

MODELIRANJE UDARNE ŽILAVOSTI ČELIKA GENETSKIM PROGRAMIRANJEM

¹ Bahrudin Hrnjica, ² Fadil Islamović, ³ Zijah Burzić, ⁴ Dženana Gačo

¹ Univerzitet u Bihaću - Tehnički fakultet Bihać, Irfana Ljubijankića bb, bhrnjica@datasoft.ba

² Univerzitet u Bihaću - Tehnički fakultet Bihać, Irfana Ljubijankića bb, f.islam@bih.net.ba

³ Vojnotehnički institut, R. Resanovića 1, 11000 Beograd, zijah_burzic@vektor.net

⁴ Univerzitet u Bihaću - Tehnički fakultet Bihać, Irfana Ljubijankića bb, dzgaco@bih.net.ba

Ključne riječi: čelik, udarna žilavost, modeliranje, evolucijske metode, genetsko programiranje.

SAŽETAK

Jedan od najstarijih postupaka ispitivanja koji potiče još iz 19. stoljeća predstavlja ispitivanje udarne žilavosti. S obzirom na probleme nekompletnosti i nepotpunog ispitivanja, koji su najčešće vezani za složenost izrade epruveta, zadnjih godina se ovaj postupak nastoji poboljšati, a kvalitet ovih ispitivanja podići na viši nivo. Ukupnu energiju udara moguće je predstaviti kao dvije komponente: energiju stvaranja prsline i energiju širenja prsline, čiji je algebarski zbir brojno jednak ukupnoj energiji udara. U ovom radu izvršeno je eksperimentalno određivanje udarne žilavosti u odnosu na temperaturu materijala. Na osnovu eksperimentalnih rezultata izvršena je numerička analiza i modeliranje udarne žilavosti pomoću genetskog programiranja. Dobijeni eksperimentalni rezultati i matematički modeli udarne žilavosti predstavljaju važne podatke u cjelokupnom procesu određivanja parametara mehanike loma, a posebno kritičnog faktora intenziteta napona.

1. UVOD

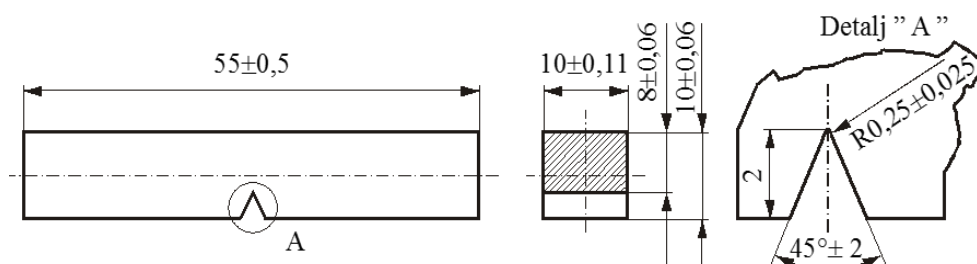
Jedan od najstarijih postupaka ispitivanja koji potiče još iz 19. stoljeća predstavlja ispitivanje udarne žilavosti. Ovaj postupak u sebi sublimira tri tipa ispitivanja i to: ispitivanje na savijanje, ispitivanje epruveta sa zarezom i ispitivanje udarnim opterećenjem. S obzirom na probleme nekompletnosti i nepotpunog ispitivanja, koji su najčešće vezani za složenost izrade epruveta, zadnjih godina se to nastoji poboljšati, a kvalitet ovih ispitivanja podići na viši nivo. Kao rezultat toga došlo je do usavršavanja već postojeće metode u ovim ispitivanjima, a to je Charpyjevo klatno. Charpyevim klatnom moguće je dobiti vrijednosti udarnih ispitivanja koja su vrlo precizna i pouzdana, jer su se razvoj i usavršavanje mjernih traka, te adaptera za konverziju signala drastično unaprijedili. Naime, danas je moguće iz vrlo malog vremenskog intervala od svega 2 [msec] dobiti i do 10.000 mjerenja sile i energije udara [1].

Udarne ispitivanja koja su provedena temelje se na evropskim normama EN 10045-1, pri čemu su se koristile epruvete posebno izrađene za ova ispitivanja. Dimenzije i oblik epruveta definisani su ovim standardom, kao i zarez koji se izrađuje sa uzdužne strane. Primjer jedne takve epruvete za udarna ispitivanja prikazuje slika 1. [2].

