

PROCJENA VIJEKA TRAJANJA STRUKTURNIH ELEMENATA IZVOZNOG POSTROJENJA KORIŠTENJEM PROŠIRENE METODE KONAČNIH ELEMENATA

ESTIMATION OF THE LIFE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF MINING HOISTING EQUIPMENTS USING THE EXTENDED FINITE ELEMENT METHOD

dr.sc. Mustafa Hadžalić, viši naučni saradnik
Univerzitet u Zenici, Institut "Kemal Kapetanović"
Travnička cesta 7, 72000 Zenica

REZIME

Vrijednost naprezanja ili deformacija tokom vremena, na mjestu gdje se pojavi pukotina, ključni su faktori za određivanje zamornog vijeka, dok je njihova raspodjela duž cijele komponente od sekundarnog značaja. Pojava nove metode tzv. proširene metode konačnih elemenata - PMKE (XFEM-eXtended Finite Element Method), daje revolucionarne rezultate u rješavanju problema za 3D slučajeve strukturnih elemenata izvoznih postrojenja koji imaju kompleksniju strukturu, a opterećenja kojima su izložene uglavnom nisu ravanskog tipa. Proces simulacije rasta pukotine u strukturnom elementu je baziran na tzv. inkrementalnom postupku, odnosno, sastoji se iz niza koraka. U svakom koraku se proračunavaju tekući parametri za tekuću dužinu pukotine. U narednom koraku, korištenjem podataka iz prethodnog koraka generišu se nove vrijednosti parametara mehanike loma.

U ovom radu prikazano je određivanje zamornog vijeka strukturnih elemenata izvoznih postrojenja sa aksijalnom prolaznom pukotinom primjenom proširene metode konačnih elemenata, pod utjecajem cikličkog opterećenja. Prikazane su vrijednosti dobivenih koeficijent intenziteta naprezanja primjenom PMKE za novi material i materijal iz eksploatacije, pri različitim dubinama inicijalne pukotine i različitim rasponima djelujućih napona. Standardna Parisova formula za određivanje putanje pukotine, integrirana u Abaqusu, korištena je za dobivanje zamornog vijeka ovjesne poluge izvoznih postrojenja.

Ključne riječi: koeficijent intenziteta naprezanja, PMKE, ovjesna poluga izvoznog postrojenja, rast pukotine, zamorni vijek.

SUMMARY

The value of stress or strain over time, at the point where the crack appears, are key factors in determining fatigue life, while their distribution along the entire component is of secondary importance. The emergence of a new method, XFEM - eXtended Finite Element Method, provides revolutionary results in solving problems for 3D cases of structural elements of export facilities that have a more complex structure, and the loads to which they are exposed to complex dynamic loads. The process of simulating crack growth in a structural element is based on the so-called incremental procedure, i.e. it consists of a series of steps. In each step, the current parameters for the current crack length are calculated. In the next step, using the data from the previous step, new values of the fracture mechanics parameters are generated.

This paper presents the determination of the fatigue life of structural elements of export facilities with an axial passing crack using the extended finite element method, under the influence of cyclic loading. The values of the obtained stress intensity coefficient using XFEM for new material and material from exploitation, for different depths of the initial crack and ranges of applied stresses are shown. The standard Paris crack path formula, integrated in Abaqus, was used to obtain the fatigue life of the structural elements of the hoisting equipments.

Keywords: stress intensity factor, XFEM, suspension arm of the mine hoisting equipment, crack growth, fatigue life.

1. UVOD

Rudarska industrija u svijetu predstavlja izuzetnu razvojnu granu. Posljednjih godina proizvodnja svih metalnih, nemetalnih i energetskih sirovina ima uzlaznu putanju gdje i narednih decenija treba očekivati ubrzani tempo razvoja. Ovakva proizvodnja je ostvarena prevashodno zahvaljujući primijenjenoj opremi (rudarskim mašinama i uređajima), koja postaje sve raznovrsnija i mobilnija, visokosofisticirana i automatizovana. Prema tome, sve važniji postaju sigurnost funkcionisanja, bezbjednost, zdravlje zaposlenih, životna sredina, pouzdanost kompletne imovine, standardizacija sistema, ali i troškovi proizvodnje i održavanja. Sva rudarska oprema u principu mora da ostvari određeno, zacrtano vremensko i kapacitetno iskorištenje. Procjena sigurnosti strukturalnih elemenata ne može se u potpunosti bazirati na strogo definisanim zahtjevima tehničkih propisa i preporuka koji tretiraju tu problematiku i u upotrebi su preko 30 godina, jer može da dođe do naglih otkaza, a to dokazuju mnogi slučajevi u praksi, [1, 2].

