

Marija Riđošić*, Branko Pejović, Milorad Tomić,
Slavko Smiljanić

Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Tehnološki fakultet Zvornik,
Republika Srpska, BiH

Naučni rad

ISSN 0351-9465, E-ISSN 2466-2585

UDC:669.14/.15.001.573

doi:10.5937/ZasMat1701104R



Zastita Materijala 58 (1)
104 - 115 (2017)

Izračunavanje dubine oksidacije niskougleničnih čelika pri nestacionarnim uslovima uvođenjem fiktivnog vremena

IZVOD

Oksidacija kao neželjena pojava, koja je posebno izražena kod niskougleničnih čelika, nastaje na povišenim temperaturama usled hemijskog dejstva atmosfere. Tačno poznavanje debljine oksidacionog sloja je od velikog praktičnog značaja.

Cilj rada je da se postojeći postupak za izračunavanje dubine oksidacije, koji važi za stacionarno, iskoristi za nestacionarno područje. Pri tome, nestacionarno područje krive zagrevanja podjeljeno je na veći broj segmenata kod kojih su za proračun merodavne odgovarajuće srednje temperature, koje su definisane u radu. Da bi se kod narednog segmenta uzeo učinak oksidacije prethodnog segmenta uvedeno je fiktivno vreme, s obzirom na temperaturu narednog segmenta. Pri izvođenju glavne relacije, pošlo se od pojedinačnih, odnosno posebnih rešenja i na bazi tih rešenja postavljeni su zakoni za opšta rešenja postavljenog problema.

Predloženi model ilustrovan je na jednom praktičnom primeru gde je izračunata dubina oksidacije za karakteristični niskouglenični čelik pri atmosferskim uslovima, kako za nestacionarno tako i za stacionarno područje.

Ključne reči: izračunavanje dubine oksidacije, niskouglenični čelici, nestacionarni uslovi, fiktivno vreme

1. UVODNA RAZMATRANJA

Kod čelika, procesi termičke obrade obavljaju se na povišenim temperaturama u pećima raznih vrsta u kojima se nalazi gasovita atmosfera određenog sastava, tečno sredstvo za zagrevanje ili vakuum. U ovim slučajevima sredina u kojoj se vrši zagrevanje ima manji ili veći hemijski uticaj na površinu čelika. Ovo predstavlja utoliko veći problem ukoliko se procesi obavljaju na višim temperaturama [1,2]. Oksidacija površine je jedna od najvažnijih neželjenih pojava koja prati problem termičke obrade [2,3]. Prema nekim istraživanjima, od ukupne količine čelika koja se podvrgava termičkoj obradi 2-3% predstavlja gubitak usled procesa oksidacije [1,3,4]. Oksidacija ima veliki uticaj na povećanje obima poslova oko čišćenja površine posle termičke obrade, da bi se otklonili produkti oksidacije. Pored ekonomskog značaja, treba imati u vidu da će kao posledica oksidacije doći do pogoršanja mehaničkih osobina i skraćenja veka trajanja delova za 15-20% [2,5].

Uticaj atmosfere peći na čelične proizvode istražuje se jako dugo. Tražena su bolja rešenja od postojećih postupaka. Pomenućemo pakovanje čeličnih delova u sanduke od sivog lima, regulisanje strujanja produkata sagorevanja u peći, a u savremenim rešenjima problem oksidacije površine se otklanja kontrolisanom atmosferom ili vakuumom [3,6].

Pri termičkoj obradi odvija se proces oksidacije metala, pa se zbog toga debljina oksidacionog sloja mora uzeti u obzir pre početka mašinske obrade. Tačno poznavanje debljine oksidacionog sloja na površini termički obrađenog čelika od velikog je značaja [4,7].

Glavni faktori koji utiču na oksidaciju površine čelika su [1,5,8]:

- hemijski sastav;
- temperatura procesa;
- vrsta čelika;
- vreme zagrevanja

Kod niskougleničnih čelika, sa sadržajem ugljenika ispod 0,3%, najveći značaj ima baš oksidacija površine [5,9,10]. Brzina oksidacije kod ugljeničnih čelika naglo raste sa porastom temperature [4]. Zagrevanje čelika u praksi najčešće

*Autor za korespondenciju: Marija Riđošić

E-mail: marija.r1504@gmail.com

Rad primljen: 10. 11. 2016.

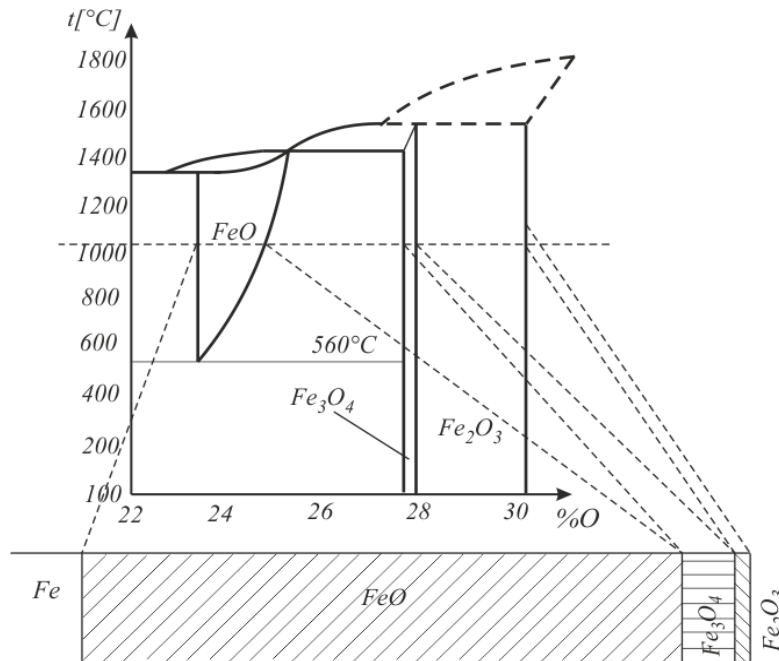
Rad prihvaćen: 19. 12. 2016.

Rad je dostupan na sajtu: www.idk.org.rs/casopis

se obavlja u vazdušnoj atmosferi, produktima sagorevanja, kao i toplim kupatilima sa rastopljenim solima [6,10].

Prema nekim ispitivanjima najpovoljnija atmosfera za niskouglenične čelike je primena mešavine

azota i vodonika koja sme da sadrži najviše 0,06% vlage [4,11]. Teorijske mogućnosti oksidacije čelika mogu se razmotriti na dijagramu ravnotežnih stanja gvožđe-kiseonik, prikazanom na slici 1. [3,12,13].



