

DVOFAZNI TOPLOTNO-PIROLIZNI MODEL ZA DOLOČITEV OGLENENJA LESA

TWO-PHASE THERMO-PYROLYSIS MODEL TO DETERMINE CHARRING OF WOOD

asist. dr. Robert Pečenko, univ. dipl. inž. grad.

robert.pecenko@fgg.uni-lj.si

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo
in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

Znanstveni članek

UDK 624.011.1:614.841

Povzetek | V članku je predstavljena nova metoda za določitev termokemične razgradnje lesenega elementa, izpostavljenega požaru. Metoda je dvofazna, pri čemer v prvi fazi na podlagi toplotne analize izračunamo razvoj in razporeditev temperatur v karakterističnem prečnem prerezu lesenega elementa. Nato v drugi fazi na osnovi pirolizne reakcije, ki temelji na Broido-Shafizadehovem piroliznem modelu, določimo razgradnjo lesa na aktivni les, oglje, katran in pline. Glavni namen in uporabnost novo razvite metode je določanje razvoja oglenenja ter temperature, pri kateri je izpolnjen kriterij oglenenja (v nadaljevanju temperatura oglenenja) lesenega elementa, izpostavljenega poljubni požarni obtežbi. V prikazanih primerih je obravnavani leseni element izpostavljen standardni in parametrični požarni krivulji. Analize so pokazale, da hitrost razvoja požara bistveno vpliva na razvoj debeline zoglenele plasti kakor tudi na temperaturo oglenenja. Ključne besede: piroliza lesa, oglenenje lesa, temperatura oglenenja, dvofazni model

Summary | The paper presents a new, two-phase method to determine the thermo-chemical decomposition of timber member exposed to fire. In the first phase, based on the thermal analysis, the distribution of temperatures in the characteristic cross-section of timber member is computed. Based on the pyrolysis reaction, the decomposition of wood is determined in the second phase, where Broido-Shafizadeh model is used. The main purpose and advantage of the new developed method is to determine charring of wood, charring depth and char front temperature for a timber member exposed to random fire load. Thus, the studies given in the paper present the analyses for timber member exposed to standard and parametric fire curves. The studies reveal that fire growth rate has a significant impact on the development of charring depth as well as char front temperature.

Key words: pyrolysis of wood, charring of wood, char front temperature, two-phase model

1 • UVOD

Obnašanje lesenih konstrukcij oz. njenih nosilnih elementov v požaru je v veliki meri odvisno od pojava in razvoja oglenenja lesa. Tako npr. poenostavljena metoda učinkovitega prečnega prereza ((SIST, 2005), (Pečenko, 2015a)), ki je ena od najpogosteje uporabljenih inženirskih metod za določanje požarne odpornosti lesenih konstrukcijskih elementov, temelji na

empiričnih hitrostih oglenenja (mm/min), ki jih podaja standard (SIST, 2005). Pri tem glavno pomanjkljivost predstavlja dejstvo, da so hitrosti oglenenja primerne in umerjene le za standardno požarno krivuljo (ISO, 1999) ter izjemoma tudi za parametrične požarne krivulje s podobno hitrostjo razvoja požara. Ker pa je požar izrazito negotov pojav, je s

standardno požarno krivuljo nemogoče zajeti spekter vseh možnih požarnih scenarijev ter razvojov temperatur v požarnem sektorju ob pojavu naravnega požara. To v praksi pomeni, da so trenutno podane hitrosti oglenenja neprimerne za določitev razvoja oglenenja in požarne odpornosti lesenega elementa v primeru naravnega požara. Omenjeno pomanjkljivost se je skušalo izboljšati z uporabo toplotnih (Hozjan, 2009) in toplotno-vlažnostnih računskih modelov (npr. (Pečenko, 2015b)), kjer se izračuna natančnejši potek

temperatur po lesenem prečnem prerezu, na podlagi temperaturnega kriterija ogleenja pa se nato določi razvoj ogleenja lesenega elementa, izpostavljenega požaru. Slabost teh modelov je uporaba temperaturnega kriterija skladno z Evrokodovo predlagano izotermo ogleenja pri 300 °C (SIST, 2005), pri čemer je ta kalibrirana na standardno požarno krivuljo. Kot kažejo zadnje raziskave ((Lange, 2015), (Turner, 2010)), je temperatura ogleenja različna od 300 °C, če je razvoj požara drugačen od standardne požarne krivulje. Iz tega je razvidno, da je tudi uporaba ogleenja, določenega na podlagi analiz s toplotnimi oz. toplotno-vlažnostnimi modeli, omejena le na

standardno požarno krivuljo ali v redkih primerih na parametrične požarne krivulje.

