

IIW IX-1963-2000

Nobutaka Yurioka

Nippon Steel Corporation

NAUKA I TEHNOLOGIJA ZAVARIVANJA I SPAJANJA U 20-OM VEKU I PERSPEKTIVE ZA 21. VEK

► KONSTRUKCIJSKI ČELICI I NJIHOVO ZAVARIVANJE ◀

1. UVOD

Na početku novog milenijuma japansko društvo za zavarivanje objavilo je specijalno izdanje Nauka i tehnologija zavarivanja i spajanja u 20-om veku. Ovo izdanje obuhvata obuku i obrazovanje u zavarivanju, materijale za zavarivanje, postupke zavarivanja i spajanja i konstrukcijski integritet zavarenih konstrukcija. Među ovim temama, za ovaj izveštaj izabran je razvoj čelika i tehnologija zavarivanja ovih čelika u Japanu.

2. RAZVOJ KONSTRUKCIJSKIH ČELIKA I METALURGIJE ZAVARIVANJA U 20-OM VEKU

Krajem 1890. godine u Nemačkoj je razvijeno aluminotermijsko zavarivanje. Ovaj postupak za zavarivanje železničkih šina koristi egzotermnu reakciju čistog aluminijuma i oksida železa. To je početak zavarivanja čeličnih materijala, a ova tehnika za zavarivanje železničkih šina se koristi širom sveta. U Japanu to nije bio slučaj sve do 1951. godine, kada je aluminotermijsko zavarivanje primenjeno za montažno zavarivanje potpuno zavarenog sistema šina linije brzog voza (Šinkansen). Osim aluminotermijskog zavarivanja, za zavarivanje na licu mesta ove linije, korišćeno je i ručno elektrolučno zavarivanje.

U prvim godinama 20-og veka prva visoka peć u Japanu proradila je u valjaonici Yawata, a čelični limovi su bili debljine do 10 mm, a tu su proizvedene i čelične šine. To su bile godine odmah iza kinesko-japanskog rata i tri godine pre rusko-japanskog rata. U cilju promene nacionalnog bogatstva i vojne snage, u Japanu se tada pojavila potreba za mnoštvom konstrukcijskih čelika. Tada su se čelični mostovi i brodovi proizvodili zakivanjem. U Ujedinjenom kraljevstvu (UK) potpuno zavareni brod proizveden je 1921. godine. Samo godinu dana posle toga, u brodogradilištu Nagasaki u Japanu, završen je SUWA-MARU, potpuno zavareni brod od 421 tone.

U tabeli 1 prikazana je istorija razvoja konstrukcijskih čelika i tehnologije zavarivanja u 20-om veku, za svaki tip zavarene konstrukcije. Iz tabele 1 je uočljivo da sa godinama raste razvijanje i korišćenje novih čelika. Razlog tome je širenje zahteva korisnika za povećanje efikasnosti proizvodnje, da mnogo ugodnije žive i da povećaju konstrukcijski integritet i ispune zahteve očuvanja životne sredine.

U tabeli 1 naznačeno je da je razvoj novih čelika nastao usled mnoštva faktora, koji ne obuhvataju samo zahteve ugodnijeg života, bezbednosti i očuvanja životne sredine, već takođe i usled razvoja procesa proizvodnje limova, kao i zbog incidentata lomova zavarenih konstrukcija, i kombinacije ovih faktora. U tabeli 2 dati su razlozi i primeri razvijenih čelika na osnovu ovih faktora.

Čudno je da nema mnogo tipova čelika koji su razvijeni usled razvoja postupaka zavarivanja.

Na početku 1950. godine japanski brodograditelji su uveli primenu visoko produktivnog postupka zavarivanja elektronskim snopom (ES), ali je ona donekle bilo usporena zbog prslina usled sumpora u zavarenom spoju. Tada je iznađen uzrok nastajanja ovih prslina, a to je što su korišćeni obični neumireni čelici, tako da je upotreba poluumirenih ili umirenih čelika za brodogradnju postalo pravilo. VCLCC - vrlo dugački tankeri za prevoz nafte doživeli su svoj bum u konstruisanju pred kraj šezdesetih godina, tako da je počelo intenzivno korišćenje EPP zavarivanja sa velikom količinom unete toplote. Tokom 70-tih, proizvođači čelika razvili su brodograđevinske čelike čija je ZUT bila dovoljno fina posle zavarivanja sa velikom količinom unete toplote. Početkom 80-ih uspešno je primenjen termomehanički kontrolisani proces (TMCP), tako da su proizvedeni čelični limovi sa daljim unapređenjem zavarljivosti. Ove tri inovacije su materijalizovane zajedničkim istraživanjem industrije i nauke zavarivanja brodograđevinskog i građevinskog inžinjeringa, a radi rešavanja problema koji su vezani za upotrebu novih čelika. Takva industrijsko-akademska saradnja u promovisanju korišćenja novih čelika značajna je za Japan. Zajednička istraživanja u ovoj oblasti obavila je, kao svetski lider, japanska industrija čelika.