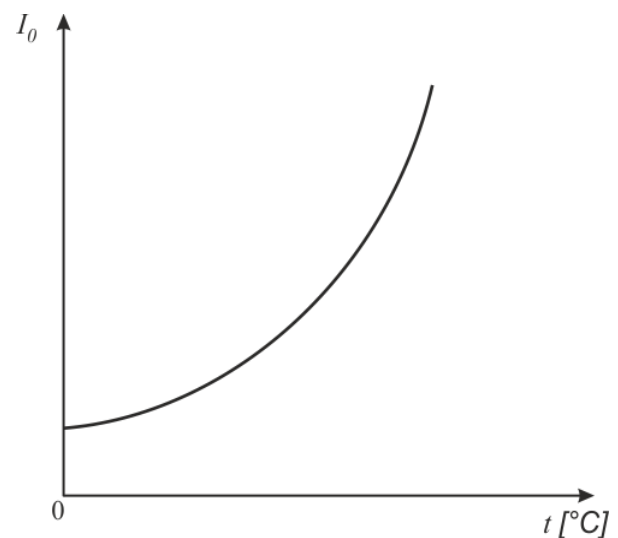
Slika 1. Dijagram stanja FeO
Figure 1. State diagram of FeO

Sa slike 1. se, pre svega, vidi da ispod 500 °C praktično nema opasnosti od oksidacije, jer se na ovim temperaturama može obrazovati samo tanki sloj oksida Fe_2O_3 koji se javlja na površini oksidnog sloja ili Fe_3O_4 koji se javlja ispod površinskog sloja. Na višim temperaturama od 570 °C prisutna su sva tri oksida: Fe_2O_3 , Fe_3O_4 i FeO , čije su debljine približno u odnosu 1:10:100, što pokazuje da najbrže nastaje oksid FeO [1, 4, 14].

Do naglog ubrzanja procesa oksidacije posle prekoračenja temperature 570 °C dolazi zbog nastajanja oksida FeO , što teče vrlo brzo [7,15-17]. Proces oksidacije je samo na početku čisto hemijska reakcija čiji je produkt čvrst oksid koji se nalazi na površini komada. Prisustvo ovog sloja prouzrokuje u daljem procesu pojavu difuzije bilo kiseonika ka gvožđu bilo gvožđa kroz oksidni sloj. Najčešći slučaj je difuzija gvožđa [9,11,18,19].

Za slučaj da oksidni sloj nije kompaktan, to se kroz pukotine u sloju pa tada može nastaviti direktna hemijska reakcija. Međutim, oksidacija čelika u najvećoj meri zavisna od brzine difuzionog procesa [2,8,20].

Uticaj temperature na tok oksidacije prikazan je na slici 2. U ovom slučaju intenzitet oksidacije raste sa porastom temperature komada [7,10,15].



Slika 2. Zavisnost intenziteta oksidacije od temperature
Figure 2. Influence of temperature on oxidation intensity

2. DUBINA OKSIDACIJE ZA STACIONARNO STANJE

Do dubine prodiranja oksidacije može se teorijski doći polazeći od diferencijalne jednačine difuzije:

$$\frac{\partial C_{AB}}{\partial \tau} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_A}{\partial x^2} \quad (1)$$

gde je: D_{AB} -koeficijent difuzije, τ - je vreme, C_A i C_{AB} - koncentracije komponenata [7,9]. Pri upotrebi jednačine (1) mora biti poznata promena temperature u funkciji vremena [15,21, 22].

Za slučaj izoternskog toka pri $t = \text{const}$, biće $D(\tau) = \text{const}$, pa se do rešenja dubine oksidacije $S = S(\tau)$ dolazi na relativno jednostavniji način [8, 16, 22].

Oksidacija čelika u najvećoj meri zavisi od brzine difuzionih procesa pri zagrevanju, usled hemijskog dejstva atmosfere, koju je neophodno držati pod kontrolom [6, 17, 23]. Za približno izračunavanje dubine oksidacije samo u zavisnosti od vremena, u teoriji i praksi često se koristi empirijski obrazac [8,12,18,24].

$$S = a\sqrt{\tau} + b\tau \quad (2)$$

Ovde su odvojena dva osnovna zbivanja od kojih zavisi brzina oksidacije. Prvi član sa desne strane jednačine uzima u obzir difuziju kroz oksidni sloj, a drugi kinetiku hemijske reakcije [19-21,25]. Koeficijent a u jednačini (2) zavisi od difuzije kroz oksidni sloj, a koeficijent b od kinetike hemijske reakcije.

Množitelji a i b zavise od stanja oksidnog sloja na površini čelika. Njihove vrednosti, najčešće se daju tabelarno za pojedine vrste čelika, zavisno od zavisno od temperature stacionarnog stanja t_{st} , tabela 1. [13,15,20,26].

Tabela 1. Tabela za određivanje koeficijenata difuzije kroz oksidni sloj i kinetike hemijske reakcije

Table 1. Table used for determination of diffusion coefficient through oxid layer and kinetic of chemical reaction

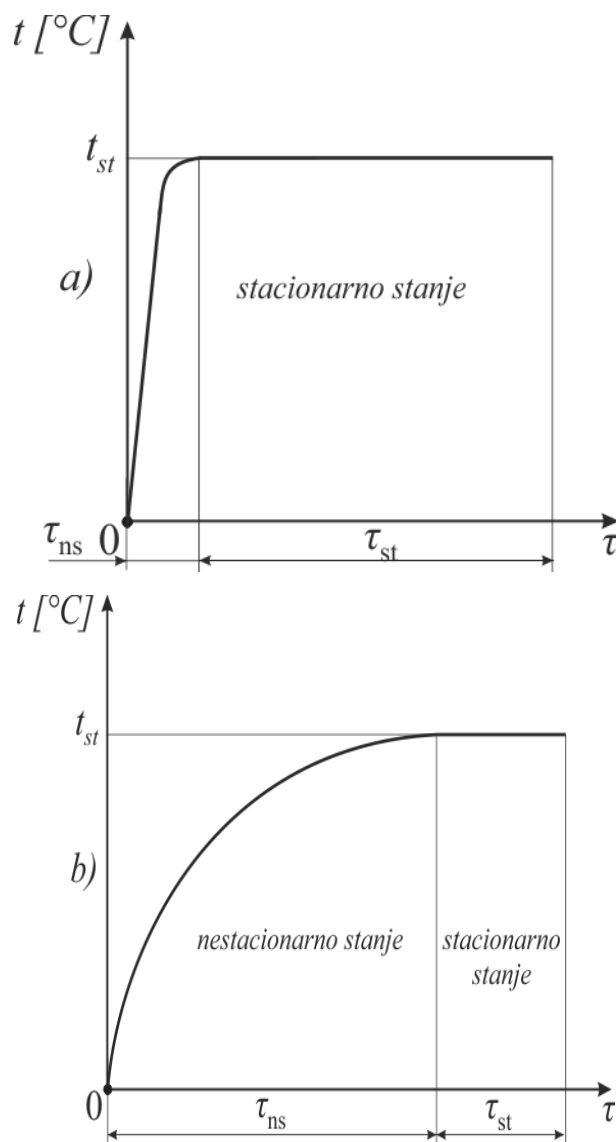
Množitelj	Temperatura t_{st} [°C]				
	t_1	t_2	t_3	t_{n-1}	t_n
a [mm/min] ^{-1/2}	a_1	a_2	a_3	a_{n-1}	a_n
b [mm/min] ⁻¹	b_1	b_2	b_3	b_{n-1}	b_n

Ova vrsta oksidacije pri $t = \text{const}$, u teoriji i praksi često se naziva izoternska oksidacija. Za slučaj da se uticaj nestacionarnog stanja može zanemariti (slika 3a), na dubinu oksidacije utiče prvenstveno vreme trajanja stacionarnog stanja τ_{st} , koja se može odrediti prema (2) kao:

$$S_{st} = a\sqrt{\tau_{st}} + b\tau_{st} \quad (3)$$

gde se a i b određuju prema stacionarnoj temperaturi t_{st} , tabela 1. [11,18,21,23,27].