Za natančno določitev ogleenja lesenega elementa, izpostavljenega naravnemu požaru, je tako treba trenutne metode nadgraditi ter fenomen ogleenja pravilno fizikalno in matematično formulirati. To pa je mogoče samo ob poznavanju procesa pirolize, ki opisuje termokemično razgradnjo lesa pri povišanih temperaturah na različne produkte, kot so oglje, katran, plini in drugo. Pirolizna reakcija je časovno odvisen proces, kar pomeni, da ima hitrost razvoja požara vpliv na hitrost termokemične razgradnje lesa ter posledično na razvoj ogleenja kakor tudi

na temperaturo, pri kateri les začne ogleneti (temperatura ogleenja).

V članku prikazujemo novo dvofazno metodo za določitev ogleenja lesa, ki združuje obstoječi toplotni model (Hozjan, 2009) in pirolizni model, ki so ga predlagali Bradbury s sodelavci (Bradbury, 1979). V prvi fazi na podlagi toplotne analize določimo razvoj temperatur po prerezu lesenega elementa, ki v drugi fazi služi kot vhodni podatek za pirolizno reakcijo, kjer določimo razgradnjo in ogleenje lesa. S prikazano metodo razvoj ogleenja ni neposredno odvisen od temperature ogleenja in je tako bolj splošen in primeren za uporabo v pogojih naravnega požara.

2 • DVOFAZNI TOPLOTNO-PIROLIZNI MODEL

Model za določitev termokemične razgradnje lesa je dvofazen, kar pomeni, da ločeno obravnavamo toplotno analizo in pirolizno reakcijo. Razlog za to poenostavitev je, da endotermna oz. eksotermna pirolizna reakcija bistveno ne vpliva na razvoj temperatur v prečnem prerezu lesenega elementa.

2.1. Toplotna analiza

Model za toplotno analizo (Hozjan, 2009) temelji na znani Fourierjevi parcialni diferencialni enačbi, ki opisuje prenos toplote po trdni snovi. Vpliv vlage je v modelu upoštevan posredno s povečanjem specifične toplote lesa v temperaturnem območju med 100 in 120 °C, s čimer implicitno zajamemo vpliv izparevanja vode v lesu. Na stiku med lesom in okolico predpišemo površinski toplotni tok, ki je sestavljen iz konvekcijskega in sevalnega dela ($h_{cr} = h_c + h_r$). Površinski toplotni tok je zaradi konvekcije odvisen od prestopnega koeficienta α_c ter od razlike med temperaturo lesenega elementa na izpostavljenem robu T_m in temperaturo okolice T_∞ . Sevalni toplotni tok je določen na podlagi Stefan-Boltzmannovega zakona: $h_r = \sigma \varepsilon_m (T_m^4 - T_\infty^4)$, kjer σ predstavlja Stefan-Boltzmannovo konstanto, ε_m pa emisivnost površine elementa.

Enačba prevajanja toplote skupaj z robnimi in začetnimi pogoji ($T = T_0$) je rešena numerično, z Galerkinovo metodo končnih elementov, za časovno diskretizacijo je uporabljena implicitna shema. Formulacija končnih elementov je primerna za 2D-analizo prenosa toplote.

2.2. Modeliranje pirolizne reakcije

Pri povišanih temperaturah oziroma požaru je les podvržen pirolizi, tj. termokemičnemu

procesu, pri katerem se razgrajuje na oglje, katran, pline in številne druge produkte. V nadaljevanju se osredotočamo na pirolizo celuloze, saj ta komponenta lesa najbolj vpliva in nadzoruje potek pirolize celotnega lesa. V preteklosti je bilo na področju termokemične razgradnje celuloze predstavljeno veliko število različnih modelov, od preprostih enostopenjskih do zelo kompleksnih z več kot 300 reakcijami (Richter, 2017). Modeli se medsebojno razlikujejo predvsem glede na hitrost toplotne obremenitve. Tako je na primer pirolizna kinetika bistveno drugačna v primeru, ko je celuloza podvržena termični obdelavi (izotermni pogoji, do 250 °C) ali pa požaru (neizotermni pogoji, hitri razvoj temperatur). Na podlagi številnih parametričnih študij je Richter s sodelavci pokazal, da pirolizni model, ki sta ga najprej predlagala Kilzer in Broido (Kilzer, 1965), nadgradili pa Bradbury in sodelavci (Bradbury, 1979) (v nadaljevanju Broido-Shafizadehov model oz. BS-model), natančno opiše termokemično razgradnjo celuloze v pogojih, ki vladajo pri požaru. Ta model opisuje razgradnjo celuloze na aktivno celulozo, ki se nato razgrajuje na

ogljje, pline in katran, kot prikazuje slika 1. V nadaljevanju zaradi večje preglednosti izraz celuloza zamenjamo z izrazom les.

