

# VPLIV VISOKOTEMPERATURNEGA LEZENJA JEKLA NA POŽARNO ODPORNOST VIJAČENIH JEKLENIH KONSTRUKCIJSKIH SISTEMOV

## INFLUENCE OF HIGH TEMPERATURE CREEP ON FIRE RESISTANCE OF BOLTED STEEL STRUCTURAL SYSTEMS

asist. dr. Peter Češarek, univ. dipl. inž. grad.

peter.cesarek@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo

in geodezijo, Katedra za mehaniko,

Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 614.84:624.014.2

**Povzetek** | Prispevek prikazuje rezultate kompleksnih računskih analiz vpliva visokotemperaturnega lezenja jekla na mehanski odziv vijačenih jeklenih konstrukcijskih sistemov v požaru in obenem primerja dva pristopa k modeliranju lezenja jekla v numerični analizi: (i) enostavnejši pristop, pri katerem deformacije lezenja implicitno vključimo v model plastičnosti (takšen je npr. tudi pristop, ki ga predlaga SIST EN 1993-1-2, 2004), in (ii) točnejši pristop, pri katerem so deformacije lezenja obravnavane ločeno oz. eksplicitno. Pri vsakodnevnih inženirskih aplikacijah se najpogosteje uporablja prvi pristop, zelo problematično pri tem pa je opažanje, da se pri tem pogosto pozablja na meje njegove veljavnosti. Doslej je bila kritičnost posledične napake izračuna raziskana na primerih analiz posameznih elementov konstrukcij (nosilcev, stebrov), ta prispevek pa to predstavi tudi na primerih konstrukcijskih sestavov z vijačenimi spoji. Pri teh je, kot pokaže članek, vpliv lezenja najbolj izrazit v območjih stikov. Rezultati pokažejo, da so časi porušitev, ocenjeni z implicitnim modelom lezenja, znatno daljši od kritičnih časov, ki jih predvideva eksplicitni model, če implicitni model napačno apliciramo zunaj meja njegove veljavnosti. Še bolj skrb zbujajoča pa je ugotovitev, da se takšna razlika za eno od obravnavanih vrst jekel pokaže tudi pri analizah, ko ostanemo v okviru omejitev poenostavljenega modela.

Ključne besede: jeklene konstrukcije, požar, lezenje, vijačeni spoji, ovirane deformacije

**Summary** | The article presents computational results of the influence of high temperature creep on the mechanical response of bolted steel structural systems during fire and simultaneously compares two approaches to modelling creep of steel in a numerical analysis: (i) the simpler approach where creep strains are integrated implicitly in the plasticity model (such as, for example, the approach proposed by EN 1993-1-2, 2004) and (ii) the more consistent approach where creep strains are considered separately, i.e. explicitly. In everyday engineering applications, the first approach is most often applied, however it is alarming to observe that the limits of its validity are thereby often overlooked. So far, the severity of the consequential error of the results of such applications has been investigated for individual structural members (e.g. beams, columns). This paper, however, presents such comparison for bolted structural assemblies. With these, as the paper reveals, the influence of creep is most pronounced in the between-member connections. The results show that the times of structural failure predicted by the implicit-creep plasticity model are significantly longer than failure times predicted by the explicit creep model, if

the implicit model is applied outside the limits of its applicability. Even more disturbing, however, is the finding that for one of the explored steels such differences are found also within these limits.

Key words: steel structures, fire, creep, fin plate connections, restrained beams

## 1 • UVOD

V mehaniki konstrukcij lezenje jekla razumemo kot časovno naraščajočo nepovratno deformacijo pri konstantni napetosti. Povzročajo jo premiki dislokacij v materialu, ki se z naraščanjem temperature jekla povečujejo (Kodur, 2010). Po prepričanju raziskovalcev ima ta pojav zato ključen vpliv na mehanski odziv jeklenih konstrukcij pri požaru (Anderberg, 1988). Za pravilen matematični opis lezenja je zato v računski analizi takšnih konstrukcij treba razlikovati med tremi tipi deformacij: (i) temperaturne deformacije (raztezki), (ii) čiste (časovno neodvisne) mehanske deformacije in (iii) časovno odvisne deformacije lezenja. V točnem računskem postopku obravnavamo deformacije lezenja eksplicitno (tj. ločeno od mehanskih) z enim od predlaganih modelov lezenja, npr. (Williams-Leir, 1983). Pri poenostavljenih računskih modelih, ki so namenjeni