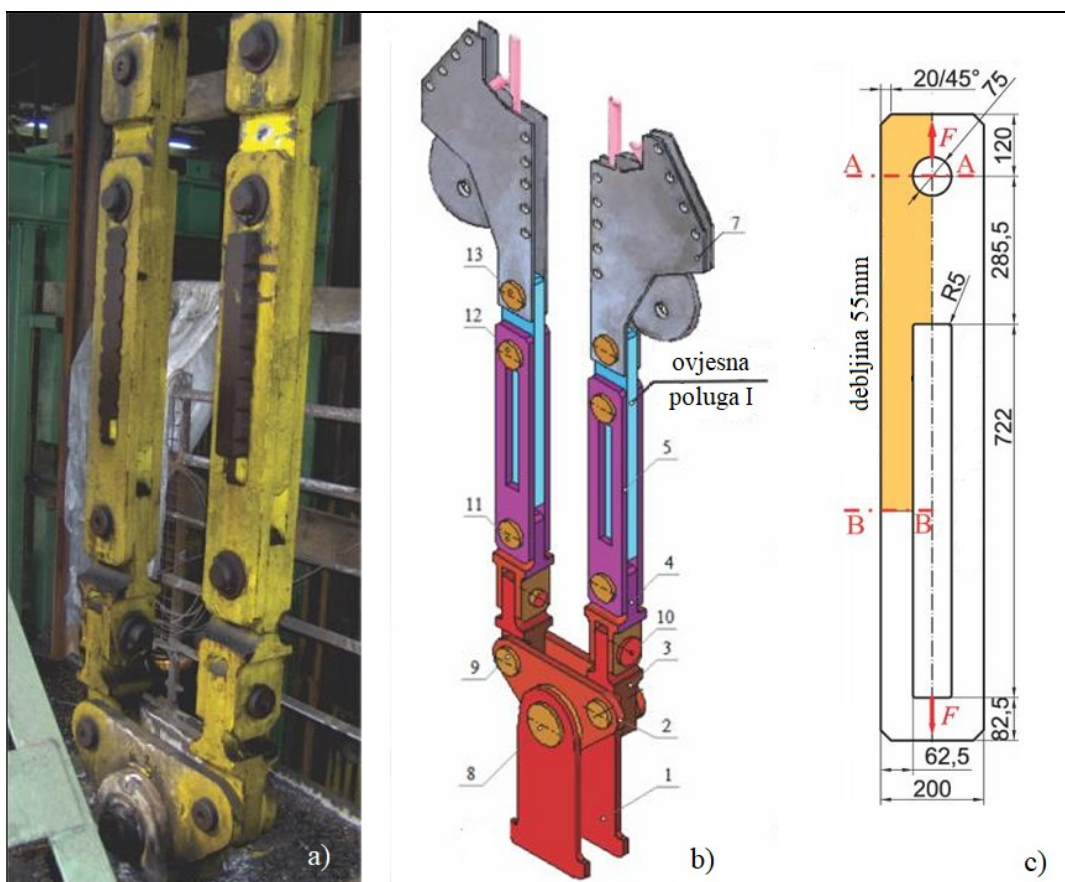
Procjena stanja i ponašanja strukturalnih elemenata rudarskih postrojenja narušenog integriteta (utvrđeno prisustvo greške tipa pukotine) mora da se izvrši primjenom mehanike loma, koja predstavlja prihvatljivu osnovu za izuzetak od postojećih standarda, ako takva analiza daje ubjedljivu i sigurnu procjenu integriteta (konzervativnu) tretirane konstrukcije. Metodologija primjene mehanike loma pri procjeni integriteta konstrukcija zavisi od raspoloživih podataka, ponašanja materijala, uticaja okoline i opterećenja konstrukcije. Ovaj problem je naročito izražen kod strukturalnih elemenata izvoznih postrojenja izloženih dinamičkim opterećenjima zbog velike akumulacije energije, gdje je površinska struktura narušena i gdje se zahtijevaju najveći mogući nivoi sigurnosti.

Minimalni zahtjevi u procesu pregleda i održavanja izvoznih postrojenja u rudnicima definisani su Pravilnikom o tehničkim normativima pri prevozu ljudi i materijala oknima rudnika, [3], te je u svim rudnicima uglavnom zastupljena politika preventivnog održavanja u tačno određenom vremenskom periodu. Pojedini elementi i sklopovi se mijenjaju nakon isteka određenog vremena, bez obzira na njihovo stanje, uslove eksploatacije i troškove zamjene. Intenzivan razvoj rudnika i podzemne eksploatacije nameće mnoge tehničke zahtjeve prema opremi izvoznih postrojenja u pogledu brzine kretanja, visine dizanja, nosivosti, načina vođenja, itd. Za ispunjenje ovih zahtjeva, kao posljedica dugotrajnih i obimnih istraživanja primjenjuju se standardi koje strukturni elementi treba da zadovolje i isti su u osnovi definisani u vidu propisa i pravilnika, [3]. Ovdje se prvenstveno misli na izbor i definisanje osnovnog materijala strukturnih elemenata izvoznih postrojenja koji se zasniva na čvrstoći materijala i obuhvata proračun dimenzija i definisanje geometrije na osnovu dopuštenih naprezanja i stepena sigurnosti (*globalni pristup*). Međutim, radi dobijanja potpunije slike stanja strukturalnih elemenata i njihove eksploatacione sigurnosti potrebno je uzeti u obzir čitav niz dodatnih podataka vezanih za eksploatacione uslove, svojstva ugrađenih materijala, konstrukciona rješenja, a posebno prisustvo grešaka (*lokalni pristup*), [4, 5]. Prisustvo grešaka, a naročito greške tipa pukotina, posebno je značajno za ocjenu sigurnosti strukturalnih elemenata, jer svakom otkazu (lomu) prethodi pojava pukotine.

