

Razvoj indukcijsko segrevane laboratorijske peči za toplotno obdelavo v zvrtničeni plasti

Development of an Induction Heating Laboratory Furnace for Heat Treatment in a Fluidized Bed

Leskovšek Vojteh, IMT-Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Ljubljana
A. Paulin, T. Kolenko, FNT-VTOZD Montanistika, Ljubljana

Vrtinčenje je tehnika, pri kateri se plast suhih med seboj neodvisno gibajočih se delcev Al_2O_3 obnaša podobno kot tekočina, pri čemer so zaradi gibanja plina posamezni delci mikroskopsko razmaknjeni. To dosežemo s tokom plina, npr. N_2 , skozi plast delcev. V članku so predstavljeni rezultati razvoja indukcijsko segrevane laboratorijske peči za toplotno obdelavo v zvrtničeni plasti. Hladno peč smo segrevali na temperaturo 900–1000°C s hitrostjo 30°C/min, pri čemer smo uporabljali ročno krmiljenje. Delovno temperaturo smo vzdrževali v predvidenem območju ročno, s pomočjo krmilne omarice. Izenačenost temperature po prerezu peči je $\pm 5^\circ C$. Največji koeficient toplotnega prenosa, ki smo ga dosegli v zvrtničeni plasti v laboratorijski peči, je bil 300 W/m²°C. Uporaba N_2 za vrtinčenje se je pokazala kot zadovoljiva rešitev tudi za zaščitno atmosfero pred razogljčenjem pri 900°C. Funkcionalni preizkus indukcijsko segrevane laboratorijske peči za toplotno obdelavo v zvrtničeni plasti je potrdil, da smo dosegli osnovni namen t.j. hitro in enakomerno segrevanje potopljenega valjastega predmeta na temperaturo avstenitizacije.

Ključne besede: indukcijsko segrevanje, razogljčenje, toplotna obdelava, zaščitna atmosfera, zvrtničena plast.

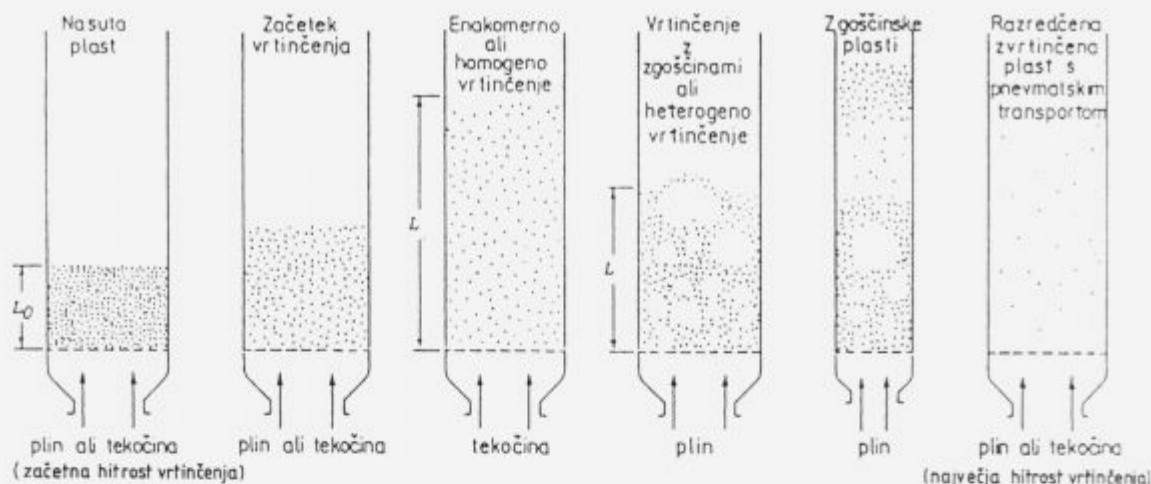
Fluidization is a technique of making a bed of dry finely dispersed particles, e.g. Al_2O_3 , to behave remarkably like a liquid in which individual particles are microscopically separated from each other by a moving gas. This is achieved by feeding a supporting gas, e.g. N_2 , up through the bed of particles. The paper presents the results of the development of an induction laboratory furnace with fluidized bed for rapid heat treatment of items. The cold furnace was heated to 900–1000°C with a heating rate of about 30°C/min and then set in to operation manually. The operating temperature was held in the specified range manually too through a control panel. The temperature difference across the cross section of the furnace was $\pm 5^\circ C$. The highest heat transfer coefficient of the fluidized bed which was achieved in the laboratory furnace was 300 W/m²°C. The application of N_2 as a supporting gas proved to be a suitable solution for protection against decarburisation at 900°C. An operational experiment of the induction laboratory furnace with a fluidized bed confirmed that basic purpose was achieved, i.e. rapid and uniform heating of an immersed cylindrical object up to the austenitization temperature.

Key words: decarburization, fluidized bed, heat treatment, induction heating, protection atmosphere.

1. Uvod

Tehnologija zvrtničene plasti ni nova tehnika, saj je bila opisana že v ameriškem patentu leta 1879, pri praženju mineralov v zvrtničeni plasti (1). V patentu je tudi že opisana značilna lastnost zvrtničene plasti in sicer, možnost doseganja enakomernih temperatur ($\pm 1^\circ C$) ter njena velika zmogljivost pri prenosu toplote.

Lastnost zvrtničene plasti je, da se plast zvrtničenih trdnih delcev obnaša tako kot tekočina, kar omogoča, da sistem lahko obravnavamo kot kvazitekočinsko stanje. Plinske zvrtničene plasti smatramo za zvrtničene plasti, dokler izhajajoči delci tvorijo zgornjo raven ali površino plasti. Pri dovolj velikem toku plina, ko prekoračimo največjo hitrost vrtinčenja, površina plasti izgine, tok snovi postane znaten, kar pomeni, da plin odnaša



Slika 1. Osnovni tipi zvrtnjenih plasti (1)

Figure 1. Various types of contacting in fluidized beds (1)

delce iz plasti. V tem stanju imamo razredčeno zvrtnjeno plast s pnevmatskim transportom delcev.

