Jerneja KOLŠEK*, Peter ČEŠAREK**, Miha Kramar***

VPLIV IZBIRE MODELA VISOKOTEMPERATURNEGA LEZENJA JEKLA NA IZRAČUN POŽARNE ODPORNOSTI JEKLENIH KONSTRUKCIJ

Povzetek

Prispevek primerja dva pristopa k modeliranju lezenja jekla v numerični analizi mehanskega odziva jeklene konstrukcije med požarom; enostavnejši pristop, pri katerem so deformacije lezenja implicitno vključene v modelu plastičnosti, in točnejši pristop, pri katerem deformacije lezenja obravnavamo ločeno oz. eksplicitno. Pri običajnih inženirskih aplikacijah se najpogosteje uporablja prvi pristop, vendar pa se pri tem pogosto pozablja na meje njegove veljavnosti. Resnost napake, ki se lahko zgodi kot posledica, je bila v literaturi doslej prikazana le na primerih analiz posameznih elementov konstrukcij. Ta prispevek pa to predstavi tudi na primerih konstrukcijskih sestavov, kjer je 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 uporabljamo zunaj meja veljavnosti. Presenetljivo 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

The influence of the choice of the high temperature creep model of steel on the calculation of the fire resistance of steel structures

Summary

The article compares two approaches to modeling the creep of steel in the numerical analysis of the mechanical response of the steel structure during the fire; the simpler approach where creep strains are considered implicitly in the plasticity model and the more complex approach where creep strains are considered separately – explicitly. For conventional engineering applications, the first approach is most commonly used, however the limits of its validity are often neglected. The severity of the error that can happen as a result, has only been shown for individual structural members in the literature so far. This paper presents such comparison on structural assemblies, where the influence of creep is most pronounced in the between-member connections. The results show that failure times predicted by the implicit-creep plasticity model are significantly longer than failure times predicted by the explicit creep model, if the implicit model is used outside the limits of applicability. Within the limits, the discrepancies of about 20% were found only for one of the explored steels.

Key words: steel structures, fire, creep, bolted connections, restrained beams

1. UVOD

Lezenje jekla je časovno odvisna nepovratna deformacija, ki nastane zaradi premikanja dislokacij v

^{*} dr. Jerneja KOLŠEK, univ.dipl.inž. grad., ZAG, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, jerneja.kolsek@zag.si

^{**} dr. Peter ČEŠAREK, univ.dipl.inž.grad., UL FGG, Jamova 2, 1000 Ljubljana, peter.cesarek@fgg.uni-lj.si

^{***} dr. Miha KRAMAR, univ.dipl.inž.grad., ZAG, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, miha.kramar@zag.si

jeklu, ki se povečujejo z naraščanjem temperature [1]. Ta pojav ima po prepričanju raziskovalcev iz strokovne in znanstvene skupnosti ključen vpliv na mehanski odziv jeklenih konstrukcij pri povišanih temperaturah oziroma požaru [2]. Zato je za pravilen matematični opis slednjega potrebno ločeno obravnavati tri tipe deformacij: (i) temperaturne deformacije (raztezke), (ii) čiste (časovno neodvisne) mehanske deformacije in (iii) deformacije lezenja. Pri točnem pristopu obravnavamo deformacije lezenja eksplicitno (t.j. ločeno od mehanskih) z enim od predlaganih modelov lezenja, npr. [3]. Pri poenostavljenih materialnih modelih, ki se skoraj brez izjeme uporabljajo v vsakdanji inženirski praksi (npr. kot to predlaga [4]), pa je deformacija lezenja implicitno vključena v zvezo med mehanskimi deformacijami in napetostmi (časovno neodvisni model z implicitnim lezenjem). Tak model je lahko dovolj dober v nekaterih primerih, v drugih, kot omenja Anderberg [2], pa je lahko "preveč približen", saj ne upošteva zgodovine razvoja temperatur in napetosti in ga kot takega ni mogoče uporabiti za vsak možen praktični primer. V literaturi je bilo do sedaj objavljenih malo primerjav med obema modeloma, npr. [1,2,5], vse pa so narejene samo za posamezne konstrukcijske elemente. Rezultatov tovrstnih primerjav za večje konstrukcijske sklope pa v literaturi ni, so pa vsekakor zelo pomembni, in sicer ne samo zaradi demonstracije vpliva lezenja na posameznih elementih, ampak tudi za prikaz vpliva lezenja na spojih elementov.