Udarne ispitivanja prvenstveno daju odgovore o ponašanju materijala pri ometanom deformisanju, pri kojem se javlja prostorno naponsko stanje. Otpornost materijala na udar može se odrediti ukoliko se poznaju energija, odnosno rad potreban za lom. Energija loma koja se dobije kao rezultat mjerenja,

predstavlja ukupnu energiju koja se mjeri tokom vremena, od kad klatno udari u epruvetu do njenog loma. Monitoring sile odnosno energije loma u vremenu daje vrlo korisne podatke o tome kako se utrošio rad u odnosu na silu. Da li je pri lomu duže djelovao manji intenzitet sile ili obrnuto [3].

Ove informacije i veličine su od presudnog značaja da se odgovori na pitanja o krutosti materijala odnosno žilavosti materijala, pri različitim vrijednostima temperature. Mjenjanjem temperature epruvete dobijaju se različite vrijednosti energije, i kao što će se vidjeti u prikazanim rezultatima temperatura utiče na ukupnu energiju udara, dok se za energiju stvaranja ne može kazati da značajno utiče temperatura, kada su u pitanju temperature okoline. Kada imamo niske temperature, tada manjoj energiji odgovara i manja plastična zona oko vrha zarez. Odnosno, snižavanjem temperature ova energija se približava vrijednostima zatezne čvrstoće i napona tečenja [1].



Slika 1: Epruveta za udarna ispitivanja Charpyjevim klatnom

Dijagram F-t koji se dobije kao izlazni rezultat mjerenja moguće je podijeliti na nekoliko zona iz kojih možemo dobiti ostale neophodne veličine. Jedan takav dijagram prikazuje slika 2. na kome se može uočiti nekoliko tačaka u kojima se definiše sila udara [1]:

- F_{GY} - **dinamička sila napona tečenja**. Određuje se na mjestu zakrivljena dijagrama, odnosno na prelaznoj tački linearne i nelinearne zavisnosti sila-vrijeme. U prvoj aproksimaciji služi kao mjera plastičnog popuštanja ligamenata epruvete.
- F_M - **Maksimalna sila** - dostignuta sila pri udaru.
- F_F - **Sila nestabilnog rasta prsline**. Ova sila može se odrediti na presjeku glatkog i strmo-padajućeg dijela krive.
- F_A - **Sila pri kojoj se zaustavlja brzi rast prsline**.

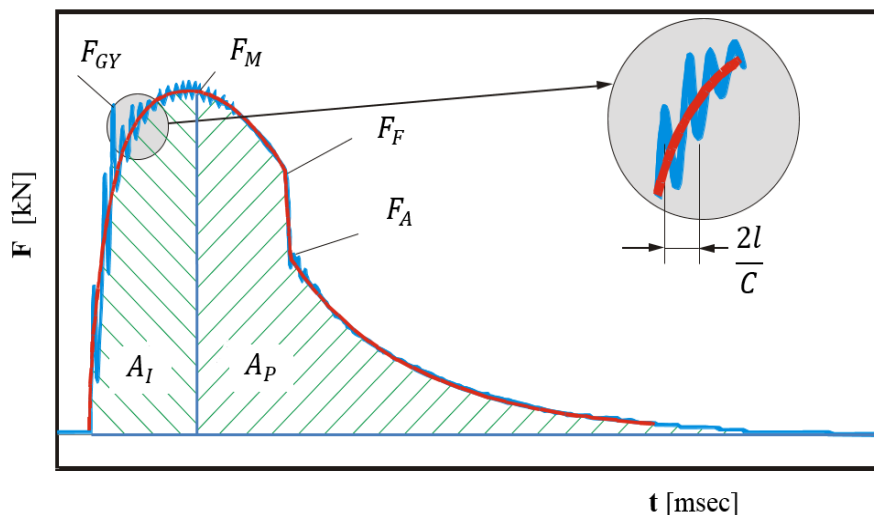
Kada imamo slučaj da se strmi pad sile izjednači sa maksimalnom silom, tada je $F_M = F_F$, dok silu F_A tada računamo kao presjek strmog pada glatkog dijela krive koja osciluje (slika 2). Energije koje su prikazane na dijagramu moguće je izračunati integriranjem sile po vremenu, a grafički one predstavljaju brojčanu vrijednost površine ispod krive [3].