Osnovni tipi zvrtnjenih plasti so prikazani na sliki 1.

Pri veliki večini zvrtnjenih plasti, ki jih uporabljamo za toplotno obdelavo, uporabljamo tip vrtnčenja z zgoščinami.

Čeprav posamezne lastnosti delca in plina določajo kakovost vrtnčenja, npr. ali se bo pojavilo enakomerno, ali zgoščitinsko vrtnčenje, lahko še drugi dejavniki vplivajo na mešanje delcev, velikost mehurjev v plasti in obseg heterogenosti v plasti. Ti dejavniki so geometrija plasti, tok plina, vrsta rešetke in notranji deli retorte, kot so zaslonke, lovilniki prahu in toplotni izmenjevalniki.

2. Teoretični del

2.1. Geometrija in hidrodinamika nasute plasti

Osnovni značilnosti nasute (mirujoče) plasti sestavljene iz zrn sta njena prepustnost in specifična površina. Ta parametra zavisita od pravilnosti zloga, razmerja med dimenzijami delcev in posode, v kateri se nahaja plast ter faktorjev oblike.

Poroznost plasti, ϵ , pomeni delež praznin med delci, skozi katere se lahko pretaka tekočina ali plin. Poroznost zavisi od oblike delcev, stanja njihove površine, značilnosti zloga in ni odvisna od absolutne velikosti geometrijsko podobnih elementov plasti.

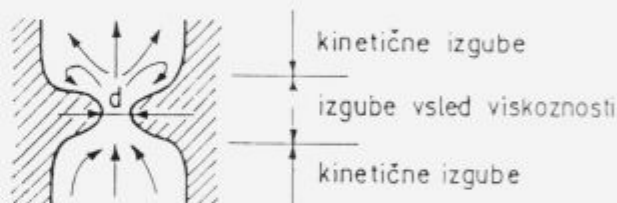
Pretok kapljevini skozi cevi je teoretično in eksperimentalno dobro obdelan. Če si zamislimo poroznost nasute plasti kot snop vzporednih cevi, katerih prerez je nepravilen in se po dolžini spreminja, lahko z modelom na osnovi hidravličnega polmera in ekvivalentnega premera uporabimo zakonitosti, ki veljajo za pretok kapljevini skozi cevi, tudi za tok skozi nasuto plast (1-4). Znižek tlaka pri toku plinov in tekočin skozi nasuto plast lahko izrazimo, kot sledi:

$$-\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\eta \cdot v}{d_k^2} + 1,75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho \cdot v^2}{d_k} \quad (1)$$

Prvi člen na desni strani prejšnje enačbe predstavlja izgube tlaka zaradi viskoznosti tekočine, drugi člen pa kinetične izgube tlaka. Izgube tlaka zaradi viskoznosti nastopajo v zoženih delih pri prehodu plina iz enega vmesnega prostora v drugega, kinetične izgube, kjer je znižek tlaka posledica povečanja kinetične energije, pa nastopajo pri prehodih iz razširjenega v zoženi del in iz zoženega v razširjeni del. Posebno velike so izgube v drugem primeru, ker se tedaj tvorijo vrtinci v kapljevini, kar močno poveča lokalne hitrosti tekočine in s tem njeno kinetično energijo, slika 2.

526

Enačba (1) pove, da izgube zaradi viskoznosti znašajo 0,99 celotnih izgub tlaka pri $[N_{re}] p = 1$ za plasti s poroznostjo 0,35 in kinetične izgube znašajo 0,97 celotnih izgub pri $[N_{re}] p = 3000$, medtem ko sta pri $[N_{re}] p = 60$ oboji izgubi približno enaki. Delci mirujoče plasti niso nikoli zloženi v enakomernem pravilnem zlogu, celo pri plasteh sestavljenih iz enakomerno velikih krogel ne. Zaradi različne gostote zloga oziroma poroznosti tudi niha hitrost plina po prerezu okoli neke srednje vrednosti (1-4).



Slika 2. Shema izgub tlaka pri toku kapljevine skozi nasuto plast (2)

Figure 2. Schematically presented pressure losses in fluid flowing through a packed bed (2)

2.2. Hidrodinamika zvrtnjene plasti

Zvrtnjena plast nastane kadar trdni delci s tokom plina ustvarjajo suspenziji podobno stanje, ki se nahaja v določenem delu reaktorja (1,2).

Ko tok kapljevine skozi nasuto plast od spodaj navzgor narašča, dosežemo ravnotežno stanje, pri katerem postane upor sredstva enak težnostni sili plasti. Upor sredstva deluje navzgor, težnostna sila pa navzdol. Plast je spodaj podprta z mrežico ali rešetko, navzgor pa se lahko nemoteno širi, ko presežemo ravnotežno stanje.