Glavni namen tega prispevka je raziskava vpliva izbire materialnega modela (model kjer je lezenje upoštevano implicitno in model, kjer je lezenje obravnavano eksplicitno), na odziv jeklenih konstrukcijskih sklopov, ki so izpostavljeni naravnim požarom. Preiskava je izvedena 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 (razdelek 2.1 in 2.2).

2. NUMERIČNI MODEL

V tem razdelku predstavimo dvostopenjski numerični model, ki je bil pripravljen za analizo izbranega konstrukcijskega sklopa, ki je prikazan na sliki 1. Izbran sklop je zelo podoben delu konstrukcije, ki je bila preizkušena v znanem požarnem preskusu v Cardingtonu [6] in smo jo uporabili za validacijo modela. Rezultate in sklepe, ki jih pridobimo z izbranim modelom, pa lahko posplošimo tudi za druge konstrukcijske sklope s podobno geometrijo.



Slika 1: Obravnavan konstrukcijski sklop.

Numerični model konstrukcije je bil pripravljen in analiziran v okolju Abaqus (Standard) [7]. Za diskretizacijo po metodi končnih elementov in opis materialnega modela pri toplotni analizi so bila uporabljena vgrajena orodja, za opis materialnih modelov pri mehanski analizi pa smo implementirali lasten algoritem s pomočjo podprograma UMAT [7].

2.1 Toplotna analiza

Prvi korak analize predstavlja toplotna analiza, ki je izvedena kot standardna Fourierova analiza prevajanja toplote. Toplotne lastnosti jekla in njihovo temperaturno odvisnost smo povzeli po

standardu EC3 [4].

2.2 Mehanska analiza

V drugem, mehanskem delu analize, poleg zunanje mehanske obtežbe, nastopajo še toplotni vplivi v obliki časovno odvisnih temperatur vozlišč mreže končnih elementov, ki jih v model uvozimo iz predhodne toplotne analize. Te uporabimo za izračun temperaturnih deformacij in za izračun temperaturno odvisnih mehanskih lastnosti jekla. V tem delu analize je posebna pozornost namenjena tudi modeliranju kontaktov veznih pločevin z vijaki in kontaktov med preostalimi deli konstrukcije, ki v začetku analize niso v stiku, zaradi velikih deformacij in pomikov pa tekom analize lahko preidejo v kontakt.

2.2.1 Materialni model

Pri definiciji materialnega modela se opremo na dobro znan princip aditivnega razcepa deformacij, pri katerem celoten (geometrijski) tenzor deformacij ε zapišemo kot vsoto (i) temperaturne deformacije ε_{th} , (ii) mehanske deformacije ε_{σ} , ki jo zapišemo kot vsoto reverzibilne elastične $\varepsilon_{\sigma,e}$ in nepovratne plastične deformacije $\varepsilon_{\sigma,p}$ in (iii) deformacije lezenja ε_{cr} , ki je prav tako nepovratna:

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

Pri poenostavljenem materialnem modelu (npr. [4]) je deformacija lezenja implicitno vključena v plastični del mehanske deformacije, zato je razcep totalne deformacije enak:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}_{th} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\sigma,e} + \boldsymbol{\varepsilon}_{\sigma,imp-cr,p} \,. \tag{2}$$

Temperaturne deformacije

Sprememba temperature povzroča deformacije samo v normalnih smereh, določimo pa jih v odvisnosti od temperaturno odvisnega razteznostnega koeficienta α_T , ki je neodvisen od vrste jekla. V materialnem modelu smo ga določili tako, kot predlaga standard EC3 [4].

