

Primljen / Received: 11.7.2012.
 Ispravljen / Corrected: 17.10.2012.
 Prihvaćen / Accepted: 23.10.2012.

Dostupno online / Available online: 15.11.2012.

Izbor čelika s obzirom na žilavost

Autori:



Doc.dr.sc. **Davor Skejić**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Zagrebu
 Građevinski fakultet
davors@grad.hr



Prof.dr.sc. **Boris Androić**, dipl.ing.građ.
 I.A. projektiranje d.o.o., Zagreb
info@iaprojektiranje.com



Prof.dr.sc. **Darko Dujmović**, dipl.ing.građ.
 Sveučilište u Zagrebu
 Građevinski fakultet
dujmovic@grad.hr

Pregledni rad

Davor Skejić, Boris Androić, Darko Dujmović

Izbor čelika s obzirom na žilavost

Činjenica da danas postoji više od 2500 vrsta čelika uvelike otežava ispravan izbor pri projektiranju. Specifični zahtjevi za izbjegavanje krtog loma definirani su u EN 1993-1-10. U radu je prikazana metoda procjene sigurnosti za izbjegavanje krtog loma preko mehanike loma, kao i teorijska pozadina inženjerskih pravila definiranih u EN 1993-1-10. Osim uobičajene primjene EN 1993-1-10, pokazane su mogućnosti njene primjene kod specifičnih zahtjeva žilavosti zbog visoke stope prirasta deformacije i/ili visokih učinaka hladne deformacije.

Ključne riječi:

izbor čelika, Eurokod, EN 1993-1-10, žilavost, krti lom, mehanika loma

Subject review

Davor Skejić, Boris Androić, Darko Dujmović

Selection of steel based on ductility

Designers are nowadays at difficulty when selecting proper steel grade, as over 2500 types of steel are available on the market. Specific requirements for the avoidance of brittle fracture are defined in EN 1993-1-10. The method for safety assessment with regard to avoidance of brittle fracture via fracture mechanics, and theoretical background of structural rules defined in EN 1993-1-10, are presented in the paper. In addition to the normal use of EN 1993-1-10, its other uses, in case of specific ductility requirements due to high strain rate and/or high cold strain effects, are also presented.

Key words:

steel selection, Eurocode, EN 1993-1-10, ductility, brittle fracture, fracture mechanics

Übersichtsarbeit

Davor Skejić, Boris Androić, Darko Dujmović

Die Auswahl von Stahl unter dem Aspekt der Festigkeit

Die Tatsache, dass es heute mehr als 2500 Stahlsorten gibt, erschwert bei der Planung die richtige Auswahl erheblich. Die spezifischen Anforderungen zur Vermeidung eines Sprödbruchs sind in EN 1993-1-10 definiert. In der Arbeit wird eine Methode zur Beurteilung der Sicherheit für die Vermeidung eines Sprödbruchs über die Bruchmechanik sowie auch der theoretische Hintergrund der Ingenieursregeln dargestellt, die in EN 1993-1-10 definiert sind. Neben der gewöhnlichen Anwendung von EN 1993-1-10 werden auch Möglichkeiten ihrer Anwendung bei spezifischen Festigkeitsanforderungen aufgrund einer hochgradigen Deformationszunahme und/oder hoher Einwirkung von Kaltverformung gezeigt.

Schlüsselwörter:

Stahlauswahl, Eurocode, EN 1993-1-10, Festigkeit, Sprödbruch, Bruchmechanik

1. Uvod

1.1. Općenito o izboru čelika prema Eurokodu

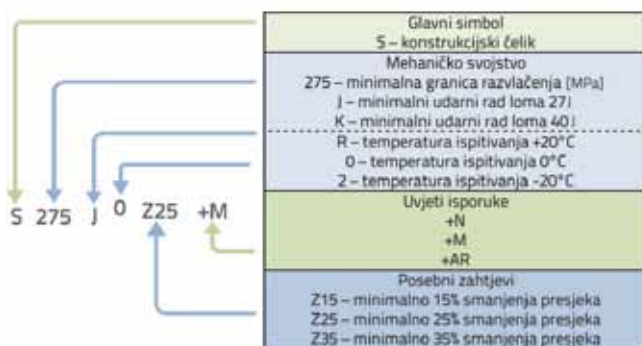
Eurokod 3 [1] se odnosi na projektiranje čeličnih konstrukcija i na građevinske radove s čelikom. U skladu je sa zahtjevima i načelima za pouzdanost konstrukcija, s osnovama njihovog projektiranja i provjere koje su navedene u EN 1990 - Osnove za projektiranje konstrukcija [2]. Zahtjevi su postavljeni za otpornost, uporabljivost, trajnost i otpornost na požar čeličnih konstrukcija. Oni se temelje na principu projektiranja prema graničnim stanjima, koji uglavnom pretpostavlja da se otpornost presjeka i elementa za krajnja granična stanja temelji na ispitivanjima u kojima su zadovoljene tolerancije prema EN 1090-2, a materijal iskazuje dovoljnu duktilnost da se mogu primijeniti pojednostavljeni modeli proračuna. Dakle, svojstva materijala, za čelik - razred (klasa) čelika, moraju biti detaljno naznačena u skladu s razinama pouzdanosti definiranim u Eurokodu 3.

Ovi pojednostavljeni proračunski modeli i koncept pouzdanosti u Eurokodu temelje se na ispitivanjima pri sobnoj temperaturi, kad se javlja duktilno otkazivanje budući da čelik u području gornje razine (nivoa) posjeduje dovoljnu žilavost. Slika 1. (lijevo) prikazuje pregled svih duktilnih oblika otkazivanja, koji su uključeni u pravila projektiranja za čelične konstrukcije, kao i izraze za karakterističnu otpornost i vrijednosti parcijalnih faktora koji su proizašli iz ispitivanja. Ako nastupa krsti lom, pretpostavke za proračunske modele i koncepte sigurnosti više nisu ispunjene, vidi sliku 1. (desno). Prema tome, otkazivanje krstom se mora izbjeći pravilno odabranim čelikom koji posjeduje dovoljnu žilavost.

1.2. Izbor kvalitetnog razreda čelika

Općenito, izbor pravilnog razreda čelika je određen u EN 1993-1-1 [1]. Navedeno je nekoliko zahtjeva:

1. mehanička svojstva - nominalne vrijednosti svojstava materijala definirane su kao karakteristične vrijednosti u proračunu.
2. zahtjevi duktilnosti - za čelike se zahtijeva minimalna duktilnost.
3. svojstva žilavosti - dana su pojednostavljena pravila za izbor odgovarajućeg materijala s dovoljnom žilavosti za izbjegavanje krtog loma.
4. svojstva kroz debljinu - smjernice za izbor svojstava kroz debljinu dane su u EN 1993-1-10 [4].



Slika 2. Označavanje razreda čelika u skladu s EN 10025 [5]

S obzirom na ove zahtjeve, razredi čelika su navedeni u normi za vruće valjane proizvode i konstrukcijske čelike - EN 10025 [5] (slika 2.). Ovdje prikazan, a u EN 10025 usvojen, alfanumerički način označavanja čelika određen je prema

Duktilni načini otkazivanja			Krti lom
<p>Način 0 Prekomjerne deformacije zbog razvlačenja, npr. vlačna šipka</p> $R_d = \frac{R_k(f_y)}{\gamma_{M0}}$	<p>Način 1 Otkazivanje elementa zbog instabilnosti, npr. izvijanje</p> $R_d = \frac{R_k(f_y, \bar{\lambda})}{\gamma_{M1}}$	<p>Način 2 Lom nakon razvlačenja, npr. vijak</p> $R_d = \frac{R_k(f_u)}{\gamma_{M2}}$	<p>Isključeno ispravnim izborom materijala</p>
$\gamma_{M0} = 1,00$	$\gamma_{M1} = 1,00$	$\gamma_{M2} = 1,25$	
$R_k = \gamma_M R_d$			
<p>R_d - računski otpornost, R_k - karakteristična otpornost, γ_{Mi} - parcijalni faktori</p>			

Slika 1. Krti lom i duktilni oblici otkazivanja [3]

normama EN 10027-1 i CR 10260. Klasifikacija razreda čelika se prema tome temelji na navedenoj minimalnoj granici razvlačenja pri sobnoj temperaturi.