V ravnotežnem stanju je:

$$[F_v = -F_g] \text{ plast} \quad (2)$$

kjer je F_v težnostna sila plasti

$$F_g = (\rho_s - \rho) A \cdot L \cdot (1 - \epsilon) \cdot g \quad (3)$$

F_v pa upor sredstva:

$$F_v = -A \cdot \Delta p \quad (4)$$

Predznak minus predstavlja delovanje sile navzgor. Če v zgornji enačbi izrazimo Δp iz enačbe 1, dobimo izraz

$$F_u = -A \cdot L \left[150 \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} \frac{\eta \cdot v}{d_k^2} + 1,75 \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \frac{\rho v^2}{d_k} \right] \quad (5)$$

Ko vstavimo enačbi 3 in 5 v enačbo 2 dobimo:

$$(\rho_s - \rho) g = \frac{150 (1-\epsilon)^2 \eta \cdot v}{d_k^2 \epsilon^3} + \frac{1,75 v^2}{d_k \epsilon^3} \quad (6)$$

Ker ravnotežno stanje velja tako za konec obstojnosti nasute plasti kot za začetek nastajanja zvrtni plasti, smo v zamenjali v_z za v_n , ki predstavlja začetno hitrost vrtnjenja. ρ_s pomeni gostoto delcev, ki tvorijo plast, in ρ je gostota kapljavine. Ko vrtnenje nastopi, je poroznost plasti blizu vrednosti za nasuto plast, t.j. 0,35 do 0,4. Z naraščanjem hitrosti toka kapljavine se večja poroznost plasti. In pri neki hitrosti se poroznost približa vrednosti 1. Delci so med seboj zelo ločeni in sorazmerno oddaljeni, plast je zelo razredčena. Zopet dosežemo ravnotežje sil, ki je meja med zvrtno plastjo in odnašanjem delcev s tokom kapljavine.

Hitrost kapljavine okoli delca je tedaj enaka največji hitrosti delca, ki bi padal skozi mirujočo kapljavino. Za okrogel delec je upor sredstva:

$$F_u = -\frac{C_u \pi \rho^2 v_n d_k^2}{8} \quad (7)$$

C_u je koeficient upora sredstva, odvisen od oblike trdnega telesa in je funkcija Reynoldsovega števila (2), v_n pa je največja možna hitrost vrtnjenja ali teoretična hitrost začetka odnašanja delcev.

Težnostna sila za posamezen okrogel delec pa je:

$$F_g = (\rho_s - \rho) g \frac{\pi d_k^3}{6} \quad (8)$$

Iz pogoja za ravnotežje sil:

$$[F_g = -F_u] \text{ delec} \quad (9)$$

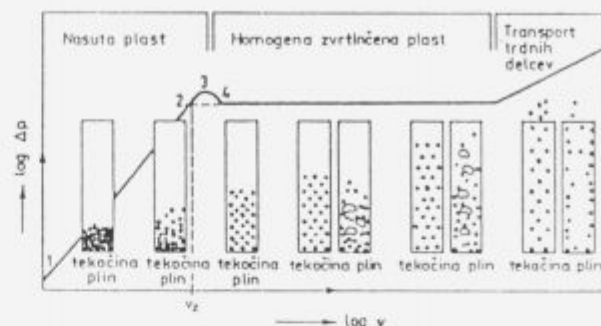
dobimo:

$$(\rho_s - \rho) g = \frac{3 C_u \rho v_n^2}{4 d_k g} \quad (10)$$

Odvisnosti C_u od N_{Re} ne moremo izraziti z enotnim matematičnim izrazom za celotno območje Reynoldsovih števil (2). Zato moramo v vmesnem področju med čistim laminarnim in čistim turbulentnim strujanjem, C_u določiti z metodo poskusa in napake (2).

Na ta način lahko določimo dve skrajni hitrosti, ki predstavljata območje obstojnosti zvrtni plasti. Poskusi so

pokazali, da je odvisnost med logaritmom poroznosti in logaritmom hitrosti toka kapljavine praktično linearna, kot to kaže slika 3.



Slika 4. Idealni znižek tlaka v nasuti in zvrtni plasti (3)

Figure 4. Idealized pressure drop versus gas velocity for a packed and fluidized bed of uniformly sized sand particles

Torej ko poznamo v_z in v_n , lahko ugotovimo obnašanje plasti pri vseh vmesnih hitrostih.

Tudi znižek tlaka je funkcija hitrosti toka kapljavine, kot kaže slika 4. Nad začetno hitrostjo vrtnjenja ostane teoretično znižek tlaka skoraj konstanten.

Zvrtna plast, ki jo vrtni tekočina, bo sledila črti na sliki 3 skoraj do poroznosti $\epsilon = 1$, zvrtna plast s plinom pa bo postala nestabilna in nehomogena že precej prej. Delci se bodo zbirali v zgoščine in plinski mehurji bodo potovali med gostejšimi deli plasti. To imenujemo heterogeno vrtnenje ali vrtnenje z zgoščinami. Prostornina plasti je večja kot pri navadni zvrtni plasti zaradi prisotnosti plinskih mehurjev.

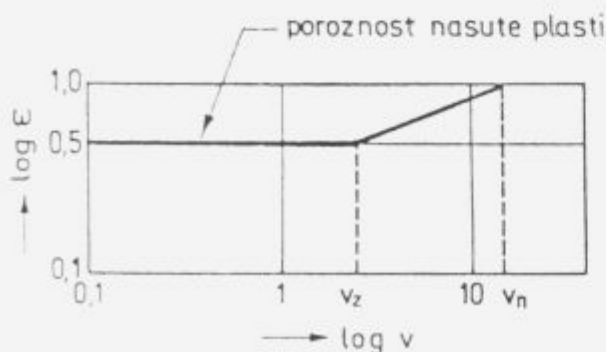
2.3. Prenos toplote v zvrtni plasti

Zelo ugodne lastnosti prenosa toplote v zvrtni plasti smo poudarili že v uvodu. Zaradi mešanja, ki ga povzroča dvigovanje mehurjev, dosežemo zelo enakomerno porazdelitev temperature v plasti. V primerih, kjer je zaželeno vzdrževanje temperature gradienta v reaktorju, pa le-tega še vedno lahko dosežemo s primerno porazdelitvijo plasti. V zvrtni plasti dosegamo dober prenos toplote med površino predmeta in zvrtno plastjo, kar dodatno olajšuje prenos toplote z zvrtni plasti na površino predmeta ali s predmeta v zvrtno plast. Pod ugodnimi obratovalnimi pogoji plinsko zvrtni sistem predstavlja enega najbolj zadovoljivih toplotnih sistemov, ne glede na to, da je bila pretekla zgodovina polna razočaranj. V praksi pa so navkljub ohrabrujočim laboratorijskim rezultatom dosegljivi koeficienti toplotnega prenosa (4), v primeru, ko je prenos toplote s sevanjem neznaten (pod 600°C), omejeni na okoli 400 W/m²C.