Na osnovu toga imamo:

$$E_{uk} = \int_0^t F(t)v(t)dt, \quad (1)$$

gdje je:

- $F(t)$ – udarna sila,
- $v(t)$ – brzina klatna za vrijeme loma,
- t – vrijeme trajanja loma.



Slika 2: Dijagram udarne sile u vremenu, dobijen mjerenjem na Charpyjevom klatnu

Pored ukupne energije moguće je izračunati koji dio energije ide na stvaranje prsline, a koji dio na širenje prsline. U tom pogledu moguće je koristiti više metoda kojima se može razdvojiti ukupna energija udara E_{uk} na energiju za stvaranje prsline E_i i energiju za širenje prsline E_s . Metode polaze od činjenice da E_i ne zavisi od radijusa zarez, već da radijus utiče na energiju za širenje prsline E_s .

Optimalan postupak određivanja energije širenja prsline je računanje preko "zamorne prsline". Suština ovog postupka je u tome da se na epruvetama sa "V" zarezom izaziva zamorna prsline, pa se takva epruveta lomi na Charpy klatnu, a energija koja se pri tom utroši za lom je praktično energija širenja prsline E_s . Ukoliko je poznata vrijednost ukupne energije udara ispitivanog materijala onda može da se izračuna dio energije potrebne za stvaranje prsline E_i [4,5].

$$E_{uk} = E_i + E_s, \quad (2)$$

Određivanje energije stvaranja i energije širenja prsline po ovoj metodi obavlja se na jednom uzorku (za razliku od drugih postupaka), što daje veću tačnost. Slika 2. prikazuje obilježene površine E_i i E_s koje upravo odgovaraju pomenutim energijama [5].

2. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

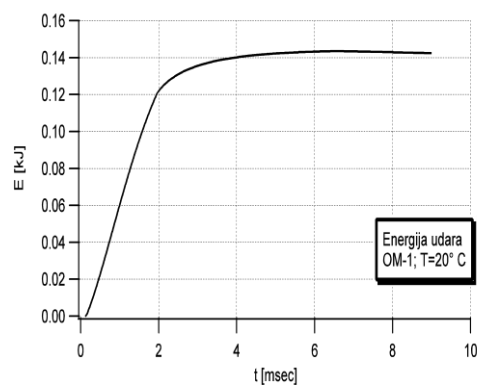
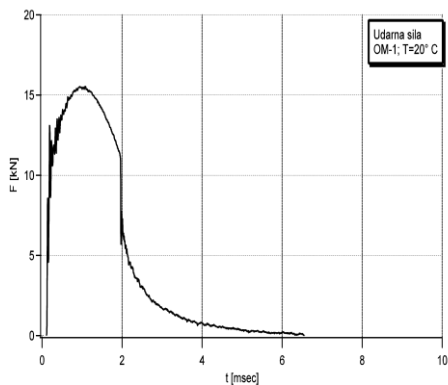
Udarne ispitivanja izvedena su se na epruveta izvađenih iz ploče čelika S 235 JG, prema unaprijed definisanoj tehnologiji zavarivanja. Ispitivanja su rađena su na temperaturama 20 °C, 10 °C, 0 °C, -10 °C, -20 °C i -40 °C.

Rezultati udarnih ispitivanja dati su u tabeli 1., dok su korespondentni dijagrami sila-vrijeme i energije vrijeme dati su na slici 3. Pored ukupne energije udara izdvojena je energije stvaranja ili inicijacije i energija širenja ili rasta prsline. Na kraju izračunata je udarna žilavost po kvadratnom centimetru površine na osnovu poprečnog presjeka odlomljene epruvete i ukupne energije udara.

Rezultate udarnih ispitivanja koje prikazuje tabela 1. moguće je sublimirati te konstruisati zavisnost između srednje energije udara i temperatura pri kojima su se provodila ispitivanja. Na taj način moguće je doći do karakterističnih vrijednosti temperatura u odnosu na energiju udara.