predvsem hitrim ocenam za vsakdanjo inženirsko uporabo (kot predlaga SIST EN 1993-1-2 (SIST, 2004)), pa je deformacija lezenja implicitno vključena v zvezo med mehanskimi deformacijami in napetostmi (časovno neodvisni model z »implicitnim« lezenjem). Taki modeli so lahko dovolj natančni v nekaterih primerih, v drugih (kot je na to opozarjal že Anderberg (Anderberg, 1988), danes pa se mu pridružujejo tudi številni drugi raziskovalci (npr. (Kodur, 2010), (Li, 2012)), pa so lahko preveč približni, saj ne upoštevajo zgodovine razvoja temperatur v konstrukciji kot tudi ne zgodovine napetosti v jeklu, zato z njimi zagotovo ne moremo opisati prav vsakega od možnih konstrukcijskih primerov, ki bi se lahko zgodili pri realnem požaru. Dolej so raziskovalci v svetovni znanstveni literaturi predstavili nekaj rezultatov primerjav med

rezultati obeh računskih pristopov, vse pa so bile narejene samo za posamezne konstrukcijske elemente. Ta prispevek k temu dodaja še primerjavo tovrstnih rezultatov, do katerih smo prišli pri analizah večjih konstrukcijskih sestavov z vijačenimi stiki. Takšne primerjave so vsekakor zelo pomembne, saj poleg vpliva lezenja na posameznih elementih sestava upoštevajo tudi pomemben vpliv lezenja na spojih elementov.

Glavni namen tega prispevka je prikaz vpliva visokotemperaturnega lezenja jekla na mehanski odziv vijačenih jeklenih konstrukcijskih sistemov pri požaru. Sočasno je namen tudi primerjava dveh pristopov k modeliranju lezenja jekla v numerični analizi (model, kjer je lezenje upoštevano implicitno, in model, kjer je lezenje obravnavano eksplicitno). Preiskava je opravljena s pomočjo parametrične študije (razdelek 2.4), in sicer na primeru konstrukcijskega sklopa, sestavljenega iz primarnega in sekundarnega nosilca, ki sta povezana z vijačnim stikom prek vezne pločevine.

analizi pa smo s podprogramom UMAT (Abaqus, 2016) vgradili lasten algoritem.

### 2.1. Toplotna analiza

Prva stopnja računskega postopka je toplotna analiza, ki jo opravimo kot standardno Fourierovo analizo prevajanja toplote preko trdnega telesa. Toplotne lastnosti jekla in njihovo temperaturno odvisnost pri tem povzamemo po standardu SIST EN 1993-1-2 (SIST, 2004).

### 2.2. Mehanska analiza

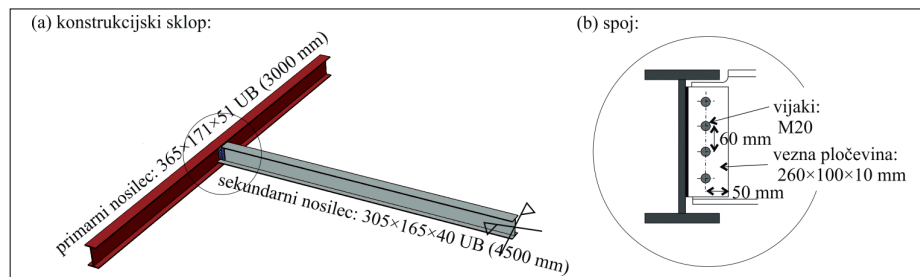
V drugem, mehanskem delu analize poleg zunanje mehanske obtežbe upoštevamo še toplotne vplive v obliki časovno odvisnih temperatur vozlišč mreže končnih elementov. Te v model uvozimo iz rezultatov predhodne toplotne analize, uporabimo pa jih za izračun temperaturnih deformacij in temperaturno odvisnih mehanskih lastnosti jekla. Zlasti pomembno v tej fazi analize je modeliranje kontaktov veznih pločevin z vijaki. Prav tako je pomembno modeliranje kontaktov med preostalimi deli konstrukcije, ki v začetku analize sicer niso v stiku, zaradi velikih deformacij in pomikov pa med analizo lahko preidejo v kontakt.

## 2 • NUMERIČNI MODEL

Konstrukcijski sestav, ki ga obravnavamo v tem prispevku (slika 1), je zelo podoben delu konstrukcije, ki je bila testirana v znanem in odmevnem požarnem preskusu realne jeklene stavbe v Cardingtonu v sredini devetdesetih let prejšnjega stoletja (opisano npr. v (Wald, 2006)). Za raziskavo je to bistvenega pomena, saj so dobro dokumentirani rezultati tega testiranja lahko služili za validacijo dvo-stopenjskega numeričnega modela, ki smo ga uporabili za računski opis sestava. Model

opišemo v nadaljevanju. Rezultate in sklepe, ki jih bomo pridobili z modelom izbranega sestava, lahko posplošimo tudi na druge konstrukcijske sklope s podobnimi geometrijskimi in materialnimi karakteristikami.