Pri temperaturah nad 600°C postane tudi prenos toplote s sevanjem pomemben v plinskem zvrtnem sistemu (4). Vrtnenje in hitro kroženje delcev v peči z zvrtno plastjo omogoča prenos toplote, ki ga lahko primerjamo s tistim, ki ga omogočajo solne ali svinčene kopeli. Koeficienti prenosa toplote zvrtni plasti so med 120 in 1200 W/m²C.

Vrtnenje in učinek hitrega kroženja delcev ter izjemno velika površina med trdno in plinsko fazo, pa je razloga za to odliko. Čeprav so bili predlagani različni modeli (4), ki obravnavajo načine prenosa toplote v zvrtni plasti, so le-ti uporabni z omejitvami, zato ker zahtevajo poznavanje parametrov, ki niso splošno veljavni za posamezna stanja.

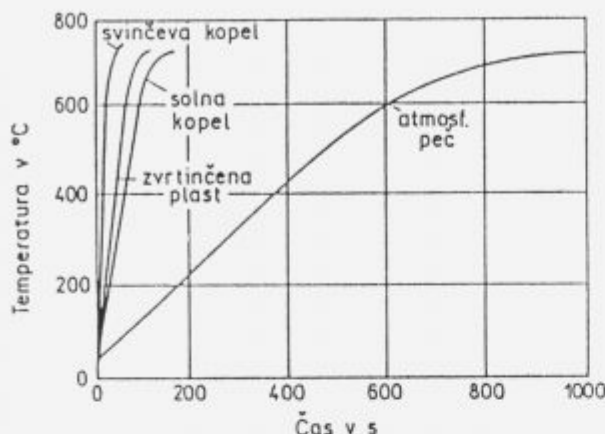
Podobno velja za mnoge empirične korelacije (4), ki se nanašajo na koeficiente prenosa toplote med plastjo in površino predmeta v območju obratovalnih pogojev. Njihova uporabnost je dvomljiva, ker ne upoštevajo dinamičnega obnašanja plinskega zvrtnega sistema.



Slika 3. Poroznost zvrtni plasti (2)

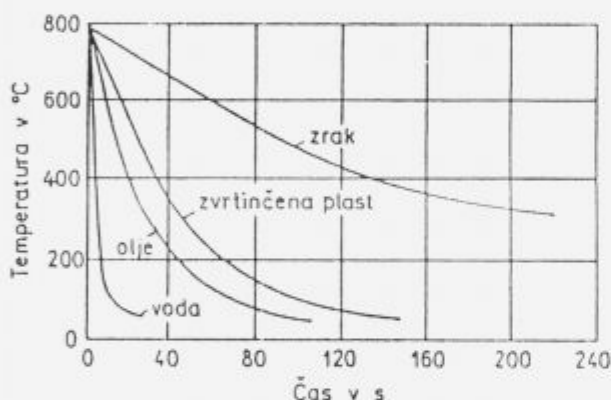
Figure 3. Porosity of fluidized bed (2)

Relativne intenzivnosti segrevanja 16 mm jeklene palice v solni kopeli, svinčeni kopeli, v zvrtnični plasti in v konvencionalni peči so prikazane na **sliki 5** (5).



Slika 5. Relativna intenzivnost segrevanja 16 mm jeklenih palic v solni kopeli, svinčeni kopeli, v zvrtnični plasti in v konvencionalni peči (5)

Figure 5. Heating rates for 16 mm diameter steel bars in lead, in salt baths, in a fluidized bed and in a conventional furnace (5)



Slika 6. Relativne intenzivnosti ohlajanja 16 mm jeklenih palic na zraku, v olju, vodi in v zvrtnični plasti (5)

Figure 6. Quenching rates for 16 mm diameter steel bars in air, in oil, in water and in a fluidized bed (5)

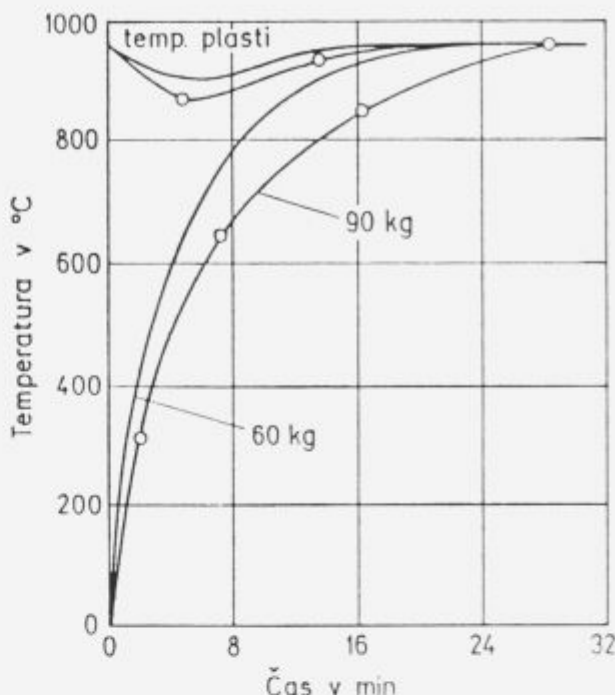
Relativne intenzivnosti ohlajevanja 16 mm jeklene palice na zraku, v olju, vodi in v zvrtnični plasti pa so prikazane na **sliki 6** (5).

Plinski zvrtnični sistem torej predstavlja "fluid" z veliko toplotno kapaciteto in izredno majhnim parnim tlakom, to je lastnost, ki je v preteklosti niso dovolj upoštevali in izbrali.

