

SVOJSTVA I PRIMJENA VISOKOČVRSTIH ČELIKA

THE PROPERTIES AND APPLICATION OF HIGH STRENGTH STEELS

Ivan Samardžić, Marko Horvat, Katarina Pisačić, Zlatko Botak

Ključne riječi: Visokočvrsti čelici, zavarljivost

Keywords: High-strength steels, weldability

Sažetak:

Kombinacijom različitih mehanizama očvrnuća, mogu se postići vrlo visoke vrijednosti čvrstoće kod određenih vrsta čelika. Takve čelike nazivamo visokočvrsti čelici. Primjena visokočvrstih čelika u konstrukcijama opravdava višu cijenu materijala njegovim manjim utroškom (manji oprečni presjeci), nižih troškova obrade te manjom masom gotovog proizvoda. Pored toga što su navedeni osnovni podaci o mehaničkim svojstvima, u radu se prikazuje se i pristup određivanju zavarljivosti. Također, prikazan je razvoj visokočvrstih čelika, detaljna sistematizacija, mehanizama očvrnuća te osnovni razlozi sve veće primjene ove grupe materijala pri izradi čeličnih konstrukcija.

Abstract:

With the combination of different strengthening mechanisms, very high strength values can be achieved in certain types of steel. These steels are called high strength steels. The application of high-strength steels in structures justifies the higher cost of materials due to its lower consumption (smaller cross-sections), lower processing costs and a smaller amount of finished product. Beside main mechanical properties data of mentioned steel, the paper presents an approach to weldability determination. Also, the paper presents the development of high-strength steels, detailed systematization, strengthening mechanisms and the main reasons for the application of this group of materials in the production of steel structures.

1 UVOD

Osnovni cilj razvoja visokočvrstih čelika je postizanje što veće granice razvlačenja (R_e) i vlačne čvrstoće (R_m) što će u konačnici rezultirati većim dopuštenim naprezanjima u eksploataciji. Iz navedenog slijedi i osnovna prednost primjene ove grupe materijala – manja masa i volumen konstrukcija (za ista opterećenja) i smanjenje troškova materijala te tehnoloških i eksploatacijskih procesa.

2 MEHANIZMI OČVRSTNUĆA ČELIKA

Prema osnovnoj definiciji, čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala da pruža otpor prema djelovanju vanjskih sila. Iz navedenog slijedi da čvrstoću (čelika) možemo definirati i kao otpornost na promjenu oblika koja se temelji na svojstvima kao što su granica razvlačenja (R_e), konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,2}$) i rastezna (vlačna) čvrstoća (R_m).

Svi mehanizmi očvrstnuća čelika temelje se na gibanju dislokacija. Dislokacije su linijske (jednodimenzijske) nesavršenosti kristalne građe, a tumače se kao narušena periodičnost strukture duž neke kristalne linije. Također, dislokacije tumače nesklad za teorijski potrebno naprezanje kod plastične deformacije tzv. "idealnog kristala" i stvarnog naprezanja potrebnog za plastičnu deformaciju realnih materijala. Svako kočenje (ili otežano gibanje) dislokacija za posljedicu ima i povećanje čvrstoće, tj. otpornost na promjenu oblika (R_e , $R_{p0,2}$, R_m). Ipak, svaki tehnički materijal mora imati i sposobnost oblikovanja (promjene oblika), stoga se gibanje ili kočenje dislokacija ne smije potpuno onemogućiti, a tu duktilnost možemo uočavati kroz udarni rad loma (KU/KV), istezljivost (A) kontrakciju (Z). [1]

Povećanje čvrstoće kod visokočvrstih čelika (postizanje otežanosti kretanja dislokacija, ali ne i potpuno kočenje kako bi se zadržala i duktilnost) postiže se preko slijedećih mehanizama:

1. Legiranjem – stvaranjem kristala mješanaca (intersticijski, supstitucijski) - (ΔR_e)_M
2. Stvaranjem novih dislokacija (gašenje, hladno oblikovanje) - (ΔR_e)_D
3. Stvaranjem precipitata i raspršenih čestica - (ΔR_e)_P
4. Usitnjenjem kristalnih zrna - (ΔR_e)_Z
5. Povišenjem udjela perlita - (ΔR_e)_P. [1]

3 RAZVOJ I SISTEMATIZACIJA VISOKOČVRSTIH ČELIKA

3.1 Uvod

Osim u uvodu navedenih razloga, razvoj, a time i primjena, visokočvrstih čelika omogućava i druge važne prednosti kao što su npr.: značajno smanjenje transportnih troškova, primjenjivost pri izradi pokretnih konstrukcija, smanjenje inercijskih sila, dobra tehnološka svojstva i dr. Iz navedenog slijedi, da je razvoj ove grupe materijala potaknut ograničenjima konvencionalnih čelika (npr. grupa konstrukcijskih čelika) gdje je zadatak bio zadržati neka važna svojstva (npr. zavarljivost), a pri tome

osigurati i neka druga svojstva koja će dati važan značaj i osigurati primjenu u konstrukcijama koje nije moguće izvesti konvencionalnim čelicima. Ovaj razvoj visokočvrstih čelika traje i dalje, a povijesno gledano, odvijao se u nekoliko značajnijih faza.