Razvoj potrošnih materijala za zavarivanje nije pomenut u tabeli 1. Postoje postupci zavarivanja kao što su zavarivanje elektronskim snopom, laserom, trenjem ili električnim otporom, kod kojih se generalno ne koriste dodatni materijali. Međutim, konstrukcijski konvencionalni čelici se najviše zavaruju uz pomoć električnog luka, uz korišćenje dodatnih materijala. Kada god se razvije novi čelik, potrošni materijali za zavarivanje se moraju tako proizvesti da budu pogodni za novorazvijeni čelik. Na primer čelici otporni na vatru - požare za građevinarstvo, nisu imali širu primenu sve dok nisu kompletirani potrošni materijali za E, TIG, MIG, EPP.

TMCP je inovirani proces proizvodnje čeličnih limova. On omogućava da odaberemo najbolju kombinaciju pravila toplog valjanja i brzina hlađenja, tako da se mogu postići najpogodnije metalurške mikrostrukture čelika, a zavisno od njegove namene, kao što su brodovi, zgrade, mostovi, skladišni rezervoari ili posude pod pritiskom. TMCP čelici su termomehanički ojačani, tako da se mogu smanjiti količine legirajućih elemenata, što doprinosi unapređenju zavarljivosti, jer se postiže manje otvrdnjavanje ZUT. Međutim, pri zavarivanju sa velikom količinom unete toplote, ZUT ima tendenciju omekšavanja. Neki potrošni materijali, za zavarivanje TMCP čelika sa velikom količinom toplote, proizvode se sa gornjim hemijskim sastavom, t.j.

sadržaj legirajućih elemenata se povećava, tako da se preko efekta naprezanja plastičnom deformacijom minimizira omekšavanje spoja. Unapređeni čelici otporni na puzanje, kao što su 2.25 Cr - 1 Mo sa dodatkom V, i 9-13 Cr sa dodatkom W, proizvode se DQ (direktnim kaljenjem), jednim tipom TMCP. Poboljšanje se odnosi i na prsline usled puzanja koje se javljaju u ZUT i metalu šava spojeva, posle dugogodišnje eksploatacije energetskih postrojenja. U cilju sprečavanja prsline usled puzanja u metalu šava (tzv. tip I i tip II prsline), sastav metala šava je takav da na visokim temperaturama, do odgovarajućeg nivoa, može da se obezbedi mehaničko ojačavanje (overmatching). Kao posledice ovoga, prsline usled puzanja u ZUT, zvane tip IV, zahtevaju odgovarajuću pažnju. Mehaničko ojačavanje (overmatching) i gornji hemijski sastav metala šava doveli su do proizvodnje opreme koja radi na višim temperaturama i pritiscima.

Za delove automobila izložene koroziji koriste se čelične trake sa galvanskom prevlakom. Od sloja prevlake galvanski prevučenog čelika zahteva se ne samo otpornost na koroziju, već je poželjna zavarljivost tačkastim elektrootpornim postupkom i pogodnost za deformaciju pritiskom. Neki proizvođači, u cilju poboljšanja zavarljivosti tačke, završnom oksidacijom obezbeđuju sloj Fe-O na trakama koje se zaštićuju sa Zn prevlakom.