Termokemična razgradnja lesa na različne produkte je formalno zapisana s sistemom osnovnih diferencialnih enačb:

$$\text{Les: } \frac{d\rho_s}{dt} = -k_1\rho_s, \quad (1)$$

$$\text{aktivni les: } \frac{d\rho_{is}}{dt} = k_1\rho_s - (k_2 + k_3)\rho_{is}, \quad (2)$$

$$\text{ogljje: } \frac{d\rho_c}{dt} = 0.35k_2\rho_{is}, \quad (3)$$

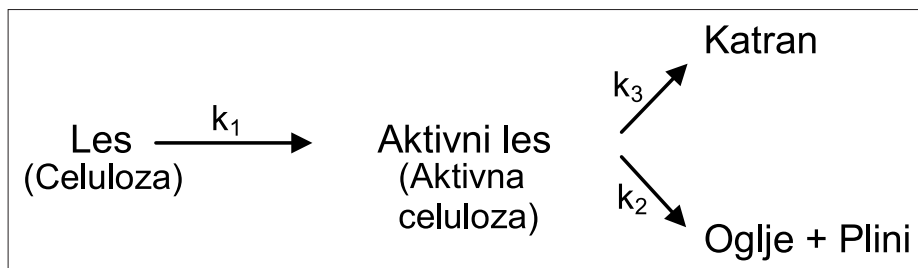
$$\text{plini: } \frac{d\rho_g}{dt} = 0.65k_2\rho_{is}, \quad (4)$$

$$\text{katran: } \frac{d\rho_t}{dt} = k_3\rho_{is}, \quad (5)$$

kjer ρ_s , ρ_{is} , ρ_c in ρ_t predstavljajo gostoto lesa, aktivnega lesa, oglja in katrana, ρ_g pa označuje koncentracijo plinov, ki se sproščajo ob procesu pirolize. Hitrost oz. stopnja i te pirolizne reakcije k_i ($i = 1, 2, 3$) sledi Arrheniusovemu zakonu:

$$k_i = A_i \exp\left(\frac{-E_i}{RT}\right), \quad (6)$$

kjer R predstavlja splošno plinsko konstanto, T je temperatura lesa v izbrani točki (določena na podlagi toplotne analize, poglavje 2.1), parametri hitrosti pirolizne reakcije A_i ter E_i pa so upoštevani skladno z (Bradbury, 1979) in podani v preglednici 1.



Slika 1 • Shema Broido-Shafizadehove pirolizne reakcije (Bradbury, 1979).

k_1	k_2	k_3
$E_1 = 242.6 \text{ kJ mol}^{-1}$	$E_2 = 153.1 \text{ kJ mol}^{-1}$	$E_3 = 197.9 \text{ kJ mol}^{-1}$
$A_1 = 1.7 \cdot 10^{21} \text{ s}^{-1}$	$A_2 = 7.9 \cdot 10^{11} \text{ s}^{-1}$	$A_3 = 1.9 \cdot 10^{16} \text{ s}^{-1}$

Preglednica 1 • Kinetični parametri pirolizne reakcije.

Ob poznanih začetnih pogojih ($\rho_s(t=0) = \rho_{s,0}$, $\rho_{is}(t=0) = 0$; $\rho_c(t=0) = 0$; $\rho_i(t=0) = 0$; $\rho_g(t=0) = 0$), enačbe (1)–(6) rešimo s po-

močjo Matlovega vgrajenega reševalca ode15s, ki temelji na implicitni časovni shemi in je primeren za reševanje »togh«

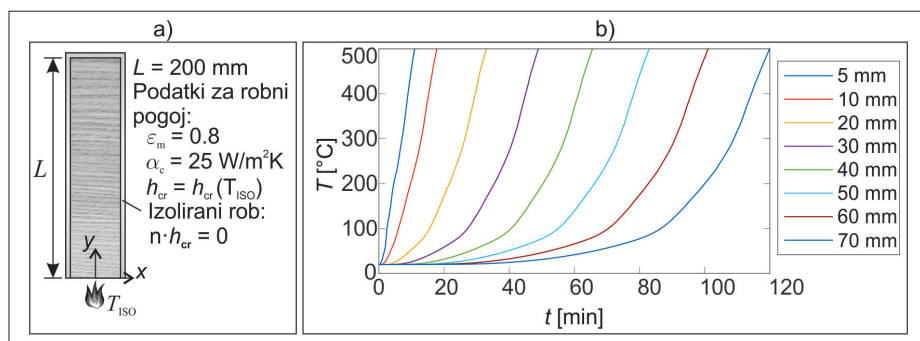
diferencialnih enačb. Celoten čas računa je razdeljen na večje število časovnih prirastkov, rešitev znotraj vsakega prirastka pa je določena iterativno. Prednost implicitnih metod pred eksplisitnimi pri reševanju tovrstnih togh problemov se izkaže predvsem v boljši konvergenci in krajšem računskem času.

3 • RAČUNSKI PRIMERI

3.1. Razvoj oglenenja pri standardni požarni izpostavljenosti

V tem računskem primeru prikazujemo uporabo naprednega toplotno-piroliznega modela za določitev razvoja oglenenja na lesenem elementu, ki je izpostavljen standardni požarni krivulji z ene strani. Obravnavani leseni element je debeline 200 mm, začetna gostota

piroliza časovno in temperaturno odvisen proces, je predvsem pomembna hitrost razvoja temperature v posamezni točki prereza, še posebno pa v temperaturnem območju med 200 in 300 °C, tj. tam, kjer je proces pirolize najbolj intenziven. Pričakovano je razvoj temperatur hitrejši, bližje ko smo izpostavljenemu robu.