Model konstrukcije smo zasnovali v orodju Abaqus (Abaqus, 2016). Pri tem smo za diskretizacijo po metodi končnih elementov uporabili vgrajena orodja. Prav tako smo vgrajena orodja uporabili pri toplotni analizi. Za opis materialnih modelov pri mehanski



Slika 1 • Obravnavani konstrukcijski sklop.

### 2.2.1. Materialni model jekla

Temelj materialnega modela jekla je dobro znan princip aditivnega razcepa deformacij. Skladno z osnovno idejo tega principa celoten (geometrijski) tenzor deformacij pri točnih računskih modelih najprej zapišemo kot vsoto (i) temperaturne deformacije  $\epsilon_{th}$ , (ii) mehanske deformacije  $\epsilon_{\sigma}$  (slednjo dalje zapišemo še kot vsoto reverzibilne elastične deformacije  $\epsilon_{\sigma,e}$  in nepovratne plastične deformacije  $\epsilon_{\sigma,p}$ ) in (iii) nepovratne deformacije lezenja  $\epsilon_{cr}$ :

$$\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\epsilon}_{th} + \boldsymbol{\epsilon}_{\sigma,e} + \boldsymbol{\epsilon}_{\sigma,p} + \boldsymbol{\epsilon}_{cr} \quad (1)$$

Pri poenostavljenih materialnih modelih (eden od pogosto uporabljenih je opisan v SIST EN 1993-1-2 (SIST, 2004)) je zgornji zapis nasprotno poenostavljen, saj je deformacija lezenja implicitno vključena v plastični del mehanske deformacije, razcep totalne deformacije pa je zato enak:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\epsilon}_{th} + \boldsymbol{\epsilon}_{\sigma,e} + \boldsymbol{\epsilon}_{\sigma,imp-cr,p} \quad (2)$$

#### Temperaturne deformacije

Sprememba temperature povzroča v materialnem delcu konstrukcijskega sestava deformacije samo v normalnih smereh. Te v modelu izračunamo v odvisnosti od temperaturno odvisnega razteznostnega koeficienta, in sicer kot predlaga standard SIST EN 1993-1-2 (SIST, 2004).

#### Mehanske deformacije

Za izračun mehanskih deformacij v postopek vpeljemo klasični von Misesov materialni model plastičnega tečenja (ta kriterij tečenja definira z ekvivalentno von Misesovo napetostjo) in izotropni evolucijski zakon utrjevanja, ki poveže plastične deformacije in napetosti. Za potrebe definicije modelov utrjevanja, ki jih vgrajujemo v točnejše računske postopke požarnega odziva jeklenih konstrukcij, se v laboratorijih pri tem običajno naredijo enoosni natezni preizkusi jekla pri različnih (konstantnih) temperaturah in pri hitrosti naraščanja napetosti (deformacij), ki je dovolj velika, da je vpliv lezenja zanemarljiv (npr. (Poh, 1995)). Dodatno se nato posebej določijo še modeli lezenja z eksperimenti zasnovanimi za merjenje lezenja (npr. (Cowan, 2014)). Za potrebe definicije poenostavljenih modelov utrjevanja, ki implicitno vključujejo tudi vpliv lezenja, pa se običajno opravijo enoosni preizkusi jekla pri spremenljivi napetosti in /ali temperaturi, katerih rezultati so zato veljavni samo v omejenem območju hitrosti naraščanja temperatur/napetosti.

Za potrebe raziskave, opisane v tem prispevku, sta bila preko podprograma UMAT (Abaqus, 2016) v model vgrajena dva materialna modela utrjevanja:

- Model utrjevanja z implicitno vključenim lezenjem, kot ga predlaga SIST EN 1993-1-2 (slika 2b), ki ga označimo z oznako EC3 (veljavnost modela: za hitrosti naraščanja temperature 2 K/min–50 K/min).

- Materialni model jekla pri povišanih temperaturah, kot ga predlaga Poh (Poh, 2014) (slika 2a), pri čemer upoštevamo, da je ta model izpeljan na osnovi enoosnih preizkusov pri visokih hitrostih naraščanja napetosti (vpliv lezenja izločen), zato moramo ločeno vgraditi še model deformacij lezenja. V tem prispevku uporabimo model (Williams-Leir, 1983), v katerem je deformacija lezenja definirana kot:

$$\dot{\epsilon}_{cr} = b_1 \coth^2(b_2 \bar{\epsilon}_{cr}) \quad (3)$$

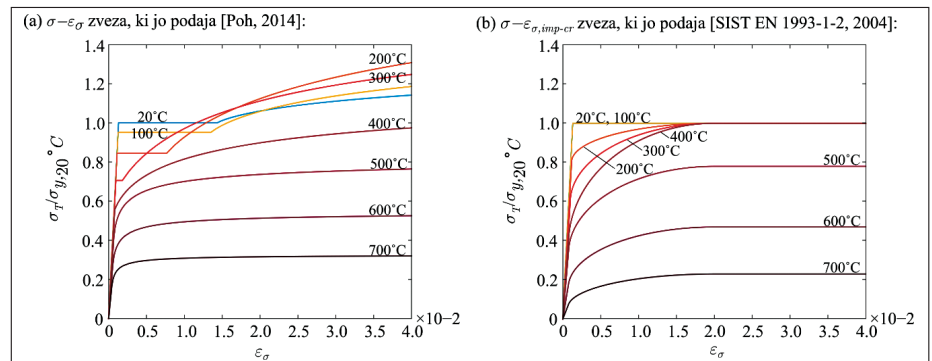
Tu je  $\epsilon_{cr}$  ekvivalentna deformacija lezenja,  $b_1$  in  $b_2$  pa sta konstanti, odvisni od lastnosti in nivoja napetosti jekla. Izrazi za njihov izračun oz. za izračun pripadajočih koeficientov lahko za različne vrste jekel najdemo v referenci (Williams-Leir, 1983).

Materialni model, razvit s pomočjo predlogov del (Poh, 2014) in (Williams-Leir, 1983), v tem prispevku označimo z oznako »Poh-WL-model«.

z modelom Poh-WL z »eksplicitno« upoštevanimi deformacijami lezenja in (ii) postopek z modelom EC3, kjer so deformacije lezenja zajete »implicitno« v evolucijskem zakonu mehanskih deformacij.

Obtežbi primarnega in sekundarnega nosilca v študiji izberemo tako, da je faktor izkoriščenosti nosilnosti konstrukcijskega sklopa pri sobni temperaturi enak 25 % (glede na elastično nosilnost sklopa) oziroma 15 % (glede na njegovo plastično nosilnost). Vsi elementi konstrukcije naj bodo pri tem iz jekla S275. V modelu lezenja bomo upoštevali materialne parametre tistih treh vrst jekel iz množice tistih, ki jih obravnava referenca (Williams-Leir, 1983), ki so po navedbah reference (Luecke, 2005) podobna konstrukcijskemu jeklu z evropsko oznako S275 (to so jekla z oznakami SS41, A135 in A149). Nadalje izberemo tudi dva režima segrevanja konstrukcije, ki ustrezata naravnim požarom (slika v preglednici 1).

Skladno z režimom segrevanja I predpostavimo, da se konstrukcija hitro segreje do 550 °C (krivulja segrevanja je do te temperature podobna tisti, ki je bila izmerjena na nosilcu v



Slika 2 • Konstitucijske zveze, uporabljene v materialnih modelih ( $\sigma_T$  in  $\epsilon_{\sigma}$  sta napetost in mehanska deformacija, izmerjena pri standardnem enoosnem preizkusu pri visokih temperaturah,  $\sigma_{y,20^{\circ}C}$  pa je napetost na meji tečenja pri sobni temperaturi).

### 2.3. Verifikacija in validacija

Kot smo že omenili, je bil predstavljeni numerični model konstrukcijskega sklopa validiran s pomočjo rezultatov eksperimenta v Cardingtonu (Wald, 2006). Zanimirani bralci lahko del rezultatov validacije poiščejo v delu (Kolšek, 2015).

### 2.4. Parametrične študije

V parametrični študiji, ki jo opisuje to poglavje, bomo primerjali rezultate računskih postopkov za izračun požarnega odziva izbranega jeklenega konstrukcijskega sklopa z dvema različnima materialnima modeloma jekla, ki smo ju predstavili zgoraj, in sicer (i) postopek

eksperimentu v Cardingtonu (Wald, 2006)), pozneje pa sledi le še počasnejše segrevanje s konstantno stopnjo 2 K/min. Slednja ustreza spodnji meji oz. najnižji stopnji segrevanja, pri kateri je model EC3 še veljaven (SIST EN 1993-1-2, 2004). Režim segrevanja II je podoben, le da je segrevanje v drugem delu počasnejše, in sicer hitrosti < 2 K/min (izberemo 0,9 K/min). Analize pri takšnem režimu segrevanja bodo zato raziskale možne posledice uporabe poenostavljenih računskih postopkov z »implicitno« (posredno) upoštevanimi vplivi lezenja (kakršen je model EC3) za primere, ko te zmožno apliciramo zunaj njihovega predpisanega območja njihove veljavnosti.