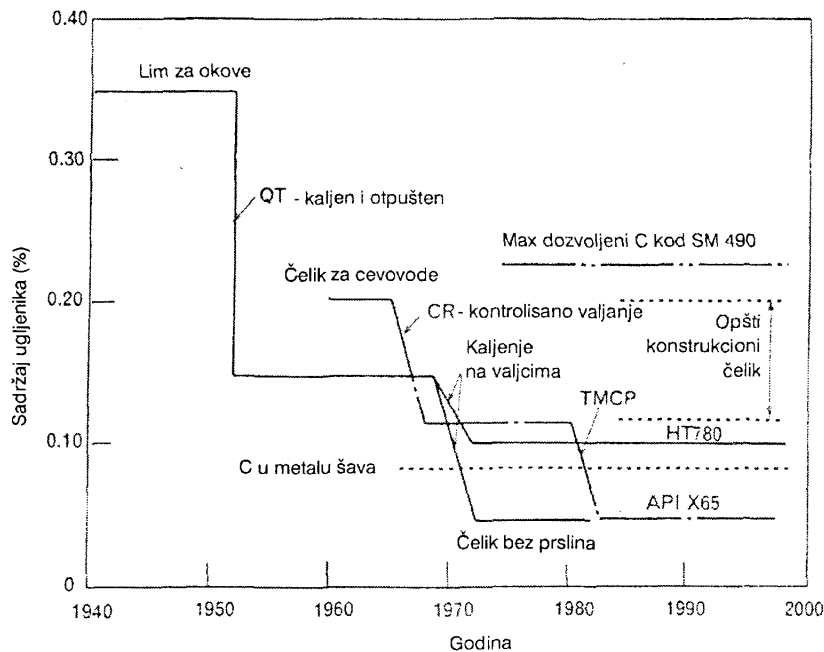
Galvanski prevučene čelične trake se ponekad zavaruju u zaštiti gasa. U tom slučaju se, zbog isparavanja cinka, u metalu šava stvaraju gasni mehurići. Radi obezbeđenja otpornosti na stvaranje gasnih mehura, neki proizvođači dodatnih materijala menjaju hemijski sastav elektrodne žice [1]. Međutim, korišćenje unapređene žice nije dovoljno. Za potpuno izbegavanje nastanka mehurova potreban je sinergetski efekat kontrole pulzirajućom strujom. Ovo se odnosi samo na čelike otporne na požare. TMCP čelici i galvanizirani čelici su primeri zajedničkog razvoja čelika i potrošnih materijala. Odgovarajući potrošni materijali uvek moraju da budu pogodni za bilo koji drugi novo razvijeni čelik.

3. RAZVOJ ČELIKA I METALURGIJE ZAVARIVANJA

Tokom 1936. godine, zbog prsline u zavarenom spoju čelika St 52 visoke čvrstoće, dogodio se incident loma ZOO mosta, što je kasnije praćeno sličnim incidentima u Evropi. Otvrdnjavanje ili plastičnost ZUT dobija veliki značaj. Tokom 1940. godine, u cilju obezbeđenja plastičnosti ZUT čelika, Duren i O Nil (O'Neil) [2] su predložili koncept ekvivalenta ugljenika. Ovaj ekvivalent ugljenika je modifikovan u MIZ (IIW) ekvivalent ugljenika, koji se danas širom sveta koristi kao indeks zavarljivosti čelika.

Tokom II svetskog rata za vojne tenkove su korišćeni pancir limovi sa sadržajem ugljenika od 0.35 %. Svaka zemlja je imala ozbiljne probleme sa ZUT usled zakasnelih prsline u ovim limovima. Američka armija je pronašla da upotreba austenitnih dodatnih materijala može sprečiti nastanak zakasnelih prsline. Tada je potvrđeno da zakasnele prsline nastaju usled vodonika, a austenitni čelik rastvara mnogo više vodonika nego feritni. Ovo otkiće je izazvalo razvoj niskovodoničnih elektroda.

Tokom 1952. godine američki, US čelik, uspešno je proizveo opremu za kaljenje i otpuštanje (QT) za široke čelične limove bez izraženog krivljenja, i proizveden je čelik T-1 klase TS 780 MPa, sa hemijskim sastavom sličnim pancir pločama, ali sa smanjenim sadržajem ugljenika na 0.15 %. Za ovaj čelik se smatralo da je veoma zavarljiv i žilav. Međutim, vodonikom izazvane prsline su se još uvek javljale na mnoštvu čeličnih mostova izrađenih od T-1 čelika, zbog čega je bilo potrebno predgrevanje na dovoljno visokim temperaturama. Pred kraj 60-ih godina postupak valjanja i kaljenja zamenio je postupak konvencionalnog valjanja i kaljenja, omogućivši ojačavanje težih limova nego ranije. Tokom 1990. godine primenjeno je direktno kaljenje (DQ), kao jedan od tipova TMCP, i proizvedeni su različiti novi tipovi čelika, kao što je čelik TS 780 MPa sa taloženjem bakra. Na slici 1 prikazana je istorija promena sadržaja ugljenika kod visokočvrstih čelika, sa razvojem postupka proizvodnje limova.



