

OSNOVNI MATERIJALI U GRADNJI VELIKIH KOTLOVSKIH POSTROJENJA

BASIC MATERIALS IN CONSTRUCTION OF LARGE TERMOENERGETICAL PLANTS

V. SALOPEK¹

Ključne riječi: kotlovska postrojenja, materijali

Key words: termoenergetical plant, materials

Sažetak: Ovaj rad daje djelomični pregled i osnovne karakteristike materijala koji se već danas koriste za izradu dijelova kotlovskih postrojenja i djelomični pregled nekih materijala koji bi prema svojim karakteristikama i mogućnostima korištenja vjerojatno u budućnosti mogli predstavljati optimalni izbor za izradu pojedinih dijelova novih kotlovskih postrojenja.

Abstract: This paper gives partial review and basic characteristics of materials that are currently used for the production of components for termoenergetical plants, and partial review of some materials that have characteristics and possibilities of usage suitable for the future optimal choice for manufacturing of some components of new termoenergetical plants.

¹ Đuro Đaković Montaža, Dr M. Budaka 1, Slav. Brod

1. UVOD

Unatoč nastojanjima za postizanjem što većeg stupnja korištenja energije, kao i nastojanjima usmjerenim ka štednji energije, u narednim godinama će biti sve veća potreba za energijom u svijetu.

Potreba povećanja proizvodnje energije u svijetu uvjetovana je, porastom broja stanovnika, ali i zbog očekivanog porasta životnog standarda, prije svega u slabije razvijenim dijelovima svijeta.

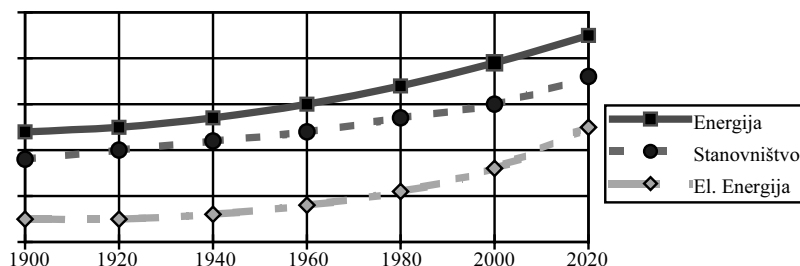
Svjetsko vijeće za energiju na svom 17. kongresu u Houstonu 1998 godine je procijenilo da će ukupno potrebna energija u svijetu sa nivoa od 12,9 milijardi t SKE¹ koliko je iznosila 1990 godine porasti na 19,5 milijardi t SKE u 2020 godini. Ova procjena temelji se na podacima o porastu broja stanovnika u svijetu, te na procjeni prosječne potrošnje energije po stanovniku koja bi sa današnje vrijednosti od 2,3 t SKE /godinu trebala porasti na 2,5 t SKE /godinu.

Od ukupno proizvedene energije zantan dio odnosi se na proizvodnju električne energije. Ovaj vid energije je povoljan za korištenje zbog brojnih i raznolikih mogućnosti primjene jer ju je uz veliki stupanj iskorištenja moguće pretvoriti u željene efekte: svjetlost, toplinu, mehanički rad, a velika prednost je da pri tome ne dolazi do opterećivanja okoline štetnim tvarima.

Zbog toga, posebnu težinu ima činjenica istaknuta na 17. kongresu Svjetskog vijeća za energiju da 1998 godine gotovo 2 milijarde stanovnika na svijetu nije imalo mogućnosti koristiti se električnom energijom. Posljedica takovog stanja je potreba da rast proizvodnje električne energije bude veći od predviđene stope rasta broja stanovnika i od predviđenog rasta ukupno potrebne energije.

Predvidivo je da će do 2020 godine broj stanovnika porasti ca. 25 %, ukupno potrebna energija će porasti ca. 55 %, a proizvodnja električne energije ca. 66 %.

Procjena porasta broja stanovnika, ukupno potrebne energije i proizvodnje električne energije prikazana je kvalitativno na dijagramu:



2. OSNOVNI MATERIJALI U GRADNJI VELIKIH KOTLOVSKIH POSTROJENJA

Unatoč nastojanjima da se što više potrebne energije dobije iz obnovljivih izvora (sunce, voda, vjetar i slično) odnosno izgaranjem goriva koja manje opterećuju okolinu štetnim tvarima i plinovima ostaje i dalje neupitno potrebna gradnja velikih kotlovskih postrojenja loženih ugljenom

Pri gradnji novih velikih kotlovskih postrojenja koja proizvode pregrijanu paru za pokretanja parnih turbina moraju se rješavati i zahtjevi koji proizlaze iz sve strožih propisa za zaštitu okoline tj. mora se osigurati da rad kotlovskog postrojenja uzrokuje što je moguće manje opterećivanje okoline štetnim tvarima i plinovima. Jedna od mogućnosti koje stoje na raspolaganju je postizanje većeg stupnja iskoristivosti kotlovskog postrojenja odnosno termoelektrane kao cjeline. Veća iskoristivost kotlovskog postrojenja je direktno vezana uz parametre (temperatura i radni pritisak) pregrijane pare na izlazu iz kotlovskog postrojenja.

Današnja nova moderna velika kotlovska postrojenja ložena kamenim ugljenom postižu neto iskoristivost od približno 46%, a ložena smeđim ugljenom od približno 43% uz vrijednosti parametara pregrijane pare: pritisak 290 bara i temperatura 600 °C. Temperatura 600 °C je granična temperatura iznad koje ne mogu biti korišteni danas uobičajeni kotlovski čelici. Daljnje povećanje stupnja iskoristivosti kotlovskog postrojenja od ca. 4% moguće je postići povećanjem parametara pregrijane pare (350 bara, 700 °C) na izlazu iz kotlovskog postrojenja pa to naravno dovodi do potrebe razvoja novih materijala odnosno primjene nekih već postojećih, ali u novim uvjetima korištenja.

Prije primjene novih materijala za izradu dijelova parnih kotlova biti će provedena različita ispitivanja koja imaju za cilj kvalificiranje primjene novih osnovnih materijala odnosno stvarnu provjeru rada pojedinih komponenti kotlovskog postrojenja.

Neki projekti ispitivanja novih osnovnih materijala odnosno provjere rada pojedinih komponenti kotlovskih postrojenja u Europi su već u tijeku, a financiraju se ili u okvirima pojedinih država ili kao zajednički projekti Europske zajednice.