2.4. Princip indukcijskega segrevanja

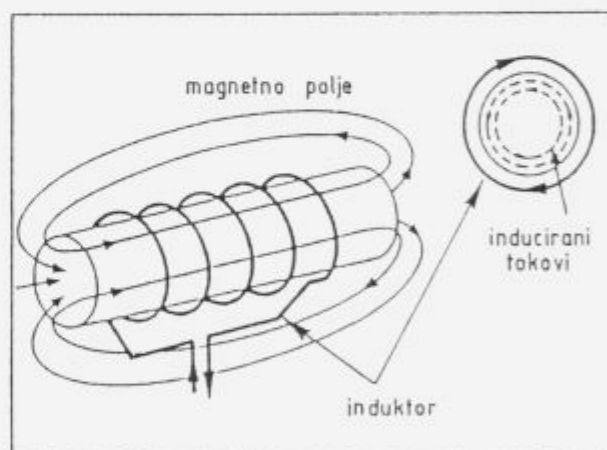
Pri indukcijskem segrevanju (6) hkrati izrabljamo zakon o indukciji – Lenz-ov zakon in joulsko toploto. Induktor, po katerem teče izmenični tok, povzroča izmenično magnetno polje **slika 8**. V skladu z Lenz-ovim zakonom se v vseh električnih prevodnikih, ki se nahajajo v izmeničnem magnetnem polju, inducira napetost, ki požene inducirane tokove skozi ta prevodnik. Pri njihovem kroženju, ti inducirani tokovi vzbudijo Foucaultove tokove, pri čemer se v samem prevodniku sprošča joulska toplota.

Induktor ter del, ki ga segrevamo, sta v načelu primerljiva s transformatorjem. Ni nujno, da je induktor tuljava, zato ker izmenični tok, ki teče po prevodniku povzroča izmenično magnetno polje H^{ind} , katero vzbudi inducirane tokove v drugem prevodniku, ki je v bližini.



Slika 7. Intenzivnost segrevanja in čas, ki je potreben, da zvrtnična plast ponovno doseže začetno temperaturo pri 60 in 90 kg vložku (5)

Figure 7. Recovery rates for 25 mm diameter steel items in a 0.3 m³ fluidized bed (5)



Slika 8. Princip indukcijskega segrevanja (6)

Figure 8. Principle of induction heating (6)

Pri induktivnem segrevanju reaktorja izrabljamo tri fizikalne pojave, ki sledijo drug drugemu:

- prenos energije induktorja na steno reaktorja z elektromagnetnim valovanjem;
- pretvorba električne energije v toploto s sproščanjem joulske toplote v steni reaktorja;
- prenos toplote s prevajanjem v steni reaktorja.

Bistvene prednosti indukcijskega segrevanja stene reaktorja so:

- ustvarjanje toplote v steni reaktorja;
- majhna toplotna vztrajnost (velika prožnost);
- velika gostota moči (hitrost segrevanja).

Pri indukcijskem segrevanju bo imela stena reaktorja, ki jo segrevamo, mnogo višjo temperaturo kot izvor, če primerjamo s klasičnim segrevanjem.

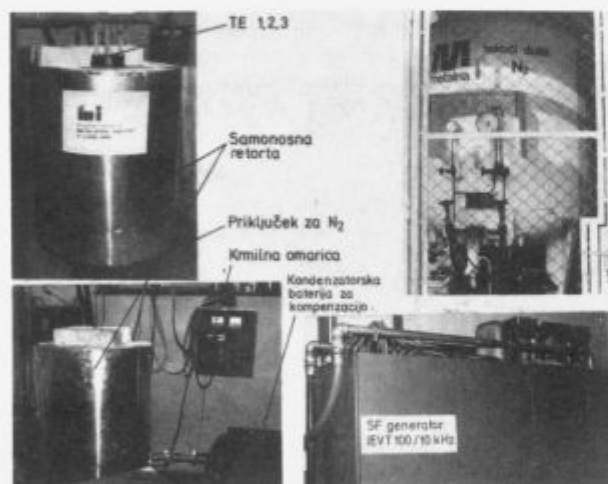
3. Eksperimentalni del z rezultati

3.1. Izdelava laboratorijske peči za toplotno obdelavo v zvrtni plasti

Pri načrtovanju laboratorijske peči za toplotno obdelavo v zvrtni plasti, ki smo jo izdelali na IMT, smo morali zadovoljiti sledečim osnovnim zahtevam:

- izdelati retorto iz ognjevarnega jekla, ki bo zadovoljil tako mehanskim (segrevanje do 1200°C), kot električnim zahtevam (indukcijsko segrevanje reaktorja);
- izdelati rešetko, ki bo zadostila vsem tehnično tehnološkim zahtevam;
- skonstruirati in izvesti dovod in regulacijo plina N_2 , ki bo omogočil vrtnjenje in bil istočasno kot zaščitna atmosfera pri segrevanju do 1000°C;
- izdelati induktor, priključek in krmilno omaro za segrevanje reaktorja s pomočjo SF generatorja IEVT 100 KVA/10 kHz;
- izbrati ustrezen ognjevarni material za zalitje induktorja in izbrati vrsto toplotne izolacije za reaktor;
- pripraviti ustrezno hlajenje induktorja in generatorja;
- izbrati vrsto materiala in optimalno velikost zm, ki sestavljajo zvrtno plast.

Na osnovi teoretičnih predpostavk in izračunov (7), smo izdelali indukcijsko segrevano laboratorijsko peč za toplotno obdelavo v zvrtni plasti **slika 9**.



Slika 9. Indukcijsko segrevana laboratorijska peč za toplotno obdelavo v zvrtni plasti

Figure 9. Induction heated laboratory furnace for heat treatment in a fluidized bed.