Slika 1. Promene sadržaja ugljenika u konstrukcijskim čelicima

Tabela 1. Razvoj zavarljivih konstrukcijskih čelika u 20-om veku

| Konstrukcija | 1900 | 1910 | 1920 | 1930 | 1940 | 1950 | 1960 | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 |
|----------------------------|---|--------------------------------------|--|--|---|---|---|---|--------------------------------------|---|--|
| Brodovi | Visoka peć Proizvodnja japanskih čelika | | Potpuno zavareni brod u Japanu | US Liberti brodovi krti lom TS 580 ratni brod | | EPP, prsline usled S | | Ultra dugi tankeri za prevoz nafte Limovi za veliki unos toplote | Visokočvrsti TMCP čelici | Incidenti izlivanja nafte | Visoko otporni čelici |
| Morske platforme | | | | | | | | Poluzaronjena oprema | Zahtevani CTOD Lokalna krtost ZUT | Čelici sa Ti O | Čelici otporni na koroziju u priobalnoj liniji |
| Građevinar- stvo | | | | Potpuno zavarene građevine u Japanu | Toranj u Tokiju HT čelik | Visoke građevine otporne na zemljotrese u Japanu | Jako široki i debeli lukovi Prsline u zavar.spoju (Amerika) | Čelici niske R _e Čelici za građevinarstvo jako visokih performansi | Jako otporni SN čelici | | |
| Mostovi | | | Čelični most St 52 lom zavar.spoja (Nemačka) | T-1 čelik Prsline u zavar. spoju | CORTEN čelik otporan na atmosfera | Minato most čelik HT 80 Japan | | Most u Tokiju čelik sa dodatkom Ti | | Akaši most HT 980 čelik (taloženi Cu) | |
| Brane | | Potpuno zavarene brane (Japan) | | | | Oh-hira hidrocentrala čelik HT 780 (Japan) | | | | Švajcarska hidrocentrala čelik HT980 | |
| Cevovodi | | | | | Kontrolisano valjani limovi (UK) | Vodonikom induk.prsline cevovod Aljaska CR čel. masovna upotreba | | API-X80 | | Zavarljivi 13 Cr cevi | |
| Skladišni rezervoari | | | | | 9 % Ni kaljen i otpušten čelik Rezervoar za TNG (prsline usled napona, Japan) | | Rezervoar za TNG (Katar) Curenje i požar | | Rezervoar sa duplim zidom | 9 % Ni čelik sa debelim zidom (TMCP) | |
| Posude pod pritiskom | | | T-1 (TS 980) čelik preko US čelika | | Rezervoar za propilen krti lom (J) | HT 780 sferni rezervoar prsline u metalu šava | Posuda generatora pare zavaren elekt. snopom | ASTM A387 G91 Modifikovani 9 Cr | | 9 Cr čelik sa W | |
| Automobilska Industrija | benzin | | | | Čelik sa niskim C za duboko izvlačenje Kanadska pravila za antikoro. zaštitu | Ultra niski C Visoko čvrsti čelik za delove | Zavarljivi galvaniz. limovi Zavarivanje i krojenje laserom | | | Rezervoar bezolovn | |
| Nerđajući čelici | | | | | Nuklearne energane u Japanu SUS 304 prevučeni čelik | Potpuno nerđajući čelik | | Nerđajući čelik za konstrukcionu opremu. Nerđajući čelik za perače mašine | | | |
| Železnica | Visoka peć u Japanu železničke šine | | | Elektrootporsko sučeono zavar. Elektrolučno zavarivanje | Šine sa otvrdnutom glavom | Prsline u šavu alumino- termijski zavar. Tehnike elektroluč. zavar. | Term. obrada otvrdnjavanje glave na liniji | Metal šava sa visokim C | | Bejnitni čelik za šine | |