Novi materijali bi bili korišteni za izradu posebno opterećenih dijelova parnih kotlova a to su:

- Cijevni (membranski) zidovi kotla
- Cijevne spirale (zmije) krajnjeg pregrijača pare
- Izlazna komora krajnjeg pregrijača pare
- Cjevovod pregrijane pare prema parnoj turbini

Ovaj rad daje djelomični pregled i osnovne karakteristike materijala koji se već danas koriste za izradu dijelova kotlovskih postrojenja i djelomični pregled nekih materijala koji bi prema svojim karakteristikama i mogućnostima korištenja vjerojatno u budućnosti mogli predstavljati optimalni izbor za izradu pojedinih dijelova novih kotlovskih postrojenja.

3. PROIZVODNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Električna energija (el. struja) se proizvodi na mnogo načina:

- korištenje energije vode (hidroelektrane)
- kroz procese izgaranja fosilnih goriva (termoelektrane)
- kroz procese fizije radioaktivnih goriva (nuklearne elektrane)
- korištenje energije vjetra
- itd.

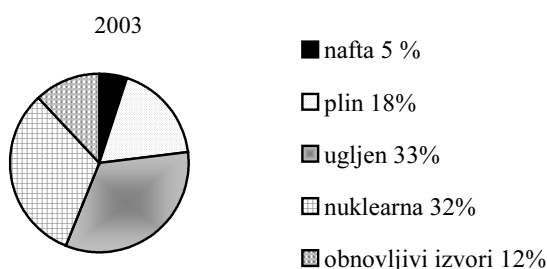
uz razmatranje i uvažavanje slijedećih okvira:

- što više energije treba proizvesti iz obnovljivih izvora energije (sunce, voda, vjetar i slično)

- što više energije treba proizvesti uz što manji utrošak izvora energije tj. povećati efikasnost proizvodnje
- što više energije treba proizvesti uz što manje troškove tj. što ekonomičnije
- što više energije treba proizvesti uz što manje opterećivanje prirodnog okruženja štetnim plinovima i tvarima

¹ 1t SKE – izgaranje 1t kamenog uglja → 29,308 GJ energije (izgaranja) → 8140 kWh

Bruto proizvodnja električne energije u 25 zemalja Europske zajednice iznosila je 2003 godine nešto više od 3000 Mrd. KWh, a učešće pojedinih izvora energije za proizvodnju električne struje prikazano je na slijedećem dijagramu:



Nakon razmatranja svih relevantnih čimbenika ostaje i dalje neupitno potrebna gradnja velikih parnih termoelektrana sa kotlovskim postrojenjima u kojima se uz izgaranje fosilnih goriva proizvodi pregrijana para za pokretanje parnih turbina odnosno generatora za proizvodnju električne energije.

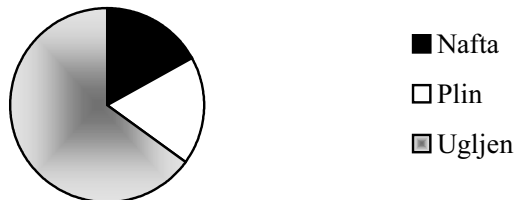
Nužnost proizvodnje električne energije u velikim termoenergetskim postrojenjima kroz procese izgaranja fosilnih goriva uvjetovana je:

- nedovoljne odnosno gotovo iscrpljene mogućnosti značajnijeg povećanja proizvodnje električne energije iz energije vode
- napuštanje odnosno smanjivanje proizvodnje električne energije u nuklearnim elektranama (u Njemačkoj je planirano do 2025 godine zatvaranje svih nuklearnih elektrana)
- visoka cijena proizvodnje električne energije iz energije vjetra odnosno sunca
- proizvodnja električne energije mora biti stabilna i neovisna o promjenama koje se ne mogu predvidjeti
- zahtjevima za brzim promjenama režima rada postrojenja za proizvodnju električne energije

Proizvodnja električne energije izgaranjem fosilnih goriva će i dalje biti stup ukupne proizvodnje energije u Europi i svijetu.

4. TERMOELEKTRANE LOŽENE UGLJENOM

Procjena svjetskih zaliha fosilnih goriva iz godine 1995 iznosila je ca. 1151,1 Mrd.t SKE, a učešće pojedinih energenata prikazano je kvalitativno na dijagramu:



Vidljivo je da će i narednim godinama ugljen imati važnu i prije svega stabilizirajuću ulogu u proizvodnji električne energije. Prema današnjim saznanjima se procjenjuje da bi rezerve ugljena mogle dostajati za slijedećih 200 godina uz današnji stupanj potrošnje. I dok su rezerve nafte i plina gotovo ograničene samo na određene regije, rezerve ugljena su dobro raspoređene u cijelom svijetu. Na temelju istog se procjenjuje da će cijene ugljena ostati relativno stabilne i što je još važnije prihvatljive posebno za zemlje u razvoju.

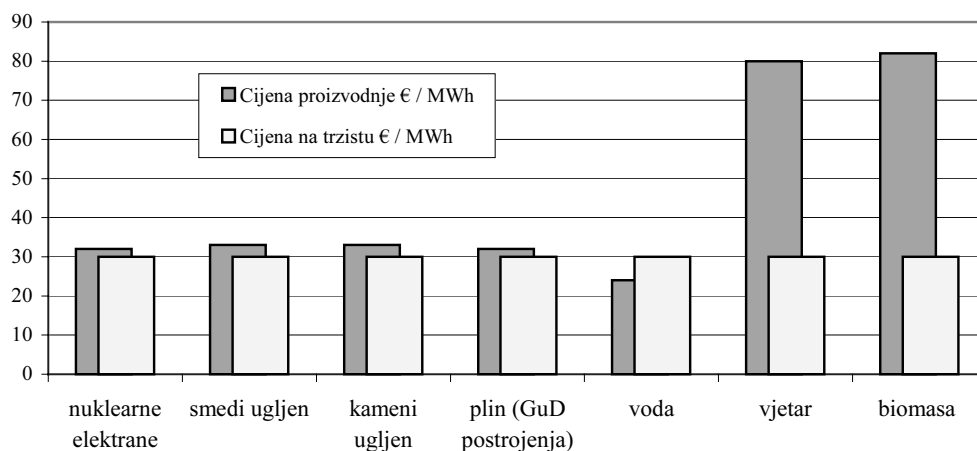
Sa druge strane proizvodnja električne energije izgaranjem ugljena suočena je sa ograničenjima koja su posljedica sve strožih propisa za zaštitu okoline sa jedne strane odnosno zahtjevima za potpunim otvaranjem tržišta sa druge strane.