Treba zapaziti, prema (2) da dubina oksidacije raste sa porastom vremena zagrevanja τ , dok uticaj temperature obuhvataju konstante a i b . U praksi, češće se sreće slučaj prikazan na slici 3.b kada se uticaj nestacionarnog stanja, zbog veće dužine trajanja, ne može zanemariti [11,14,24,28]. Očigledno za ovaj slučaj zbog $t \neq \text{const}$ tokom τ_{ns} , relacija (2) se ne može primeniti za određivanje dubine oksidacije. Ideja rada je da se jednačina (2) posle pogodne modifikacije primeni i za slučaj nestacionarnog stanja.



Slika 3. Dva karakteristična slučaja zagrevanja čelika u dijagramu $t = f(\tau)$

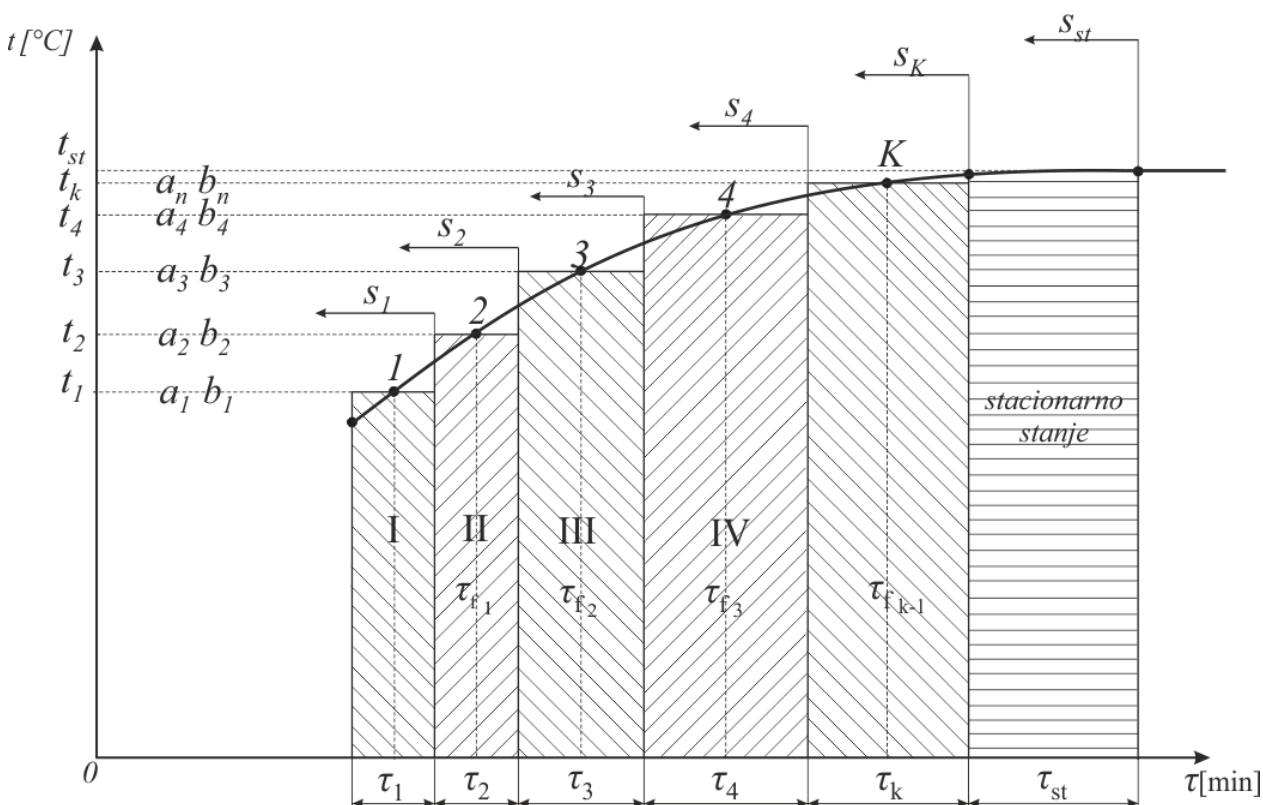
Figure 3. Two characteristic cases of steel heating in diagram $t = f(\tau)$

3. OPŠTI MODEL ZA REŠAVANJE PROBLEMA

Područje trajanja nestacionarnog zagrevanja podelimo na k segmenata $\tau_1, \tau_2, \tau_3, \tau_4, \dots, \tau_k$. Odgovarajuće temperature biće u tačkama na sredini svakog segmenta $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots, t_k$, što je prikazano na slici 4. Tačke 1, 2, 3, 4, ..., k su na sredini segmenta s obzirom da ako je uzet dovoljan broj segmenata, luk u segmentu se može aproksimirati sa pravom linijom, tako da odgovarajuće površine ispod luka i prave budu jednake. Ova aproksimacija zadovoljava za slučaj da segmenti nisu suviše veliki. Pri ovome, intervali segmenata

τ_k u opštem slučaju ne moraju biti jednaki. Srednje temperature merodavne za proračun ($k=1, 2, 3, 4, \dots$) označene su sa t_k . Na ovaj način, dijagram zagrevanja $t = f(\tau)$ aproksimiran je tzv. „stubastim“ dijagramom koji je konstruisan na bazi odgovarajućih srednjih temperatura $t_k (k = 1, 2, 3, 4, \dots)$, kao što je prikazano na slici 4.

Završetak nestacionarnog stanja, određuje se grafički pri uslovu da porast temperature ne bude veći od $2-3 \text{ }^\circ\text{C}$ [23,25,29].



Slika 4. Kriva zagrevanja u dijagramu $t = f(\tau)$ podeljena na odsečke u nestacionarnom području

Figure 4. Warming curve in diagram $t = f(\tau)$ divided into segments in non-stacionary area

Prema tome, za stacionarno stanje je temperatura $t_{st} = \text{const}$ dok je τ_{st} vreme trajanja stacionarnog zagrevanja i ono se obično zadaje.