2. Zahtjevi pri izboru čelika

2.1. Mehanička svojstva

Nominalne vrijednosti granice razvlačenja, f_y i čvrstoće, f_u , za konstrukcijski čelik trebaju se dobiti usvajanjem vrijednosti $f_y = R_{eh}$ i $f_u = R_m$ izravno iz norme za proizvode [5], ili iz tablice 3.1. u EN 1993-1-1 [1], koja je ustvari preuzeta iz [5]. Mora se naglasiti da se zahtijevana granica razvlačenja smanjuje s povećanjem debljine materijala. Na taj se način uzima u obzir učinak da s porastom debljine materijala treba dodati više legirajućih elemenata kako bi se postigla konstantna granica razvlačenja po debljini. Međutim, s porastom dodatka legirajućih elemenata povećava se vrijednost ekvivalenta ugljika i zavarivanje postaje problematično. Zavarljivost je značajno svojstvo za primjenu konstrukcijskih čelika. Stoga, normativna pravila uzimaju u obzir ovu činjenicu smanjujući zahtijevanu granicu razvlačenja za deblje ploče kako bi se osigurala zavarljivost.

Ovdje je bitno napomenuti da novi načini proizvodnje termomehanički valjanih sitnozrnati čelika u kvalitetnim razredima jednakim ili većim od S460 omogućuju izvrsna mehanička svojstva, tj. mali pad granice razvlačenja s povećanjem debljine. Takvi čelici, u praksi poznati pod komercijalnim nazivom HISTAR, posjeduju izuzetno svojstvo zavarljivosti koje je, uz navedena visoka mehanička svojstva, posljedica novog načina proizvodnje visokokvalitetnih čelika s malim udjelom legirajućih elemenata i općenito malom vrijednosti ekvivalenta ugljika.

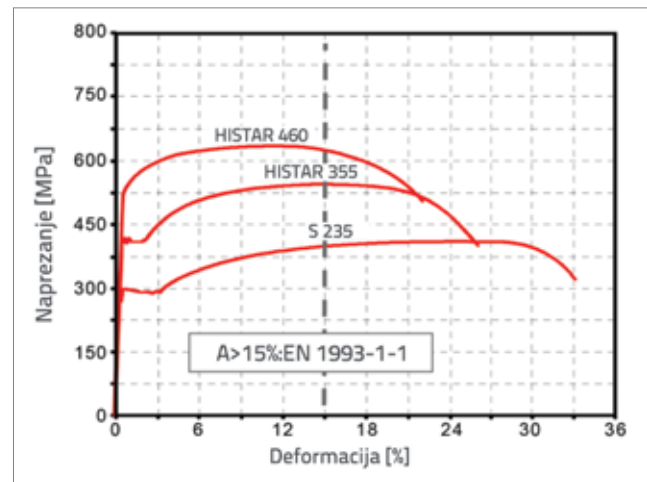
2.2. Duktilnost

Između ostalog, duktilnost se zahtijeva kako bi se izbjegao krti lom konstrukcijskih elemenata. Za čelike se minimalna zahtijevana duktilnost izražava u smislu ograničenja je za:

- istezljivost pri otkazivanju na mjernoj duljini od $5,65\sqrt{A_0}$ (gdje je A_0 početna površina poprečnog presjeka). Eurokod preporučuje da istezljivost pri otkazivanju ne bude manja od 15%,
- omjer f_u/f_y određene minimalne čvrstoće, f_u , i određene minimalne granice razvlačenja, f_y . Eurokod preporučuje da minimalna vrijednost bude $f_u/f_y \geq 1,10$.

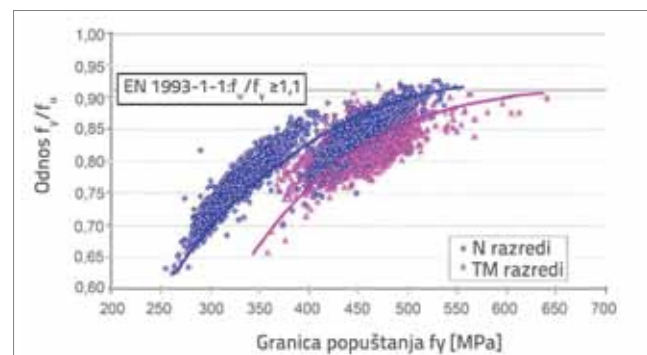
Oba kriterija su od posebne važnosti za konstrukcijske čelike visoke čvrstoće, kao na primjer razred HISTAR 460 (ili razred čelika S460 prema EN 10025-4 za termomehanički valjane zavarljive sitno zrnate konstrukcijske čelike), s obzirom na činjenicu da što je veća granica razvlačenja to će istezljivost

pri otkazivanju (lomu) biti manja (slika 3.). Minimalna potrebna istezljivost za konstrukcijske čelike propisana je u [5]. Dakle, norma za proizvode nudi više duktilnosti od zahtijevane u EN 1993-1-1. Međutim, slika 3. također pokazuje da je minimalna istezljivost općenito zadovoljena s visokom razinom pouzdanosti za suvremenu generaciju čelika visoke čvrstoće.



Slika 3. Usporedba krivulja naprezanje-deformacija za čelik S235 i čelike suvremene generacije HISTAR 355 i HISTAR 460

Omjer f_u/f_y je općenito kritičniji od minimalnog produljenja. Stoga su provedena mnogobrojna vlačna ispitivanja, a dobiveni omjeri f_u/f_y su prikazani u odnosu na granicu razvlačenja na slici 4. [6].



Slika 4. Odnos granice razvlačenja i čvrstoće konstrukcijskih čelika proizvođača ArcelorMittal [6], N – normalizirani čelici, TM termomehanički obrađeni čelici

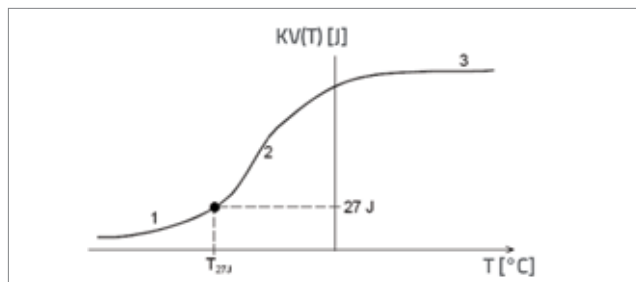
Iz dijagrama sa slike 4. može se zaključiti da konstrukcijski čelici do 460 MPa ispunjavaju kriterije duktilnosti. Na prvi se pogled čini da konstrukcijski čelici s granicama razvlačenja većim od 460 MPa ne ispunjavaju kriterije duktilnosti. Međutim, čelici proizvedeni termomehaničkim (TM) postupkom ciljano ispunjavaju te kriterije zahvaljujući njihovom specifičnom mehanizmu očvršćivanja (sitnija mikrostruktura i smanjeni udio mikrolegirajućih elemenata).