Uvjet da rad kotlovskog postrojenja uzrokuje što je moguće manje opterećivanje okoline štetnim tvarima i plinovima uzrokuje povišenje troškova izgradnje elektrana i proizvodnje električne energije. Dodatno se u Europskoj zajednici uvode mjere kojima će biti pogođeni svi proizvođači koji prekomjerno opterećuju okolinu štetnim tvarima i plinovima, uvode se tzv. CO₂ – Certifikati.

Slične mjere su predviđene i kroz Kyoto-Sporazum koji govori o prodaji prava na emisiju određenih količina štetnih plinova od strane država koje okolinu opterećuju manje nego je propisano državama koje ispuštaju prekomjernu količinu štetnih plinova.

Potpuno otvaranje tržišta, sasvim pojednostavljeno, dovodi do toga da će električnu energiju prodavati oni koji je mogu ponuditi po najnižim cijenama. Potpuno otvaranje tržišta ne dozvoljava uvođenje mjera kojima bi pojedine države pogodovala svojim proizvođačima.

Kvalitativni prikaz cijena različitih načina proizvodnje električne energije 2003 godine u odnosu na prosječnu cijenu vidljiv je iz slijedećeg dijagrama:



U okviru navedenih činjenica postaje neupitno da se moraju pronaći mogućnosti koje trebaju povećati konkurentnost novih velikih kotlovskih postrojenja loženih ugljenom u proizvodnji električne energije.

5. STUPANJ ISKORIŠTENJA TERMoeLEKTRANA

Jedna od mogućnosti koje stoje na raspolaganju je postizanje većeg stupnja iskorištenja kotlovskog postrojenja odnosno termoelektrane kao cjeline.

Stupanj iskorištenja termoelektrane kao cjeline predstavlja odnos između veličine proizvedene električne energije i veličine unesene energije izgaranja.

Ukoliko se u termoelektrani iz 1t SKE proizvode 3100 kWh električne energije tada stupanj iskorištenja te elektrane iznosi:

$$\eta = \frac{3100 \text{ kWh}}{8140 \text{ kWh}} = 0,381 \rightarrow 38,1 \%$$

Veći stupanj iskorištenja termoelektrane kao cjeline moguće je postići kroz razne mjere kao što su npr:

- povećavanje pritiska i temperature pregrijane pare na izlazu iz kotlovskog postrojenja
- povećavanje stupnja iskorištenja parnih turbina kroz poboljšanje strujanja i poboljšanje geometrije lopatica
- poboljšavanje u procesu izgaranja
- smanjivanje izlaznog pritiska kondenzatora
- korištenje topline izlaznih plinova za predgrijavanje odnosno međupredgrijavanje
- smanjivanje vlastite potrošnje energije u termoelektrani

Najučinkovitija mjera za povišenje stupnja iskorištenja termoelektrane ostaje povećavanje pritiska i temperature pregrijane pare na izlazu iz kotlovskog postrojenja.

Početkom 20-tih godina prošlog stoljeća parametri pare (pritisak 36 bara i temperatura 450°C) su omogućavali da stupanj iskorištenja termoelektrane iznosi oko 20 %, sredinom prošlog stoljeća stupanj iskorištenja termoelektrane već je dostizao 30 % (150-180 bara i 510

– 540°C), a krajem 90-tih u Danskoj je proradila termoelektrana (izgaranje kamenog ugljena i direktno hlađenje morskom vodom) sa stupanjem iskorištenja 47 %.

Termoelektrane ložene smeđim ugljenom postižu nešto niže iskorištenje zbog činjenice da smeđi ugljen u sastavu može imati i do 18 % vlage pa se za isparavanje ove vlage troši veća količina energije pri izgaranju.

Unatoč tome, termoelektrana BoA Niederaußem koja je na mrežu priključena 2002 godine postiže stupanj iskorištenja od max. 45,3 %.

Današnja nova moderna velika kotlovska postrojenja ložena kamenim ugljenom postižu neto iskoristivost od približno 46%, a ložena smeđim ugljenom od približno 43% uz vrijednosti parametara pregrijane pare: pritisak 290 bara i temperatura 600 °C.

Daljnijim povećanjem parametara pregrijane pare na 350 bara i 700 °C na izlazu iz kotlovskog postrojenja moguće je povećanje stupnja iskorištenja termoelektrane od ca. 4%, ali to uvjetuje potrebu razvoja novih materijala odnosno istraživanje primjene nekih već postojećih, ali u novim uvjetima korištenja.

Zahtijevani parametri pregrijane pare ograničavaju primjenu uobičajenih vrsta kotlovskih čelika, odnosno uvjetuju primjenu novih materijala koji bi bili korišteni za izradu posebno opterećenih dijelova parnih kotlova a to su:

- Cijevni (membranski) zidovi kotla
- Cijevne spirale (zmije) krajnjeg pregrijača pare
- Izlazna komora krajnjeg pregrijača pare
- Cjevovod pregrijane pare prema parnoj turbini

6. POZNATI KOTLOVSKI ČELICI

Čelike namijenjene radu pri povišenim temperaturama, a koji imaju garantirane mehaničke značajke pri povišenim temperaturama nazivamo "kotlovski čelici". Postoji nekoliko skupina ovih čelika:

- nelegirani (čvrstoća pri povišenim temperaturama i otpornost na puzanje zbog smanjenog sadržaja fosfora i sumpora, stvaranja kristala mješanaca i isporuke u normaliziranom stanju, primjena do 400 °C)
- legirani Molibdenom (povišenje čvrstoće i otpornosti na puzanje zbog uključivanja Mo u kristalne rešetke, primjena do 450 °C)
- niskolegirani feritno-perlitni/bajnitni Mo-V, Cr-Mo i Cr-Mo-V (povišenje čvrstoće i otpornosti na puzanje zbog stvaranja sitnih karbida u zrnima i isporuke u poboljšanom stanju, primjena do 550 °C)
- martenzitni (legiranje sa 9 – 12 % Cr uz povišenje čvrstoće i otpornosti puzanju povisuje i otpornost nastanku korozijskih procesa na površini izloženoj temperaturi iznad 550 °C, primjena do max. 600 °C)

Potreba daljnjeg povišenja radne temperature u cijevnim (membranskim) zidovima kotla dovela je do stanja da do sada korišteni materijali 16 Mo 3 i 13 CrMo 4-5 više ne zadovoljavaju uvjete korištenja. Korištenja materijala 10 CrMo 9-10 ili čak materijala X10 CrMoVNb 9-1 za ove dijelove kotla nije moguće zbog činjenice da je toplinsku obradu ovih dijelova kotla nakon zavarivanja gotovo nemoguće izvesti.