Na slici 4. sa $S_k (k=1, 2, 3, 4, \dots)$, označene su dubine oksidacije na kraju posmatranog segmenta. Isto tako fiktivna vremena $\tau_{f_{k-1}} (k=1, 2, 3, 4)$ označena su na onom segmentu kod koga se koristi za proračun dubine oksidacije odnosno na koju srednju temperaturu se odnose. Množitelji a_k, b_k odnose se na srednje temperature $t_k (k=1, 2, 3, 4)$ posmatranih segmenata. Za prvi interval,

odnosno na kraju prvog intervala, dubina oksidacije biće prema jednačini (2):

$$S_1 = a_1 \sqrt{\tau_1} + b_1 \tau_1 \quad (4)$$

Prvi segment krive zagrevanja pri proračunu dubine oksidacije dat je na slici 5. gde je τ_1 vreme trajanja prvog (I) segmenta, dok se množitelji a_1 i b_1 uzimaju za srednju temperaturu t_1 . Uvedimo fiktivno vreme τ_{f_1} pri kome će dubina oksidacije biti jednaka S_1 , ali pri srednjoj temperaturi drugog (II)

segmenta t_2 . S obzirom na prethodno, prema (4) sledi da je:

$$a_1\sqrt{\tau_1} + b_1\tau = a_2\sqrt{\tau_{f_1}} + b_2\tau_{f_1} \quad (5)$$

Fiktivno vreme u (5) τ_{f_1} , odredićemo uvođenjem smene

$$\sqrt{\tau_{f_1}} = x^2 \rightarrow \tau_{f_1} = x^4 \quad (6)$$

Odnosno prema (5):

$$a_1\sqrt{\tau_1} + b_1\tau = a_2x^2 + b_2x^4 \quad (7)$$

odavde dobijamo jednačinu četvrtog stepena po x:

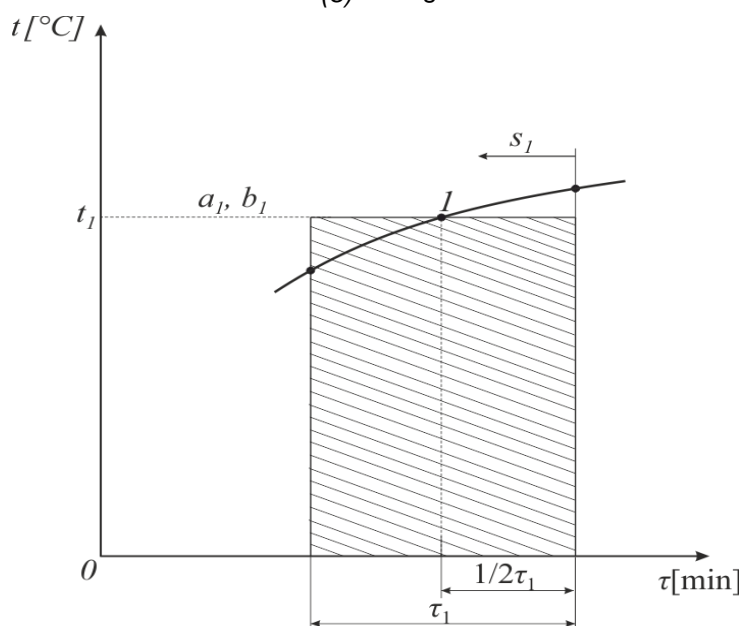
$$b_2x^4 + a_2x^2 - a_1\sqrt{\tau_1} - b_1\tau = 0 \quad (8)$$

čije je rešenje:

$$x^2 = \frac{-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 + 4b_2 \cdot (a_1\sqrt{\tau_1} + b_1\tau)}}{2b_2} = \sqrt{\tau_{f_1}} \quad (9)$$

$$\tau_{f_1} = \frac{\left[-a_2 \pm \sqrt{a_2^2 + 4b_2 \cdot (a_1\sqrt{\tau_1} + b_1\tau)}\right]^2}{4b_2^2} \quad (10)$$

U relaciji, množitelji a_2, b_2 određuju se za temperaturu narednog (drugog (II) intervala) t_2 . Zbog ovoga τ_{f_1} je označena na ordinati drugog (II) segmenta.



Slika 5. Prvi segment krive zagrevanja pri proračunu dubine oksidacije
Figure 5. First segment of warming curve at calculation the depth of oxidation

Radi preglednijeg i jednostavnijeg proračuna dubine oksidacije u nestacionarnom području, u

tabeli 2., uneseni su svi neophodni parametri za svaki segment, uključujući i fiktivno vreme τ_f .

Tabela 2. Parametri za proračun dubine oksidacije u nestacionarnom području

Table 2. The parameters for calculation the depth of oxidation in non-stacionary area

Interval	1	2	3	4	k-1	k
Temperatura t_k	t_1	t_2	t_3	t_4	t_{k-1}	t_k
Vreme τ_k	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_{k-1}	τ_k
Fiktivno vreme τ_f	τ_{f_1}	τ_{f_2}	τ_{f_3}	τ_{f_4}	$\tau_{f_{k-1}}$	τ_{f_k}

Dubina oksidacije na kraju drugog (II) intervala S_2 , dobija se prema relaciji (2) gde se mora dodati izračunato fiktivno vreme τ_{f_1} . Razlog za ovo je

očigledan jer se mora dodati uticaj oksidacije tokom prvog intervala.

Odavde sledi da je:

$$S_2 = a_2 \sqrt{(\tau_2 + \tau_{f_1})} + b_2(\tau_2 + \tau_{f_1})$$

(11)

Fiktivno vreme τ_{f_1} u relaciji je poznato i određeno je prema (10). Množitelji a_2 , b_2 uzimaju se za temperaturu t_2 .

Kao i u prošlom slučaju, fiktivno vreme τ_{f_2} odnosi se na temperaturu t_3 . Uvođenjem dubine oksidacije prema (11) biće:

$$a_2 \sqrt{(\tau_2 + \tau_{f_1})} + b_2(\tau_2 + \tau_{f_1}) = a_3 \sqrt{\tau_{f_2}} + b_3 \tau_{f_2}$$

(12)

Odavde, fiktivno vreme τ_{f_2} biće:

$$\tau_{f_2} = \frac{\left[-a_3 \pm \sqrt{a_3^2 + 4b_3 [a_2 \sqrt{\tau_2 + \tau_{f_1}} + b_2(\tau_2 + \tau_{f_1})]} \right]^2}{4b_3^2}$$

(13)

Na isti način za treći interval biće:

$$S_3 = a_3 \sqrt{(\tau_3 + \tau_{f_2})} + b_3(\tau_3 + \tau_{f_2})$$

(14)

Odnosno nakon izjednačavanja relacije:

$$a_3 \sqrt{(\tau_3 + \tau_{f_2})} + b_3(\tau_3 + \tau_{f_2}) = a_4 \sqrt{\tau_{f_3}} + b_4 \tau_{f_3}$$

(15)

Odavde, fiktivno vreme, s obzirom na temperaturu t_4 :

$$\tau_{f_3} = \frac{\left[-a_4 \pm \sqrt{a_4^2 + 4b_4 [a_3 \sqrt{\tau_3 + \tau_{f_2}} + b_3(\tau_3 + \tau_{f_2})]} \right]^2}{4b_4^2}$$

(16)

Odavde se može izvesti opšti izraz za bilo koji segment odnosno odsečak:

$$\tau_{f_k} = \frac{\left[-a_{k+1} \pm \sqrt{a_{k+1}^2 + 4b_{k+1} [a_k \sqrt{\tau_k + \tau_{f_{k-1}}} + b_k(\tau_k + \tau_{f_{k-1}})]} \right]^2}{4b_{k+1}^2}$$

(17)

Iz prethodne analize, s obzirom na (16) sledi da će dubina oksidacije na kraju proizvoljnog k-tog intervala biti:

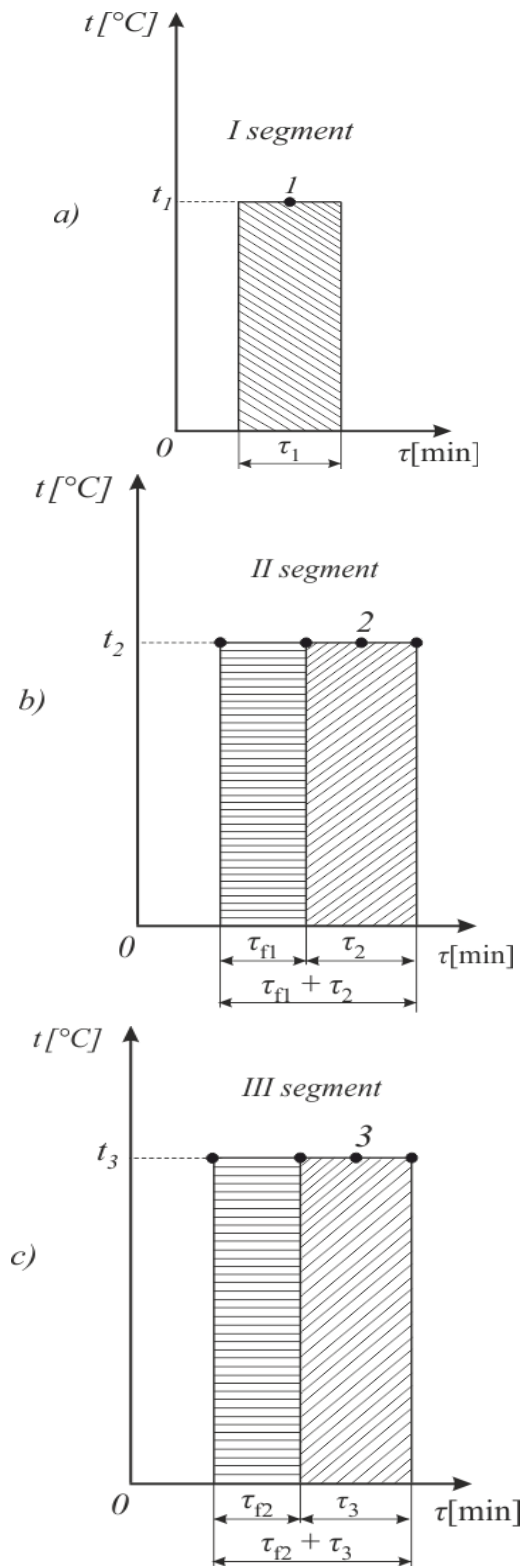
$$S_k = a_k \sqrt{(\tau_k + \tau_{f_{k-1}})} + b_k(\tau_k + \tau_{f_{k-1}})$$

(18)

Izvedene opšte zavisnosti (17) i (18) predstavljaju glavne relacije za rešavanje postavljenog problema izračunavanja dubine oksidacije ugljeničnih čelika u nestacionarnim uslovima. Na slici 6.,

za prva tri segmenta (I, II, III) prikazane su merodavne temperature i vremena za proračun dubine oksidacije S_1 , S_2 i S_3 za nestacionarno područje. Pri ovome uključeno je i odgovarajuće fiktivno vreme.

Treba zapaziti da se dubina oksidacije za prvi segment S_1 , određuje kao za slučaj stacionarnog stanja gde je merodavna srednja temperatura segmenta S_1 . Ovo je jedini segment gde se u proračunu ne uključuje fiktivno vreme.



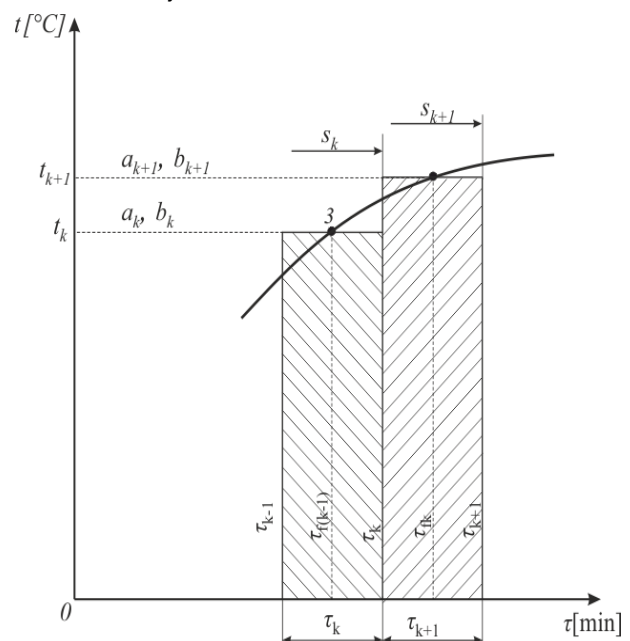
Slika 6. Odsecci krive zagrevanja za prvi, drugi i treći segment sa merodavnim fiktivnim vremenom
Figure 6. Parts of warming curve for first, second and third segment with applicable fictitious time

Kod proračuna dubine oksidacije drugog intervala S_2 uključuje se fiktivno vreme τ_{f_1} , kod prora-

čuna S_3 uključuje se τ_{f_2} itd., do poslednjeg segmenta. Prema tome, dubina oksidacije S_2 ostvaruje se pri temperaturi t_2 za fiktivno vreme τ_{f_1} , dubina oksidacije S_3 pri t_3 za τ_{f_2} itd., do kraja poslednjeg segmenta nestacionarnog stanja.

Na bazi prethodne analize, na slici 7. prikazani su u opštem slučaju parametri za proračun dubine oksidacije u dijagramu (t , τ) za slučaj nestacionarnog stanja.

Oznaka „k“ odnosi se na proizvoljni segment, a oznaka „k+1“ na sledeći, odnosno naredni, segment. Očigledno, oznaka S_k odnosi se na dubinu oksidacije na kraju k-tog segmenta. Napomenimo da kada bi se izvršilo direktno sabiranje dubine oksidacije svih segmenata, to ne bi odgovaralo realnom stanju.



Slika 7. Zamena krive zagrevanja segmentima, odnosno stubastim dijagramom u nestacionarnom području

Figure 7. Replacment of warming curve with segments, i.e. „column chart“ diagram

Za tačnija izračunavanja, posebno kada je usvojen manji broj segmenata, određivanje merodavne temperature t_{sr} za proračun može se izvesti prema definiciji srednje vrednosti funkcije. Neka je prema slici 8., $t = f(\tau)$ proizvoljna funkcija zagrevanja sa vremenskim intervalima $\tau_B - \tau_A$, sa odgovarajućim tačkama A-B na krivoj.