2.3. Žilavost

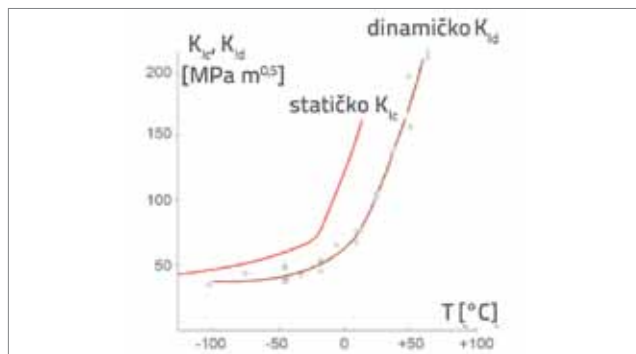
Moguća su dva načina otkazivanja materijala: duktilno ili krto (tablica 1). Krto otkazivanje je nepoželjno naglo otkazivanje bez plastične deformacije materijala i uobičajeno se naziva krto lom.

Žilavost je otpornost naprezanog materijala na krto lom. Definira se kao količina energije po jedinici volumena koju materijal može apsorbirati prije nego što pukne. Na žilavost materijala utječe više čimbenika:

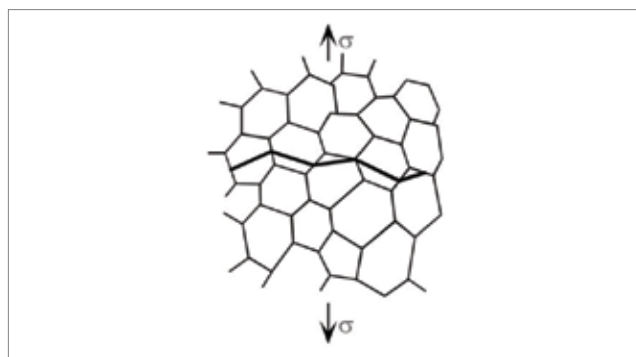
- *Temperatura*
Materijali gube otpornost na lom sa smanjenjem temperature, vidi sliku 5. Ovaj se odnos može prikazati na krivulji udarni rad loma (KV) - temperatura (T) s područjem gornje razine (3: duktilno otkazivanje), područje s donjom razinom (1: krto lom) i prijelazno područje (2: mješoviti lom - lom pokazuje dijelove cijepanja i površinu smicanja).
- *Brzina opterećivanja*
Što je veća brzina opterećivanja to je žilavost manja (slika 6.).
- *Veličina zrna*
Orijentacija kristalne rešetke je različita u susjednim zrnima (slika 7.). Kad god vrh pukotine dosegne granicu zrna, pukotina naknadno mijenja svoj smjer širenja (rasta) te se tako energija razgrađuje. Prema tome, fino zrnati čelici su otporniji na krto lom.
- *Hladno oblikovanje*
S povećanjem hladnog oblikovanja dolazi do povećanja granice razvlačenja uz smanjenje duktilnosti (slika 8.).
- *Debljina materijala*
U dvodimenzionalnom stanju naprezanja, plastična deformacija čelika počinje u točki razvlačenja. U trodimenzionalnom stanju naprezanja, kristalna rešetka čelika je zbijena (stisnuta) sa svih strana i stoga dolazi do značajnog porasta granice razvlačenja čelika. Dakle, tanje ploče s većim udjelom materijala u dvodimenzionalnom stanju naprezanja imaju veću duktilnost od debljih ploča (slika 9.).



Slika 5. Krivulja udarni rad loma KV - temperatura T



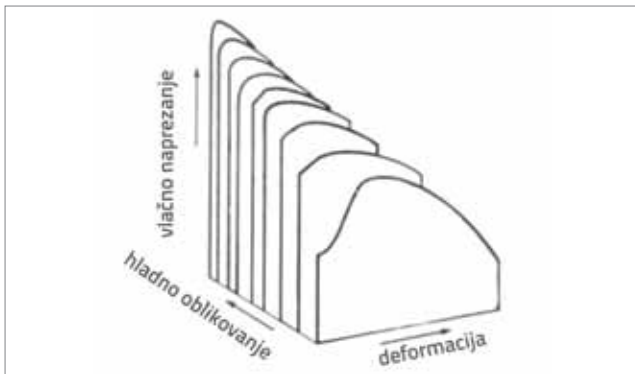
Slika 6. Krivulja faktora intenziteta naprezanja - temperatura za kvazistatičko i dinamičko opterećenje



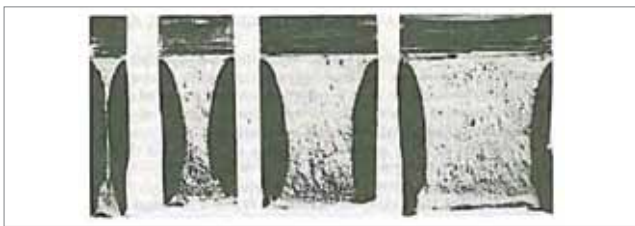
Slika 7. Model širenja pukotine u mikrostrukтури

Tablica 1. Mehanizmi otkazivanja materijala [7]

Način otkazivanja	Deformacija kristalne rešetke	Mikrostruktura površine loma
Duktilno otkazivanje <ul style="list-style-type: none"> - posmik - klizanje - žilavost - bez sjaja 		
Krto otkazivanje (lom) <ul style="list-style-type: none"> - cijepanje - dekohezija - lomljivost - sjaj 		



Slika 8. Krivulja naprezanje-deformacija u ovisnosti o stupnju hladnog oblikovanja



Slika 9. Površine loma nakon Charpyevih udarnih ispitivanja ploča različitih debljina

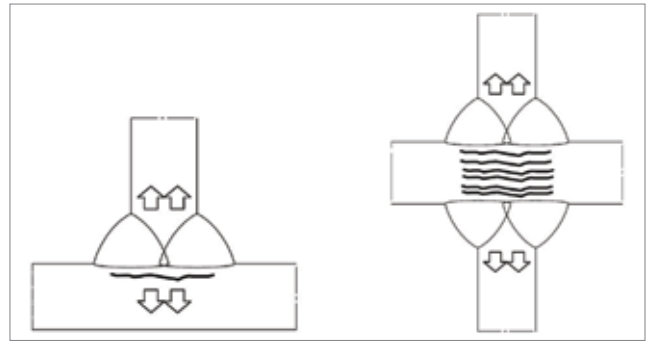
Žilavost se uobičajeno eksperimentalno utvrđuje Charpyevim udarnim ispitivanjem čime se dobiva krivulja *udarni rad loma - temperatura*.

Ostali relevantni čimbenici koji imaju utjecaj i na otpornost elementa na krti lom jesu:

- Detalj (oblik) zareza
 - Začetak pukotine izrazito ovisi o detalju zareza i proizašlom naprezanju, položaju pukotine i obliku pukotine izražene faktorom intenziteta naprezanja.
- Stupanj iskorištenosti elementa (omjer učinka djelovanja i otpornosti)
 - Što su veća vlačna naprezanja u elementu, veća je vjerojatnost loma.

2.4. Svojstva kroz debljinu

Lamelarno cijepanje je tip loma koji se događa ispod zavara (slika 10). Obično nastupa kada se neki pločasti materijali koji imaju nisku duktilnost u smjeru debljine (ili kroz debljinu) zavaruju na okomiti element. Otkazivanje cijepanjem obično nastupa unutar osnovnog metala izvan zone utjecaja topline i paralelno je s granicom taljenja zavara. Problem je uzrokovan varovima koji osnovni materijal izlažu visokim naprezanjima, odnosno skupljanju u smjeru debljine. Glavni pokazatelj da materijal određuje deformabilnost u smjeru kroz debljinu jest sumpor (sadržan kao rezidualni element u čeliku). Međutim, poznato je da se samo deformabilnost, ali ne i čvrstoća (otpornost) u smjeru kroz debljinu, može poboljšati postupcima proizvodnje čelika.