Pokazala se bezuvjetna potreba razvoja novih materijala za izradu cijevnih zidova kotla pa je to dovelo do pojave novog materijala oznake HCM 2S (ASME-Code T23/P23) koji je

razvijen u Japanu, odnosno do čelika oznake 7 CrMoVTiB 10-10 (ASME-Code T24/P24) koji je razvijen u Njemačkoj.

Baza za razvoj obje vrste materijala je kotlovski čelik oznake 10 CrMo 9-10 (ASME-Code T22/P22) kako je to i vidljivo iz Tablice 1 u kojoj su prikazani kemijski sastavi ovih čelika.

Element [%]	10 CrMo 9-10	HCM 2S	7 CrMoVTiB 10-10
C	max. 0,15	0,04 – 0,10	0,05– 0,10
Si	max. 0,50	max. 0,50	
Mn	0,30 – 0,60	0,10 – 0,60	
P	max. 0,025	max. 0,030	max. 0,025
S	max. 0,025	max. 0,010	max. 0,025
Ni	-----	-----	-----
Cr	1,90 – 2,60	1,90 – 2,60	2,20 – 2,60
Mo	0,87 – 1,13	0,05 – 0,30	0,90 – 1,10
W	-----	1,45 – 1,75	-----
Ti	-----	-----	0,05 – 0,10
V	-----	0,20 – 0,30	0,20 – 0,30
Nb	-----	0,02 – 0,08	-----
Al	-----	max. 0,030	max. 0,020
N	-----	max. 0,030	max. 0,010
B	-----	0,0005 – 0,0060	0,0015 – 0,0070

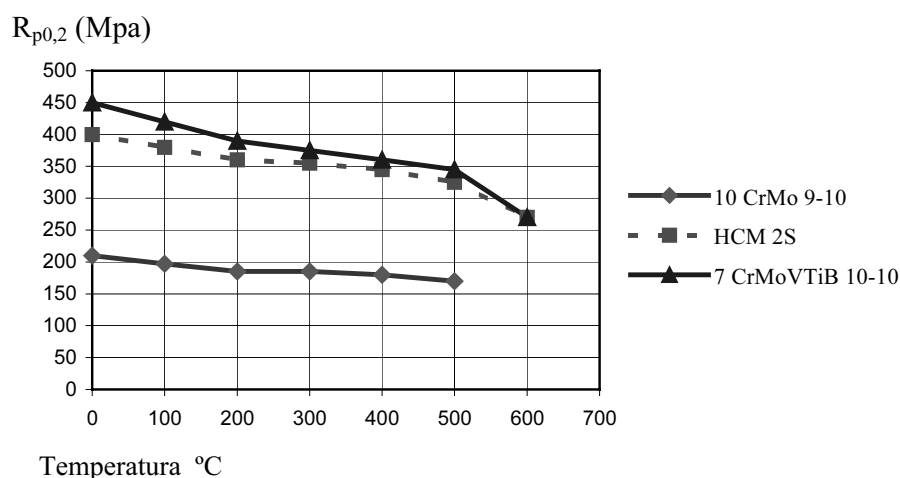
Tablica 1.

U oba čelika je vidljiva ideja dodavanja elemenata koji stvaraju posebne vrste karbida koji dovode do povišenja čvrstoće pri povišenim temperaturama i povišenja otpornosti puzanju.

U slučaju čelika oznake 7 CrMoVTiB 10-10 to su Ti, V i B, a u slučaju čelika HCM 2S to su W, V i Nb.

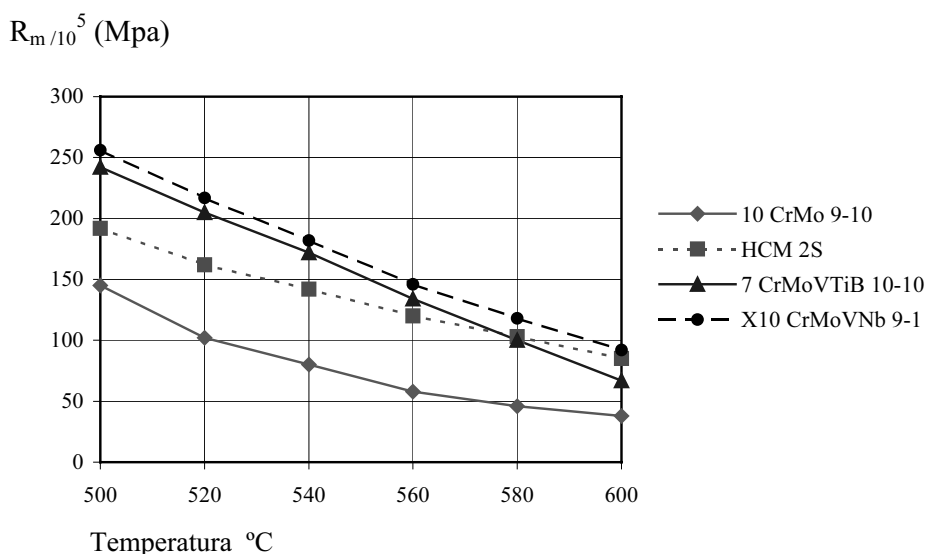
Za ograničavanje mogućnosti prekomjernog otvrdnjavanja pri brzom ohlađivanju sadržaj C je ograničen na oko 0,07 % čime se osigurava da se pri realnim brzinama ohlađivanja postigne miješana martenzitno-bajnitna struktura sa tvrdoćama max. 320HV₁₀

Slijedeći dijagram pokazuje vrijednosti granice razvlačenja R_{p0,2} čelika HCM 2S odnosno čelika 7 CrMoVTiB 10-10 pri povišenim temperaturama u odnosu na čelik 10 CrMo 9-10:



Pored vrijednosti granice razvlačenja $R_{p0,2}$ važna značajka pri odabiru vrste materijala koji će se upotrijebiti za izradu dijelova parnog kotla je i trajna čvrstoća pri povišenim temperaturama. Za područje izrade dijelova parnih kotlova kao referentno vrijeme za koje se utvrđuje trajna čvrstoća određena je granica od 10^5 radnih sati.