Laboratorijska peč za toplotno obdelavo v zvrtni plasti je sestavljena iz samonosnega reaktorja z notranjim premerom 165 mm, višino 1000 mm in debelino stene 6,3 mm, ter priključka za plin.

Induktor, dolžine 700 mm in premera 220 mm, z 19 ovoji je zalit v aluminatni cement, ter priključen preko kondenzatorske baterije za kompenzacijo na srednjefrekvenčni generator IEVT 100 KVA/10 kHz. Zunanji izolacijski plašč je izdelan iz vlaknatega ognjevarnega materiala na osnovi Al_2O_3 ter obdan z aluminijemski pločevinski ohišjem.

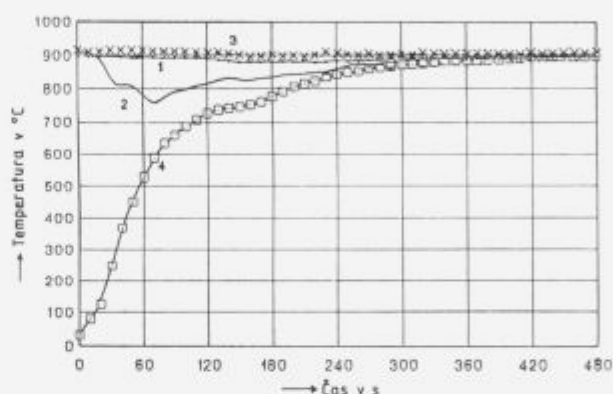
Za merjenje temperature v zvrtni plasti smo uporabili termo element NiCrNi po DIN 4370, za merjenje pretoka N_2 pa rotameter Fisher-Porter (4,1 m³PV/h; 760 mm Hg; 20°C).

N_2 z deležem O_2 pod 10 ppm, shranjen v rezervoarju za tekoči dušik s tlakom 16 barov, ki ga poljubno krmilimo preko reducirnega ventila Messer-Griesheim v območju 0-16 barov,

smo uporabili za vrtnjenje plasti in za zaščitno atmosfero do 1000°C.

3.2. Preiskus toplotne obdelave v zvrtni plasti

Preiskus toplotne obdelave smo opravili s palicami ϕ 16 x 540 mm iz jekla za poboljšanje Č 1630. Temperaturo palice smo merili v jedru s termoelementom NiCrNi. Glede na to, da jekla Č 1630 ni potrebno držati na temperaturi avstenitizacije, smo jeklene palice segreli na temperaturo avstenitizacije kar v zvrtni plasti s temperaturo 900°C. Temperaturo zvrtnice plasti smo merili s tremi termoelementi, NiCrNi, ki so bili razporejeni po delovnem prostoru zvrtnice plasti, znotraj katerega je temperatura nihala v območju $\pm 5^\circ C$. To nam je omogočilo, da smo segrevali palice na temperaturo avstenitizacije 835°C, s hitrostjo 235°C/min, krivulja št. 4 na **sliki 10**. Temperaturne krivulje podane na diagramu, smo posneli s pomočjo Data Logging System-3530.

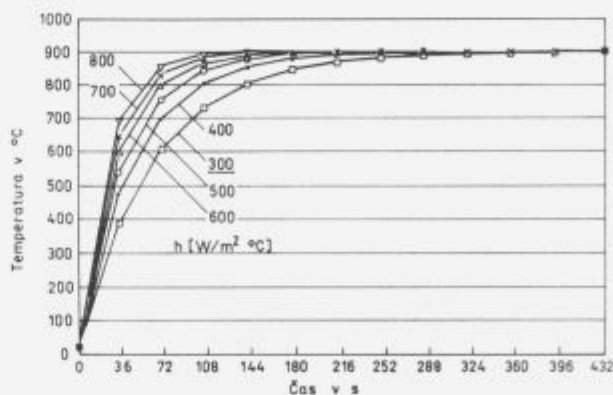


Slika 10. Relativna intenzivnost segrevanja palice ϕ 16 x 540 mm iz jekla Č 1630 v zvrtni plasti s temperaturo 900°C

Figure 10. Relative intensity of heating of the Č 1630 (C 55) steel rod with dimension ϕ 16 x 540 mm in a fluidized bed at 900°C

Iz analize temperaturne krivulje št. 4, ki kaže temperaturo v jedru palice, lahko ugotovimo začetek premene A_{c1} pri 730°C in konec premene A_{c3} pri 760°C, kar je značilno za to jeklo pri dani hitrosti segrevanja.

Ker smo palico potopili v zvrtno plast ob termoelementu št.2, le-ta kaže tudi znižanje temperature zvrtnice plasti v



Slika 11. Spreminjanje koeficienta prenosa toplote pri segrevanju palice ϕ 16 x 540 mm iz jekla Č 1630 v zvrtni plasti s temperaturo 900°C.

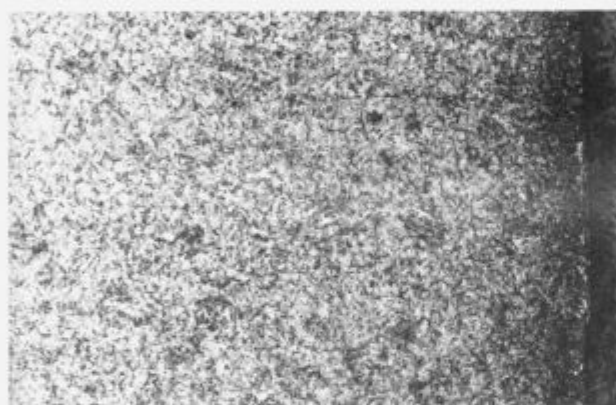
Figure 11. Variation of the heat transfer coefficient in heating Č 1630 (C 55) steel rod with dimensions ϕ 16 x 540 mm in a fluidized bed at 900°C.

okolici palice in čas, ki je bil potreben, da je zvrtnična plast v okolici termoelementa št. 2 ponovno dosegla začetno temperaturo. Iz ostalih dveh meritev temperature zvrtnične plasti pa je razvidno, da potopljena masa 785 g vpliva le na znižanje temperature v bližnji okolici palice, medtem ko v ostalem delovnem prostoru ni bilo zaznati vpliva. Iz eksperimentalno dobljenih podatkov smo izračunali tudi koeficient toplotnega prenosa h , **slika 11**. V našem primeru smo dobili vrednost $h = 900 \text{ W/m}^2\text{°C}$, ki je znotraj območja, ki ga navaja literatura (4).