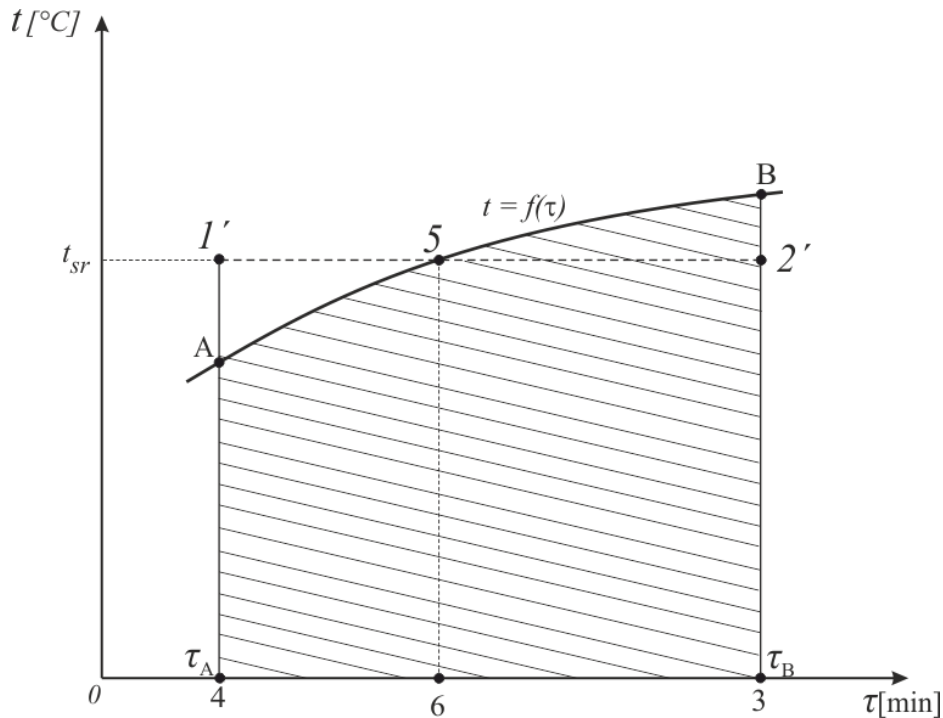
Pri ovome, uzima se da je površina ispod krive $t=f(\tau)$ na proizvoljnom segmentu A-B jednaka površini pravougaonika 1' 2' 3 4:

$$\int_{\tau_A}^{\tau_B} f(\tau) d\tau = t_{sr} \cdot (\tau_B - \tau_A) \quad (19)$$

$$t_{sr} = \frac{\int_{\tau_A}^{\tau_B} f(\tau) d\tau}{\tau_B - \tau_A} \quad (20)$$

gde su τ_A , τ_B vrednosti apscisa za krajnje tačke segmenta A i B. Merodavna temperatura prema (19) biće:

Sa geometrijskog aspekta prema slici 8. površine krivolinijske površine A15 i 5B2 su jednake.



Slika 8. Srednja vrednost funkcije $t=f(\tau)$

Figure 8. Average value of function $t=f(\tau)$

Pri ovome, zakon krive zagrevanja u (t, τ) dijagramu mora biti poznat i najčešće se uzima u obliku:

$$t = c_1 + c_2 e^{c_3 \tau} \quad (21)$$

$$\int_{\tau_A}^{\tau_B} f(\tau) d\tau = \frac{h}{3} (y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + \dots + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n) \quad (22)$$

Segmenti ovde moraju biti jednaki. Ako prema slici 9. Nestacionarno područje označimo krivom 1-2 onda dubinu oksidacije za ovo područje možemo izračunati sasvim približno, svođenjem problema na stacionarni slučaj, koristeći srednju temperaturu t_{sr} za ceo interval zagrevanja 1-2.

S obzirom na (19) ova temperatura biće:

$$t_{sr} = \frac{\int_{\tau_1}^{\tau_2} f(\tau) d\tau}{\tau_{ns}} \quad (23)$$

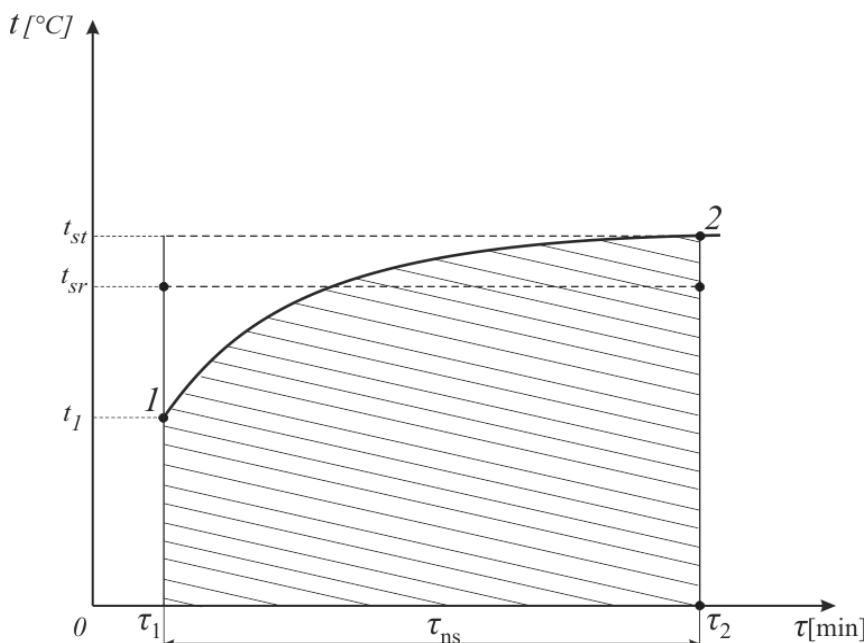
gde su c_1, c_2, c_3 konstante koje se određuju nekom od matematičkih metoda.

Do približnog rešenja integrala u jednačini (20) može se doći jednostavnije primenom grafičke metode preko Simpsonovog pravila. Pri ovome, segment se deli na određeni broj manjih delova, a ordinate se očitavaju direktno sa grafika:

Dubina oksidacije za ovaj slučaj prema (2) biće:

$$S_{ns} = a_{sr} \sqrt{\tau_{ns}} + b_{sr} \tau_{ns} \quad (24)$$

Pri ovome, za određivanje a_{sr} i b_{sr} merodavna je temperatura t_{sr} . Ovim postupkom, tačniji rezultati će se dobiti za slučaj da promene temperature u nestacionarnom području nisu suviše velike.



Slika 9. Približno određivanje dubine oksidacije za nestacionarno područje
Figure 9. Approximately determination of oxidation depth for non-stacionary area

4. RAČUNSKI PRIMER

Izračunaćemo debljinu oksidacionog sloja radnog predmeta od čelika Č.0545 (0,28% C), pri zagreivanju na stacionarnoj temperaturi $t_{sr}=1150$ °C i zadržavanju na ovoj temperaturi $\tau_{st}=15$ min. Zagreivanje se odvija u atmosferskim uslovima. Poznata je eksperimentalna određena kriva zagreivanja u dijagramu $t-\tau$ (temperatura – vreme) za zadate uslove i zadati čelik (slika 10.). Smatraćemo da su za zadate uslove poznati množitelji a i b za širi temperaturni interval.

a) Podela nestacionarnog područja na segmente

Polazeći od poznate krive zagreivanja u dijagramu $t=f(\tau)$, slika 10., celo nestacionarno područje podelili smo, npr. na 4 segmenta $\tau_1=7$ min, $\tau_2=8$ min, $\tau_3=12$ min, $\tau_4=12$ min tako da je ukupno vreme ovog područja:

$$\tau_{ns} = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 = 39 \text{ min}$$

Vreme stacionarnog područja je zadato, $\tau_{st}=15$ min.