Tabela 2. Razlozi razvoja zavarljivih konstrukcijskih čelika

| RAZLOG | | RAZVIJENI ČELIK |
|------------------------------------|---|---|
| Razvoj postupka zavarivanja | Zavarivanje sa velikom količinom energije Zavarivanje elektronskim snopom | Ti-N čelik, Ti-O čelik, Čelik sa manje Al |
| Razvoj proizvodnje čeličnih limova | Ujednačeno kaljenje Kontrolisano valjanje (CR) Termomehanički kontrolisani proces (TMCP) Toplo valjanje tokom zagrevanja(TMCP) | T-1 čelik (QT) Čelik za cevovode sa smanjenim perlitom Čelici visoke čvrstoće i žilavosti za brodogradnju, građevinarstvo rezervoare za rad na niskim temperaturama i posude pod pritiskom Čelici visoke otpornosti |
| Pojave loma | Lom zavarenog spoja mosta od čelika velike čvrstoće Krti lom Liberti brodova Prsline usled sumpora u EPP metalu šava Lamelarni lom poluzaronjene opreme Curenje i požar rezervoara za TNG Raspipanje nafte iz tankera | T-1 čelik (QT) Specifikacija vrednsti po Šarpiju Umireni čelici Čelici otporni na lamelarni lom 3,5% Ni čelik; Dupla posuda; Dupli trup; čelik visoke otpornosti |
| Konstrukcije sa malim troškovima | Smanjenje temperature predgrevanja Relaksacija ograničenja unosa toplote | TMCP čelici; Čelici sa taloženjem Cu; TiN čelici; TiO čelici |
| Životna sredina/ održavanje | Bezbednost skladišnih rezervoara za TNG i tečni gas Smanjenje zaštite mostova premazima Velika termička efikasnost (smanjenje CO ₂) Konstrukcijski integritet pri zemljotresu Sprečavanje rasipanja nafte Automobil manje težine(smanjenje CO ₂) Automobil duže trajnosti Bezbednost automobila pri sudaru | Čelici rafinisanog zrna umireni sa Al; 9% Ni čelik Čelik otporan na atmosferski uticaj Modifikovani Cr Mo čelik; unapređeni 9Cr čelik Čelik nižeg napona tečenja; Čelik visoke otpornosti; Čelične trake visoke čvrstoće; Zavarljivi galvanski prevučeni čelici; Čelične trake visoke čvrstoće |

Promena sadržaja ugljenika kod čelika za cevovode dobro je prikazana na slici 1. U 60-im godinama najznačajnija pojava kod sušeonog zavarivanja cevi su vodoničkom izazvane prsline poput mehura, duž perlitnih traka bogatih ugljenikom, koje se javljaju u eksploataciji pod dejstvom vodonik sulfida (H₂S). U tim danima BISRA (Britanski istraživački institut za gvožđe i čelik) je metalurški istraživao proces kontrolisanog valjanja(CR). Proces CR je praktično primenjen sredinom 60-ih godina i tada su proizvedeni čelici za cevovode sa smanjenim perlitom i

nižim sadržajem ugljenika. Krajem 60-ih godina procesom CR japanski proizvođači čelika masovno proizvode čelike za cevovode za natovod na Aljasci. Sledeće smanjenje ugljenika do 0,05 %, omogućeno je upravljanjem korišćenja TMCP. Osnovni zahtev kod čelika za cevovode bio je smanjiti sadržaj ugljenika, zbog sprečavanja nastanka prsline usled naponske korozije tokom eksploatacije u okruženju H₂S, jer je kod sušeonih spojeva tvrdoća ZUT jako ograničena.

Kaljeni i otpušteni (QT) čelik, klase TS 600 MPa sa 0.05 % ugljenika, razvijen je kao čelik bez prslina, kod koga se ne zahteva predgrevanje. Međutim, pri zavarivanju konstrukcija potrebno je predgrevanje od 50 °C, radi sprečavanja nastanka vodonikom izazvanih prslina, ređe u metalu šava, nego u ZUT. Kao što je prikazano na slici 1 sadržaj ugljenika u metalu šava se malo menja, stojeći na nivou 0.08 %. Ovo znači da se unapređenje zavarljivosti čelika mora izvesti do mnogo višeg nivoa nego što je to kod metala šava. Međutim, postoje slučajevi da se smanjenje ugljenika uglavnom manifestuje poboljšanjem žilavosti ZUT, posebno kod minimiziranja lokalnih krtih zona u ZUT.

Itoh i drugi [3] su 1969. godine predložili P_{cm} , kao indeks osetljivosti na vodonikom izazvane prsline. Ovaj indeks se razlikuje od ekvivalenta ugljenika IIW u značaju ugljenika na vodonikom izazvane prsline. To znači da je IIW ekvivalent ugljenika pogodan za konvencionalne čelike, a P_{cm} je pogodan za čelike sa smanjenim ugljenikom. Tvrdoća ZUT je određena interaktivnim odnosom tvrdoće martenzita (određena sadržajem ugljenika) i sklonosti ka otvrdnjavanju (dobro određena IIW ekvivalentom ugljenika) pri relativno maloj količini unete toplote pri zavarivanju. Uzimajući ovaj odnos u razmatranje, predložen je CE_N [4] ekvivalent ugljenika. Evropski komitet za normalizaciju (CEN) je publikovao uputstvo za određivanje potrebnog predgrevanja za sprečavanje vodonikom izazvanih prslina, zasnovano na ekvivalencijama ugljenika, kao što je predloženo [5].