Sljedeći dijagram prikazuje usporedbu trajne čvrstoće $R_m/10^5$ za čelike 10 CrMo 9-10; HCM 2S; 7 CrMoVTiB 10-10 i X10 CrMoVNB 9-1 u odnosu na vrijednosti temperature:



Na osnovu utvrđenog se pokazalo mogućim da novi materijali osim za izradu cijevi za cijevne zidova kotla budu korišteni i za izradu cijevi za cijevne zmije pregrijača, ali i za deblostijene komore odnosno cjevovode u okviru kotlovskog postrojenja.

Drugi pravac razvoja bili su martezični čelici na bazi 9%Cr za izradu najopterećenijih dijelova parnih kotlova (izlazna komora krajnjeg pregrijača pare i cjevovod svježe pregrijane pare prema turbini), a polazilo se od već poznatog čelika X10 CrMoVNB 9-1 (ASME-Code P91). Čelik P91 je prvi put u kotlogradnji primijenjen 1989 godine za izradu komore svježe pare u KW Dayton Power, a za izradu cijelog visokotlačnog sistema u KW Scholven 1991 godine.

Razvijeni su materijali: X10 CrMoWVNb (E911) razvijen u Europi i materijal Nf 616 (ASME-Code P92) koji je razvijen u Japanu.

U Tablici 2. su prikazani kemijski sastavi ovih čelika:

Element [%]	X10 CrMoWVNb 9 – 1(P91)	X11 CrMoWVNb 9-1-1 (E911)	Nf 616 (P92)
C	0,08 – 0,12	0,09 – 0,13	0,07– 0,13
Si	0,20 – 0,50	0,10 – 0,50	max. 0,50
Mn	0,30 – 0,60	0,30 – 0,60	0,30 – 0,60
P	max. 0,025	max. 0,020	max. 0,020
S	max. 0,025	max. 0,020	max. 0,020
Ni	max. 0,40	0,10 – 0,40	max. 0,40
Cr	8,00 – 9,50	8,50 – 9,50	8,50 – 9,50
Mo	0,85 – 1,05	0,90 – 1,10	0,30 – 0,60
W	-----	0,90 – 1,10	1,50 – 2,00
V	0,18 – 0,25	0,18 – 0,25	0,15 – 0,25
Nb	0,06 – 0,10	0,06 – 0,10	0,04 – 0,09
N	0,030 – 0,070	0,050 – 0,090	0,030 – 0,070
B	-----	-----	0,0010 – 0,0060

Tablica 2.

U cilju daljnjeg povećavanja vrijednosti trajne čvrstoće pri povišenim temperaturama odnosno u svrhu omogućavanja daljnjeg povećavanja parametara pregrijane pare u oba čelika se kao važan legirajući element uvodi wolfram. Utjecaj wolframa na povećavanje vrijednosti trajne čvrstoće pri povišenim temperaturama je vrlo kompleksan i još uvijek nije istražen u svim pojedinostima.

U čeliku E911 je prosječno ca. 1% wolframa, a u čeliku P92 oko 1,7% ali je zbog toga u istom smanjen sadržaj molibdena na ca. 0,5% kako bi se smanjila mogućnost stvaranja δ -Ferita.

Oba čelika namijenjena su, prema prvim prognozama, za korištenje do max. 630 °C. Osnovno pravilo je da zahtijevana svojstva ovih čelika postizemo pravilno provedenim postupkom poboljšavanja. U odnosu na veličinu izratka mora se sa temperature normalizacije izvršiti ohlađivanje dovoljno velikom brzinom da bi se postigla željena struktura. Do debljina ca.

80 mm hlađenje na zraku osigurava postizanje potpuno martenzitne strukture. Zbog smanjenog sadržaja ugljika ovaj martenzit ima niže vrijednosti tvrdoće koje nakon zavarivanja u metalu zavara iznose oko 400HV₁₀. Zbog toga se smanjuje i sklonost nastanku interkristalnih pukotina uslijed unutarnjih naprezanja pri ohlađivanju pa kod ovih čelika i za debljine do 50 mm dozvoljava ohlađivanje zavara do temperature okoliša što je nezamislivo u slučaju čelika X20 CrMoV 12-1.

Čelik X11 CrMoWVNb 9-1-1 (E911) je prvi put primijenjen za izradu izlazne komore pregrijača pare i cjevovoda pregrijane pare u termoelektrani BoA Niederaußem Blok K. Izrada navedenih dijelova od čelika E911 je omogućila smanjenje debljine stijenke cijevi za ca. 25% pa su naravno smanjeni i troškovi materijala i izrade.

Novi materijal Nf616 (P92) je prvi put u Njemačkoj primijenjen za izradu izlazne komore međupregrijanja u okviru mjera sanacije u GKK Kiel, gdje je morala biti zamijenjena stara komora koja je bila izrađena od materijala 10 CrMo 9-10, a veća primjena je uslijedila pri izradi nove termoelektrane Alvedøre u Španjolskoj.

Prema svojim svojstvima trajne čvrstoće na povišenim temperaturama navedeni čelici su će biti korišteni u izradi dijelova za nove termoelektrane. Ograničavajuća okolnost je njihova manja otpornost nastanku korozijskih procesa na visokim temperaturama, koja također određuje vrijeme korištenja određenog kotlovskog dijela. Na dijelovima parnih kotlova djeluju različiti korozijski procesi. Sa jedne strane su to korozijski procesi na strani pare odnosno vode, a sa druge strane procesi korozije na povišenim temperaturama koji su prisutni sa strane izložene djelovanju vrućih plinova izgaranja. Novi materijali na bazi 9 % sadržaja kroma imaju manju otpornost nastanku korozijskih procesa na visokim temperaturama u odnosu na poznati čelik X20 CrMoV 12-1 koji ima ca. 12 % kroma. Zbog toga je bilo nužno raditi na razvoju materijala na bazi 12 % kroma, koji bi imali trajnu čvrstoću pri povišenim temperaturama usporedivu sa vrijednostima za materijale E911 odnosno P92, ali bolju otpornost korozijskim procesima.