Temperature u tačkama 1, 2, 3, 4 određene su približno grafički (tačke na sredini pojedinih područja).

b) Određivanje množitelja

U literaturi [2,10] za zadati čelik (oznake po ruskim standardima st.5, što odgovara čeliku po

našem standardu Č.0545), date su vrednosti za množitelje a i b za širi interval temperature $t=600-1200$ °C u razmaku od 100 °C.

Na osnovu ovih podataka za naš slučaj, prema tabeli 3, iz navedene literature interpolacijski su određene vrednosti množitelja koje odgovaraju srednjim temperaturama prema dijagramu na slici 10.

Tabela 3. Množitelji a i b za niskouglenični čelik Č.0545 (oznaka po ruskom standardu st.5)

Table 3. Multiplier a i b for low carbon-steel Č.0545 (simbol by Russian standard St.5)

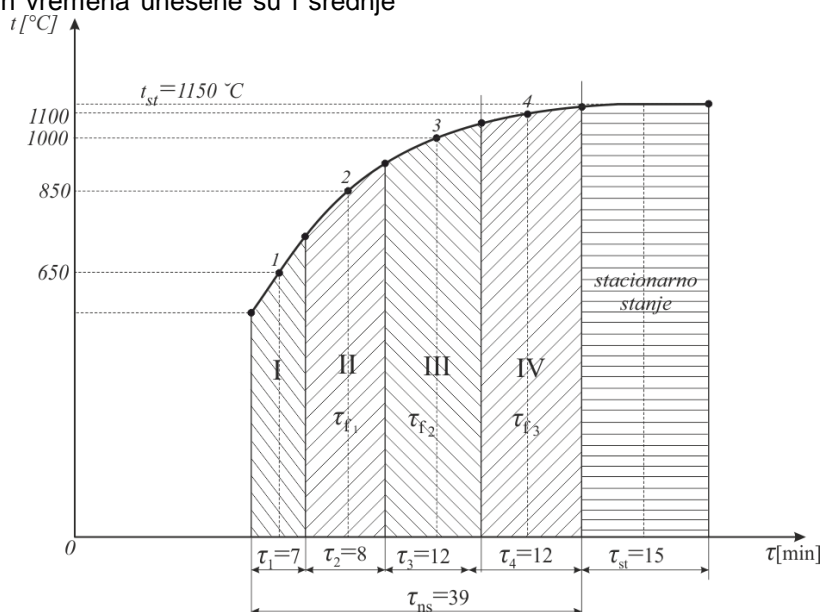
Množitelj	Temperatura [°C]				
	650	850	1000	1100	1150
a) $10^6[\text{mm}/\text{min}]^{1/2}$	3570	14760	23910	45150	68325
b) $10^6[\text{mm}/\text{min}]^{-1}$	75	340	2016	5940	7245

c) Proračun fiktivnog vremena

Prema relaciji (10) gde je $\tau_1=7$ min i množitelji $a_1=3570 \cdot 10^{-6} [\text{mm}/\text{min}]^{-\frac{1}{2}}$, $b_1=75 \cdot 10^{-6} [\text{mm} \cdot \text{min}]^{-1}$ za $t_1=650$ °C i $a_2=14760 \cdot 10^{-6} [\text{mm}/\text{min}]^{-\frac{1}{2}}$, $b_2=340 \cdot 10^{-6} [\text{mm} \cdot \text{min}]^{-1}$ za $t_2=850$ °C, izračunava se fiktivno vreme τ_{f_1} . Na isti način, vodeći računa o merodavnim tempera-

turama određena su ostala fiktivna vremena τ_{f_2} i τ_{f_3} , prema relacijama (13) i (16). U tabeli 4., pored izračunatih fiktivnih vremena unesene su i srednje

merodavne temperature i vremena τ_k za sve segmente, prema slici 9. Pri ovome nakon IV segmenta sledi stacionarno područje.



Slika 10. Kriva zagrevanja za računski primer podeljena na odsečke
Figure 10. Warming curve for exposed example divided on segments

Tabela 4. Parametri za određivanje dubine oksidacije za računski primer

Table 4. Parameters for determination of oxidation depth for exposed example

Interval	1	2	3	4	5
Temperatura [°C]	650	850	1000	1100	1150
Vreme τ_k [min]	7	8	12	12	15
Fiktivno vreme τ_f [min]	1,75	5,40	10,62	-	-

Treba zapaziti da je fiktivno vreme određeno zaključno sa predposlednjim odnosno III segmentom.

d) Izračunavanje dubine oksidacije nestacionarnog područja

Dubina oksidacije u nestacionarnom području je jednaka dubini oksidacije poslednjeg odnosno četvrtog područja nestacionarnog stanja:

$$S_{ns} = S_4 = a_4 \sqrt{(\tau_4 + \tau_{f_5})} + b_4 (\tau_4 + \tau_{f_5}) = 0,11 \text{ mm}$$

Ovde je $\tau_{f_5} = 10,62$ min, određeno prema (16)

dok je $\tau_4 = 12$ min. Množitelji prema tabeli 3. su:

$$a_4 = 45150 \cdot 10^{-6} [\text{mm}/\text{min}]^{-\frac{1}{2}}$$

i

$$b_4 = 5940 \cdot 10^{-6} [\text{mm} \cdot \text{min}]^{-1}$$

za temperaturu $t_4 = 1100$ °C.

e) Izračunavanje dubine oksidacije stacionarnog područja

Za izračunavanje dubine oksidacije u stacionarnom području, stacionarna temperatura je određena prema dijagramu na slici 10., $t_{st} = 1150$ °C. Stacionarno vreme je zadato i iznosi $\tau_{st} = 15$ min. Dubina oksidacije u stacionarnom području izračunava se jednostavno:

$$S_{st} = a_{st} \sqrt{\tau_{st}} + b_{st} \tau_{st} = 0,23 \text{ mm}$$

Prema tabeli 3. za temperaturu t_{st} , množitelji su:

$$a_{st} = 68325 \cdot 10^{-6} [\text{mm}/\text{min}]^{-\frac{1}{2}}$$

j

$$b_{st} = 7245 \cdot 10^{-6} [\text{mm} \cdot \text{min}]^{-1}$$

f) Ukupna dubina oksidacije

Ova dubina je jednaka zbiru oksidacije za nestacionarno i stacionarno područje:

$$S = S_{ns} + S_{st} = 0,11 + 0,23 = 0,34 \text{ mm}$$

5. ZAKLJUČAK

Dobijeno opšte rešenje za izračunavanje dubine oksidacije niskougličnih čelika, zbog aproksimacije krive zagrevanja „stubastim“ dijagramima je približno, ali u mnogim slučajevima u praksi može biti primenjeno. Tačnost rešenja se može povećati usvajanjem većeg broja segmenata „stubova“, ali je tada vreme računanja duže.

Pri praktičnoj primeni modela, radi preglednosti i praćenja rezultata, odnosno inženjerskog pristupa problemu, treba sprovoditi uporedo grafički i tabularni prikaz veličina. Radi jednostavnijeg rešavanja problema uvedeno je fiktivno vreme, koje se pokazalo efikasno kod rešavanja postavljenog problema.

Pri primeni modela određuje se dubina oksidacije samo za poslednji segment, dok se fiktivno vreme mora odrediti za svaki segment, s obzirom da ono uzima u obzir učinak oksidacije prethodnih segmenata. Pri ovome odabrana vremena segmenata τ_k , ne moraju biti jednaka, što olakšava proračun.