Mehanske deformacije

Kot je pri jeklu običajno, uporabimo za obravnavo mehanskih deformacij klasičen von Misesov model plastičnega tečenja z izotropnim utrjevanjem. Von Misesov kriterij tečenja je določen z ekvivalentno von Misesovo napetostjo in evolucijskim zakonom, ki plastične deformacije povezuje z napetostmi (konstitucijski model utrjevanja). Model utrjevanja je običajno definiran s pomočjo enoosnega preizkusa, ki je opravljen pri konstanti temperaturi in dovolj veliki hitrosti naraščanja napetosti (deformacij), da je izločen vpliv lezenja [8]. Modeli lezenja so določeni posebej, z eksperimenti zasnovanimi za merjenje lezenja (npr. [9]). Poenostavljeni modeli utrjevanja, ki implicitno vključujejo tudi vpliv lezenja, pa so ponavadi izpeljani iz preizkusov materiala pri spremenljivi napetosti in /ali temperaturi in veljajo samo v omejenem območju hitrosti naraščanja temperatur/napetosti. Za potrebe raziskave, opisane v tem prispevku sta bila v model pripravljen v Abaqusu vgrajena dva modela utrjevanja:

- Prvi materialni model je model utrjevanja z implicitno vključenim lezenjem, ki ga predlaga EC3 (slika 2b, referenca [4]), in ga označimo z model EC3. Ta model je veljaven za hitrosti naraščanja temperature 2 K/min 50 K/min.
- Pri drugem modelu uporabimo konstitucijske zveze za jeklo pri povišanih temperaturah, ki

jih predlaga Poh [10] (slika 2a). Te zveze so pridobljene iz preizkusov, pri katerih je bil izločen vpliv lezenja, zato so primerne za vgradnjo skupaj z eksplicitnim modelom deformacij lezenja. Pri pregledu literature, npr. [1,3] lahko najdemo le nekaj takšnih modelov lezenja, ki se v splošnem ločijo glede na predpostavke o stanju napetosti v jeklu. Če so te blizu konstantni, imamo opraviti s »time hardening«, če pa so spremenljive pa s »strain hardening« modelom. Glede na izbiro prvega ali drugega načina, pa morajo biti zasnovani tudi eksperimenti za določitev parametrov modela, ki so za različne vrste jekel lahko zelo različni. V tem delu uporabimo predlog Williams-Leira [3], ki je deformacijo lezenja definiral kot

$$\mathscr{X}_{cr} = b_1 \coth^2(b_2 \varepsilon_{cr}), \tag{3}$$

kjer je ε_{cr} ekvivalentna deformacija lezenja, b_1 in b_2 pa sta konstanti odvisni od lastnosti in nivoja napetosti jekla. Njihov izračun in pripadajoče koeficiente za različne vrste jeklel lahko poiščemo v referenci [3]. Skupen materialni model označimo s Poh-WL model.



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

2.3 Verifikacija in validacija

Predstavljen numerični model konstrukcije za toplotno in mehansko analizo je bil validiran s pomočjo rezultatov eksperimenta Walda in sodelavcev [6]. Ti so leta 2004 v Cardingtonu izvedli dobro poznani požarni eksperiment konstrukcije, katere del, ki je bil izpostavljen požarni obremenitvi, je po geometrijskih lastnostih zelo podoben tisti na sliki 1. Del rezultatov validacije lahko zainteresiran bralec najde v referenci [11].

