Kaljenje težkih rotorjev v vodni meglici

Mihael Kaiser, Andrej Krajnc, Hugo Bosio
Bosio d.o.o., Bukovžlak 109, 3000 Celje
all@bosio.si

Quenching of Heavy Rotors in Water Spray

At first a concrete system for quenching of rotors with spraying is presented, consisting of a furnace for heating the details up to 1100 °C and a sprayer quencher. In the paper a focus is set to the quenching process particulary. That is to the controlled application of a cooling medium flow the way a time temperature traces would stay within certain envelope. Only that way a requested material microstructure could be guaranteed at the end.

Short theoretical overview for the cooling thermodynamics of a thick roll is provided in the second chapter, following by an analysis of traditional cooling approaches with forced air and water bag. Limitations like the low heat transfer coefficient for air and low controllability of cooling power within a water bag drive research of alternative approaches for application in modern metalurgy. Cooling by using water spray is one such.

In the third chapter an implementation of water sprayer is described, including necessary mechanical equipment. We stay focused on data structures to uniformly describe roll's geometry in relation to water nozzles grouping into several control sections.

A paper is finished with a new proposal scheme for controlling the nozzle's duty cycle applying multi segment proportional regulator. The temperature at certain roll's depth represents a referential value which is calculated with a referential process model. That temperature setpoint is than compared with process temperature measured on treated roll's equal depth to control nozzle's duty cycle.

Kratek pregled prispevka

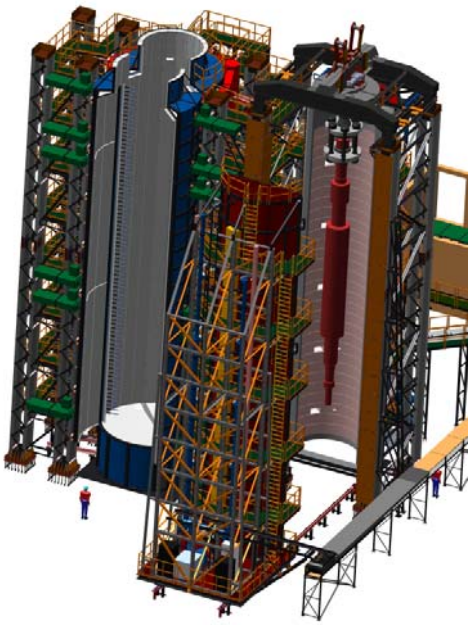
V članku uvodoma predstavimo izvedbo sistema za kaljenje rotorjev v vodni meglici, sestavljeno iz peči za kontrolirano gretje vložka na kalilno temperaturo (do 1100 °C) in iz razpršilnika za kontrolirano hlajenje vložka v vodni meglici. Omejimo se na proces kaljenja, to je procesno gledano, kontrolirano dovajanje hladilnega medija, da ostanejo časovne temperaturne sledi po globini vložka znotraj predpisanega območja. S tem se zagotovi željena mikrostruktura materiala po končani termični obdelavi.

V drugem poglavju najprej teoretično ovrednotimo hlajenje valjev in na tej osnovi v nadaljevanju izpostavimo omejitve procesno manj zahtevnih tradicionalnih načinov hlajenja težkih valjev na zraku oziroma v vodni kopeli. Sledi predstavitev uporabe vodne meglice kot alternativni način hlajenja s kombiniranim medijem.

V tretjem poglavju opišemo implementacijo nadzorovanega hlajenja v vodni meglici; potrebno konstrukcijsko opremo, predvsem pa podatkovne strukture za opis geometrije valja in na tej osnovi razdelitev šob v regulacijske skupine. Zaključimo s predlogom izvedbe zaprtozančnega vodenja šob z več segmentnim proporcionalnim regulatorjem. Referenčno vrednost temperature na izbrani globini pridelamo z referenčnim modelom procesa, meritev procesne temperature na valju se izvede s sledilnim termoelementom na enaki globini. Čas odprtja šobe se prilagaja velikosti tako dobljenega pogreška.