S obzirom da je predloženi model opšteg karaktera, to je isti pogodan za izradu računskog programa čijom bi se primenom analize i vreme računanja znatno skratili. Na ovaj način, mogao bi se uvesti u proračun proizvoljan broj segmenata i tako izvršiti analiza uticaja broja segmenata na tačnost dobijenih rezultata.

Tačnost dobijenih rezultata prvenstveno zavisi od tačnosti konstruisanja krive zagrevanja i tačnosti određivanja množitelja a i b , koji se eksperimentalno određuju za pojedine čelike.

Prikazana metoda na bazi uvođenja fiktivnog vremena, postavljeni složeni problem izračunavanja dubine oksidacije rešava na relativno jednostavan način. S obzirom da se oksidacija kod čelika javlja u intervalu 550-1200 °C, to je prema predloženom modelu za proračun dubine oksidacije dovoljno uzeti 6-7 segmenata u razmaku od 100 °C. Množitelji a i b , u literaturi se obično određuju za isti temperaturni razmak. Za ovaj slučaj tačnost metode je najveća jer ne treba izvoditi interpolaciju.

Dobijeno rešenje, u odnosu na postojeće teorijsko rešenje, je znatno pogodnije i brže, a time i efikasnije za praktičnu primenu.

Rezultate računskog primera trebalo bi uporediti sa eksperimentalnim merenjima dubine oksidacije na konkretnom uzorku od niskougličnog čelika, pa bi prikazana metoda tako bila bolje ilustrovana i realnije procenjena.

6. LITERATURA

- [1] A.D. Assonov (2000) Tehnologija termičeskoj obrabotki detalej mašin, Moskva;
- [2] M.A.Balter (2003) Upročnenie detalej mašin, Mašinstroenie, Moskva;
- [3] M.A.Berništejn (2004) Termonohaničekaja obrabotka metalov i splavov I, II, Učpetgiz, Moskva;
- [4] E.Bickel (2004) Die metalischen Werkstoffe des Maschinenbaes, Shringer, Berlin;
- [5] C.E.Bleckmann (2010) Die Härtereie, Springer, Berlin;
- [6] R.W.Cahn (2011) Physikal Metallurgy, VTN, Amsterdam;
- [7] M.Sovilj (2004) Difuzione operacije, Tehnološki fakultet, Novi Sad;
- [8] U. Dehlinger (2008) Teoretische Metallkunde, Springer, Berlin;
- [9] R.E.Treybal (1981) Transfer Operations, 3. ED., International Student Edition, McGraw –Hill International Book Company, Tokyo;
- [10] A.P.Guljaev (2010) Termičeskaje obrabotka, Mašgiz, Moskva;
- [11] W. Hanfe (2012) Schenellstähle, München;
- [12] G.V. Karpenko (2000) Vlijanie difuzionih pokritij na pročnost stalnih izdelij, VŠ, Kiev;
- [13] G.A.Kašenko (2000) Osnovi metalovedenija, Mašgiz, Leningrad;
- [14] I.S.Kozlovskij (1995) Himiko-termičeskaja obrabotka šesteren, Mašinoskroenie, Moskva;
- [15] W.Ordinanz (1993) Introduction a la Trempe, Dunod, ParisRajces, V.B. Tehnologija himiko-termičeskoj obrabotki, Mašinstroenie, Moskva;
- [16] R.E.Reed-Hill (2010) Physical Metallurgy Principles, New York;
- [17] B. Zakhorow (1990) Heat Treatment of Metals, Mašgiz, Moskva;
- [18] R. P. Šubin (1988) Tehnologija i oborudovanie termičeskoga ceha, Mašgiz, Moskva;
- [19] S. A. Filinov (1987), Sprovočnik Termiska, Mašinoskroenie, Moskva;
- [20] R.Bunker, J.Bailey (2001) Effect of Squealer Cavity Depth and Oxidation on Turbine Blade Tip Heat Transfer, ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air Volume 3: Heat Transfer; Electric Power; Industrial and Cogeneration, New Orleans, Louisiana, USA, June 4–7;
- [21] X.Liao, D.Zhao, X.Yan (2011) Determination of potassium permanganate demand variation with depth for oxidation–remediation of soils from a PAHs-contaminated coking plant, Journal of Hazardous Materials, 193, 164–170;
- [22] Y.Li, T.Qiu (2007) Oxidation behaviour of boron carbide powder, Materials Science and Engineering, 444(1–2), Pages 184–191;
- [23] D. Blowes, E.Reardon, J. Jambor, J. Cherry (1991) The formation and potential importance of cemented layers in inactive sulfide mine tailings, Geochimica et Cosmochimica Acta, 55(4), 965-978;

- [24] C.S.Liu, S.N.Atluri (2009) A Fictitious Time Integration Method for the Numerical Solution of the Fredholm Integral Equation and for Numerical Differentiation of Noisy Data, and Its Relation to the Filter Theory, CMES, 41(3), 243-261;
- [25] E.Egorian, S.Kalitzin (1983) A superfield formulation of stochastic quantization with fictitious time, Physics Letters B, 129(5), 320-322;
- [26] C.S.Liu, S.N.Atluri (2008) A Fictitious Time Integration Method (FTIM) for Solving Mixed Complementarity Problems with Applications to Non-Linear Optimization, CMES, 34(2), 155-178;
- [27] M.S.Hashemi, D.Baleanu (2016) Numerical approximation of higher-order time-fractional telegraph equation by using a combination of a geometric approach and method of line, Journal of Computational Physics, 316, 10–20;
- [28] L.Sun, W.Chen, A.H.D.Cheng (2016) Method of fundamental solutions without fictitious boundary for plane time harmonic linear elastic and viscoelastic wave problems, Computers & Structures, 162, 80–90.

ABSTRACT

CALCULATION OF OXIDATION DEPTH IN LOW-CARBON STEEL UNDER NON-STATIONARY CONDITIONS BY INTRODUCING A FICTITIOUS TIME

Oxidation as an undesired phenomena particularly evident in and significant for low-carbon steel, occurs at elevated temperatures due to the chemical effects of the atmosphere. The exact information about the thickness of the oxidation layer has a great practical importance.

The aim of this paper is to take the existing process for calculating the depth of oxidation, which is valid for a stationary area, and use it for a non-stationary area. The non-stationary area of the heating curve is divided into a number of segments in which medium temperatures are relevant. These medium temperatures were defined in the paper. In order to use the effect of oxidation of the previous segment on the proceeding segment, a fictitious time was introduced, considering the temperature of the next segment. In the process of calculating the main relation, the starting point were individual, specific solutions, based on which we obtained the general solutions for the problem.

The proposed model was illustrated using a suitable example where the depth of oxidation was determined for a typical low-carbon steel under atmospheric conditions, both for the stationary and for the non-stationary area.

Keywords: *calculating the depth of oxidation, low-carbon steels, non-stationary conditions, fictitious time.*

Scientific paper

Paper received: 10. 11. 2016.

Paper accepted: 19. 12. 2016.

Paper is available on the website: www.idk.org.rs/journal