Slika 2 • a) Vhodni podatki za toplotno analizo. b) Razvoj temperatur v izbranih točkah prereza.

lesa pa znaša $\rho_{s,0} = 400 \text{ kg/m}^3$. Kot je že omenjeno, je analiza dvofazna. Najprej naredimo toplotno analizo, izračunane temperature pa nato uporabimo kot vhodni podatek za analizo z BS-modelom.

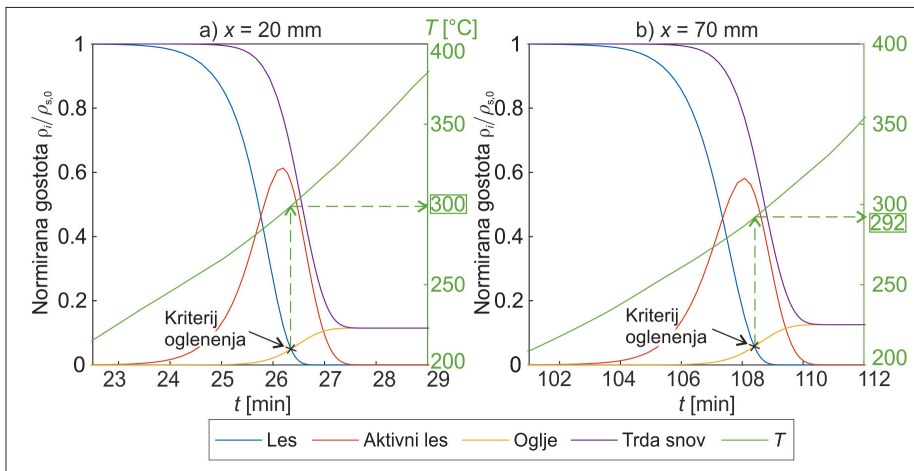
Osnovni podatki za toplotno analizo so prikazani na sliki 2a. Toplotne karakteristike lesa in prestopni koeficient ter emisivnost površine elementa upoštevamo skladno s standardom (SIST, 2005). Za toplotno analizo prerez v y -smeri razdelimo na 80 polj, v x -smeri pa zaradi 1D-problema na eno samo polje. Število končnih elementov, s katerimi diskretiziramo prerez, je 80, pri čemer je velikost posameznega elementa $2,5 \times 2,5 \text{ mm}^2$.

Slika 2b prikazuje razvoj temperatur v izbranih točkah prereza, ki so različno oddaljene od spodnjega, požaru izpostavljenega roba (5 mm, 10 mm ...). Prikaz temperatur je omejen na 500 °C, saj se pri tej temperaturi celuloza razgradi v trenutku (Richter, 2017). Ker je

Rezultati drugega dela analize, tj. termokemične dekompozicije lesa, so predstavljeni na sliki 3. Zanima nas razgradnja trdne snovi, tj. razgradnja lesa na aktivni les in oglje, zato tvorbe plinov in katrana med pirolizno reakcijo ne prikazujemo. Slika 3a ponazarja razgradnjo lesa v točki prereza, ki je od spodnjega izpostavljenega roba oddaljena 20 mm (v nadaljevanju točka P1). Najprej opazimo, da se izrazitejša razgradnja lesa prične pri času 23 min, ko temperatura znaša 225 °C. Tukaj je treba poudariti, da se razgradnja lesa v osnovi prične že prej, in sicer pri temperaturi približno 150 °C, vendar, kot je že omenjeno, je piroliza temperaturno in časovno odvisen fenomen, kjer je pomembno, koliko časa je les izpostavljen določeni temperaturi. Na podlagi tega je mogoče izračunati prirastek razgradnje lesa znotraj časovnega koraka pri dani temperaturi, celotna razgradnja lesa pa je nato določena kot vsota

vseh prirastkov razgradenj. Če se vrnemo na obravnavani primer, pri 150 °C je prirastek razgradnje lesa zanemarljivo majhen in nima vidnejšega vpliva na celotno razgradnjo lesa. Zato je razgradnjo mogoče zaznati pozneje, in sicer pri 225 °C, ko je prirastek razgradnje dovolj izrazit, da vpliva na celotno razgradnjo lesa. Proces pirolize se konča po 27,5 min pri temperaturi 337 °C. Ker je celotna trdna snov sestavljena iz lesa, aktivnega lesa in oglja (trdna snov = % les + % aktivni les + % oglje), vidimo, da po poteku pirolizne reakcije ostane samo še oglje, ki predstavlja 11,5% trdne snovi, ostanek trdne snovi se pretvori v pline in katran. To pomeni, da gostota trdne snovi od začetnih 400 kg/m³ pade na 46 kg/m³. Na sliki 3b prikazujemo rezultate procesa pirolize v točki oddaljeni 70 mm od spodnjega roba (točka P2). Ker je razvoj temperature v tej točki počasnejši (glej sliko 2b), se zaradi prej opisanih fenomenov začetek razgradnje lesa prične pri nižji temperaturi kot v točki P1, in sicer pri $T = 199 \text{ °C}$ ($t = 101 \text{ min}$), konča pa pri 329 °C ($t = 111 \text{ min}$). Poleg tega ob koncu piroliznega procesa ostane več oglja (12,5%), kot to velja v točki P1. To je skladno z osnovnimi zakoni pirolizne reakcije, saj je znano, da pri počasnejšem naraščanju temperatur prevladuje razgradnja lesa na oglje in pline, medtem ko je pri hitrejšem razvoju temperatur izrazitejša razgradnja lesa na katran (Bradbury, 1979).