1 Predstavitev objekta vodenja

Gledano s stališča procesa, sistem za kaljenje tvorita kalilna peč, kjer se obdelovanec segreje na kalilno temperaturo, in razpršilnik, kjer ga izpostavimo ohlajanju v vodni meglici (Slika 1).



Slika 1: Kalilna peč (desno) in razpršilnik (levo).

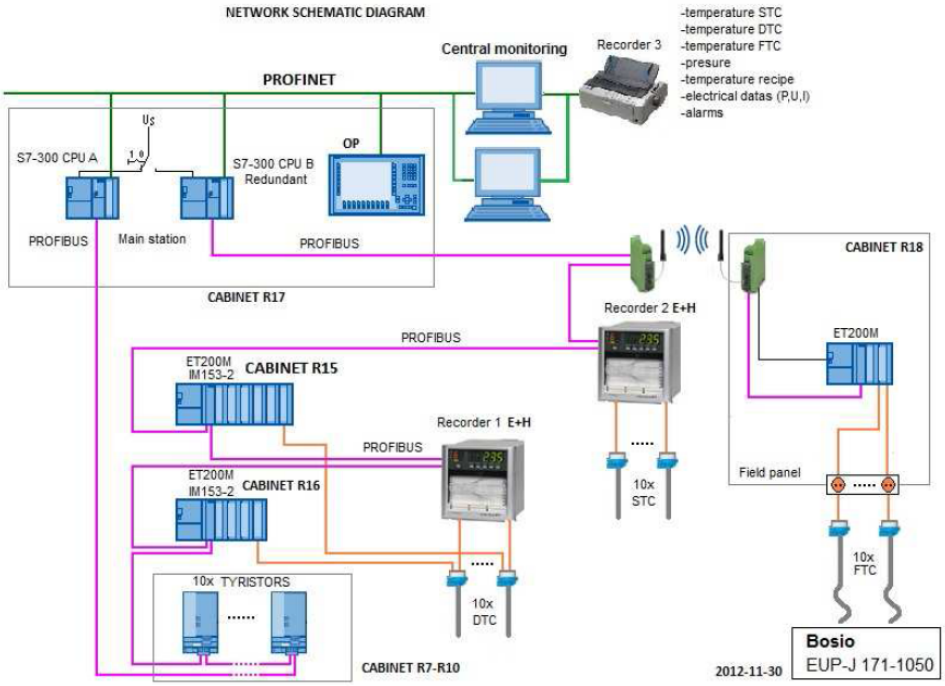
Značilni obdelovanci (vložek, ki ga vlagamo v peč / razpršilnik), so dolgi jekleni rotorji električnih generatorjev velikih moči, ki se uporabljajo v elektrarnah, lahko je nanizanih več krajših rotorjev (vetrni generatorji), do dveh metrov premera. Zelo značilen vložek so tudi parne turbine (osnova brez krilc), kjer se premer obdelovanca zelo spreminja vzdolž osi rotorja.

Električna peč skupne moči 3,5 MW z notranjim premerom komore 3m, sprejme vložek premera do 2m, dolžine 16m in skupne teže 100t. Pri največji obremenitvi zagotavlja strmino gretja do 100C/h, v območju od 300 do 1100 C, s točnostjo temperature vročega zraka v peči +/- 5C. Po višini peči je enakomerno razporejenih 10 regulacijskih sekcij grelcev. Zaradi dragih izolacijskih blokov je peč opremljena s kontroliranim ohlajanjem prazne peči do strmine 60C/h. Da ne bi bila potrebna dvojna višina zakladalnega mostu, je ena polovica peči premična po tračnicah z elektromotornim pogonom. V peči je med obratovanjem zahtevan rahel nadtlak, zato sta obe polovici peči tesno speti s hidravličnimi zapirali.