Rezultat ovog nastojanja je pojava materijala, tvornički imenovanog kao VM12, koji je razvijen od strane kompanije Vallourec&Mannesmann sa slijedećim kemijskim sastavom:

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	W	V	Nb	Co	B	N
0,115	0,49	0,35	0,018	0,001	0,08	11,5	0,29	0,29	1,50	0,26	0,05	1,62	0,0049	0,065

Prema materijalima objavljenim od strane kompanije Vallourec&Mannesmann od ovog materijala su već izrađene i tankostijene (8,8 mm) ali i deblostijene cijevi (35 mm) koje su u stadiju ispitivanja.

Nešto ranije u Japanu je razvijen čelik oznake HCM 12. Ovaj čelik je također nastao daljnjim razvojem čelika X20 CrMoV 12-1 odnosno čelika X20 CrMoWV 12-1. Vrijednosti trajne čvrstoće pri trajanju opterećenja 10^5 sati su veće nego kod čelika X10 CrMoVNb 9 – 1 (P91). Pored ove značajke čelik HCM 12 ima i veću otpornost prema koroziji i oksidaciji na povišenim temperaturama, a zanimljivo je da ima najmanju tvrdoća zavara u toplinski neobrađenom stanju (as-welded condition) od svih čelika koji imaju 9 - 12 % kroma. Uz optimalne parametre zavarivanja postignuta tvrdoća zavarenog spoja je ispod 380HV₁₀.

Kemijski sastav ovog čelika:

C	Cr	Mo	W	Nb	V
max. 0,14	11,0-13,0	0,80-1,20	0,80-1,20	max. 0,20	max. 0,20

Pri izvođenju montažnih radova izvodili smo ugradnju i zavarivanje cjevovoda izrađenih od čelika X10 CrMoVNb 9-1 (GuD Anlage München Süd, GuD Anlage Köln – Niehl, Gud Anlage A800 – BASF Ludwigshafen, KW Hamborn Duisburg), a sa materijalima oznake 7 CrMoVTiB 10-10 i HCM 12 smo radili na gradilištu KW Hamborn Duisburg. Obje vrste materijala su korištene za izradu cijevnih zmija pregrijača, a čelik 7 CrMoVTiB 10-10 i za izradu komora pregrijačkog sistema. Na istom gradilištu smo izvršili zavarivanje montažnog spoja između izlazne komore pregrijača pare 3 od materijala X11 CrMoWVNb 9-1-1 (E911) sa cjevovodom svježe pare izrađenog od materijala X10 CrMoVNb 9-1.

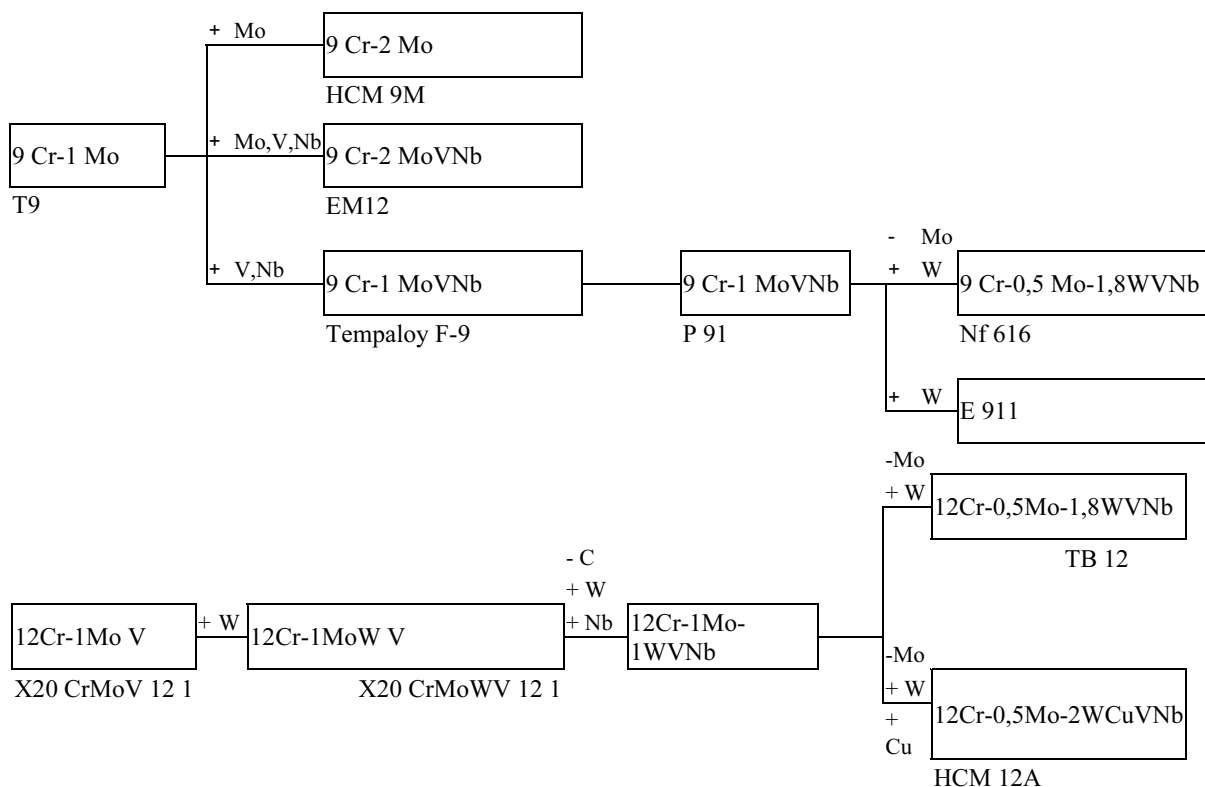
Pored navedenih radova naši zavarivači su izvodili zavarivanje spojeva na cijevnim zmijama pregrijača pare izrađenim od čelika X3 CrNiMoN 17-13 u termoelektrani BoA Niederaußem Blok K. Ovaj materijal je razvijen, odnosno našao je primjenu kao materijal za izradu cijevnih zmija čak i pri temperaturama iznad 620 °C. Za razliku od ranije primjenjivanog materijala oznake X8 CrNiNb 16-16 koji je stabiliziran niobijem, čelik X3 CrNiMoN 17-13 je nestabiliziran, pa je manje osjetljiv na moguću pojavu pukotina u zoni utjecaja topline pri dugotrajnom izlaganju povišenim temperaturama, a zadovoljavajuća trajna čvrstoća je postignuta legiranjem sa Mo. Sadržaj ugljika je ograničen na max. 0,04% da bi bilo onemogućeno gotovo ikakvo stvaranje karbida, a za povećavanje granice razvlačenja u kemijski sastav je dodan i mali sadržaj dušika.