Materialne karakteristike in režimi segrevanja opravljenih analiz so povzeti v preglednici 1.

sliki 3a. V nadaljevanju, ko postane tlačna sila v območju opazovanega kontakta dovolj

strukcije se začnejo razvijati območja, ki so polno plastificirana (kumulativna plastična deformacija in deformacija lezenja dosežeta v teh območjih mejno vrednost, po kateri se jeklo začne mehčati), in sicer okrog uklonjenih delov nosilca in okrog lukenj za vijake, kar je posledica koncentriranih napetosti v tem območju. Ta območja se s časom širijo in postopno združijo, pri čemer v območju spoja nastane plastični členek (slika 3e). Momentni spoj primarnega in sekundarnega nosilca postane s tem členkast, ta preobrazba pa je jasno vidna tudi iz poteka osne sile v nosilcu, ki pade na 0 (točka C5 na sliki 3a). Ta dogodek že pomeni tudi porušitev nosilca, saj nastanek plastičnega členka sproži hitro naraščanje vertikalnih pomikov nosilca, ki kmalu postane hitrejša od stopnje, ki je v standardnih požarnih preizkusih določena kot mejna (EN, 2012) (t.j.  $\frac{dD}{dt} = \frac{L^2}{9000d}$  mm/min, kjer je  $L$  razpon nosilca,  $d$  pa največja razdalja med vlakni nosilca v nategu in tlaku pri dimenzioniranju pri sobni temperaturi). Pri nadaljnjem hitrem povešanju nosilca se v območju stika razvijejo velike natezne sile, ki neizbežno povzročijo porušitev nosilca v območju vijlačnih lukenj (slika 3f).

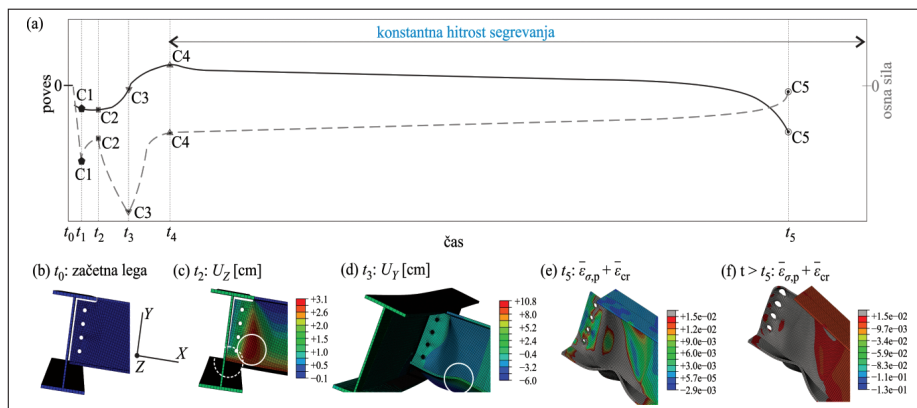
Analiza	Režim segrevanja	Materialni model	Karakteristike modela lezenja	Režimi segrevanja
I-EC3	I	EC3	/	
I-PWL-A135	I	Poh-WL	Jeklo A135	
I-PWL-A149	I	Poh-WL	Jeklo A149	
I-PWL-SS41	I	Poh-WL	Jeklo SS41	
II-EC3	II	EC3	/	
II-PWL-A135	II	Poh-WL	Jeklo A135	
II-PWL-A149	II	Poh-WL	Jeklo A149	
II-PWL-SS41	II	Poh-WL	Jeklo SS41	

Preglednica 1 • Parametrične študije.

### 2.4.1. Mehanski odziv in čas porušitve

Mehanski odziv obravnavanega konstrukcijskega sestava opredeljuje nekaj značilnosti, ki so skupne vsem obravnavanim modelom (slika 3). Že kmalu po začetku požara se v sekundarnem nosilcu razvijejo osne sile, ki so posledica raztezanja nosilca, ki je ovirano z vijaki na spoju. Posledica je uklon stojine nosilca v bližini vijakov, ki jo označuje točka C1 na sliki 3a ter prikazuje slika 3c (območje, označeno s polnim krogom). Raztezki nosilca zunaj območja vijakov so omogočeni, kar pri nadaljnjem segrevanju nosilca kmalu privede do drugega karakterističnega dogodka (dogodek C2 na sliki 3a), ko pride do kontakta spodnje pasnice sekundarnega nosilca in stojine primarnega nosilca (črtkan krog na sliki 3c). Tlačne napetosti, ki se razvijejo v sekundarnem nosilcu kot posledica segrevanja konstrukcije po vzpostavitvi tega kontakta in nadaljnje težnje po raztezanju, s časom zmanjšujejo natezne napetosti v spodnjem delu nosilca, ki so posledica njegove zunanje mehanske obtežbe, in jih postopoma tudi presežejo. Posledično se začne sekundarni nosilec dvigovati, kar nakazujejo zmanjšani vertikalni pomiki na

velika, pride še do uklona spodnje pasnice sekundarnega nosilca (slika 3d), hkrati pa tudi do zmanjšanja predhodno hitrorastoče osne sile v nosilcu (točka C3 na sliki 3a). S povečevanjem uklona pasnice se dvigovanje nosilca upočasni in postopno ponovno preide v povešanje (točka C4 na sliki 3a). Pri nadaljnjem naraščanju deformacij kon-