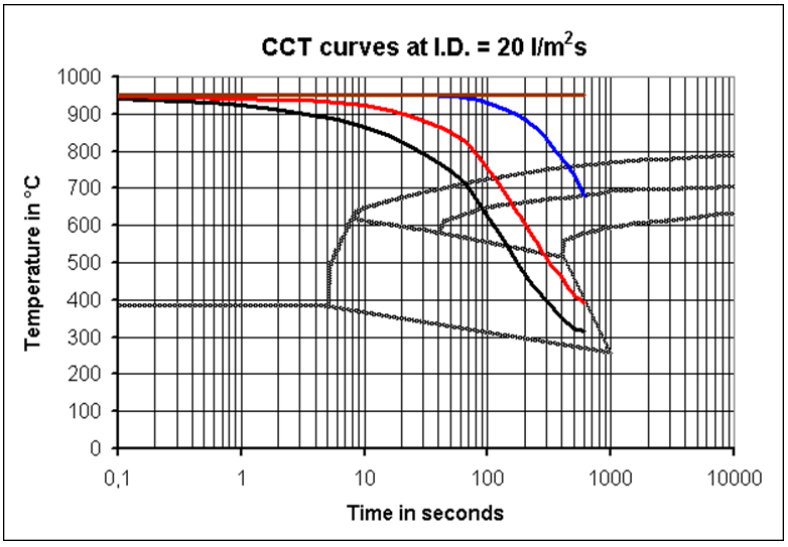
Razpršilnik električne priklopne moči 0,8 MW sprejme vložek premera do 2,5m, dolžine 18m in skupne teže 140t. Temperatura vložka pri zalaganju je lahko 1100C, ohlaja se do 100C, po strmini do 60C/h (temperatura jedra valja premera 2m) oziroma 160C/h (temperatura jedra valja premera 1,2m). Tri črpalke oskrbujejo 350 šob z vodnim pretokom 720 m3/h in vstopnim tlakom 12 bar. Dodatni dve črpalki prečrpavata segreto vodo čez izmenjevalnik. Odsesavanje vodne pare. Tudi razpršilnik se zalaga praktično iz delovne višine le-tega, saj je opremljen z dvema vratnima kriloma, po tri višinske segmente vsako, z 1,5m vreteni z elektromotornim pogonom. Med hlajenjem se vložek počasi vrti v vodni meglici, zato je razpršilnik na vrhu opremljen še s pajkom z nastavljivo hitrostjo obračanja.

Peč in razpršilnik sta vsak na svojem PLC, oboje je čez Profinet povezano na skupen nadzorni računalnik v operaterski sobi (Slika 2).

Po končani termični obdelavi se zahteva prekaljenost obdelovanca po celotni prostornini s pričakovano mikrostrukturo materiala. Inženirski izziv za skupino je oblikovati konstrukcijsko in energetsko osnovo, ki se jo softversko primerno nadgradi, da dobimo vodljiv sistem v ključnih vplivnih parametrih za zagotavljanje končne performance termične obdelave (poglavje 2). Poslovni izziv za podjetje je pridelati cenovno sprejemljiv izdelek, upoštevajoč konkurenčnost in oddaljenost indijskega trga (poglavje 3). V poglavju 4 so zbrani zaključki.



Slika 2: Arhitektura sistema za avtomatizacijo.



Slika 3: CCT, časovna sled temperaturnih sprememb pri ohlajanju valja (na površini, 20mm pod plaščem in v središču 100mm valja).

2 Problematičnost nadzorovanega hlajenja debelih valjev spremenljivega premera

Temeljna zahteva vodenja ohlajevalne faze je nazorno prikazana na sliki 3. Pri globinski obdelavi je predpisan temperaturni profil sprejemljive širine, znotraj katerega se morajo nahajati temperaturne sledi na različnih globinah, da se doseže ustrezna mikrostruktura materiala.