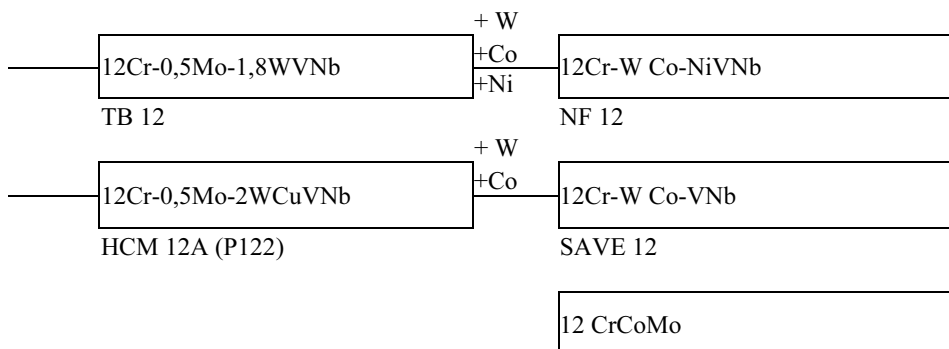
C max.	Pmax.	Smax.	Cr	Ni	Mo	B	N
0,04	0.035	0,015	16,0-18,0	12,0-14,0	2,0-3,0	0,0015-0,0050	0,10-0,18

Svi navedeni novi materijali su već primijenjeni pri izradi novih ili saniranju starih kotlovskih postrojenja, ali njihova primjene još uvijek ne omogućuje povećavanje parametara pregrijane pare na željenih 350 bara pritiska i temperature 700 °C na izlazu iz kotlovskog postrojenja.

7. PRAVCI RAZVOJA KOTLOVSKIH MATERIJALA

Daljnji razvoj materijala na bazi čelika iz grupe 9-12 % kroma vidljiv je iz slijedećeg shematskog prikaza:





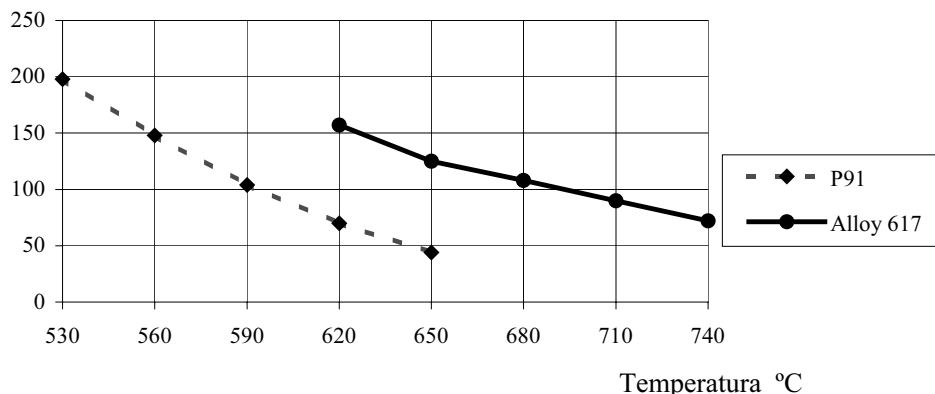
Uz daljnji razvoj čelika ove grupe sve prisutnija je spoznaja da će za izradu najopterećenijih dijelova parnog kotla koji bi na izlazu iz kotlovskog postrojenja postizao pregrijanu paru pritiska 350 bara i temperature 700 °C trebati primijeniti visokolegirane vatrootporne čelike odnosno legure. Ograničavajući faktor primjene ovih materijala je svakako visoka cijena istih, budući da se radi o materijalima sa visokim sadržajima kroma i nikla. Zbog toga su istraživanja usmjerena u pravcu primjene materijala sa što je moguće manjim sadržajem ovih legirajućih elemenata, a posebno je značajna cijena nikla. Sa druge strane istraživanja idu u pravcu optimiranja dijelova odnosno tijeka procesa u parnom kotlu kako bi se postiglo da za izradu najopterećenijih dijelova bude utrošeno što je moguće manje ovih skupih materijala (smanjenje površine krajnjih pregrijača, smanjenje dužine cjevovoda svježe pregrijane pare i sl.)

Iz navedene grupe materijala u istraživanja su kao potencijalno najprimjenjiviji uključeni slijedeći materijali:

- TP347HFG (18Cr-8Ni Nb)
- Tempaloy A-1 (18Cr-8Ni Nb Ti)
- Super 304H (18Cr-8Ni Cu Nb Ti)
- HR 3 C (25Cr-20Ni Nb N)
- NF 709 (25Cr-20Ni Mo Nb Ti)
- Tempaloy A-3 (22Cr-15Ni Nb N)
- SAVE 25 (23Cr-18Ni Cu W Nb N)
- AC 66 (27Cr-32Ni Ce Nb)
- Alloy 617 (Ni-legura, 20-24%Cr, 8-10%Mo, 10-15%Co)
- Alloy 690 (Ni-legura, 27-30%Cr)
- Alloy 740 (Ni-legura, 23-27%Cr, 18-20%Co, 2%Ti, Nb+Ta 2%)

Sljedeći dijagram kvalitativno prikazuje usporedbu trajne čvrstoće $R_{m/10^5}$ za leguru Alloy 617 u odnosu na čelik P91 (X10 CrMoVNb 9-1):

$R_m / 10^5$ (Mpa)



8. PROJEKTI ISPITIVANJA I RAZVOJA

Prije primjene novih materijala za izradu dijelova parnih kotlova moraju biti provedena različita ispitivanja koja imaju za cilj kvalificiranje primjene novih osnovnih materijala odnosno stvarnu provjeru rada pojedinih komponenti kotlovskog postrojenja.