Slika 10. Lamelarno cijepanje [3]

Otpornost na lamelarno cijepanje je jedan od bitnih zahtjeva pri izboru čelika. Međutim, težište ovog rada su zahtjevi žilavosti, te se navedena problematika prije svega zbog nedostatka prostora neće detaljno obrazlagati.

3. Procjena sigurnosti za izbjegavanje krtog loma pomoću mehanike loma

U radu je prikazana procjena sigurnosti za izbjegavanje krtog loma pomoću mehanike loma kao što je normirano u Eurokodu 3, dio 1-10 – Žilavost materijala i svojstva kroz debljinu [4]. Više informacija može se naći u [7].

Provjera se provodi uspoređivanjem K -vrijednosti (faktor intenziteta naprezanja), vidi izraz (1). Uspoređuju se, s jedne strane, računске vrijednosti učinaka djelovanja izražene pomoću faktora intenziteta naprezanja, $K_{appl,d}^*$ a s druge strane, računске vrijednosti otpornosti izražene pomoću faktora intenziteta naprezanja, $K_{mat,d}^*$

$$K_{appl,d}^* \leq K_{mat,d}^* \quad (1)$$

Računske vrijednosti su dobivene iz statističkih distribucija na takav način da se postigne zahtijevana pouzdanost za procjene krajnjega graničnog stanja. Provjera se temelji na sljedećim konzervativnim pretpostavkama:

1. konstrukcijski dio ima nedostatak u obliku pukotine u točki maksimalne koncentracije naprezanja (*hot spot*) s veličinom a_0 (npr. računska vrijednost dubine pukotine), i izložena je također zaostalim naprezanjima od izrade;
2. temperatura konstrukcijskog dijela ($T_{min,d}$) dostiže svoju minimalnu vrijednost i time uzrokuje minimalna svojstva žilavosti;
3. konstrukcijski dio je izložen naprezanju od stalnog i promjenjivog opterećenja uz vodeće djelovanje ($T_{min,d}$);
4. proračunska situacija koja obuhvaća kombinaciju navedenih pretpostavki je izuzetna.

Pomoću K-vrijednosti za procjenu, vidi izraz (1), moguće je iskoristiti prednost Sanzove korelacije između vrijednosti mehanike loma KV i vrijednosti dobivene iz Charpyevog udarnog ispitivanja s V-zarezom, kao što je navedeno u normama za isporuku čelika, na način da se izbor čelika može provesti bez referiranja podataka o žilavosti određenim za konkretni projekt.

3.1. Zahtjevi žilavosti

Zahtjev žilavosti $K^*_{appl,d}$ koji proizlazi iz unesenih naprezanja može se utvrditi za dane detalje, kao što je to prikazano na slici 11. na primjeru zavarenog dodatka na donjoj pojasnici nosača.

Naprezanja σ_{Ed} su dio granice razvlačenja koja proizlaze iz:

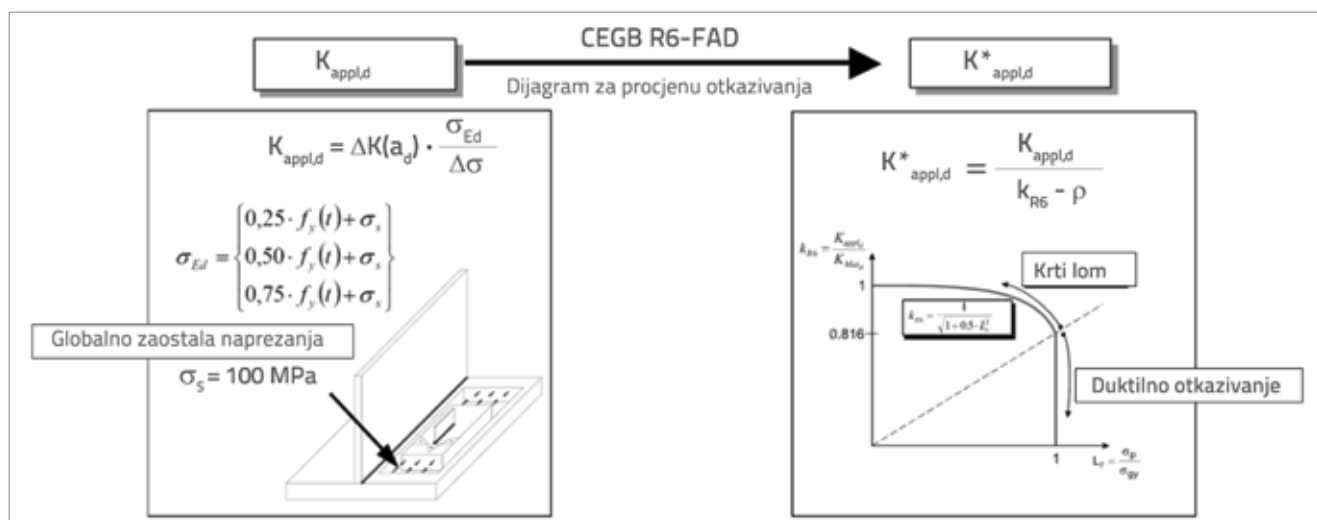
- a) učestale kombinacije opterećenja $G_k + \psi_2 Q_k$ (2)

gdje je G_k karakteristična vrijednost stalnog opterećenja, Q_k karakteristična vrijednost promjenjivog opterećenja, a ψ_2 faktor za nazovistalnu vrijednost promjenljivoga djelovanja [2];

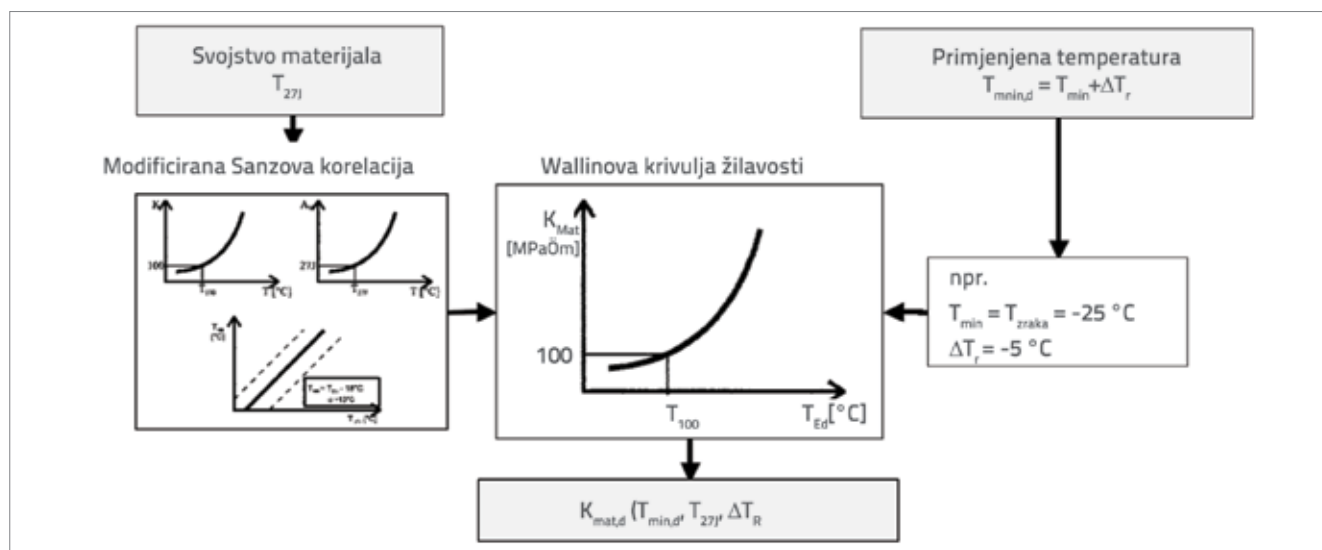
- b) zaostalih naprezanja σ_s u vlačnoj pojasnici nosača zbog učinaka skupljanja tijekom proizvodnje nosača. Lokalna zaostala naprezanja u kritičnoj "hot spot" točki, na primjer zbog zavarivanja dodatka, uključena su u postupak provjere.