2. PROŠIRENA METODA KONAČNIH ELEMENATA U PROCJENI ZAMORNOG VIJEKA OVJESNE POLUGE SA AKSIJALNOM PROLAZNOU PUKOTINOM

Spojni pribor veze izvozna posuda-užad jedan je od najvažnijih sklopova strukture izvoznog postrojenja i lom uslijed zamora njegovih elemenata - koji bi sigurno doveo i do oštećenja izvozne posude - imao bi katastrofalne posljedice. Iz tog razloga, projektovanju spojnog pribora se posvećuje velika pažnja, a materijal od koga se izrađuje najčešće je konstrukcioni čelik velike duktilnosti i otpornosti na zamor. Najopterećeniji dio spojnog pribora su, ovjesne poluge, [6] i prilikom provjere njihove nosivosti moraju se poštovati preporuke definisane pravilnikom o tehničkim normativima pri prevozu ljudi i materijala u oknima rudnika, [3] i njemačkog standarda, [7].

Analiza otpornost prema zamornom lomu, upotrebom proširene metode konačnih elemenata provedena je na ovjesnim polugama spojnog pribora ugrađenom na Pogonu "Raspotočje" Rudnika uglja Zenica, slika 1, [6].



Slika 1. Izgled spojnog pribora za vezu izvozna posuda - uže: sklop (a); CAD model (b) i ovjesna polug (c), [6]

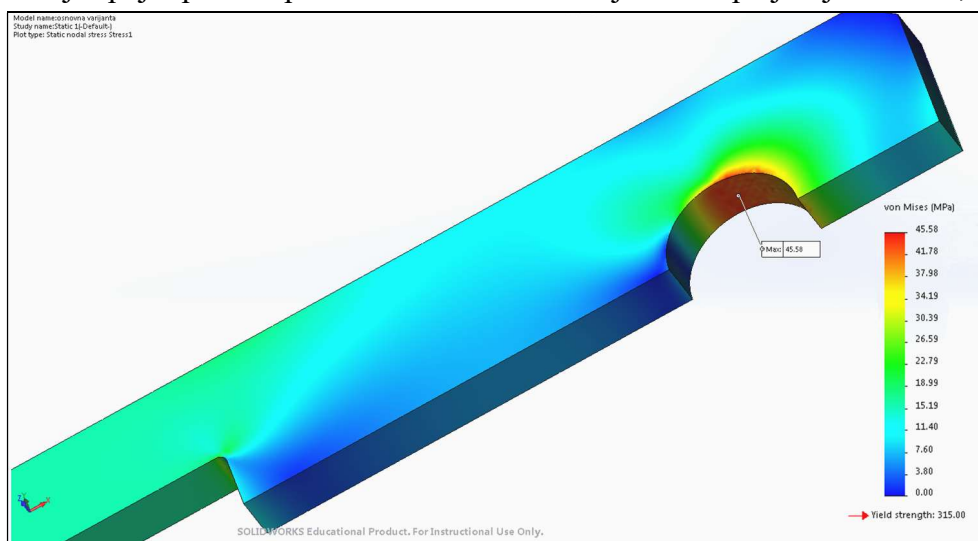
Sklop je projektovan prema Pravilniku, [3], sa potrebnim minimalnim faktorom sigurnosti deset za statičko opterećenje od 211 kN. Projektovano opterećenje je zbir težine svih konstrukcijskih dijelova, uže i maksimalnog tereta, [3, 6]. Dijelovi spojnog pribora izrađeni su od standardnog konstrukcijskog čelika, S355JR prema EN 10027-1 [3, 6], sa relevantnim mehaničkim svojstvima. Eksperimentalnim ispitivanjem uzoraka novog i eksploatisanog materijala dobijena su mehanička svojstva i dinamička čvrstoća konstrukcijskog čelika, S355JR, čije vrijednosti su prikazane u tabeli 1, [6].

Tabela 1. Eksperimentalni rezultati mehaničkih svojstava i dinamičke čvrstoće konstrukcijskog čelika, S355JR, [6]

Materijal	Modul elastičnosti, E (GPa)	Poissonov koeficijent, ν	Napon tečenja, $R_{0,2}$ (MPa)	Zatezna čvrstoća R_m (MPa)	Izduženje A , [%]	Dinamička čvrstoća R_d (MPa)
novi materijala	210	0.3	404,0	550,6	30,5	316
eksploatisani materijala	210	0.3	363,7	537,7	29,2	266

U radu, [6] urađena je 3D simulacija zamornog loma pomoću proširene metode konačnih elemenata (PMKE) na standardnoj Sharpy epruveti od čelika S355JR, tj od istog materijala kao i ovjesne poluge. Poređenjem rezultata za epruvetu iz 3D simulacije sa onim iz eksperimenta, dobijeno je prilično dobro poklapanje vrijednosti, tako da je proračunski vijek epruvete analogan sa vijekom dobijenim 3D simulacijom.