2.4 Parametrične študije

Materialna modela, ki ju obravnavamo v parametrični študiji sta model Poh-WL in model EC3. Vsi elementi konstrukcije so iz jekla S275. V parametrični študiji sta bili obtežbi primarnega in sekundarnega nosilca izbrani tako, da je bil faktor izkoriščenosti nosilnosti konstrukcijskega sklopa pri sobni temperaturi (t=0) enak 25%, glede na elastično nosilnost oziroma 15% glede na plastično nosilnost. Glede na izbran trdnostni razred jekla, smo za model lezenja izbrali dve od jekel, za katera referenca [3] podaja parametre lezenja, to sta jekli SS41 in A135. Po navedbah reference [12] sta ti dve jekli podobni konstrukcijskemu jeklu S275. Nadalje smo za parametrično študijo izbrali dva režima segrevanja, ki ustrezata naravnim požarom, glej sliko 1. Režim segrevanja I predvideva, da se konstrukcija hitro segreje do 550°C (krivulja segrevanja je do te temperature

podobna tisti, ki je bila izmerjena na nosilcu v eksperimentu v Cardingtonu [5]), v nadaljevanju pa sledi počasnejše segrevanje s konstantno stopnjo 2 K/min. Slednja ustreza spodnji meji, pri kateri je model EC3 še veljaven za požarno analizo konstrukcij [4]. Režim segrevanja II je podoben prvemu, le da je segrevanje v drugem delu stopnje 0.9 K/min. Z analizo pri takem režimu segrevanja želimo preveriti možne posledice uporabe poenostavljenega upoštevanja lezenja izven predpisanega območja veljavnosti. Materialne karakteristike in režimi segrevanja predvidenih analiz so povzeti v preglednici 1.

Analiza	Režim segrevanja	Materialni model	Karakteristike modela lezenja	Režimi segrevanja
I-EC3	Ι	EC3	/	700 -
I-PWL-A135	Ι	Poh-WL	Jeklo A135	600 - 0.9 K/min
I-PWL-SS41	Ι	Poh-WL	Jeklo SS41	© 500 ⊑ 400
II-EC3	II	EC3	/	300 -
II-PWL-A135	II	Poh-WL	Jeklo A135	200 režim segrevanja I režim segrevanja II
II-PWL-SS41	II	Poh-WL	Jeklo SS41	$ \begin{array}{c ccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

Preglednica	1:	Parametri	čne	študije
0				

2.4.1 Mehanski odziv in čas porušitve

V mehanskem odzivu obravnavanega konstrukcijskega sestava lahko opazimo nekaj značilnosti, ki so skupne vsem obravnavanim modelom. Predstavljamo jih na sliki 3 in opišemo v nadaljevanju.

Kmalu po začetku segrevanja se v sekundarnem nosilcu razvijejo osne sile, saj je raztezanje nosilca preprečeno z vijaki na spoju. Posledično pride do uklona stojine nosilca v bližini vijakov, točka C1 na sliki 3a in slika 3c (območje označeno s polnim krogom). Zaradi mehanske obtežbe je nosilec upognjen, s tem so dovoljeni raztezki nosilca izven območja vijakov, kar pri naraščanju temperature privede do drugega karakterističnega dogodka, C2 na sliki 3a, ko pride do kontakta spodnje pasnice sekundarnega nosilca in stojine primarnega nosilca (črtkan krog na sliki 3c). Tlačne napetosti, ki nastanejo zaradi segrevanja po vzpostavitvi kontakta, zmanjšujejo natezne napetosti v spodnjem delu nosilca, ki so posledica mehanske obtežbe in jih s časom tudi premagajo. Posledično se začne sekundarni nosilec dvigovati, kar je lepo vidno iz zmanjšanih vertikalnih pomikov na sliki 3a. Ko tlačna sila v območju kontakta postane dovolj velika, pride do uklona spodnje pasnice sekundarnega nosilca (slika 3d), pri tem pa pride do zmanjšanja predhodno hitro rastoče osne sile v nosilcu (točka C3 na sliki 3a). S povečevanjem uklona pasnice se dvigovanje nosilca upočasni in pri nekem času zopet spremeni v povešanje (točka C4 na sliki 3a). V tako deformiranem nosilcu se pri nadaljnjem naraščanju deformacij začnejo razvijati območja, ki so polno plastificirana (kumulativna plastična deformacija in deformacija lezenja dosežeta mejno vrednost, po kateri pride do mehčanja jekla). Ta območja se razvijejo okrog uklonjenih delov nosilca in okrog lukenj za vijake, kar je posledica koncentriranih napetosti v tem območju, in se v nekem trenutku združijo, pri čemer v območju spoja nastane plastični členek (slika 3e). Momentni spoj primarnega in sekundarnega nosilca, postane členkast, ta preobrazba pa je jasno vidna iz poteka osne sile v nosilcu, katere vrednost pade na 0 (točka C5 na sliki 3a). Ta dogodek praktično že pomeni porušitev nosilca, saj nastanek plastičnega členka sproži tudi hitro naraščanje vertikalnih pomikov nosilca, ki kmalu postane hitrejše od stopnje, ki je v standardnih požarnih preizkusih določena kot mejna [13] (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). Zaradi hitrega naraščanja vertikalnih pomikov na območju stika nastanejo velike natezne sile, ki neizbežno povzročijo porušitev nosilca v območju vijačnih lukenj (slika 3f).