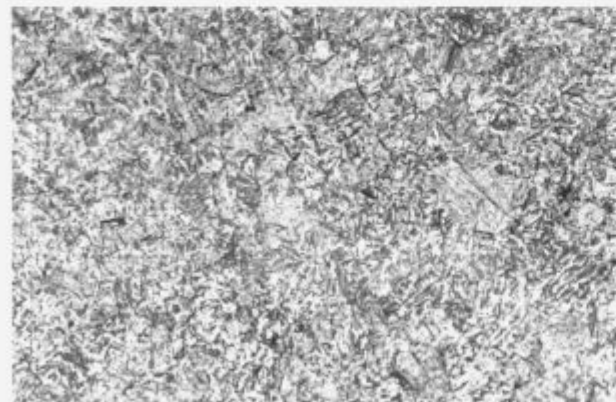
Veliko hitrost segrevanja smo uporabili zato, da bi lahko ugotovili vpliv toplotnega šoka na pojav morebitnih površinskih razpok oziroma kalilnih razpok. Palice, ki so v jedru dosegle temperaturo austenitizacije 835°C , smo kalili v vodi s temperaturo 20°C .

V nadaljevanju preiskusa segrevanja palic iz jekla Č 1630 v zvrtnični plasti smo osredotočili naše raziskave tudi v smeri ugotavljanja uporabe N_2 kot zaščitne atmosfere pred oksidacijo površine oziroma pred razogljčenjem.

V ta namen smo prav tako uporabili palico $\phi 16 \times 540 \text{ mm}$ iz jekla za poboljšanje Č 1630, ki smo jo segreli na temperaturo 900°C in jo držali v plasti eno uro, potem smo jo ohladili v vodi ter normalizirali pri 830°C .



rob (100x)
edge (100x)



sredina (200x)
centre (200x)

Slika 12. Mikrostruktura palice $\phi 16 \times 540 \text{ mm}$ iz jekla Č 1630, segrevane v zvrtnični plasti na temperaturo avstenitizacije 835°C in kaljene v vodi, pov. 200x

Figure 12. Microstructure of the as quenched Č 1630 (C 55) steel rod after the austenitization at 835°C , mag. 200x

3.3. Pregled površin in mikrostrukturne preiskave kaljenih ter kaljenih in normaliziranih vzorcev

Na vseh vzorcih, segrelih na temperaturo austenitizacije v zvrtnični plasti in kaljenih v vodi, smo pregledali površino s pomočjo magnetne metode na stroju Contromag 20 in ugotovili, da navkljub velikim hitrostim segrevanja, kakor tudi ohlajanja, na preiskanih palicah ni nobenih površinskih razpok. Tudi pri kasnejšem metalografskem pregledu vseh vzorcev, nismo ugotovili nobenih površinskih razpok oziroma kalilnih razpok.

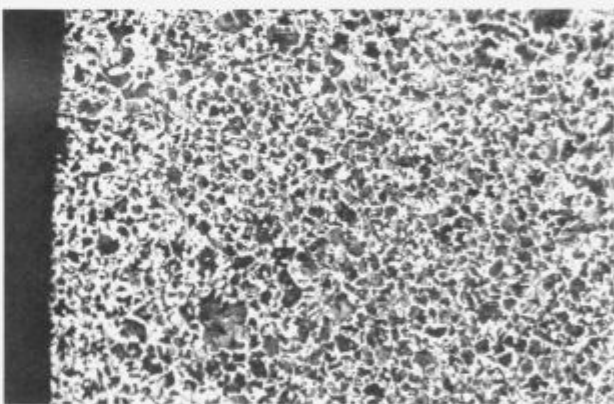
Metalografski pregled vzorcev segrevanih v zvrtnični plasti na temperaturo avstenitizacije 835°C in kaljenih v vodi kaže, da ima kaljeno jeklo martenzitno mikrostrukturo, le v sredini je pod 1% bainita, **slika 12**.

Nastali bainit v sredini vzorca je posledica prenizke ohlajevalne hitrosti, ki smo jo dosegli z ohlajanjem v sveži vodi. Pri ohlajanju so se tvorili parni mehurji in na ta način zmanjšali ohlajevalno hitrost.

Stopnjo razogljčenja površine vzorcev, ki smo jih segrevali v zvrtnični plasti in eno uro držali na temperaturi 900°C ter ohladili v vodi, smo ugotavljali na vzorcu dimenzij $\phi 16 \times 540 \text{ mm}$, ki je bil izdelan iz jekla za poboljšanje Č 1630. Nato smo palico od čela navzgor razrezali na 60 mm odseke in vzorce nato normalizirali v komorni peči pri temperaturi 830°C .

Pri metalografski preiskavi na normaliziranih vzorcih nismo opazili znakov razogljčenja, **slika 13**.

Iz tega lahko sklepamo, da za izbrano jeklo Č 1630, ki smo ga segrevali 1h na temperaturi 900°C v zvrtnični plasti, deluje N_2 z manj kot 10 ppm O_2 kot zaščitna atmosfera.



Slika 13. Mikrostruktura jeklene palice $\phi 16 \times 540 \text{ mm}$, ki je bila segrevana v zvrtnični plasti 1h/ 900°C , ohlajena v vodi in normalizirana pri 830°C , pov. 100x.