Studije o žilavosti ZUT su se ubrzale kada je Nippes (Nippes) [6] razvio Gleeble test za reprodukovanje ZUT pod različitim brzinama hlađenja. Tokom 1962. godine Nakamura i drugi su razvili AIN čelike, klase R_m do 780 MPa, kod kojih je unapređenje žilavosti bilo uzrokovano otežanim rastom austenitnih zrna usled čestica AIN. Tokom 1970. Kanazawa i drugi [8] razvili su čelike za brodogradnju za vrlo velike količine unete toplote, kod kojih se koriste čestice TiN, jer su na visokim temperaturama stabilnije od AIN.

Kako se austenitna zrna rafinišu na visokim temperaturama, a tokom hlađenja austenit se transformiše u ferit i beinit, kao rezultat je da su i oni rafinirani. Međutim, ako su granice zrna između transformisanih produkata pod malim uglom, one ne mogu delovati kao barijere prostiranju prslina, i kao rezultat imaju malu žilavost. Tokom 1970-e Inoue i drugi [9] su predložili koncept efektivne veličine zrna pri lomu, što predstavlja rastojanje između granica zrna pod velikim uglom. Ovaj koncept potpomaže razumevanju relativno velike žilavosti rafinisanog ferita i donjeg beinita, kao i relativno male žilavosti gornjeg beinita. Skoro u isto vreme Mimura i drugi [10] su otkrili da martenzit poput ostrvaca ili tvrde tačke u ZUT ima vrlo loš uticaj na žilavost ZUT. Posle više od 10 godina od ovog otkrića započeto je sa korišćenjem ispitivanja CTOD (kritično pomeranje vrha prsline), koje, nasuprot Šarpi ispitivanju, omogućava da se lokalizuje krtost. Tada je ustanovljeno da je lokalna krtost uzrokovana martenzitom u obliku ostrvaca. Proizvođači čelika su ispitivali uticaj elemenata, kao što su C, Si i Al, na stvaranje i rastvaranje ostrvaca martenzita, tako da su uspeli da naprave čelike bez pojave lokalne krtosti.

Mikrostruktura ZUT se suštinski rafiniše kada stvaranje klica ferita nije po granicama prethodnih austenitnih zrna, već po talogu dispergovanom unutar

austenitnih zrna. Tokom 1975. godine [8, 11] saopšteno je da TiN, ne samo da sprečava rast austenitnih zrna, već deluje kao mesto nukleacije unutargranularnog ferita. Funakoshi i drugi [12] su saopštili da su REM oksid-sulfidi jezgra unutargranularnog ferita, tako da je tada počelo efektivno korišćenje oksida, koji su proglašeni za glavni faktor unapređenja žilavosti u ZUT, kao i u metalu šava. Potrošni materijali za zavarivanje uglavnom sadrže malu količinu Ti koji obezbeđuje stabilizovani prenos kapi rastopa tokom elektrolučnog zavarivanja i već je bilo dobro poznato da je metal šava koji sadrži Ti poželjno rafinisan. Ali taj mehanizam nije bio poznat. Tokom 1980-e, Watanabe i drugi [13] su eksperimentalno promenili sadržaje kiseonika u metalu šava, izvedenog u zaštiti gasa, koji sadrži Ti i pronašli su da oksidi Ti efektno deluju kao jezgra finog unutargranularnog acikularnog ferita. Tada je ustanovljen i potvrđen mehanizam rafinacije zrna kod metala šava koji sadrži Ti.

Do ovih dana sačinjene su brojne studije [13, 14, 15] koje se odnose na ulogu oksida na stvaranje unutargranularnog ferita. Zasnovano na ovom znanju Homa (Homma) i drugi [16] razvili su čelik sa Ti oksidom, takozvani Ti-O čelik, koji je krajem 1980. korišćen za konstrukcije velikih morskih platformi u Severnom moru. U ZUT zagrejanom na visokim temperaturama Ti oksidi su mnogo stabilniji nego talozi TiN, tako da su Ti-O čelici mnogo povoljniji za zavarivanje sa velikim unosom energije. Metalurzi koji se bave čelikom drastično su promenili svoje poglede na okside, koji su smatrani najnepovoljnijim uključcima. Tada je ustanovljena nova disciplina, metalurgija oksida.

4. PERSPEKTIVE ZA 21. VEK

Od 1969. godine u Americi i Evropi su napravljena mnoga značajna otkrića u metalurgiji proizvodnje čelika i zavarivanju. Neka od njih su: otkriće uzroka zakasnelih prslina (Amerika) i pronalazak odnosa između vrednosti po Šarpiju i krtosti (Amerika); koncept ekvivalentnog ugljenika za zavarljivost čelika (UK); razvoj T-1 kaljenog i otpuštenog čelika (UK) i fundamentalna studija kontrolisanog valjanja (UK). Amerika i Evropa su nadmašile Japan u u metalurgiji izrade čelika i zavarivanju. Međutim, posle 1970, u Japanu je započeto sa mnoštvom razvojnih projekata. To su npr: Ti-N čelici za veliki unos toplote; masovna proizvodnja čelika za cevovode postupkom CR, sa redukovanim perlitom; otkriće efektivne veličine zrna i ostrvaca martenzita; praktično korišćenje TMCP za čelike cevovoda; čelici koji koriste okside; promenjena upotreba TMCP za različite konstrukcijske čelike i zavarljive čelične trake sa ultra niskim sadržajem ugljenika.