Slika 3 • Značilen odziv obravnavanega konstrukcijskega sklopa: (a) vertikalni pomiki in osna sila v sredini sekundarnega nosilca v odvisnosti od časa, (b) začetna lega primarnega in sekundarnega nosilca v spoju, (c) izbočenje stojine sekundarnega nosilca in vzpostavitev kontakta med primarnim in sekundarnim nosilcem, (d) uklon spodnje pasnice sekundarnega nosilca, (e) akumulacija plastičnih deformacij in formiranje plastičnega členka, (f) porušitev stojine nosilca v območju vijčanega spoja.

## 3 • REZULTATI IN DISKUSIJA

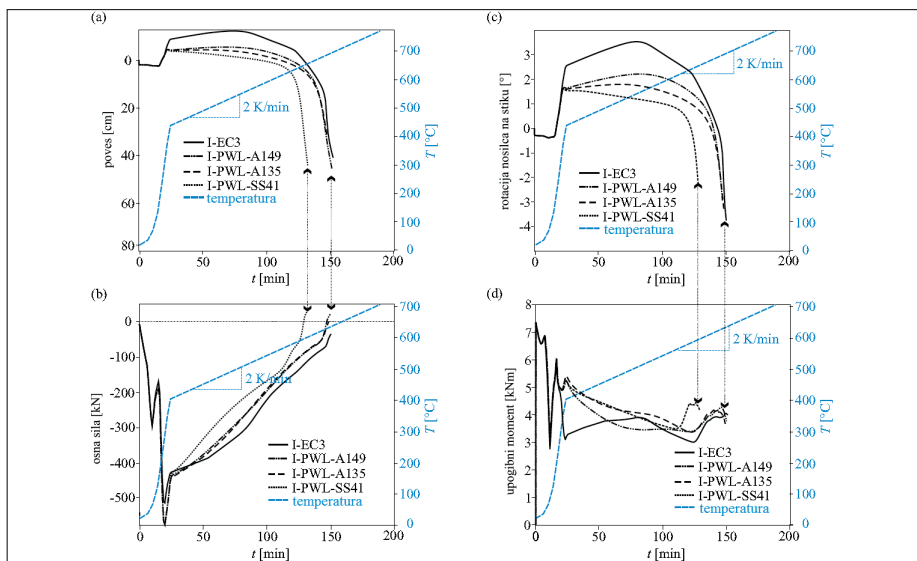
Rezultate parametrične študije (poves v sredini razpona sekundarnega nosilca, osna sila v nosilcu, rotacija nosilca na stiku in upogibni moment na stiku) prikazuje sliki 4 in 5. Časi porušitve, ki smo jih določili

za posamezno analizo, so prikazani v preglednici 2.

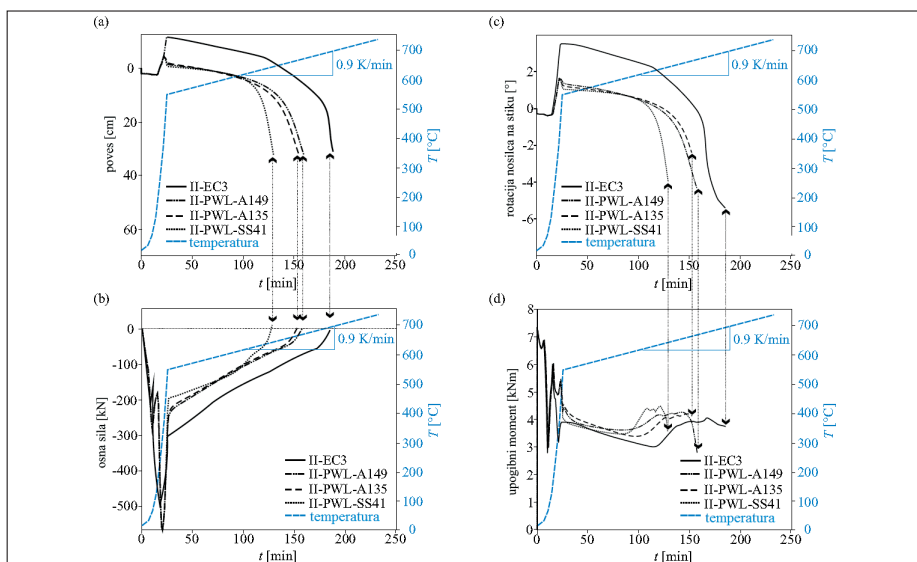
Iz rezultatov opazimo, da je pri časih, ko nosilec še ni izpostavljen počasnejši spremembi temperature (t.j. hitrosti 2 K/min oz. 0,9 K/

min), potek krivulj za vse analize zelo podoben, kar kaže na to, da se do teh temperatur večje deformacije lezenja še ne razvijejo. Te postanejo bolj izrazite v nadaljevanju analize, kjer je opazna tudi razlika v odzivu konstrukcije, če to obravnavamo z modelom EC3 ali modelom Poh-WL. Razlike so tudi v časih porušitve konstrukcije, res pa je, da so te pri analizah z režimom segrevanja I (2 K/min)