Slika 3: Značilen odziv obravnavanega konstrukcijskega sklopa: (a) vertikalni pomiki in osna sila na 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 vijačenega spoja.

3. REZULTATI IN DISKUSIJA

Rezultati parametrične študije so kratko predstavljeni na sliki 3, časi porušitev, ki smo jih določili za posamezno analizo pa v preglednici 2. Na sliki 3 prikazujemo razvoj povesov na sredini sekundarnega nosilca.



Slika 4: Vertikalni pomiki na sredini sekundarnega nosilca za opravljene analize (a) pri režimu segrevanja I in (b) pri režimu segrevanja II.

Opazimo lahko, da je pri časih, ko nosilec še ni izpostavljen počasnejši spremembi temperature s konstantno hitrostjo, potek krivulj za vse analize zelo podoben, saj do teh temperatur še ni pomembnejših vplivov lezenja. Ti postanejo prevladujoči v nadaljevanju analize, od tu naprej pa je opazna tudi razlika v obnašanju modela z materialnim modelom EC3 in modelov z eksplicitnim lezenjem. Razlike so tudi v (kar nas najbolj zanima) časih porušitve konstrukcije, čeprav so te pri analizah z režimom segrevanja I (2 K/min) majhne; nekoliko večje odstopanje opazimo le pri jeklu SS41. Slednje pokaže, da je uporaba implicitnega modela lezenja EC3 znotraj meja njegove veljavnosti sprejemljiva tudi za konstrukcijske sklope, vendar tudi tukaj lahko pride do izjem. Večje razlike v časih porušitev opazimo pri analizah z režimom segrevanja II (0.9 K/min). Tukaj na znatno krajše čase porušitev, v primerjavi z modelom EC3, pokažeta obe analizi z eksplicitnim Poh-WL modelom lezenja, kar jasno kaže, da uporaba takega modela zunaj meja ni smiselna.

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-SS41	128	596	15.2
I-EC3	151	638	/
II-PWL-A135	152	662	17.4
II-PWL-SS41	127	640	31.0
II-EC3	184	692	/

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

4. ZAKLJUČEK

V prispevku smo raziskali vpliv lezenja na odziv konstrukcijskega sklopa z vijačenim strižno obremenjenim spojem, ki je izpostavljen naravnemu požaru. Študija je bila opravljena s pomočjo posebej pripravljenega numeričnega modela.

Raziskali smo razlike v odzivu konstrukcije pri implicitno in eksplicitno upoštevanih deformacijah lezenja, za prvo smo uporabili materialni zakon, ki je predlagan v EC3 [4] (EC3 model), za drugo pa konstitucijske zveze, ki jih predlaga Poh [10] z dodanimi deformacijami lezenja izračunanimi po modelu Williams-Leira [3] (Poh-WL model). Za analizo smo izbrali jeklo trdnostnega razreda S275, pri katerem smo za vplive lezenja upoštevali koeficiente za jekli A135 in SS41 [3,12].