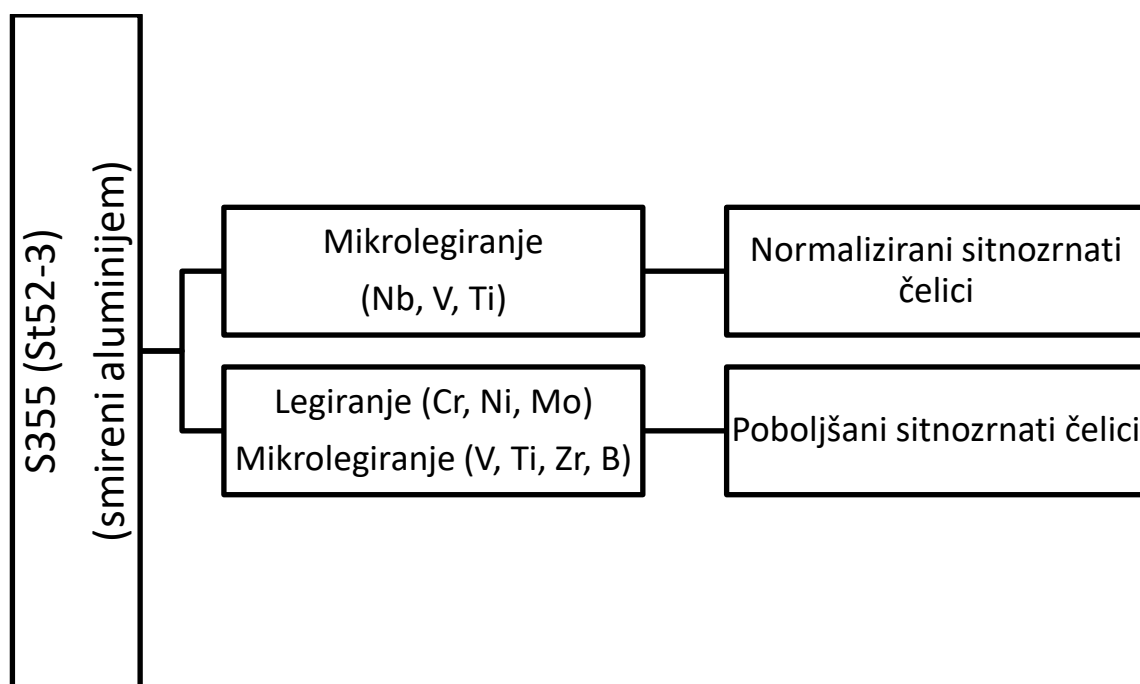
Općenito, kada govorimo o ovoj grupi čelika klasifikacija se može izvršiti prema nekoliko kategorija: način očvršnuća čelika, vrijednost granice razvlačenja, procesi dobivanja itd. Ipak, ovi čelici mogli bi se svrstati u čelike srednje čvrstoće, visokočvrste čelike (konvencionalni visokočvrsti čelici – HSS) i napredni visokočvrsti čelici (AHSS). Sve grupe čelika danas imaju značajnu primjenu u čemu prednjači transportna tehnika, ali sve je značajnija primjenama drugim industrijskim područjima. Sažeti pregled i sistematizacija visokočvrstih čelika (ili čelika istaknute čvrstoće) dana je u nastavku ovog rada.

3.2 Prva faza razvoja čelika istaknute čvrstoće (HSS - high-strength steels)

Prva faza razvoja čelika istaknute čvrstoće odvijala se do sredine prošlog stoljeća. Temeljila se na modifikaciji tada primjenjivanih čelika ($R_{p0,2}$ do 240 N/mm²) i to uglavnom metalurškim procesima. Uvidio se utjecaj postotka ugljika na čvrstoću, ali i na pad žilavosti. Iz tog razloga pristupalo se mehanizmu očvršnuća stvaranjem kristala mješanaca, ali se i istaknula važnost sitnog zrna, koje je istovremeno pozitivno utjecalo na granicu razvlačenja kao i na vrijednost prijelazne temperature. Ova faza razvoja rezultirala je čelikom S355 (St52-3) koji i danas nalazi važnu primjenu kao konstrukcijski materijal. [1, 2]