Slika 4 • Pomiki in notranje sile sekundarnega nosilca pri režimu segrevanja I: (a) poves v sredini razpona nosilca, (b) osna sila v nosilcu, (c) rotacija nosilca na stiku, (d) upogibni moment na stiku.



Slika 5 • Pomiki in notranje sile sekundarnega nosilca pri režimu segrevanja II: (a) poves v sredini razpona nosilca, (b) osna sila v nosilcu, (c) rotacija nosilca na stiku, (d) upogibni moment na stiku.

majhne; nekoliko večje odstopanje opazimo le pri jeklu SS41. Zaključimo lahko, da je uporaba implicitnega modela lezenja EC3 znotraj meja njegove veljavnosti za obravnavani vijačeni in temu sorodne konstrukcijske sklope primerna, vendar pa lahko nastanejo tudi izjeme.

Pri analizah z režimom segrevanja II (0.9 K/min) opazimo bistveno večje razlike. Tukaj na znatno krajše čase porušitev, v primerjavi z modelom EC3, pokažejo vse tri analize z modelom Poh-WL, iz česar jasno zaključimo, da je uporaba implicitnega modela, kakršen je model EC3, zunaj meja njegove veljavnosti brez dvoma nesprejemljiva.

### 3.1. Rezultati pri večjih mehanskih obtežbah konstrukcije

Rezultati, prikazani doslej, predstavljajo torej rezultate analiz, pri katerih sta bili izbrani takšni mehanski obtežbi primarnega in sekundarnega nosilca, da je bil faktor izkoriščenosti nosilnosti konstrukcijskega sklopa pri sobni temperaturi enak 25 % (glede na njegovo elastično nosilnost) oziroma 15 % (glede na plastično nosilnost). Za potrebe te raziskave pa so bile študije ponovljene tudi pri višjih faktorjih izkoriščenosti. Za faktor izkoriščenosti konstrukcije 35 % (njegova elastična nosilnost) oz. 25 % (plastična nosilnost) so bili zaključki analiz zelo podobni oz. istosmiselni tistim, ki smo jih predstavili zgoraj. Za še večje faktorje izkoriščenosti pa so analize z implicitnim modelom lezenja (model EC3) v splošnem vodile do časov porušitev, ki so bili zelo podobni ali nekoliko krajši kot v primeru uporabe eksplicitnega Poh-WL-modela. Da bomo lahko natančneje opredelili, ali je slednje zgolj specifičnost analiziranega primera (izbrane geometrije konstrukcijskega sklopa, režima segrevanja itd.) izbranih materialov, uporabljenih materialnih modelov lezenja (tj. modelov lezenja za jekla tipov A135, A149 ali SS41) ali česa drugega, pa bodo potrebne nadaljnje študije.

Ime analize	Čas porušitve $t_{por}$ (min)	Temperatura pri času porušitve $T_{por}$ (°C)	Relativni čas porušitve $\frac{t_{por} - t_{por,EC3}}{t_{por,EC3}}$ (%)
I-PWL-A135	148	632	2.0
I-PWL-A149	147	629	2.6
I-PWL-SS41	128	596	15.2
I-EC3	151	638	/
II-PWL-A135	152	662	17.4
II-PWL-A149	157	668	14.7
II-PWL-SS41	127	640	31.0
II-EC3	184	692	/

Preglednica 2 • Časi porušitev in pripadajoče temperature pri opravljenih analizah.

## 4 • ZAKLJUČEK

Prispevek je analiziral vpliv visokotemperaturnega lezenja jekla na požarni odziv konstrukcijskega sklopa dveh nosilcev, povezanih z vijačenim strižno obremenjenim spojem. Študija je bila opravljena s pomočjo posebej pripravljenega numeričnega modela, pri čemer so bile predstavljene tudi razlike v odzivu konstrukcije pri »implicitno« in »eksplicitno« upoštevanih deformacijah lezenja. Pri tem smo v prvem primeru uporabili materialni zakon, ki ga predlaga SIST EN 1993-1-2 (SIST, 2004) (tak model smo poimenovali model EC3), v drugem pa konstitucijske zveze, ki jih predlaga Poh (Poh, 2014), in zveze za izračun deformacij lezenja skladno z modelom (Williams-Leir, 1983) (Poh-WL-model). Za analizo smo izbrali jeklo trdnost-