Postojali su rastući zahtevi kupaca za tehnologije zavarivanja i zavarljive konstrukcijske čelike. To su zavarljivi čelici kod kojih je moguć unos velike količine toplote pri zavarivanju tako da je porasla efikasnost proizvodnje; čelici otporni na atmosferski uticaj i čelici sa prevlakama radi produženja trajanja konstrukcije; čelici otporni na lom; čelici otporni na vatru (požar) i zemljotrese, radi povećanja integriteta zavarenih konstrukcija; čelične trake visoke čvrstoće obradive pritiskom za bezbednost pri sudaru automobila; čelici otporni na pužanje u cilju povećanja efikasnosti razmene toplote kao i smanjenje emisije CO₂. Proizvođači čelika su odgovarali na ove zahteve. Novi čelici

definitivno traže potrošne materijale pogodne za njih, tako da i proizvođači potrošnih materijala moraju odmah odgovoriti na ovaj zahtev.

Međutim, postoje i drugi ekstremni zahtevi razvoja novih čelika, kao što su čelici otporni na zamor, jeftini čelici otporni na uticaj atmosfere (bez premaza), zavarljivi čelici sa malom distorzijom i čelici sa smanjenom bukom. Ovi zahtevi se odnose na inherentne osobine čelika, tako da je vrlo teško razviti ove vrste čelika uz razumne troškove. Kada se novi čelik prvi put upotrebi mogu se desiti neočekivane stvari. Na primer čelici bez buke su razvijeni tako što je stavljen međusloj (sendvič) smole, ali postoje značajne teškoće pri gasnom rezanju i elektrolučnom zavarivanju ovih čelika.

Postoje velika očekivanja za upotrebu lasera velike snage za zavarivanje debelih limova, bez grešaka u zavarenom spoju, i razvoj nove tehnike zavarivanja bombardovanjem sa takvom brzinom kao što je zavarivanje varničanjem ili aluminotermijsko zavarivanje. Tehnički razvoj ovih inoviranih procesa je izuzetno težak. Međutim, čelici namenjeni za inovirane procese, kao što su ovi napred pomenuti, mogu biti odmah razvijeni preko žilavosti ZUT, otpornosti na hladne prsline i prsline pri očvršćavanju, kojima bi se obezbedilo to da kvalitet metalurgije zavarivanja čelika ostane na sadašnjem nivou.

Skoro svakih 10 godina dolazi do novog procesa proizvodnje limova, kao što su proces QT, proces CR, TMCP proces i različiti TMCP. Jasno je da je osnovni razvoj procesa izrade čelika već realizovan tokom 20-og veka. Međutim, u 21-om veku nije neophodno da razvijamo inovirani proces izrade čelika uporediv sa TMCP. Mi nemamo nove koncepte za unapređenje žilavosti ZUT od AIN čelika (1963), TiN čelika (1975) i TiO čelika (1985). U buduće će biti potrebno mnogo vremena za razvoj dvofaznih finodispergovanih čelika, superiornih u odnosu na TiO čelik, mada su od 1985. godine obavljena mnoga istraživanja, snažno podstaknuta metalurgijom oksida. Ono što razočarava je to da od TiB dodatnih materijala, koji su na tržištu od 1960. godine, mi nemamo novije razvijene potrošne materijale sa mikrostrukturom fino acikularnog ferita.

Kao što je prikazano u tabeli 1. čelik HT 980 je prvi put korišćen u Švajcarskoj pred kraj 1990. godine. Razvoj čeličnih limova visoke čvrstoće ove klase je već skoro završen tokom 1970, ali se oni nisu koristili u Japanu. To je prevashodno zato što nije bila unapređena zavarljivost materijala metala šava, a čak se nije postiglo smanjenje temperature predgrevanja, uprkos unapređenju osnovnog materijala. Metal šava koji se koristi u očvršnutom stanju, u osnovi nije u mogućnosti da bude podvrgnut termomehaničkoj termičkoj obradi, pa sastav metala šava ostaje isti kao i pre. Drugim rečima, rezultati preteranog obogaćivanja hemijskog sastava u zavarenim spojevima su smanjenje legirajućih elemenata u osnovnom materijalu. Šta više, konstrukcijski integritet ostaje nepromenjen i kada je unapređena žilavost ZUT i osnovnog materijala, iako su otvrdnjavajući elementi, izuzev Ni, redukovani u metalu šava. Svaki novije razvijeni čelik mora da bude blizak kupcu ili poboljšan, u smislu smanjenja troškova proizvodnje (smanjenje potrebnog predgrevanja i relaksacije, ograničenja unosa toplote) i/ili da se može unaprediti