Odzivnost materiala na hlajenje je določena s termodinamiko prenosa toplote. Poenostavimo tako, da se omejimo le na prenos v smeri od središča valja navzven v hladilni medij. Specifična toplota skupaj z geometrijo telesa izbrane gostote določa velikost akumulirane toplote, ki jo je potrebno odvesti skozi površino

telesa v hladilni medij. Pri tem je toplotni tok deležen upiranja najprej zaradi uporov toplotnega prevajanja znotraj telesa, na zunanji površini še upori konvektivnega prehoda toplote iz valja na medij.

Rezultati modeliranj, potrjeni z merilnimi izkušnjami, pokažejo, da z velikostjo toplotnega toka raste gradient notranjega temperaturnega polja. Posledično so temperaturne sledi T(r) na različnih globinah r vedno bolj narazen. Izhodišče pri oblikovanju zakona vodenja je krmiliti dovod hladilnega medija tako, da ostane rezultirajoč toplotni tok navzgor omejen, da bi zadržali temperaturne sledi znotraj predpisanega intervala (slika 3). Pri tem sta pomembni dve situaciji časovnega razhajanja:

- sledi T(r) za različne polmere r pri izbrani debelini valja 2R in
- sledi T(r,x) za izbrano globino r v valju s spremenljivim premerom 2R(x) vzdolž osi x.

2.1 Enostavne rešitve hlajenja

Hlajenje s prisilnim zračnim pretokom je natančno vodljiv sistem odvajanja toplote, saj je možno izvesti preprosto krmiljenje pretoka od 0 do 100% vrednosti. Če so potrebne velike hladilne moči, je potrebno generirati vedno večje zračne pretoke, saj smo pri zraku omejeni s faktorjem prestopa toplote nekje na vrednost a=200 W/m^2K (Tabela 1).

Potapljanje v vodno ali oljno kopel omogoča velike hladilne moči. S predgrevanjem medija lahko le omejeno vplivamo na zmanjšanje začetne hladilne moči kopeli. Po določenem času se kopel ogreje in s tem njena hladilna moč upade. Prav tako je velik problem s potapljanjem hladiti različno debele dele vložka z različnimi močmi.

Naštete glavne omejitve tradicionalnih rešitev odpirajo pot v iskanje alternativnih pristopov. Eden od teh je predstavljen v nadaljevanju.

Tabela 1: Območja faktorja prestopa toplote a za različne hladilne medije.

a [W/m^2K]	hladilni medij
20..200	prisilno hlajenje z zrakom
800..4500	vodna kopel
400..2500	
2500..35000	

2.2 Hlajenje v vodni meglici

Če uporabimo šobo za združitev zraka in vode pod tlakom, se ustvari okoli šobe meglica kot kombiniran hladilni medij, zelo uporaben tudi v sodobni metalurgiji. Geometrija šobe skupaj z vstopnim tlakom tekočin določata velikost kapljic in njihovo začetno hitrost na poti do trka s površino vložka, ki ga hladimo. Ob ugodnih pogojih kapljice ob trku (popolnoma) izparijo. Tedaj je odvzem toplote s površine materiala enak celotni specifični toploti vode do vrelišča, povečan za vrednost izparilne toplote. Prav slednje prispeva k velikim efektivnim vrednostim faktorja prestopa toplote a pri uporabi vodne meglice (Tabela 1).

3 Ugotovitve in pridelane rešitve

Osnovna ugotovitev je, da s krmiljenjem pretoka vode čez šobe učinkovito in kontrolirano vplivamo na jakost odvajanja toplote skozi površino valja in jo s tem prilagajamo jakosti sproščanja nakopičene toplote znotraj telesa, da ostane temperaturni gradient ustrezno majhen. Krmilni signal za šobo je binaren (odprto / zaprto) in je pulzno širinsko moduliran. Poleg trajanja odprtosti šobe, sta vplivna parametra hlajenja še tlak tekočin pred šobo, saj je z njim določen masni pretok vode ter velikost kapljic, ter hitrost vrtenja valja okoli vzdolžne osi, da v največji možni meri preprečimo nastanek ne povrete vodne plasti na površini. Navpični nosilec šob je radialno premičen, da so šobe zmeraj na enaki oddaljenosti od največjega premera valja, na primer 250mm.