Figure 13. Microstructure of quenched and normalized Č 1630 (C 55) steel rod, mag. 100x.

3.4. Meritve trdote HRC na kaljenih vzorcih

Površinske meritve trdote HRC po dolžini kaljene palice od čela navzgor, so nihale med 65 HRC in 60 HRC, kar je posledica neenakomernega ohlajanja v vodi, ki ni bila mehčana ali starana, tako da so se na posameznih delih palice pojavljali parni mehurji, ki so zmanjšali ohlajevalno hitrost. Dosežena trdota v sredini palice na čelu je 65 HRC in je v pričakovanih mejah za to jeklo.

4. Zaključek

Na osnovi eksperimentalnih rezultatov lahko ugotovimo, da nam je v celoti uspelo izdelati indukcijsko segrevano laboratorijsko peč za toplotno obdelavo v zvrtnični plasti. Delovna prostornina zvrtnične plasti, znotraj katere temperatura niha v območju $\pm 5^\circ\text{C}$, je $\phi 165 \times 590 \text{ mm}$ s koeficientom toplotnega prenosa, $h_{900^\circ\text{C}}$, $300 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Dosegljivo delovno temperaturo 1000°C omejujejo trdnostne lastnosti izbranega jekla pri povišanih temperaturah, iz katerega je izdelan samonosilni reaktor. Višje delovne temperature, do 1250°C, bomo lahko dosegli z uporabo ustreznega ognjevdržnega jekla.

S SF induktivnim segrevanjem stene reaktorja je možno zelo natančno krmiliti hitrosti segrevanja zvrtni plasti. Dosežena hitrost segrevanja zvrtni plasti je bila do 30°C/min, kar močno povečuje prožnost laboratorijske peči.

Uporaba N₂ kot plina za vrtnjenje se je pokazala tudi kot ustrezna rešitev za nevtralno atmosfero.

Koncept induktivno segrevane laboratorijske peči za toplotno obdelavo v zvrtni plasti omogoča, da celoten proces krmilimo z zaprto zanko s pomočjo mikroprocesorjev, z ustreznimi programatorji pa lahko proces toplotne obdelave v zvrtni plasti programiramo.

Z dograditvijo opreme za krmiljenje atmosfere bo dana tudi možnost, da že na obstoječi laboratorijski peči opravimo vse poskuse, ki so potrebni za ugotavljanje sposobnosti in načina krmiljenja termokemijskih postopkov toplotne obdelave, kot so nitriranje, karbonitriranje in cementiranje z direktno pripravo ustrezne atmosfere v sami zvrtni plasti.

Funkcionalni preizkus indukcijsko segrevane laboratorijske peči za toplotno obdelavo v zvrtni plasti je potrdil:

- da proces ne onesnažuje okolja,
- da je proces ekonomičen in varčen v energijskem smislu, kot tudi v smislu porabe materialov,
- da je proces možno mikroprocesorsko krmiliti z zaprto zanko, z ustreznim programatorjem pa celoten postopek toplotne obdelave v zvrtni plasti programirati,
- da postopek že v tej fazi omogoča zadovoljivo stopnjo ponovljivosti rezultatov.

Na osnovi teh lastnosti smatramo, da je potrebno za bodočnost naše raziskave voditi v dveh smereh in sicer:

– v smeri razvoja in izdelave indukcijsko segrevanih peči oz. avtomatiziranih celic za toplotno obdelavo in kemotermično obdelavo v zvrtni plasti, z delovno temperaturo do 1250°C ter

– v smeri razvoja industrijskih peči oziroma avtomatiziranih celic za toplotno obdelavo v zvrtni plasti do 1000°C (npr. za izotermalno kaljenje bainitne nodularne litine).

Preizkus toplotne obdelave palice ϕ 16 x 540 mm iz jekla Č1630, je dokazal, da smo dosegli osnovni namen, t.j. hitro in enakomerno segrevanje potopljenega predmeta na temperaturo austenitizacije. Hitrost segrevanja potopljenega predmeta se je gibala med 150 in 235°C/min, kar je primerljivo s segrevanjem v solnih kopelih, vendar brez njihovih pomanjkljivosti.

Plinsko zvrtni sistem torej predstavlja "fluid" z veliko toplotno kapaciteto in izredno majhnim parnim tlakom, to pa je lastnost, ki je v preteklosti niso dovolj upoštevali in izrabili.

* – skupen izraz ta tekočine in pline

** – hitrost toka kapljevine pri ravnotežnem stanju sil imenujemo začetno hitrost vrtnjenja, v_z , ker se pri minimalni prekoračitvi te hitrosti začno premikati delci med seboj, kar je začetek vrtnjenja.

*** – magnetna poljska jakost

5. Literatura

- ¹ D. Kunii, O. Levenspiel: *Fluidization Engineering*, John Wiley and Sons, New York 1969
- ² A. Paulin: *Kovinarstvo*, FNT, Ljubljana 1980
- ³ J. S. M. Botterill: *Fluid bed heat transfer*, Academic Press, London, New York, San Francisco 1975
- ⁴ A. P. Baskakov, B. V. Berg, O. K. Vitt, N. F. Filippovsky, V. A. Kirakosyan, J. M. M. Goldobin and V. K. Maskav: Heat transfer to objects immersed in fluidized beds, *Powder Technology*, 8 (1973) 273-282
- ⁵ William L. James: Fluidized-Bed Equipment, *Metals Handbook*, Ninth edition, Volume 4, Ohio 1981, 299
- ⁶ EDF, Le chauffage par induction, Direction des Etudes et Recherches d'Electricite de France, Centre des Renardieres, Moret-sur-Loing
- ⁷ V. Leskovšek, V. Hrnčič, A. Paulin, T. Kolenko: Razvoj polindustrijskega agregata za toplotno obdelavo v zvrtni plasti, IMT – Ljubljana, *Naloga št. 88-043*, 1988.