$K^*_{appl,d}$ se određuje u dva koraka:

1. određivanjem linearne elastične vrijednosti $K_{appl,d}$ (na primjer pomoću $\Delta K(a_d)$ - vrijednosti);
2. modifikacijom $K_{appl,d}$ kako bi se dobila vrijednost $K^*_{appl,d}$ preko CEBG R6 – dijagrama za procjenu otkazivanja (FAD - Failure Assessment Diagram), koja uzima u obzir lokalnu plastifikaciju vrhova pukotine.



Slika 11. Određivanje zahtjeva žilavosti $K^*_{appl,d}$ [7]



Slika 12. Određivanje otpornosti žilavosti $K_{mat}(T_{Ed})$ [7]

3.2. Otpornost žilavosti

Otpornost žilavosti $K_{mat,d}(T_{Ed})$ izračunava se iz određene udarne energije KV izražene pomoću temperatura T_{KV} za koje je dosegnuta minimalna vrijednost udarne energije KV (npr. T_{27J} za $KV=27J$) i iz minimalne temperature konstrukcijskog dijela T_{Ed} kao ulaznih vrijednosti (slika 12.).
 Primjenom Sanzove korelacije za povezivanje T_{27J} s faktorom intenziteta naprezanja K_{100} i Wallinove krivulje za određivanje K_{mat} iz K_{100} i $T_{min,d}$ može se dobiti $K_{mat}(T_{Ed})$. Postupak se svodi na uvođenje dodatnog elementa sigurnosti ΔT_R kojim se $T_{min,d}$ pomiče kako bi se postigla dostatna pouzdanost za dokaz.

3.3. Metoda za procjenu sigurnosti

Procjena sigurnosti kao što je opisano, vidi izraz (1), transformira se u vrijednosti temperature i time dobiva oblik prikazan s izrazom (3) (slika 13.):

$$T_{Ed} \geq T_{Rd} \tag{3}$$

gdje je T_{Rd} temperatura pri kojoj se razina sigurnosti žilavosti loma može povezati s procijenjenim uvjetima navedenim

u sklopu definicije otpornosti žilavosti (točka 3.3.), a T_{Ed} je referentna temperatura koja uključuje sve ulazne vrijednosti tako da ih uzima u obzir s promjenom (pomakom) temperature.

Ulazne vrijednosti su:

- najniža temperatura zraka, T_{min} (karta temperature za standardni povratni period od 50 godina),
- gubici zbog zračenja komponente (ΔT_r)
- utjecaj oblika i dimenzija elementa, nesavršenosti od pukotine, i naprezanja σ_{Ed} što rezultira sa (ΔT_s)
- dodatni element sigurnosti (ΔT_R)
- utjecaj stope prirasta deformacije (ΔT_ϵ);
- utjecaj hladnog oblikovanja ($\Delta T_{\epsilon cf}$).

Detalji proračuna prikazani su na slici 13. Strana otpornosti sadrži isključivo ispitnu vrijednost T_{27J} i temperaturni pomak od 18°C koji je uzrokovan Sanzovom korelacijom.

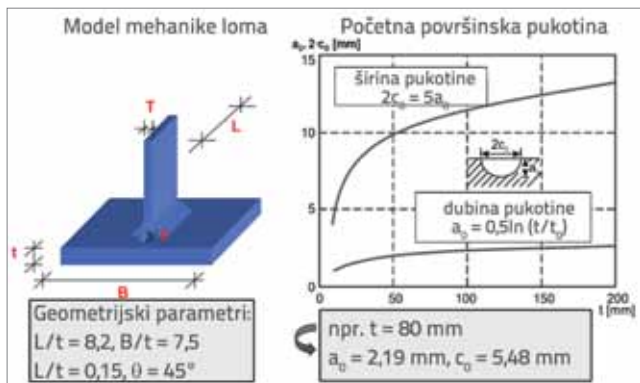
Dodatni element sigurnosti ΔT_R dobiven je iz kalibracije postupka za bazu podataka ispitivanja na velikim uzorcima, koja sadrži ispitivanja na različitim kvalitetama čelika, različitim zavarenim dodacima, uključujući lokalna zaostala naprezanja i pukotine a_d uzrokovane umjetnim početnim pukotinama koje se šire uslijed promjenjivog opterećenja.

$K_{appl,d} \leq K_{mat,d}$	→	transformacija	→	$T_{Ed} \geq T_{Rd}$
Postupak procjene				
$T_{Ed} \geq T_{Rd}$				
Djelovanje		Otpornost		
$T_{Ed} = T_{min} + \Delta T_r + \Delta T_\sigma + \Delta T_R + [\Delta T_\epsilon + \Delta T_{\epsilon cf}]$		$T_{Rd} = T_{100}$		
Najniža temperature zraka u kombinaciji s npr. $T_{min} = -25\text{ °C}$ Gubici zbog zračenja komponente, npr. $\Delta T_r = -5\text{ °C}$ Utjecaj naprezanja, nesavršenosti oblika pukotine i oblika i dimenzija elementa $\Delta T_\sigma = -52 \ln \left[\frac{\left(\frac{K_{appl,d}}{K_{R6} - \rho} - 20 \right) \left(\frac{b_{eff}}{25} \right)^{0,25} - 10}{70} \right] \text{ [°C]}$ Dodatni element sigurnosti, npr. $\Delta T_R = +7\text{ °C}$ za $\beta = 3,8$		Utjecaj žilavosti materijala $T_{100} = T_{27J} - 18 \text{ [°C]}$		
Može biti nadopunjeno s:				
Utjecajem prirasta deformacije $\Delta T_\epsilon = - \frac{1440 - f_y(t)}{550} \left(\ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{1,5} \text{ [°C]}$ sa $\dot{\epsilon} = 0,0001 \text{ s}^{-1}$ Utjecajem hladnog oblikovanja $+\Delta T_{\epsilon cf} = -3 \text{ DCF [°C]}$ gdje je DCF - stupanj hladnog oblikovanja (DCF - Degree of Cold Forming) [%]				

Slika 13. Postupak procjene sigurnosti koji se temelji na temperaturi $T_{Ed} \geq T_{Rd}$ [7]

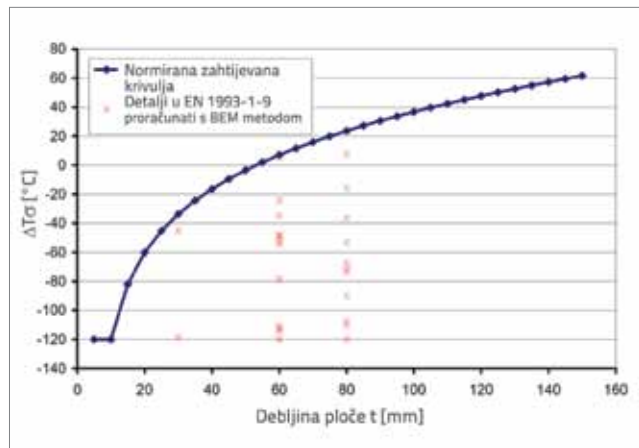
3.4. Standardizacija izbora materijala

Za pojednostavljeni postupak izbora materijala potrebne su tablice s dopuštenim debljinama lima konstrukcijskih elemenata s najčešćim konstrukcijskim detaljima ovisno o kvaliteti čelika, svojstvima žilavosti, referentnim temperaturama T_{Ed} i razinama naprezanja σ_{Ed} . U tu svrhu načinjene su, za različite konstrukcijske detalje, pretpostavke za početne površinske pukotine s dubinama a_0 (slika 14.) koje su izložene širenju u dubinu a_d primjenom referentnog promjenjivog opterećenja koje dovodi do loma od umora, a koje ovisi o kategoriji detalja $\Delta\sigma_c$ prema [8] i odgovara četvrtini potpunog oštećenja kod umora $D = 1$.