3.1 Povezanost geometrije valja s porazdelitvijo šob vzdolž valja

Predpostavimo, da je geometrija i-tega segmenta valja stalnega premera Ri in višine tega segmenta hi enoumno podana z dvojico (Ri, hi). Tedaj je celotna geometrija m-segmentnega valja podana z množico m dvojic (Ri, hi), glej sliko 4.

Vse šobe, ki se geometrijsko nahajajo vzdolž i-tega segmenta, združimo v skupino šob si ter jih vzbujamo z istim krmilnim signalom pi(k).

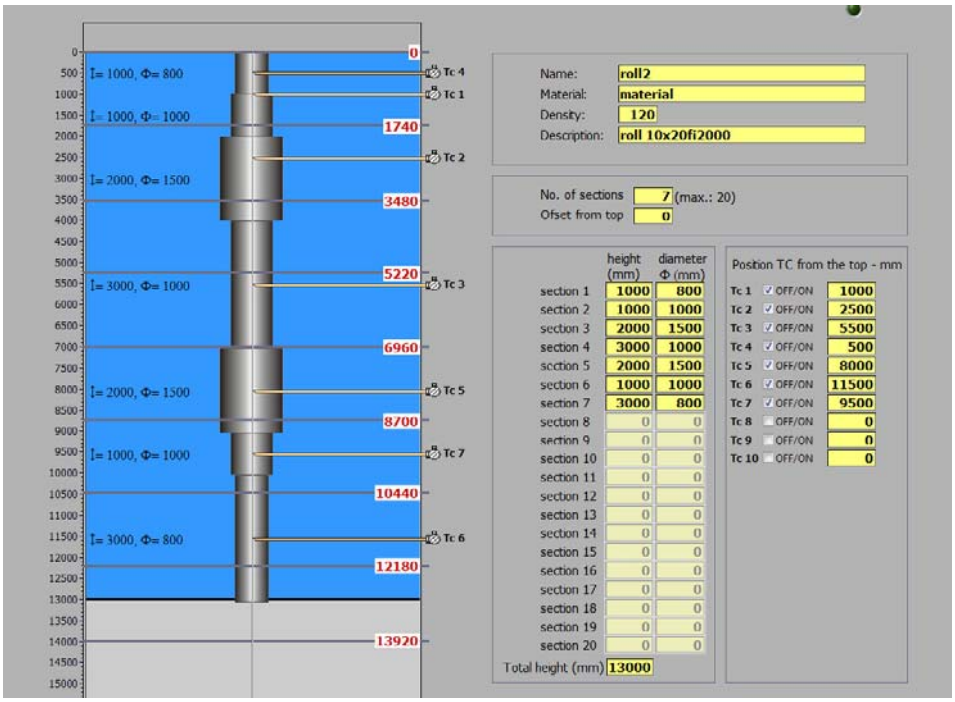
3.2 Odprtozančno obnašanje

Za nastavitev parametrov sistema, meritev ali na splošno za potrebe izkustvenega eksperimentiranja je podprt krmilni režim za šobe, programiran po korakih. Celotno trajanje procesa ohlajanja je razdeljeno v k različno dolgih korakov, za vse skupine šob enako. Nato za vsako skupino šob za vsak korak posebej določimo še odstotek trajanja dolžine krmilnega pulza. Tako lahko izmerimo različne dejavnike vplivanja na končno performanco vodenja pri stalnem vzbujanju, kot so na primer: oddaljenost šob, velikost in razmerje tlakov na šobi, hitrost vrtenja valja med hlajenjem. Na sliki 5 je primer odziva na 20% vzbujanje.