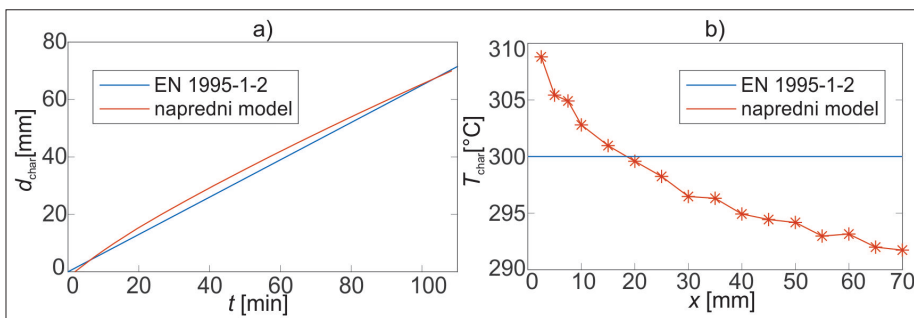
Z vidika nosilnosti lesa pri požaru je predvsem pomembno, kdaj nastopi popolna izguba mehanskih lastnosti lesa, kar je v terminologiji standarda SIST EN 1995-1-2 definirano z izrazom oglenenje, temperatura, pri kateri le-to nastopi, pa je prepoznana kot temperatura oglenenja. Na podlagi rezultatov toplotno-piroliznega modela je možnih več kriterijev nastopa oglenenja. V prvi vrsti lahko za kriterij upoštevamo, da oglenenje nastopi v trenutku, ko se začne tvoriti oglje. Tak sklep bi bil dokaj konservativen, saj se na primer v točki P2 (slika 3a) do tistega trenutka ($t \approx 25 \text{ min}$) razgradi le 13,6% lesa, kar pomeni, da ohranja še dobršen del svoje strukture in



Slika 3 • Razgradnja lesa na aktivni les in oglje v različnih točkah prereza: a) 20 mm od spodnjega roba. b) 70 mm od spodnjega roba.

s tem tudi mehanske lastnosti. Drugi možni kriterij je upoštevanje nastopa oglenjenja, ko se les popolnoma razgradi in v sestavi trdne snovi ostane le še oglje. Vendar kakor kažejo zadnje raziskave na področju molekularne dinamike ((Mayes, 2012), (Paajanen, 2017)), depolimerizacija celuloznih vlaken pri povišanih temperaturah nastopi, preden reakcija pirolize v celoti poteče. To posledično pomeni, da les izgubi mehanske lastnosti, preden se v celoti razgradi. Tako upoštevamo, da kriterij oglenjenja nastopi, ko je v sestavi trdne snovi delež oglja večji od deleža lesa. Na slikah 3a in b to predstavlja presečišče krivulji, ki ponazarjata razgradnjo lesa in tvorbo oglja, označujemo pa ga kot kriterij oglenjenja. Temperaturo, pri kateri je izpolnjen kriterij oglenjenja, pa poimenujemo temperatura oglenjenja. Tako določimo, da oglenenje v točki P1 nastopi pri času 26,3 min, ko temperatura znaša

Na sliki 4a je podana primerjava med debelino zoglenele plasti, določene na podlagi kriterija oglenjenja z naprednim modelom (toplotno-pirolizni model), ter poenostavljenim postopkom, ki ga podaja standard SIST EN 1995-1-2 (2005). Standard SIST EN 1995-1-2 (2005) podaja debelino zoglenele plasti kot linearno funkcijo odvisno od stopnje oglenjenja β_0 in časa t ($d_{char} = \beta_0 \cdot t$), pri čemer stopnja enodimenzijskega oglenjenja mehkega lesa z gostoto, večjo od 290 kg/m³, znaša 0,65 mm/min. Odstopanja med enostavno in napredno določeno debelino zoglenele plasti so zanemarljiva. To je pričakovano, saj je oglenenje, določeno po (SIST, 2005), umerjeno na standardno požarno krivuljo, torej poenostavljen postopek omogoča natančne rezultate v tem primeru, hkrati pa se izkaže, da je izbira kriterija oglenjenja v BS-modelu za standardno požarno izpostavljenost primerna.