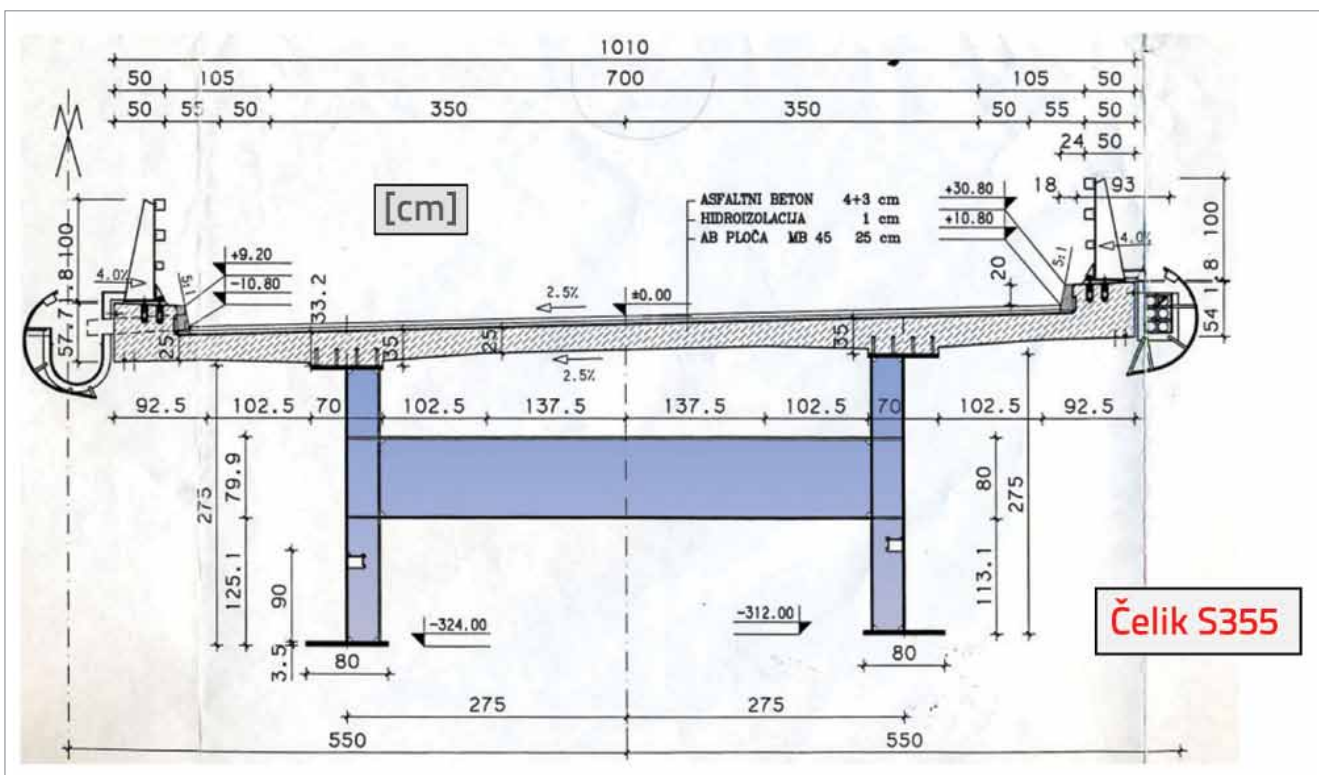
Slika 14. Pretpostavke za detalje i početne veličine površinskih pukotina

Na slici 15. prikazane su vrijednosti zahtjeva žilavosti izražene kao ΔT_e dobivene na ovaj način za različite kategorije detalja koje su navedene u EN 1993-1-9 [8] i anvelopne normirane zahtijevane krivulje dobivene od tih izračuna.



Slika 15. Anvelopna normirana zahtijevana krivulja žilavosti za detalje prema EN 1993-1-10

U EN 1993-1-10 [4] navedena je tablica (2.1.) za izbor materijala koja se temelji na anvelopnoj normiranoj zahtijevanoj krivulji. Tablica uz standardne kvalitete čelika obuhvaća i čelike visoke čvrstoće S460 i S690.



Slika 16. Poprečni presjek spregnutog mosta u sredini raspona (kontinuirani nosači) i dimenzije poprečnog presjeka čeličnog nosača u sredini raspona (Vijadukt Mirna, Istra, RH) [9]

4. Izbor čelika u praksi

4.1. Uobičajena primjena u mostogradnji

Za spregnuti cestovni most s poprečnim presjekom kao na slici 16. potrebno je izabrati čelik za donju pojasnicu nosača. Dimenzije čeličnog nosača također su prikazane na slici 16. Određivanje referentne temperature prikazano je u tablici 2.

Tablica 2. Određivanje referentne temperature

Učinak	Vrijednost
Najniža temperatura zraka, T_{min}	-15 °C
Gubici zbog zračenja komponente, ΔT_r	- 5 K
ΔT_s (detalj specificiran u EN 1993-1-9: poprečno ukrućenje zavareno za donju pojasnicu)	0 K
Dodatni element sigurnosti, ΔT_R	0 K
$\dot{\epsilon} = 0,005 \text{ s}^{-1}$, $\Delta T_{\dot{\epsilon}}$	-16 K*
Nema hladnog oblikovanja, ΔT_{edf}	0 K
T_{Ed}	-36 °C

* izračunano sa $f_y(t) = f_{y0} \cdot 0,25$; $t/t_0 = 355 \cdot 0,25 / 35 = 2,5$; $f_y(t) = 346 \text{ N/mm}^2$

$$\Delta T_{\dot{\epsilon}} = -\frac{1440 - f_y(t)}{550} \left(\ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{1,5} = -\frac{1440 - 346}{550} \left(\ln \frac{0,005}{0,0001} \right)^{1,5} = -15,4 \text{ K} \approx -16 \text{ K} \quad (5)$$

Za više informacija o ulaznim parametrima koji se koriste u izrazu (5) treba vidjeti u [10].

Relevantno naprezanje σ_{Ed} je izračunano sa $\Psi_1=0,7$ iz izvanredne kombinacije opterećenja ($\gamma=1,0$) i iznosi 209 N/mm². To vodi do razine naprezanja $\sigma_{Ed} = 209 / 346 f_y(t) = 0,60 f_y(t)$. Korištenje tablice 2.1. iz EN 1993-1-10 [3] daje minimalni zahtjev žilavosti $T_{277} = -20$ °C ili S355 J2, gdje je maksimalna dopuštena debljina (dobivena linearnom interpolacijom za $T_{Ed} = -40$ °C u ovisnosti o razini naprezanja):

$$t_{dopušteno}(0,60 f_y(t)) = 47 \text{ mm} > t_f = 35 \text{ mm} \quad (6)$$

S druge strane, čelik S355 J0 ($T_{277} = 0$ °C) ne zadovoljava jer je za takav čelik maksimalna dopuštena debljina $t_{dopušteno}(0,60 f_y(t)) = 32$ mm manja od debljine pojasnice $t_f = 35$ mm koja je potrebna iz uvjeta krajnjega graničnog stanja.