Prethodna analiza opterećenja kojima su izvozne posude i spojni pribor izloženi tokom rada, pokazala je da je ukupna maksimalna aksijalna sila, koja se sa osovinice prenosi na ovjesnu polugu I , intenziteta $F_{aks.} = 105\ 604,5$ N. Otpornost na dejstvo spoljašnjih sila koje se javljaju tokom rada izvoznog postrojenja analizirana je metodom konačnih elemenata i omogućava uvid u vrijednosti *von Mises*-ovih napona u najopterećenijoj zoni otvora ovjesne poluge I (koji se kreću između 41,78 MPa i 45,58 MPa), pri čemu su ove vrijednosti dobijene u slučaju kada je spojni pribor opterećen maksimalno izmjerenim spoljašnjim silama, slika 2.



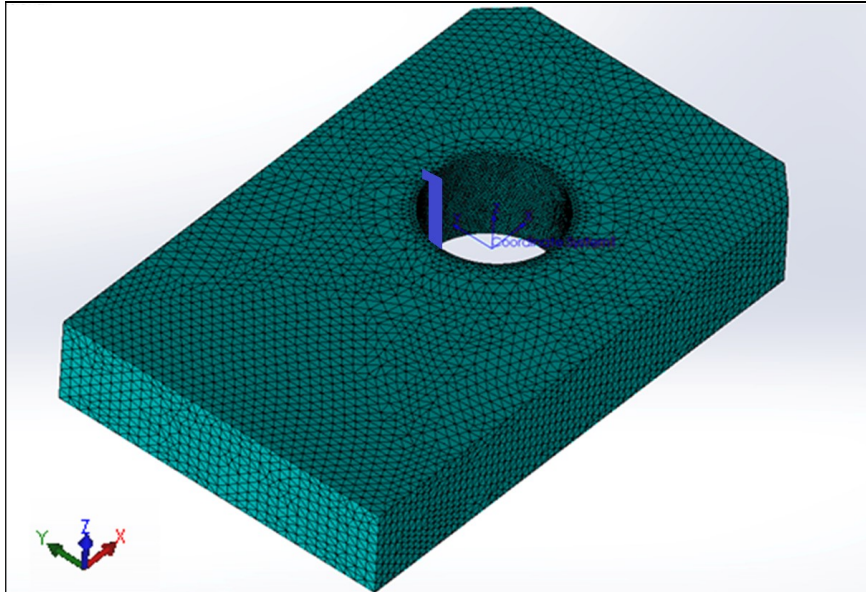
Slika 2. Naponsko stanje na ovjesnim polugama I spojnog pribora izvoznog postrojenja RMU Zenica – pogon "Raspotočje", [6]

2.1. Izbor modela za numeričku analizu

Naime, pretpostavljeno je da na otvoru ovjesne poluge može doći do pojave "dubinske" pukotine (tj. ona koja prolazi kroz cijelu debljinu materijala; eng. *through crack*). Kao i u ranijem primjeru, napravljena je mreža konačnih elemenata, sa tetraedrima (slika 3.), na koju je postavljena inicijalna pukotina oblika pravougaonika 2 mm. Mreža modela sa tetraedrima korištena u proračunu je imala 121 350 čvorova i 695 350 elementa.

Kao što se na slici 3. može vidjeti, u slučaju mreže sa tetraedarskim elementima oblasti u kojima je očekivano da će se pukotina širiti generisana je znatno gušća mreža, da bi se korištenjem većeg broja čvorova povećala tačnost vrijednosti dobijenih proračunom. Potrebno je napomenuti da je na slici 3. dat konačni izgled mreže do koje se došlo nakon nekoliko iteracija i koja je na kraju i dala najbolje rezultate.

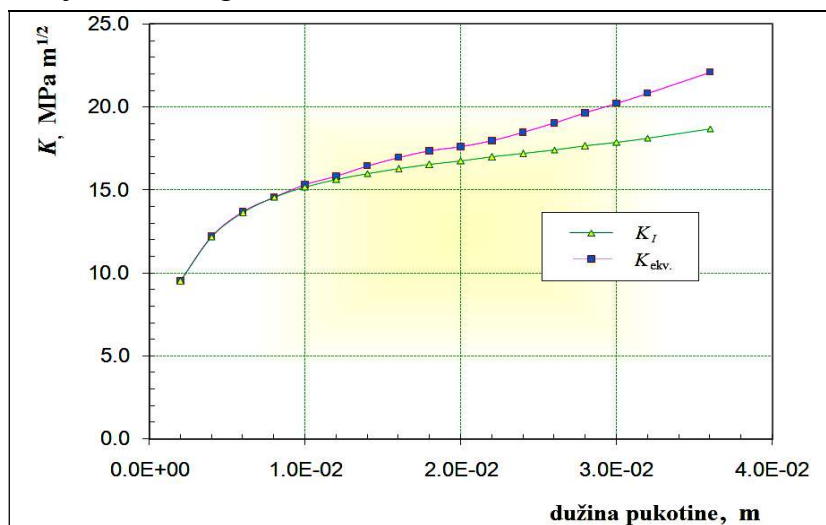
Na mreži je postavljena inicijalna pukotina dužine 2 mm i širine jednake debljini ovjesne poluge koja se u *Abaqus*-u definiše kao poseban entitet bez svoje mreže elemenata (to je površina uvezena iz softvera *solidWorks*).