Neki projekti ispitivanja novih osnovnih materijala odnosno provjere rada pojedinih komponenti kotlovskih postrojenja u Europi su već u tijeku, a financiraju se ili u okvirima pojedinih država ili kao zajednički projekti Europske zajednice.

Na nivou Europske zajednice postoji istraživački projekt AD 700 (Advanced 700°C Power Plant) koji uključuje više od 40 kompanija i to proizvođače električne energije, proizvođače kotlova, turbina i opreme, proizvođače materijala i znanstvene institucije. Trajanje cjelokupnog projekta je 15 godina i dodatne 2 godine probnog rada novog postrojenja. Projekt se sastoji od 3 istraživačke cjeline: kotao, turbina i procesi, a predviđeno je da se odvija u 6 faza. Faza 1 koja je započela 1998 i završena je krajem 2003 a ukupni troškovi su bili ca. 21 Mio €.

Troškovi faze 2 ovog razvojnog projekta, koja je započela početkom 2002 godine i koja bi trebala trajati 4 godine, planirani su na nivou ca. 12 Mio €. Tijekom faze 2 će biti nastavljeno sa daljnjim istraživanjem primjenjivih materijala, ali težište je na kreiranju osnovnog dizajna pojedinih komponenti novog postrojenja.

Faza 3 uključuje provođenje različitih podprojekata ispitivanja materijala odnosno komponenti koji se financiraju ili na nivou Europske zajednice ili na nivou pojedinih država.

Kao primjeri provođenja ispitivanja mogu se spomenuti slijedeći projekti:

- projekt ispitivanja komponenti kotlovskog postrojenja COMTES 700 (EU)
- projekt ispitivanje materijala KW Esbjerg (EU)
- projekt ispitivanje materijala KOMET 650 (Njemačka)

COMTES 700 (Component Test Facility for a 700°C Power Plant) je projekt ispitivanja pojedinih komponenti termoelektrane. Ispitivanje obuhvaća slijedeće komponente:

- isparivački dio
- cijevne zmije pregrijača

- komore isparivačkog i pregrijačkog dijela
- cjevovod visokog pritiska
- sigurnosne ventile

Ispitivanje ovih komponenti koje se provodi u termoelektrani KW Scholven Blok F u Njemačkoj počelo je tijekom 2005 godine a kroz ca. 4 godine provođenja predviđeno je da bude testirano kroz približno 20 000 radnih sati. Rezultati ispitivanja trebaju verificirati primjenu novih materijala odnosno trebaju biti iskorišteni pri gradnji nove termoelektrane sa temperaturom pregrijane pare 700°C.

Pri izradi komponenti su korišteni slijedeći materijali: P24, HCM 12, HR 3C, Alloy 174, Alloy 617 i Alloy 740.

Projekt ispitivanja Esbjerg je ispitivanje materijala za cijevne zmije pregrijača parnog kotla. U okviru ovog ispitivanja izrađene su pojedinačne cijevne zmije od slijedećih materijala: TP 347HFG, HR 3C, S 304 Hcu, Sanicro 25, HR 6W, Alloy 740. Izrađene cijevne zmije su ugrađene u pregrijačko područje bloka 3 u KW Esbjerg u Danskoj u ljeto 2004 godine i i njima se vrši pregrijavanje pare do 720 °C. Težište ispitivanja je usmjereno na korozijsko ponašanje ispitivanih materijala u uvjetima korozije površina izloženih dimnim plinovima odnosno u uvjetima oksidacijskog djelovanja pare sa unutarnje strane cijevi.

KOMET 650 (**K**raftwerk **O**ptionen: **M**aterial- und **M**esstechnik-**E**ntwicklungen und **T**est) je projekt koji se sastojao od 14 različitih podprojekata. Rezultati ovog projekta trebaju biti osnova za izgradnju nove referentne termoelektrane u Njemačkoj sa temperaturom pregrijane pare 620 °C.

Gradnja ove termoelektrane je prvi cilj grupe E_{max}. u kojoj su udruženi proizvođači električne energije (RWE Power, E.ON, STEAG i MARK E), proizvođači: Siemens i Babcock Hitachi i znanstvene institucije.

Konačni cilj grupe je gradnja nove referentne termoelektrane ložene ugljenom sa temperaturom pregrijane pare 700 °C i maksimalnim pritiskom do 375 bara koja bi mogla postići neto stupanj iskorištenja i do 55%.

Zahvaljujući povećanju stupnja iskorištenja ove termoelektrane bi trošile ca. 15% manje ugljena, emisija CO₂ bi također bila smanjena za najmanje 15%.

Jednostavnim izračunom se može pokazati da bi zamjenom svih postojećih termoelektrana u svijetu loženih ugljenom (prosječni stupanj iskorištenja 30%) sa novim termoelektranama sa stupanjem iskorištenja 46% emisija CO₂ bila smanjena za najmanje 35%. Time bi se ukupna godišnja emisija CO₂ u svijetu sa današnjih ca. 5,5 Mrd. t smanjila na ca. 3,6 Mrd. t što je oko 50% veće smanjenje od smanjenja koje zahtjeva Kyoto – Protokol u periodu 2008 do 2012.



9. LITERATURA

1. Studija: Kraftwerke der Zukunft: sauber und wirtschaftlich – 1999
Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
Technischer Vereinigung der Großkraftwerkebetreiber e.V.
Vereinigung Deutscher Elektrizitätswerke e.V.
Fachverband Dampfkessel- Behälter und Rohrleitungsbau e.V.
2. Članak: Wie haben sich die Wirkungsgrade der Kohlekraftwerke entwickelt und was ist künftig zu erwarten?
Autor: Hans-Dieter Schiling, 2004
3. Studija: Power: Perspektiven 2005
RWE Power AG, März 2005
4. Studija: Zahlen und Fakten zur Stromerzeugung
VGB PowerTech, 2004
5. Zbornik radova: VGB Konferenz "Kraftwerke im Wettbewerb-Technik, Betrieb und Umwelt" Köln 2003
6. Seminar: Schweißtechnisches verarbeitung der Stähle des Kraftwerksbau
GSI SLV Duisburg – Ožujak 2004