Tabela 1: Rezultati udarnih ispitivanja za osnovni materijal OM

Oznaka epruvete	Temp. T [°C]	Ukupna energija udara Eu [J]	Energija inicijacije prsline Ei [J]	Energije širenja prsline Eš [J]	Udarne žilavost [J/cm ²]
OM-1-1	20	232	52	180	290
OM-1-2		226	50	176	283
OM-1-3		241	54	187	301
OM-2-1	10	186	50	136	233
OM-2-2		174	50	124	217
OM-2-3		164	51	113	205
OM-3-1	0	127	48	79	159
OM-3-2		143	50	93	179
OM-3-3		131	49	82	164
OM-4-1	-10	93	45	48	116
OM-4-2		78	43	35	98
OM-4-3		81	45	36	101
OM-5-1	-20	51	40	11	64
OM-5-2		46	38	8	58
OM-5-3		49	38	11	61
OM-6-1	-40	30	26	4	38
OM-6-2		32	27	3	40
OM-6-3		31	25	6	39



Slika 3: Dijagrami sila - vrijeme i energija – vrijeme, za OM - 1 na temperaturi 20°C, dobijen mjerenjem na Charpyjevom klatnu

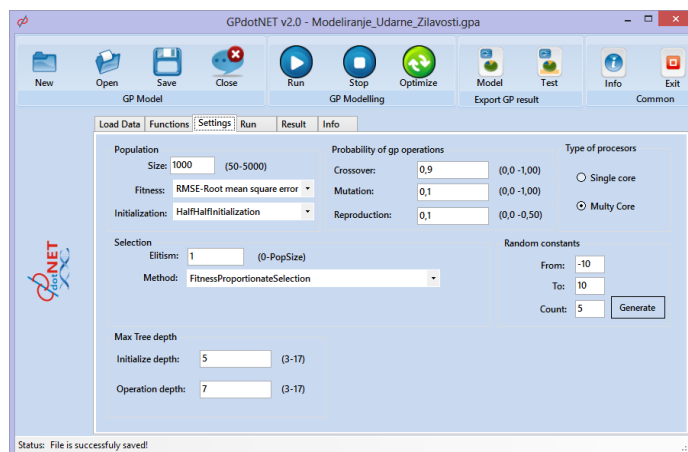
Krajnji cilj ispitivanja udarne žilavosti jeste i taj da se odredi ona temperatura pri kojoj dolazi do naglog pada žilavosti. Temperaturu naglog pada zovemo jos i prelazna temperatura. Udarne žilavost je iskazana po poprečnom presjeku izraženom u cm².

3. MODELIRANJE UDARNE ŽILAVOSTI GENETSKIM PROGRAMIRANJEM

Nad eksperimentalnim rezultatima izvršeno je matematičko modeliranje genetskim programiranjem, a matematički modeli dobijeni su primjermom GPdotNET – softverskog paketa razvijenog od strane autora rada, a dostupan je u open source verziji na <http://gpdotnet.codeplex.com> [2]. Modeliranje udarne žilavosti rađeno je u zavisnosti od temperature. Vrijednosti eksperimentalnih rezultata dijelom prikazanih u tabeli 1. pripremani su na način da je za svaku temperaturu izračunata srednja vrijednost energije udara. Nakon ove obrade rezultati su zapisani u CSV datoteku te učitani u GPdotNET. Za izračunavanje matematičkog modela pomoću genetskog programiranja potrebno je definisati parametre s kojim će se izvršavati algoritam genetskog programiranja. Apliciranje ovog inženjerskog procesa u genetsko programiranje definisano je slijedećim GP parametrima:

1. Skup $F = \{+, -, *, /, \sin, \exp, \ln\}$ – funkcija GP modela.
2. Skup $T = \{T\}$ – radna temperatura.
3. Izlazna vrijednost Y – udarna žilavost.

Slika 4. prikazuje GPdotNET pri definisanju parametara za modeliranje. Najbolje rješenje pronađeno je u 377 generaciji, a sam proces modeliranja je trajao 35 sekundi. Srednja vrijednost trajanja evolucije iznosila je 0.09 sekundi, a proces pronalazjenja najboljeg modela podešen je na 500 generacija.