Slika 3. Mreža konačnih elemenata modela ovjesne poluge sa inicijalnom "dubinskom" pukotinom,

Prvi korak u 3D analizi širenja pukotine primjenom PMKE je "otvaranje" pukotine i izračunavanje vrijednosti napona na ovjesnoj polugi koji se, potom, koriste za određivanje faktora intenziteta napona u vrhu pukotine i ugla skretanja u odnosu na početni pravac širenja pukotine. Pukotina je zatim širena po 2 mm da bi se dostigla ukupna dužina od 36 mm. U slučaju modela sa tetraedarskim elementima pukotina je jednim dijelom fronta nastavila kretanje približno u horizontalnoj ravni, a drugim u ravni pod određenim uglom u odnosu na horizontalni pravac.

Poređenjem srednjih vrijednosti ekvivalentnih faktora intenziteta napona, $K_{ekv.}$, dobijenih tokom 18 koraka širenja pukotine na ovjesnoj ploči sa tetraedarskim elementima i srednjih vrijednosti faktora intenziteta napona Moda I, K_I , (slika 4.), uočava se da su vrijednosti K_I nešto niže od vrijednosti $K_{ekv.}$, ali i da razlike vrijednosti faktora po koracima nisu pretjerano velike. Ovo upravo i ide u prilog da se rezultati predviđanja vrijednosti faktora $K_{ekv.}$, putem PMKE za ovjesnu polugu, sa sigurnošću mogu uzeti kao relevantni i dovoljno pouzdani, jer predstavljaju strožije uslove nego što su realni.



Slika 4. Promjene srednje vrijednosti $K_{ekv.}$ i K_I sa dužinom pukotine na ovjesnoj polugi

2.2. Procjena preostalog vijeka trajanja ovjesne poluge sa pukotinom

Da bi se dobila procjena vijeka trajanja pri zamoru ovjesne poluge sa otvorom na kojem se pojavila pukotina, potrebno je, usvojiti određeni model brzine rasta pukotine u materijalu, koji će na osnovu izračunatih vrijednosti faktora intenziteta napona i spektra spoljašnjeg opterećenja dati predikciju broja ciklusa opterećenja koji pukotinu proširuju do određene dužine. Procjenu broja ciklusa moguće je dobiti i u okviru *Abaqus*-a, [8] koji, na osnovu izračunatih vrijednosti K_{ekv} , po koracima i unijetih vrijednosti Parisovog koeficijenta (m_p), Parisovog eksponenta (C_p) i odnosa napona (R), izračunava broj ciklusa upotrebom modifikovanog Parisovog zakona širenja pukotine, [9] datog jednačinom (1):

$$\frac{da}{dN} = \frac{C_p \cdot (\Delta K)^{m_p}}{(1-R)(K_c - K_{maks})} \quad (1)$$

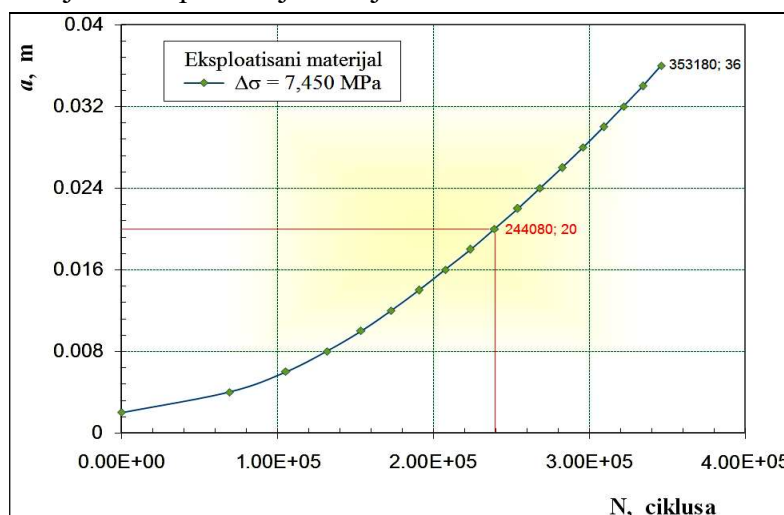
Vrijednosti parametara Parisove jednačine, koeficijenta C i eksponenta m , praga zamora ΔK_{th} , i brzine rasta zamorne pukotine, da/dN , pri vrijednosti $\Delta K = 10 \text{ MPa m}^{1/2}$, date su u tabeli 2. za epruvete sa zarezom u eksploatisanom i novom materijalu, [6].

