzitet napona u vrhu prsline opada sa povećanjem hrapavosti. Takođe je utvrđeno da uzimanje u obzir hrapavosti interfejsa indukuje Mod I faktor intenziteta napona koji je skoro jednak Mod II faktoru intenziteta napona za posmatrane vrednosti hrapavosti. Uopšteno moguće je reći da kada je interfejs hrapav u vrhu prsline postoji mešoviti mod.

Rezultati prikazani na slikama 4, 5 i 6 dobijeni primenom koncepta linearno elastične mehanike loma i programskog paketa Mathematica dobro se slažu sa rezultatima prikazanim u [3] koji su dobijeni numeričkim rešavanjem integralnih jednačina. Ovo potvrđuje mogućnost primene koncepta linearno elastične mehanike loma na objašnjavanje raslojavanja prevlaka. Unapređenje jednačina prikazanih u [3] primenom jednačina prikazanih u [4] i simboličkog programiranja umesto numeričkog rešenja predstavljaju korak u pravom smeru pri tumačenju raslojavanja prevlaka.

#### 5. LITERATURA

[1] Yu, H. M.Y. He and J.W. Hutchinson, "Edge Effects in Thin Films", *Acta Material*, **49**, pp. 93-107, 2001  
 [2] Hutchinson, J. W. and Suo Z., "Mixed mode cracking in layered materials", *Advances in Applied Mechanics*, Vol. **29**, pp. 63-191, 1992.

- [3] Balint D.S. and J.W. Hutchinson, "Mode II Edge Delamination of Compressed Thin Films", *J.Appl.Mech.*, vol.68, pp. 725 - 730, 2001.
- [4] Veljkovic J. M. and R. R. Nikolic, Edge Effect on the coating delamination, Fatigue 2003 "Fatigue & Durability Assessment of Materials, Components & Structures", 5-th International Conference of the Engineering Integrity Society, Cambridge, UK 2003, pp. 301 - 309, 2003.
- [5] Rice J.R., Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks, *J.Appl.Mech.*, vol.55, pp.98 - 103, 1988.

## SUMMARY

### SOME ASPECTS OF COATINGS DELAMINATION

*Ceramic coatings on the metal substrate create significant stresses, when they start to cool down after the coating procedure. These stresses are the consequence of the mismatch in the thermal expansion coefficients of the substrate and coating materials. One of the basic forms of these coatings destruction is the edge delamination. For the ideally brittle interface, the edge delamination of the compressed coating occurs as the Mode II interfacial fracture. In this paper shown that the friction and roughness of the separated surfaces interface the fracture toughness. The proposed and analysed Mode II delamination in steady-state conditions enhances effects of friction and roughness between the coating and the substrate. This model is used in order to estimate which of the two effects is sufficient to explain the large value of the Mode II fracture toughness obtained in experiments. The model will be considered based on the interfacial fracture mechanics with programme package Mathematica.*

**Key words:** Edge delamination, Mode II, fracture toughness, interfacial crack, roughness, Mathematica