Slika 4 • Razvoj debeline zoglenele plasti s časom. b) Razvoj temperature oglenjenja z oddaljenostjo od spodnjega izpostavljenega roba.

300 °C, medtem ko se v točki P2 to zgodi pri času 108,4 min pri temperaturi 292 °C. Ti dve temperaturi oglenjenja sta v veliki meri skladni tudi z Evrokodovo (SIST, 2005) priporočeno temperaturo oglenjenja za standardno požarno izpostavljenost, ki znaša 300 °C.

Temperaturo oglenjenja, določeno z naprednim modelom v različnih točkah prereza, prikazujemo na sliki 4b, kjer je x razdalja od spodnjega izpostavljenega roba. Vidimo, da se na račun počasnejšega naraščanja temperatura v notranjosti prereza temperatura

oglenjenja niža z oddaljenostjo od spodnjega roba. Poleg tega se v povprečju temperatura oglenjenja, določena po napredni metodi, dobro ujema s temperaturo oglenjenja $T = 300$ °C, ki jo predlaga (SIST, 2005).

3.2. Razvoj oglenjenja v primeru parametrične požarne krivulje

V tem poglavju prikazujemo uporabo naprednega modela za določitev razvoja oglenjenja lesenega elementa, izpostavljenega naravnemu požaru. Razvoj temperatur s časom po prostoru določimo na podlagi parametrične požarne krivulje v (SIST, 2005), ki predstavlja poenostavljen model naravnega požara, pri čemer so upoštevani bistveni parametri, ki vplivajo na razvoj in jakost požara ter s tem povezanega razvoja temperature v prostoru. Analiziramo tri različne parametrične požarne krivulje, ki imajo naslednje skupne vhodne podatke: velikost požarnega prostora $\dot{S}/d/v = 15/20/4$ m³ in čas $t_{lim} = 20$ min. Drugi vhodni podatki za posamezno parametrično požarno krivuljo so podani v preglednici 2.

Obravnavane parametrične požarne krivulje prikazujemo na sliki 5, kjer je za primerjavo podana še standardna požarna krivulja. Parametrična krivulja zajema tako fazo segrevanja kakor tudi fazo ohlajanja, s čimer se že v osnovi razlikuje od standardne požarne krivulje. Kljub temu pa je možna primerjava s standardno krivuljo v fazi segrevanja, in sicer se tej krivulji najbolj približa parametrična krivulja #1, preostali dve imata bistveno hitrejši razvoj temperatur. Faza ohlajanja najprej nastopi pri krivulji #3, sledita krivulji #2 in #1.

Za toplotno analizo upoštevamo enako geometrijo, toplotne lastnosti lesa, robne pogoje in druge parametre kot v primeru, ki je predstavljen v poglavju 3.1.

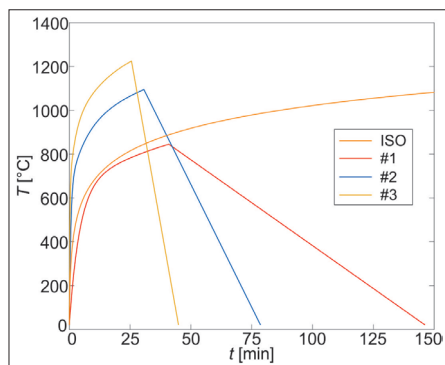
Razvoj debeline zoglenele plasti, določene z naprednim modelom, je podan na sliki 6a. Hkrati je prikazan tudi razvoj debeline zoglenele plasti, izračunane na podlagi poenostavljene metode, ki je primerna za leseni element, izpostavljen parametrični požarni krivulji, metoda pa je podana in podrobneje opisana v standardu (SIST, 2005). Po poenostavljeni metodi debelino zoglenele plasti določimo v odvisnosti od časa t_0 ($t_0 = 0.009 q_{e,d}/O$, glej (SIST, 2005)). Za čas, manjši od t_0 ($t < t_0$), debelina zoglenele plasti narašča linearno, za čas $t_0 < t < 3t_0$ narašča po kvadranti funkciji, za čas $t > 5t_0$ pa se upošteva končna debelina zoglenele plasti.