Tabela 2. Parametri rasta zamorne pukotine za epruvete sa zarezom u materijalu ovjesne poluge, pri temperaturi 20°C, [6]

	Prag zamora ΔK_{th} , [MPa m ^{1/2}]	Koeficijent C	Eksponent m	da/dN , [m/cikl.] pri $\Delta K = 10$ [MPa m ^{1/2}]
Eksploat. materijal	5,1	$7,84 \cdot 10^{-12}$	3,69	$7,85 \cdot 10^{-08}$
Novi materijal	5,7	$1,13 \cdot 10^{-11}$	3,53	$3,14 \cdot 10^{-08}$

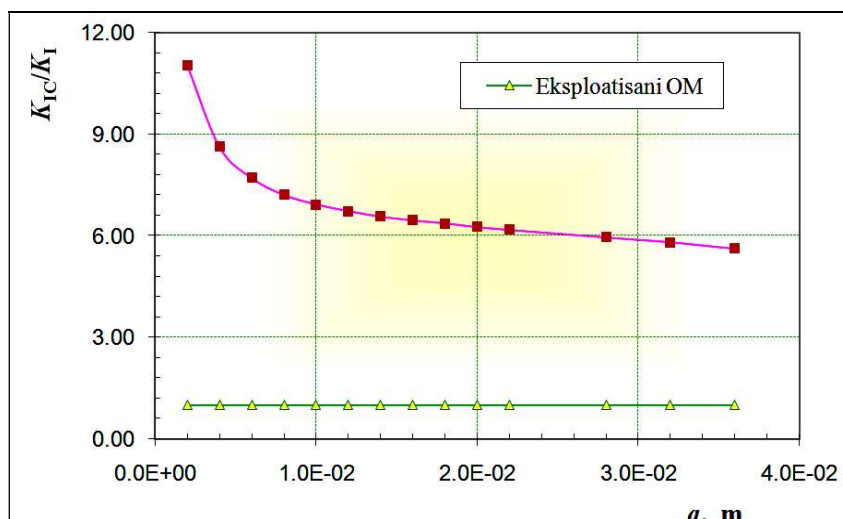
Kritična vrijednost faktora intenziteta napona iznosi $K_{IC} = 3\,323,55 \text{ MPa mm}^{0,5}$ (odnosno $105,1 \text{ MPa m}^{0,5}$). Za odnos minimalnog i maksimalnog napona dobijenog tenzometrijskim mjerenjem u radnim uslovima, iz [6] usvojena je vrijednost $R = \sigma_{min.}/\sigma_{maks.} = 0,35$.

Dobijena kriva dužine pukotine u zavisnosti od broja ciklusa primijenjenog spektra opterećenja za materijal iz eksploatacije data je na slici 5.



Slika 5. Vrijednost dužine pukotine u funkciji broja ciklusa primijenjenog sinusoidnog opterećenja

Na slici 6. prikazana je promjena odnosa K_{IC}/K_I sa dužinom pukotine dobijene proračunom. Vrijednosti broja ciklusa dobijene primjenom modifikovanog Parisovog zakona pokazuju da će se pukotina početne dužine 2 mm proširiti na dužinu od 4 mm nakon približno 70 660 ciklusa spoljašnjeg opterećenja (u ovoj analizi simuliranog preko odgovarajućeg pomjeranja spojnog pribora izvozne posude), a da će dužinu od 6 mm dostići nakon sljedećih 36 900 ciklusa. Ukupan broj ciklusa potreban da pukotinu proširi sa početne dužine 2 mm do zadane dužine od 36 mm po modifikovanoj Parisovoj formuli iznosi 353 180 ciklusa.



Slika 6. Promjena odnosa K_{IC}/K_I sa porastom dužine pukotine za ovjesnu polugu

Slike 5. i 6. pokazuju da pukotina nije dostigla kritičnu vrijednost dužine, jer faktor intenziteta napona nije dostigao kritičnu vrijednost $K_{IC}=105,1 \text{ MPa m}^{0,5}$ (horizontalna zelena linija na slici 6. predstavlja odnos $K_{IC}=K_I=1$). Dužina pukotine 36 mm dobijena simulacijom širenja u softveru *Abaqus* odgovara vrijednosti faktora intenziteta napona $K_I=18,695 \text{ MPa mm}^{0,5}$, što je ispod kritične vrijednosti. Uz to, integracijom jednačine 1. dobijena je kriva zavisnosti dužine pukotine od broja ciklusa (slika 5.) čiji oblik jasno ukazuje da se pukotina dužine 36 mm još nije približila zoni ubrzanog (nestabilnog) rasta, odnosno da je brzina napredovanja oštećenja još uvijek umjerena (gradijent krive na slici 5. skoro je konstantan).

Dobijeni proračunski broj ciklusa sinusoidnog opterećenja koji će početnu pukotinu dužine 2 mm proširiti do ukupne dužine od 36 mm iznosi $N = 353\,180$ ciklusa. Ovaj broj predstavlja proračunski vijek pukotine pod zamorom i u literaturi (na engleskom jeziku) se, obično, naziva samo *Life*. Na slici 5. se vidi da za proizvoljnu dužinu pukotine može da se procijeni i preostali vijek do dostizanja pune dužine od 36 mm.