Slika 4: GPdotNET i definisanje parametara genetskog programiranja

Analitički oblik matematičkog modela udarne žilavosti u odnosu na radnu temperaturu dobijen nakon apliciranja prethodnih parametara dat je slijedećom jednačinom:

$$f(T) = e^{0,034644365 \cdot T + 5,0136101} - 12,27842228 \cdot \sin(0,4169151 \cdot T - 1,55974134) + (1,367918876 + 0,54242 \cdot T) \cdot (0,34248 - \sin(0,40635 \cdot T)) + 3,789606257$$

Na osnovu ovako dobijenog matematičkog modela, izračunate su vrijednosti udarne žilavosti za karakteristične temperature, te izvršena komparacija sa eksperimentalnim vrijednostima koju prikazuje tabela 2. Iz prezentiranih vrijednosti vidimo da se matematički model dosta precizno poklapa sa eksperimentalnim vrijednostima, te da se kao takav može dalje koristiti. Model dobijen metodom genetskog programiranja nema ograničenja u pogledu stepena polinoma, kao što je to slučaj kod regresijske analize, pa se po iskustvu, po stepenu složenosti procesa, odlučuje kojim operacijama definisati skup funkcija.

Tabela 2: Komparacija eksperimentalnih vrijednosti sa vrijednostima matematičkog modela

Oznaka epruvete	Temp. T [°C]	Yex [J/cm ²]	Ygp [J/cm ²]	R [J/cm ²]
OM-1-1	20	290	291,2	0,1
OM-1-2		282,5	291,2	0,1
OM-1-3		301,25	291,2	0,1
OM-2-1	10	232,5	218,0	0,2
OM-2-2		217,5	218,0	0,2
OM-2-3		205	218,0	0,2
OM-3-1	0	158,75	167,0	0,2
OM-3-2		178,75	167,0	0,2
OM-3-3		163,75	167,0	0,2
OM-4-1	-10	116,25	105,6	0,2
OM-4-2		97,5	105,6	0,2
OM-4-3		101,25	105,6	0,2
OM-5-1	-20	63,75	61,1	0,1
OM-5-2		57,5	61,1	0,1
OM-5-3		61,25	61,1	0,1
OM-6-1	-40	37,5	37,9	0,2
OM-6-2		40	37,9	0,2
OM-6-3		38,75	37,9	0,2

4. ZAKLJUČAK

Korištenjem digitalnih računara i osciloskopa prevaziđen je problem izračunavanja ukupne energije udara, odnosno energije širenja i energije rasta prsline. Sada je moguće snižavanjem temperature doći do vrijednosti tranzitnih temperatura odnosno nulte prelazne temperature koja je u našem slučaju vrlo važna za naredna ispitivanja i izračunavanje kritičnog faktora intenziteta napona. Modeliranjem energije udara u zavisnosti od temperature moguće je dobiti vrlo važne matematičke modele koji u narednim ispitivanjima mogu pojednostiti sami proces eksperimentalnog istraživanja, a s druge strane vrijednosti i za one temperature koje nisu obuhvaćene eksperimentom, a nužne su nam za izračunavanje energije udara odnosno udarne žilavosti. Evolucijske metode korištene u ovom radu doprinose kvalitetnijem izučavanju ove oblasti jer daju pouzdanije, brže i kvalitetnije rezultate modeliranja u odnosu na klasične metode matematičkog modeliranja.

5. LITERATURA

- [1] Hrnjica B.: „Pocjena integriteta i životnog vijeka posude pod pritiskom“, Magistarski rad - Tehnički fakultet Univerzitet u Bihaću, 2012.
- [2] GPdotNET – Open source projekat za modeliranje i optimizaciju evolucijskim metodama, <http://bhrnjica.net/gpdotnet>, 2013.
- [3] Islamović F.: „Poboljšanje integriteta stacionarnih višekomornih tankostijenih posuda za tečna goriva“, Doktorska disertacija - Mašinski fakultet Univerzitet u Tuzli, 2006.
- [4] Gačo Dž.: „Istraživanje uticaja promjenljivog opterećenja i temperature na ponašanje zavarenih spojeva visokolegiranih čelika“, Doktorska disertacija - Mašinski fakultet Beograd, 2007.
- [5] Burzić M., Sedmak S., Burzić Z. i dr.: „Eksperimentalno određivanje dinamičke žilavosti loma KI_I, kod metalnih materijala visoke čvrstoće“, Tehnička dijagnostika Beograd, 2003.