Primerjava debeline zoglenele plasti, določene z napredno in poenostavljeno metodo, za

Krivulja #1	Krivulja #2	Krivulja #3
$b = 2000 \text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K})$	$b = 2000 \text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K})$	$b = 1500 \text{ J}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2}\text{K})$
$O = 0.06 \text{ m}^{1/2}$	$O = 0.16 \text{ m}^{1/2}$	$O = 0.2 \text{ m}^{1/2}$
$q_{fd} = 600 \text{ MJ}/\text{m}^2$	$q_{fd} = 1200 \text{ MJ}/\text{m}^2$	$q_{fd} = 1250 \text{ MJ}/\text{m}^2$

Preglednica 2 • Vhodni podatki za tvorbo različnih parametričnih požarnih krivulj.

element, izpostavljen parametrični krivulji #1, pokaže (slika 6a), da se rezultati dobro ujemajo do časa približno 30 min, tj. do časa, ko



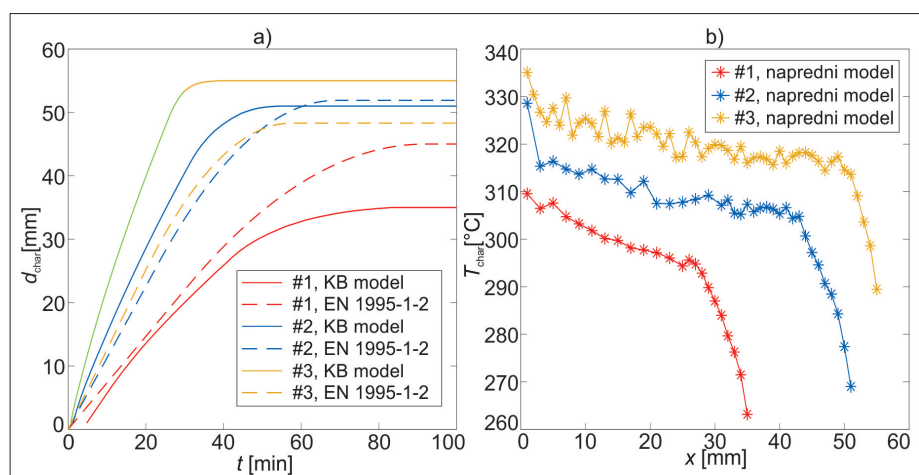
Slika 5 • Razvoj temperatur v prostoru za obravnavane parametrične požarne krivulje in standardno krivuljo.

je debelina zoglenele plasti po poenostavljeni metodi določena z linearno funkcijo (t_0 za #1 je 30 min). Od časa 30 minut naprej pa sledijo velika odstopanja, saj s poenostavljenim postopkom izračunamo večjo vrednost debeline zoglenele plasti kot pa v primerjavi z napredno metodo. Končna vrednost debeline zoglenele plasti, določene s poenostavljeno analizo, tako znaša 45 mm, z napredno pa 35 mm. V primeru analize s parametrično krivuljo #2 se dobro ujemata končni vrednosti debeline zoglenele plasti, ki znašata 51,9 mm (poenostavljena metoda) in 51 mm (napredni model), manj pa se ujemata razvoja debeline zoglenele plasti do časa približno 60 min, pri čemer poenostavljen postopek predvideva počasnejši razvoj oglečenja. Največja odsto-

panja so opazna pri analizi s parametrično krivuljo #3, kjer s poenostavljeno metodo ocenimo manjšo debelino zoglenele plasti kot pa v primerjavi z napredno metodo. Na podlagi teh študij lahko sklepamo, da v primeru hitrejšega razvoja požara od standardnega (krivulji #2 in #3) poenostavljen postopek poda manjše vrednosti debeline zoglenele plasti od napredne metode. To pa predstavlja velik problem, saj upoštevanje manjše debeline zoglenele plasti, ki je osnova za določanje požarne odpornosti lesenega elementa s poenostavljeno metodo efektivnega prečnega prereza po (SIST, 2005), vodi v rezultate »na nevarni strani« (Lange, 2017).

Slika 4b podaja krivulje, ki prikazujejo razvoj temperatur oglečenja v odvisnosti od od-

daljenosti od požaru izpostavljenega roba, določene na podlagi napredne analize. S slike je razvidno, da je potek krivulj bilinearen. Za primer #1 npr. vidimo, da se naklon krivulje bistveno spremeni za $x > 29 \text{ mm}$. Razlog za to je, da temperature v točkah do $x = 28 \text{ mm}$ dosežejo razmeroma hitro visoke temperature ($T > 350 \text{ °C}$), kar pomeni, da se les v celoti razgradi, preden preide v fazo ohlajanja. V točkah za $x > 29 \text{ mm}$ je temperaturni potek počasnejši in se zato del lesa razgradi tudi v fazi ohlajanja. To pa pomeni, da je celoten proces pirolize v tem delu prereza daljši, kar skladno s predhodnimi ugotovitvami vodi v nižjo temperaturo oglečenja. Za parametrični krivulji #2 in #3 velja, da temperatura oglečenja v fazi segrevanja znaša med 310 in 335 °C, kar je višje od temperature oglečenja, ki jo (SIST, 2005) podaja za standardno požarno izpostavljenost ($T = 300 \text{ °C}$). Ker pa za požare, različne od standardnega (SIST, 2005), ne ponuja dodatnih priporočil ali omejitev, se v praksi predpostavi temperaturo oglečenja 300 °C tudi v primeru naravnega požara, kar pa je, kot ta analiza prikazuje, napačna predpostavka.