4.2. Druge mogućnosti primjene

4.2.1. Vjetroelektrane

Uobičajeno su elementi stupova vjetroelektrana (slika 17.) izrađeni od konstrukcijskog čelika i stoga se može primijeniti standardizirana procedura opisana u točki 4.1. Međutim, ono što treba imati na umu jest učinak stope prirasta deformacija.

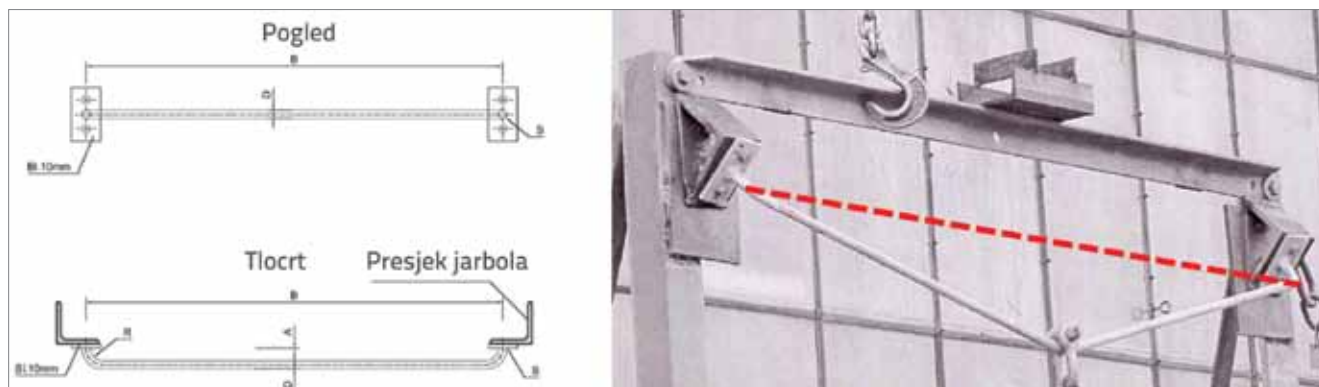
Prema [10], tijekom udara vjetra mogu se javiti značajne stope prirasta deformacije $\dot{\epsilon} = 0,0001$ do $0,1 \text{ s}^{-1}$. Međutim, u većini slučajeva može se izabrati dovoljno duktilna kvaliteta čelika i za elemente koji su kritični s aspekta krtoq loma (npr. spojna sredstva, dijelovi koji su ugrađeni u temelj i sl.). Stoga, često se odabiru sitnozrnate kvalitete čelika (npr. S355 NL ili ML) kako bi se osigurala dovoljna sigurnost protiv krtoq loma i u slučajevima gdje su vjetroelektrane izgrađene u hladnim klimatskim područjima. No, što učiniti s elementima koji nisu izrađeni od uobičajenog konstrukcijskog čelika, npr. centar rotora i osovina?

Obično su osovine izrađene od kovanog poboljšanog čelika 30CrNiMo8. U takvim slučajevima trebaju se provesti detaljna istraživanja koristeći osnovni format provjere, izraz (1). Glavni problem tih istraživanja bit će prikupljanje dostatnih podataka o materijalu posebice s obzirom na svojstva žilavosti i učinke brzine deformacije. Tehnički uvjeti isporuke, primjerice prema EN 10083 [11] ne daju zahtjeve žilavosti ili, ako ih daju, ti podaci nisu primjenjivi za istraživanja krtoq loma budući da se oni odnose na materijal koji se naknadno poboljšava. Uz to, mora se primijetiti da opterećenje na takve elemente može biti veliko, pogotovo ako se moraju uzeti u obzir učinci koncentracije naprezanja zbog promjene krutosti (npr. u području oko spoja između osovine i centra rotora).



Slika 17. Vjetroelektrana Trtar-Krtolin

Na kraju se mora uzeti u obzir da vjetroelektrane uobičajeno imaju različito trajanje opterećenja u odnosu na mostove. S jedne strane, visoki broj ciklusa opterećenja je u blizini trajne čvrstoće definirane postupkom proračuna na umor. No, s druge strane, broj tih ciklusa opterećenja je mnogo veći ($\times 10$ do $\times 100$) u odnosu na mostove, a neki od ciklusa opterećenja nisu u rasponu mnogo manjem od granice razvlačenja, što također nije tipično za mostove. Stoga se za proračun moraju usvojiti specijalne pretpostavke, dok se za izradu moraju postaviti specijalni zahtjevi. Ovo se mora kombinirati kako bi se osiguralo da su pretpostavljene veličine pukotina "sigurne" za proračun i za uporabu u proračunu mehanike loma. Pri procjeni krtoq loma "sigurno" znači da se početni nedostatak s definiranom



Slika 18. Primjer plastične deformacije zaustavnog uređaja nakon što je pad zaustavljen

početnom veličinom zasigurno može pronaći zahtijevanim provjerama kvalitete (npr. nerazornim ispitivanjem). A u "izvanrednom" slučaju kada se takav nedostatak ne pronađe, a krti lom može nastupiti pod učestalim opterećenjima, mora se osigurati da je vrijeme između dva pregleda ili životnog vijeka (optimalno) kraće od vremena koje je potrebno da se početna pukotina pod određenom trajanjem proširi do kritične veličine pukotine. Ispravni zahtjevi za izradu osovina mogu biti:

- zavarivanje nije dopušteno (također se ne dopušta reparaturno zavarivanje);
- učinci koncentracija naprezanja moraju biti minimizirani (npr. glatkom promjenom krutosti);
- nema hladnog oblikovanja;
- stopostotno nerazorno ispitivanje, s posebnim osvrtom na površinu (pukotine nisu dopuštene, druge neispravnosti moraju imati određenu udaljenost do podloge i hrapavost površine je ograničena).

Na temelju takvih zahtjeva mora se pretpostaviti "izvanredna" početna veličina pukotine i proračuni širenja pukotine se moraju provesti kako bi se doznalo ima li dovoljno vremena za nalaženje pukotine prije nego što ona postane kritična. Ako ima dovoljno vremena, proračun mehanike loma pokazati će da je raspoloživa žilavost veća od zahtjeva žilavosti uslijed pukotine, učestalog opterećenja i zbog razmatranja učinaka brzine deformacije.

Ovisno o graničnom uvjetu, istraživanje krtog loma na ovakvim elementima (komponentama) često vodi do zahtjeva lomne žilavosti od $K_{mat} = 45 - 100 \text{ MPa}\sqrt{m}$ koji se može ispuniti kovanim poboljšanim čelikom 30CrNiMo8. Međutim, izračunani zahtjev treba biti dogovoren ugovorom, jer većina dostupnih tehničkih uvjeta isporuke ne sadrži takav zahtjev.