V članku smo pokazali, da so časi porušitev pri uporabi modela EC3 v požarnih scenarijih s hitrostmi segrevanja, ki so počasnejše od tistih, ki so na spodnji meji dovoljene uporabe modela, lahko tudi znatno preveliki (30%) v primerjavi z uporabo bolj točnega eksplicitnega modela. Na spodnji meji uporabnosti pa smo za jeklo A135 zaznali zanemarljive razlike v časih porušitve, medtem ko je bil pri jeklu SS41 čas porušitve določen z modelom EC3 15% daljši od časa izračunanega z modelom Poh-WL.

Zaključimo lahko, da je za zanesljivo obravnavanje jeklenih konstrukcij potrebno vplive lezenja upoštevati eksplicitno, za kar bo v prihodnosti potreben pospešen razvoj eksperimentalno podprtih modelov lezenja in njihova validacija tudi na konstrukcijah ali konstrukcijskih sklopih v polnem obsegu.

5. ZAHVALA

Delo J. Kolšek je bilo opravljeno v okviru podoktorskega raziskovalnega projekta Požarno varno umeščanje gorljivih materialov v stavbe z jekleno okvirno nosilno konstrukcijo: Razvoj modelov in verifikacija z eksperimenti (Z7-7677), ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS). Delo M. Kramarja je podprto v raziskovalnem programu P2-0273, delo P. Češarka pa v raziskovalnem programu P2-0260, ki ju financira ARRS. Za podporo se avtorji iskreno zahvaljujejo.

6. LITERATURA

- [1] V. K. R. Kodur, M. M. S. Dwaikat, *Effect of hihg temperature creep on the fire response of restrained seel beams*. Mater. Struct., letnik 43, str. 1327-1341, 2010
- [2] Y. Anderberg, Modelling steel behaviour. Fire Saf. J., letnik 13, str. 17-26, 1988
- [3] G. Williams-Leir, Creep of structural steel in fire: Analytical expressions. Fire Mater., letnik 7, str. 73-78, 1983
- [4] Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2: Structural fire design. European Committee for Standardizaton, 2004
- [5] G.-Q. Li, C. Zhang, *Creep effect on buckling of axially restrained steel columns in real fires.* J. Constr. Steel Res., letnik 71, str. 182-188, 2012
- [6] F. Wald, L. S. da Silva, D. B. Moore, T. Lennon, M. Chladna, A. Santiago, M. Beneš, L. Borges, *Experimental behaviour of a steel structure under natural fire*. Fire Saf. J., letnik 41, str. 509-522, 2006
- [7] ABAQUS 2016 documentaton. DS-Simulia, Providence, R.I. AISC., 2016
- [8] K.W. Poh, M. Skarajew, Elevated temperature tensile testing of grade 300PLUSe hot rolled structural steel. Rep. No. BHPR/SM/R/007, BHP Research Melbourne Labs, Melbourne, Australia, 1995
- [9] M. Cowan, K. Khandelwal, *Modeling of high temperature creep in ASTM A992 structural steels*. Eng. Struct., letnik 80, str. 426-434, 2014
- [10]K. W. Poh, *Erratum for 'Stress-strain-temperature relationship for structurlal steel'*. J. Mater. Civil Eng., letnik 26, str. 388-389, 2014
- [11]J. Kolšek, P. Češarek, Performance-based fire modelling of intumescent painted steel structures and comparison to EC3. J. Constr. Steel Res., letnik 104, str. 91-103, 2015
- [12] W. E. Luecke, J. D. McColsley, C. N. McCowan, S. W. Banovic, R. J. Fields, T. Foecke, T. A. Siewert, F. W. Gayle, 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.
- [13]EN1363-1, Fire Resistance Tests, Part 1: General Requirements. European Committee for standardization, 2012