integritet konstrukcije. Ukoliko se ne očekuje smanjenje troškova i povećanje ukupnog integriteta konstrukcije, novi čelik nije komercijalno prihvatljiv.

Ako se ojačavanje čelika ne postiže samo otvrdnjavanjem čvrstog rastvora ili taložnim otvrdnjavanjem, već izuzetnom rafinacijom zrna, sa povećanjem čvrstoće čelika napreduje neslaganje hemijskog sastava metala šava i osnovnog materijala. Pre razvijanja čelika visokih osobina moramo razviti materijale za zavarivanje sa manjim stepenom neslaganja hemijskog sastava u odnosu na osnovni materijal. Međutim, kontrolisano valjanje i termička obrada ne mogu se primeniti na metal šava. Za razvoj inoviranih materijala metala šava potreban je veći kvalitet istraživanja, nego za sam osnovni materijal. Ako se ovaj razvoj smatra nemogućim, onda ćemo morati da razvijamo postupke zavarivanja bez korišćenja dodatnih materijala, ili sa njihovim naknadnim korišćenjem. Drugačije rečeno, čelične konstrukcije sa višim osobinama od sadašnjeg nivoa ne mogu se realizovati u 21-om veku.

5. ZAKLJUČAK

Na izradi čelika i metalurgije zavarivanja u 20-om veku postignut je značajan razvoj i broj dostignuća. Izgleda da razvoj metala šava postaje udaljen od osnovnog materijala. Mehaničko i hemijsko neslaganje između osnovnog materijala i metala šava izuzetno raste. Smanjenje troškova zavarene konstrukcije i unapređenje ukupnog integriteta zavarene konstrukcije ne treba očekivati u 21-om veku, jer je unapređen osnovni materijal, ali bez unapređenja metala šava.

U 21-om veku treba pojačati metalurška proučavanja metala šava, u cilju podizanja efikasnosti proizvodnje, integriteta konstrukcije, zahteva zaštite životne sredine i duže trajnosti konstrukcije. Ako unapređenje metala šava nije moguće, moraju se razvijati postupci zavarivanja bez korišćenja dodatnih materijala.

LITERATURA

- [1] Y. Sakai and T. Suga: *Welding Technique*, 37 (1989), No. 2, p. 62, in Japanese
- [2] J. Dearden and H. O'Neil: *Trans. International Welding*, 3 (1949), p.203.
- [3] Y. Itoh and K. Bessho: *J. Japan Welding Soc.* 37 (1968), p. 983, in Japanese
- [4] N. Yurioka, S. Ohsita and H. Temchiro: *Pipeline welding in the 80s*, AWWA, Melbourne (1981)
- [5] ISO/TC444, N1201(1999): *Collection of methods for avoidance of hydrogen cracking*
- [6] E.F. Nippes: *WRC Bulletin* No.33 (1957)
- [7] H. Nakamura et al.: *IHI Engineering Review*, 3 (1963), p.117.
- [8] S.Kanazawa et al.: *Tetsu-to-Hagane*, 61 (1975), p.2589, in Japanese
- [9] T. Inoue, S. Matsuda and K. Aoki: *Trans. JIK*, 11 (1970), p.36.
- [10] H. Mimura et al.: *Trans. of Japan welding Soc.* (1970), April, p.28.
- [11] S. Ueda et al.: *Tetsu-to-Hagane*, 68 (1977), p.303, in Japanese
- [12] T. Funakoshi et al.: *Tetsu-to-Hagane*, 68 (1977), p.303, in Japanese
- [13] I. Watanabe and T. Kojima: *J. Japan Welding Soc.* 49 (1980), p.772, in Japanese
- [14] D. J. Abson and R. E. Dolby: *Welding Institute Research Bulletin* 202, (1978) July
- [15] N. Mori et al.: *J. Japan Welding Soc.* (1981), p.786, in Japanese
- [16] H. Homma and S. Ohkita: *Japanese Patent 59-185760 (1984)*, Weldable high toughness steel

Prevod M. Antić