nega razreda S275, pri katerem smo glede na vir (Williams-Leir, 1983) upoštevali koeficiente lezenja za jekla tipa A135, A149 in SS41, ki so skladno z virom (Luecke, 2005) podobna konstrukcijskemu jeklu z evropsko oznako S275. Rezultati so pokazali, da so časi porušitev konstrukcije pri uporabi »implicitnih« modelov, kakršen je model EC3, v požarnih scenarijih s hitrostmi segrevanja, ki so pod dovoljeno spodnjo mejo uporabe modela, lahko tudi do 30 % previsoki v primerjavi s časi, ki jih določimo z uporabo točnega eksplicitnega modela (nevarna stran poenostavljenega modela!). Na spodnji meji uporabnosti modela EC3 pa smo za jekli A135 in A149 zaznali zanemarljive razlike v časih porušitve med primerjanimi izračuni, čas

porušitve pri jeklu SS41 pa je bil pri izračunu z modelom Poh-WL presenetljivo spet daljši od časa porušitve, določenega z modelom EC3, in sicer za kar 15 %. Iz slednjega zaključimo, da je uporaba implicitnega modela lezenja, kakršen je model EC3, znotraj meja njegove veljavnosti primerna, vendar pa lahko nastanejo tudi izjeme. Zunaj teh meja je uporaba poenostavljenih modelov povsem nesprejemljiva in lahko vodi do hudih projektantskih napak (precejšena nosilnost konstrukcije). Za zanesljivo obravnavanje jeklenih konstrukcij med požarom bo torej v prihodnosti takšne konstrukcije treba upoštevati s točnimi računskimi postopki, kjer bodo vplivi lezenja upoštevani eksplicitno. Da bo slednje sploh mogoče, pa bosta potrebna tudi pospešen razvoj eksperimentalno podprtih modelov lezenja različnih vrst konstrukcijskih jekel in njihova validacija tudi na konstrukcijah oz. konstrukcijskih sklopih v velikem merilu.

## 5 • ZAHVALA

Delo P. Češarka je podprto v raziskovalnem programu P2-0260, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS). Za podporo se avtor iskreno zahvaljuje.

## 6 • LITERATURA

- ABAQUS 2016 documentaton, DS-Simulia, Providence, R.I. AISC., 2016.
- Anderberg, Y., Modelling steel behaviour, *Fire Safety Journal*, 13, 17–26, 1988.
- Cowan, M, Khandelwal, K., Modeling of high temperature creep in ASTM A992 structural steels, *Engineering Structures*, 80, 426–434, 2014.
- EN1363-1, Fire Resistance Tests, Part 1: General Requirements. European Committee for standardization, 2012.
- Kodur, V. K. R., Dwaikat, M. M. S., Effect of high temperature creep on the fire response of restrained steel beams, *Materials and Structures*, 43, 1327–1341, 2010.
- Kolšek, J., Češarek, P. Performance-based fire modelling of intumescent painted steel structures and comparison to EC3, *Journal of Constructional Steel Research*, 104, 91–103, 2015.
- Li, G.-Q., Zhang, C. Creep effect on buckling of axially restrained steel columns in real fires, *Journal of Constructional Steel Research*, 71, 182–188, 2012.
- Luecke, W. E., McColsley, J. D., McCowan, C.N., Banovic, S. W., Fields, R. J., Foecke, T., Siewert, T. A., Gayle, F. W., NIST NCSTAR 1-3D: Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster: Mechanical Properties of Structural Steel, NIST National Institute of Standards and Tehnology, Tehnology Administration, U.S. Department of Commerce, U.S. Government Printing Office, 2005.
- Poh, K. W., Skarajew, M., Elevated temperature tensile testing of grade 300PLUSE hot rolled structural steel, Rep. No. BHPR/SM/R/007, BHP Research Melbourne Labs, Melbourne, Australia, 1995.
- Poh, K. W., Erratum for »Stress-strain-temperature relationship for structural steel«, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26, 388–389, 2014.
- SIST EN 1993-1-2: Evrokod 3: projektiranje jeklenih konstrukcij – 1-2- del: Splošna pravila – Požarnoodporno projektiranje, European Committee for Standardizaton, 2004.
- Wald, F., da Silva, L. S., Moore, D. B., Lennon, T., Chladna, M., Santiago, A., Beneš, M., Borges, L., Experimental behaviour of a steel structure under natural fire, *Fire Safety Journal*, 41, 509–522, 2006.
- Williams-Leir, G., Creep of structural steel in fire: Analytical expressions, *Fire and Materials*, 7, 73–78, 1983.