Pri prosječnom godišnjem fondu rada izvoznog postrojenja, $T_y = 7884$ sati, [10], broj ciklusa promjene napona iznosi:

$$N_y = T_y \cdot n_{sp} = 7\,884 \cdot 42 = 3,311 \cdot 10^5 \text{ ciklusa/godišnje,}$$

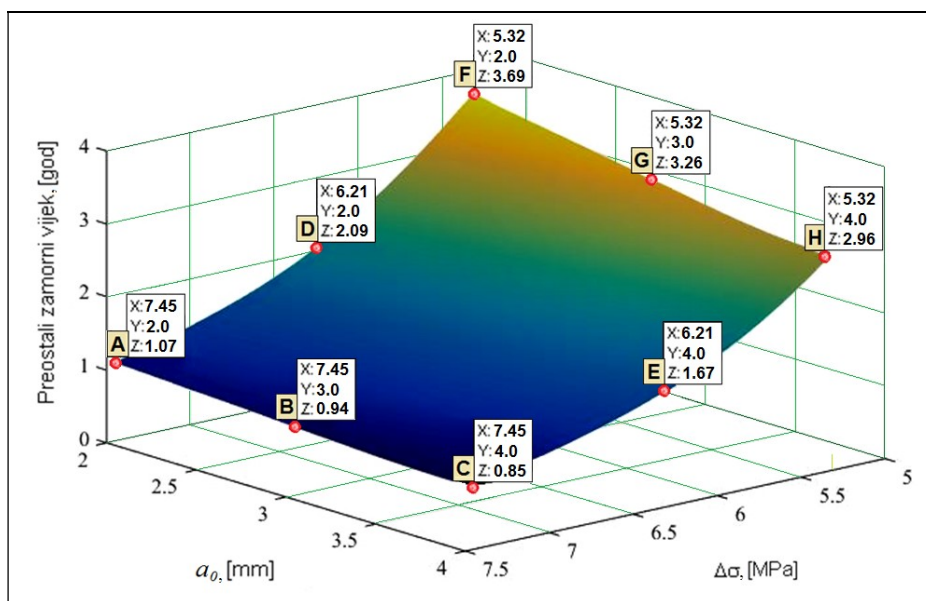
pri čemu je $n_{sp} = 42$ ciklusa/h, prosječan broj ciklusa izvozne posude sa spojnim priborom. U tom slučaju, preostali životni vijek uslijed zamora (*remaining fatigue life*) može da se iskaže u godinama eksploatacije:

$$n = \frac{N}{N_y} = \frac{3,532 \cdot 10^5}{3,311 \cdot 10^5} = 1,067 \text{ godina} \quad (2)$$

Preostali vijek uslijed zamora je proračunat i za različite dubine pukotine i opsege primijenjenog napona. Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 3. i na slici 7.

Tabela 3. Preostali vijek uslijed zamora n (godina) za različite dubine inicijalne pukotine a_0 i opsege primijenjenih napona $\Delta\sigma$ [MPa], eksploatisani materijal

Dubina početne pukotine, a_0 [mm]	Preostali vijek uslijed zamora, n [god.]		
	$\Delta\sigma_1=7,450$ [MPa]	$\Delta\sigma_2=6,208$ [MPa]	$\Delta\sigma_3=5,320$ [MPa]
2	1,067	2,091	3,695
2,5	0,997	1,954	3,453
3	0,942	1,846	3,255
4	0,853	1,672	2,956



Slika 7. Zavisnost preostalog vijeka uslijed zamora od opsega napona $\Delta\sigma$ i referentnih veličina spoljašnjih oštećenja a_0 , eksploatisani materijal

Dobijeni rezultati preostalog vijeka uslijed zamoraza za novi materijal prikazani su u tabeli 3.

Tabela 4. Preostali vijek uslijed zamora n (godine) za različite dubine inicijalne pukotine a_0 i opsege primjenjenih napona $\Delta\sigma$ [MPa], novi materijal

Dubina početne pukotine, a_0 [mm]	Preostali zamorni vijek, n [god.]		
	$\Delta\sigma_1 = 7,450$ [MPa]	$\Delta\sigma_2 = 6,208$ [MPa]	$\Delta\sigma_3 = 5,320$ [MPa]
2	1,648	3,137	5,409
2,5	1,546	2,943	5,076
3	1,466	2,79	4,811
4	1,334	2,539	4,378

2.3. Analiza rezultata

Dubina pukotine na ovjesnoj polugi podvrgnutoj promjenljivom opterećenju ima značajan uticaj na vijek tog elementa. Međutim, analizom slike 7, evidentno je da je preostali vijek uslijed zamora osjetljiviji na promjene opsega napona $\Delta\sigma$, nego referentne vrijednosti dubine spoljašnjeg oštećenja. Ako se, na primjer, pri fiksnoj vrijednosti dubine pukotine od 2 mm poveća opseg naprezanja sa 5,32 MPa na 7,45 MPa (što je povećanje za 40%) preostali vijek uslijed zamora smanjiće se sa 5,409 godina na 3,137 godine, što je smanjenje za 42,0%.