Slika 6 • a) Razvoj debeline zoglenele plasti, določene z napredno in poenostavljeno metodo ob upoštevanju različnih parametričnih krivulj (#1, #2, #3). b) Temperatura oglečenja, določena z napredno metodo.

4 • ZAKLJUČKI

V prispevku je prikazana nova metoda za določitev razgradnje in oglečenja lesa, ki temelji na dvofaznem toplotno-piroliznem modelu. V prvi fazi je bil na podlagi prenosa toplote po trdni snovi skladno s Fourierjevo parcialno diferencialno enačbo določen razvoj temperatur po prečnem prerezu lesenega elementa. Te so bile nato uporabljene kot vhodni podatek za drugo fazo, kjer je bila modelirana pirolizna reakcija, ki temelji na

BS-modelu in omogoča izračun razgradnje lesa na aktivni les, oglje, pline in katran. Glavni namen tega prispevka je bil pokazati uporabnost nove metode za določitev oglečenja, debeline zoglenele plasti in temperature oglečenja. Poglavitna prednost pri tem je, da novo razvita metoda temelji na splošnejšem opisu problema in je zato primerna tudi za uporabo v pogojih naravnega požara.

Na podlagi izračunov in parametričnih študij je bilo ugotovljeno naslednje: (i) hitrejši razvoj temperatur v delu prereza elementa vodi v višjo temperaturo oglečenja, hkrati pa se tvori manj oglja po poteku pirolizne reakcije, (ii) ob izpostavljenosti elementa standardni požarni krivulji se je izkazalo, da sta se poteka debeline zoglenele plasti, izračunana z naprednim modelom ter poenostavljeno metodo po (SIST, 2005), dobro ujemala. Poleg tega je tudi temperatura oglečenja, določena z naprednim modelom, dobro sovpadala s temperaturo oglečenja $T = 300 \text{ °C}$, ki jo predpisuje

standard (SIST, 2005), (iii) za leseni element, izpostavljen parametričnim požarnim krivuljam, pa so analize pokazale, da se je razvoj debeline zoglelene plasti, določen z naprednim in poenostavljenim postopkom po (SIST, 2005), bistveno razlikoval. Pri tem je

za parametrični krivulji s hitrejšim razvojem temperatur od standardne krivulje (krivulji #2 in #3) poenostavljena metoda podcenila vrednost debeline oglja. Prav tako se je v fazi segrevanja za ti dve parametrični krivulji izkazalo, da je temperatura oglenenja, določče-

na z napredno metodo ($310 < T < 335$ °C), višja od običajno predpostavljene temperature oglenenja 300 °C, ki pa je umerjena na standardno požarno izpostavljenost, in kot z analizo pokažemo, ni primerna za druge požarne krivulje.

5 • ZAHVALA

Avtor se Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije zahvaljuje za sofinanciranje projekta Z2-8160.

6 • LITERATURA

- Bradbury, A. G. W., Sakai, Y., Shafizadeh, F., A Kinetic Model for Pyrolysis of Cellulose, *Journal of Applied Polymer Science*, 23, 3271–3280, 1979.
- Hozjan, T., Program Heatko: 2-D analiza prenosa toplote po trdni snovi, FGG, Univerza v Ljubljani, 2009.
- ISO, ISO-834, Fire-Resistance Test-Elements of Building Construction: Part 1. General Requirements, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1999.
- Kilzer, F. J., Broido, A., Speculations on the nature of cellulose pyrolysis, *Pyrodynamics*, 2, 151–163, 1965.
- Mayes, H. B., Broadbent, L. J., Unraveling the reactions that unravel cellulose, *The Journal of Physical Chemistry A*, 116, 7098–7106, 2012.
- Lange, D., Bostroem, L., Schmid, J., Albrektsson, J., The reduced cross section method applied to glulam timber exposed to non-standard fire curves, *Fire Technology*, 51, 1311–1340, 2015.
- Paajanen, A., Varri, J., High-temperature decomposition of the cellulose molecule: a stochastic molecular dynamics study, *Cellulose*, 24, 2713–2725, 2017.
- Pečenko, R., Huč, S., Hozjan, T., Performančni način projektiranja požarne odpornosti lepljenega lesenega nosilca, Del 2, Toplotna in mehanska analiza, *Gradbeni vestnik*, 64, 134–144, 2015a.
- Pečenko, R., Svensson, S., Hozjan, T., Modelling heat and moisture transfer in timber exposed to fire, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 87, 598–605, 2015b.
- Richter, F., Rein, G., Pyrolysis kinetics and multi-objective inverse modelling of cellulose at the microscale, *Fire Safety Journal*, 91, 191–199, 2017.
- SIST, SIST EN 1995-1-2, Evrokod 5: Projektiranje lesenih konstrukcij – 1-2. del: Splošna pravila – Projektiranje požarnovarnih konstrukcij, 2005.
- Turner, I., Rousset, P., Rémond, R., Perré, P., An experimental and theoretical investigation of the thermal treatment of wood (*Fagus sylvatica* L.) in the range 200-260. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 715–725, 2010.