4.2.2. Zaustavni uređaji radnih platformi

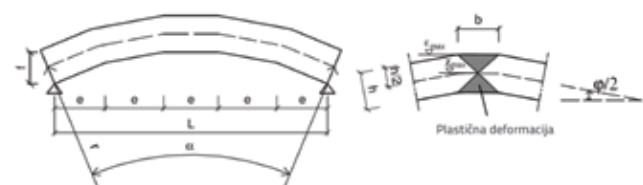
Na nekim čeličnim konstrukcijama potrebne su radne platforme s visokom razinom pouzdanosti. Ako se tračnice ne mogu ugraditi, koriste se zaustavni uređaji kao zaštita radnika od pada. U slučaju da radnik koji je pričvršćen na takve uređaje padne, njegov će pad zaustaviti ti uređaji. Također, ako

se koriste prigušivači energije za ublažavanje pada, trajanje opterećenja zaustavnog uređaja često će imati stope prirasta deformacije $\dot{\epsilon} = 0,0007 \text{ s}^{-1}$. Zbog toga se učinci stope prirasta deformacije moraju uzeti u obzir pri istraživanju krtog loma ovih elemenata. Do sada je istraženo samo nekoliko tipova zaustavnih uređaja kako bi se saznala njihova specifična maksimalna stopa prirasta deformacije. Međutim, dobivene su stope prirasta deformacija do $\epsilon = 10 \text{ s}^{-1}$. Mora se napomenuti da se tih nekoliko rezultata ne može primijeniti na druge vrste zaustavnih uređaja jer imaju različito trajanje i ponašanje opterećenja u odnosu na deformaciju.

Osim toga, neki tipovi zaustavnih uređaja pokazuju veliku plastičnu deformaciju nakon što je pad zaustavljen, slika 18. Te se plastične deformacije moraju uzeti u obzir čak i ako su proračuni krtog loma provedeni za te zaustavne uređaje. Prema [10], razina hladnog oblikovanja se može izračunati primjenom izraza:

$$\epsilon_{cf} = \epsilon_{\max} = \frac{16f}{L(n+1)} \times \frac{h}{b} \times 100 \quad (7)$$

uz oznake f, L, h, b i n prema slici 19.



Slika 19. Definicije oznaka iz izraza (7)

Za uobičajene dimenzije tipa zaustavnog uređaja koji je prikazan na slici 18, izraz (7) vodi do razine hladnog oblikovanja od 30 % do 35 %. Ako se primjene izrazi (2.3) i (2.4) iz EN 1993-1-10 [3] oba učinka (stope prirasta deformacije i hladnog oblikovanja) vode do promjene (pomaka) prijelazne temperature prema temperaturi od $\Delta T_{\epsilon} \approx -75\text{K}$ i $\Delta T_{\epsilon_{cf}} \approx -105\text{K}$. S obzirom na ove rezultate, očito je:

- da se preporučuju istraživanja krtog loma za sve zaustavne uređaje, a ne samo za one koji se upotrebljavaju u hladnim klimatskim uvjetima,

- iako se uobičajeni konstrukcijski čelik mora koristiti, preporučuju se dodatna detaljna istraživanja kako bi se iznašle realnije pretpostavke za oba učinka od prije navedenih teorijski procijenjenih vrijednosti.

Za razmatrani tip zaustavnog uređaja provedena su ispitivanja, gdje se zabilježilo trajanje opterećenja tijekom prigušenja pada kao i konačna plastična deformacija. Dokazano je da su obje, i stopa prirasta deformacije ($\dot{\epsilon} > 4 \text{ s}^{-1}$) i plastična deformacija (ϵ_{ef} , 15 %), znatno niže od teorijski procijenjenih vrijednosti. Također je potrebno uzeti u obzir da oba učinka nemaju svoj maksimum u isto vrijeme (maksimalna stopa prirasta deformacije je na početku prigušivanja pada, a maksimalni stupanj hladnog oblikovanja je na kraju) i obično se ne događaju na istom mjestu elementa. Odnosno, gdje stopa prirasta deformacije i plastična deformacija imaju svoj maksimum, nema drugih negativnih učinaka s aspekta krtoeg loma, primjerice varova, promjene krutosti, itd. Stoga, takvi tipovi se zaustavnih uređaja u pravilu mogu izraditi od čelika S355 J2.

5. Zaključak

Europska praksa za ispravan izbor čelika temelji se na odredbama norme EN 1993-1-1 koja definira zahtjeve za mehanička svojstva materijala - duktilnost, svojstva žilavosti i svojstva kroz debljinu. Nova europska jedinstvena tehnička pravila za projektiranje čeličnih konstrukcija (Eurokod 3) nude u jednom svom dijelu (EN 1993-1-10) metodu za izbor čelika da se izbjegne krto loma. Taj koncept se temelji na procjeni sigurnosti pomoću mehanike loma, a dostupan je za različite elemente izrađene od konstrukcijskog čelika. Uobičajeno se metoda primjenjuje za elemente izložene dinamičkom opterećenju koje dovodi do umora, ali je također primjenjiva za elemente pod kvazistatičkim opterećenjem. Kao što je prikazano u ovom radu, metoda se može primjenjivati i u slučajevima sa specifičnim zahtjevima žilavosti zbog visoke stope prirasta deformacije i/ili visokih učinaka hladne deformacije. Jednako tako primjenjiva je i na druge metalne materijale.

LITERATURA

- [1] European Committee for Standardization (CEN): EN 1993-1-1. *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*, Brussels, Belgium, 2005.
- [2] European Committee for Standardization (CEN): EN 1990. *Eurocode - Basis of structural design*, Brussels, Belgium, 2002.
- [3] Schäfer, D.; Eichler, B.; Amlung, L.; Vayas, I.; Karlos, V.; Spiliopoulos, A.; Lippe, M.; Kubon, Z.; Kander, L.: *EUR 24227: Modern plastic design for steel structures*, Research Fund for Coal and Steel series, Luxembourg, 2010.
- [4] European Committee for Standardization (CEN): EN 1993-1-10. *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-10: Material toughness and through thickness properties*, Brussels, Belgium, 2005.
- [5] European Committee for Standardization (CEN): EN 10025: *Hot rolled products of structural steels*, Brussels, Belgium, 2004.
- [6] Hechler, O.; Axmann, G.; Donnay, B.: *The right choice of steel - according to the Eurocode*, Symposium proceedings: Use of steel materials in buildings & construction, Hong Kong, China, 2009, pp. 01-22.
- [7] Sedlacek, G.; Feldmann, M.; Kühn, B.; Tschickardt, D.; Höhler, S.; Müller, C.; Hensen, W.; Stranghöner, N.; Dahl, W.; Langenberg, P.; Münstermann, S.; Brozetti, J.; Raoul, J.; Pope, R.; Bijlaard, F.: *COMMENTARY AND WORKED EXAMPLES TO EN 1993-1-10 'Material toughness and through thickness properties' and other toughness oriented rules in EN 1993*. JRC Scientific and Technical Reports, Italy, 2008.
- [8] European Committee for Standardization (CEN): EN 1993-1-9: *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-9: Fatigue*, Brussels, Belgium, 2005.
- [9] Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, Zavod za konstrukcije: *Vijadukt Mirna - glavni projekt, knjiga 2 - dio 1: Statički proračun gornji ustroj*, Zagreb, veljača 1999.
- [10] Kühn, B.: *Beitrag zur Vereinheitlichung der europäischen Regelungen zur Vermeidung von Sprödbruch*, Dissertation am Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, 2005.
- [11] European Committee for Standardization (CEN): EN 10083: *Steels for quenching and tempering - Part 1: General technical delivery conditions*, Brussels, Belgium, 2006.
- [12] Höhler, S., Kühn, B., Sedlacek, G.: *Brittle fracture mechanical concept for welded connections in steel structures*, Proc. of the 10th Nordic Steel Conference, Copenhagen (Denmark), 7-9 June 2004, pp 65-76.