Slično je i za neku drugu vrijednost dubine inicijalne pukotine. Tako za dubinu inicijalne pukotine od 3 mm, povećanje opsega naprezanja sa 5,32 MPa na 7,45 MPa, skraćuje vijek uslijed zamora za 69,53%. Sa druge strane, povećanje dubine pukotine sa 2 mm na 3 mm (povećanje od 50%), pri istom opsegu naprezanja $\Delta\sigma = 5,32$ MPa, skraćuje vijek uslijed zamora sa 5,409 godina na 4,811 godinu, a to je smanjenje za 11%. Takođe u slučaju povećanja dubine početne pukotine sa 2 mm na 4 mm (povećanje od čak 100%) pri istom opsegu naprezanja $\Delta\sigma = 5,32$ MPa, skraćuje vijek za 19,1%.

Očigledan je dominantniji uticaj opsega naprezanja od same dubine oštećenja. Imajući ovo u vidu, može se izvesti zaključak da je za ovakvu vrstu problema, u slučajevima da postoji pukotina određene dubine u elementu konstrukcije, značajnije praćenje opsega opterećenja nego praćenje do koje je dubine bilo oštećenje tipa pukotine napredovalo.

3. ZAKLJUČAK

Prikazani rezultati pokazuju mogućnost primjene Proširene metode konačnih elemenata – PMKE (*Extended Finite Element Method - XFEM*), kao jedne relativno nove metode, u trodimenzionalnoj simulaciji rasta zamorne pukotine na geometriji tipa ovjesne poluge. Kako je prikazano u ovom radu, problem procjene integriteta i otpornosti prema lomu uslijed zamora elemenata spojnog pribora izrađenih od konstrukcionog čelika može da bude uspješno razmatran upotrebom PMKE. Naravno, metoda je novija i još uvijek traži da se potvrđuje kroz praksu, a ovdje prikazani rezultati su doprinos ideji da se obimna, dugotrajna, skupa, a veoma često i teško izvodljiva eksperimentalna ispitivanja, mogu efikasno zamijeniti numeričkim simulacijama. Na osnovu istraživanja koje je provedeno u ovom radu može se zaključiti:

- Predložene metode za procjenu preostalog vijeka trajanja strukturnih elemenata izvoznih postrojenja su realne i doprinose racionalizaciji primjene procedure u praćenju stanja i održavanja, kako sa aspekta tehničkih performansi, tako i na planu optimizacije, preventivnog održavanja i redukcije troškova uopšte.
- Primjenom predložene procedure dobijeni su kvalitetni parametri koji se mogu uspješno primijeniti na optimiziranje, projektovanje, rekonstrukciju, sanaciju, revitalizaciju ili produženje životnog vijeka strukturnih elemenata izvoznih postrojenja;
- Ovaj rad je pokazao da se prednosti korištenja *software*-a u procjeni integriteta konstrukcija ogledaju u sljedećem: ušteda vremena, sredstava i resursa, što je našlo opravdanost sa ekonomskog aspekta. Dakle, skupa laboratorijska mjerenja su zamijenjena korisničkim *software*-om, u okviru kog se vrši: modeliranje konstrukcije uvođenjem inicijalne pukotine u strukturu, a potom proračun napona i deformacije, kao i simulacija širenja pukotine sa svim relevantnim parametrima mehanike loma.

4. REFERENCE

- [1] Hansel, J.: Development of the Mine Hoist Safety Management System, *Journal of AGH-KTL*, Part 1, Vol. 27, (95 pages), Kraków 2002, Part 2, Vol. 32, (241 pages), Kraków, 2003.
- [2] Petković, D., Jašarević, S. i Brdarević, S.: Ispitivanje i analiza pogonskog stanja pogona dizanja u strojarnici izvoznog okna Stara Jama RMU Zenica, MF Zenica, 1998.
- [3] Pravilnik o tehničkim normativima pri prevozu ljudi i materijala oknima rudnika –*Tehnički propisi*, Rudarstvo, Beograd, 1986, str.490-526
- [4] Hertzberg, R.W.: Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, John Wiley and Sons, 1996.
- [5] Tada, H., Paris, P.C., & Irwin, G.: The Stress Analysis of Cracks Handbook, Del Research Corp. Hellertown, Pa., 1973.
- [6] Hadžalić, M.: Razvoj algoritama za određivanje integriteta i vijeka trajanja strukturnih elemenata izvoznih postrojenja, doktorski rad, Univerzitet u Zenici, Mašinski fakultet, Zenica, BiH, 2018.
- [7] Technische Anforderungen an Schacht – und Schrägförderanlagen, Verlag Hermann Bellmann, Dortmund, 2005, blat 7/17÷7/22.
- [8] Cenaero. Morfeo/crack for Abaqus, https://dial.uclouvain.be/pr/boreal/fr/object/boreal%3A134972/datastream/PDF_01/view
- [9] Forman, R.G., Kearney, V.F., Engle, R.M.: Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures, *Journal of Basic Engineering, ASME Transactions Series D*, 1967, pp.459.
- [10] Sehitoglu, H.: Fatigue of Low Carbon Steels as Influenced by Repeated Strain Aging, *Fracture Control Program*, Report No. 40, University of Illinois at Urbana Champaign, June 1981.