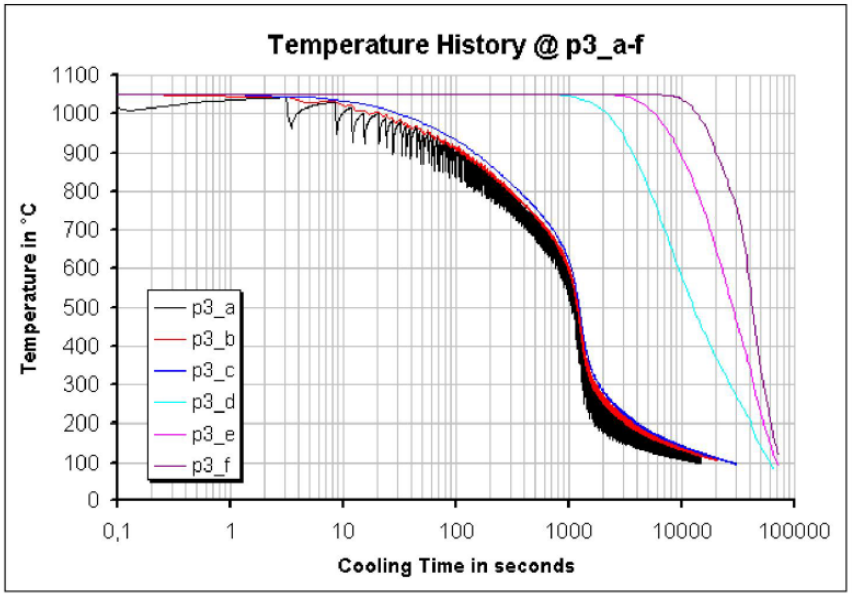
3.3 Možnost zaprtozančnega vodenja

Predpostavimo, da je na razpolago enodimenzionalen termodinamičen model prevajanja akumulirane toplote iz notranjosti i-tega segmenta valja proti površini Tn,i(k) = Tn,i(k-1) - k*qi(k), za vse segmente valja. Tedaj je metoda vodenja z referenčnim modelom v i-tem segmentu organizirana kot sledi:

- v modelu predpišemo časovni potek toka praznjenja qi akumulirane toplote tako, da ostanejo temperaturne sledi po globini znotraj predpisanega intervala,
- iz modela se nato jemlje vrednosti izračunane temperature na določeni globini (npr 50mm) pod plaščem valja kot referenčna vrednost za to globino ter
- valj se opremi s sledilnim termoelementom na enaki globini, s proporcionalnim regulatorjem popravljamo širino pulza šobe ustrezno pogrešku med izmerjeno in referenčno temperaturo.



Slika 4: Zaslon za pobiranje parametrov geometrije valja.



Slika 5: Globinski temperaturni odziv na stalno vzbujanje 20%.

4 Zaključki

Pomembna ugotovitev je, da se tudi v opisanem primeru ob realizaciji hlajenja v razpršilniku z meritvami potrdi, da s krmiljenjem pretoka vode skozi šobe učinkovito in kontrolirano vplivamo na jakost odvajanja nakopičene toplote skozi plašč valja.

Šobe združujemo v regulacijske skupine glede na geometrijo valja. Podprt je krmilni režim za šobe, programiran po korakih. To rešitev uporabljamo po tem, ko se do takega režima pride. Pri tem eksperimentiranju smo predlagali zaprtozančno vodenje, s katerim zajamemo modelirano dinamiko snovno geometrijskih lastnosti obdelovanca, prenosnega medija in ostalih parametrov hladilnega stolpa. Odstopanja pokompenzira nelinearen proporcionalen regulator.

Glede značilnosti hlajenja z vodno meglico ugotovimo:

- veliko manj vode za učinkovito ohlajanje, v primerjavi s klasično vodno kopeljo.
- zelo veliki obdelovanci, problem prostora za bazene, hladilni stolpi in potreben čas za razhladitev za novo obdelavo.