3.3 Druga faza razvoja čelika istaknute čvrstoće (HSS - high-strength steels)

Spoznaja o vrlo povoljnom utjecaju sitnog zrna na mehanička svojstva čelika bila je temelj za drugu fazu razvoja čelika istaknute čvrstoće. Dodatni razlog tome bila je i sve veća primjena zavarivanja kao tehnologije spajanja konstrukcija, a koja je zahtijevala nizak sadržaj ugljika zbog njegovog nepovoljnog utjecaja na ZT i ZUT. Kako navodi izvor 1., takav razvoj čelika istaknute čvrstoće krenuo je u smjeru kako to prikazuje slika 1. [1, 2]



Slika 1. Shematski prikaz smjera razvoja čelika u II fazi razvoja čelika istaknute čvrstoće [1]

Ovakvi čelici nazvani su i HSLA (High Strenght Low Alloyed) čelici (visokočvrsti niskolegirani). Njihov razvoj omogućen je kroz danje usitnjenje zrna koje se temelji na disperzoidnim elementima koji se spajaju s ugljikom i dušikom te daju povoljan utjecaj na usitnjenje zrna (masen udio legiranih elemenata ispod 0,1%). Na ovaj način dolazi do kočenja gibanja dislokacija kroz mehanizme očvršnuća usitnjenja zrna te mehanizam stvaranja precipitata, uz naglasak da na svojstva utječe i završna termomehanička obrada materijala. Pri tome se to odnosi na završno valjanje, tj. na temperaturu valjanja čelika. Visoka završna temperatura toplovaljanih čelika za posljedicu ima grubo zrno te se stoga takvi materijali podvrgavaju normalizaciji. Također, važan parametar je i temperatura normalizacije. Ona je kompromis veličine austenitnog zrna te količine otopljenosti mikrolegirajućih elemenata. Ove spoznaje su važne i kod zavarivanja ove grupe materijala. Proces zavarivanja, kao toplinski input, djelovat će na promjene u strukturi materijala pa će tako bez obzira na nizak postotak ugljika i Ce postojati mogućnost pojave negativnih promjena, prvenstveno u ZUT-u. Povoljno je osigurati sporije hlađenje približiti proces hlađenja procesu normalizacije. [1, 2]

3.4 Treća faza razvoja čelika istaknute čvrstoće (HSS - high-strength steels)

Poboljšani sitnozrnati čelici mogu se svrstati u treću fazu razvoja čelika istaknute čvrstoće. Ova se faza razvoja djelomično preklapa sa drugom fazom razvoja, a cilj je razvoj čelika za poboljšavanje koje će istovremeno imati i istaknuto svojstvo zavarljivosti (nizak postotak ugljika, nizak Ce). Iako

prvi čelici iz ove faze razvoja nisu dali očekivane rezultate, proučavanje utjecaja legiranja i mikrolegiranja dali su značajan doprinos današnjim poboljšanim sitnozrnatim čelicima. Ovi se čelici najčešće zakaljuju već u čeličani, popuštaju te se isporučuju u poboljšanom stanju. Sadrže nizak postotak ugljika (zahtjev zavarljivosti), višestruko su legirani (više elemenata u manjem postotku, ukupno manje od 5%), prisutnost disperzoidnih elemenata koji osiguravaju sitno zrno, legiranjem je osigurana dobra prokaljivost i osiguranje djelomične zakaljivosti na zraku (kod zavarivanja – izbjegavanje nastajanja ferita; približno jednaka svojstva ZUT-a i osnovnog materijala). Pri tome, u procesu dobivanja ove grupe čelika sudjeluje mehanizam očvrsnuća legiranjem, mehanizam stvaranja dislokacija (kaljenje), mehanizam stvaranja precipitata te mehanizam usitnjenja zrna. Pošto se radi o toplinski obrađenim čelicima, zavarivanje ovakvih čelika osjetljivi je proces, osobito u pogledu toplinskog inputa. Premale vrijednosti $t_8/5$ mogu izazvati stvaranje krhkih struktura, dok prevelike vrijednosti $t_8/5$ izazivaju stvaranje ferita u strukturi. Važno je i minimizirati pad tvrdoće u ZUT-u (tzv. jarak tvrdoće) koji je neizbježan. [1, 2]

3.5 AHSS (advanced high-strength steels)

Spomenuti visokočvrsti čelici (konvencionalni visokočvrsti čelici, HSS) bili su vrlo značajan napredak, kako u samoj proizvodnji čelika, tako i u primjeni. Vrlo značajnu primjenu imali su 90-tih godina u automobilskoj industriji, ali ih nakon toga istiskuju AHSS čelici prvenstveno zbog mogućnosti apsorpcije energije. Naime, u usporedbi s HSLA čelicima, ovi čelici pružaju veću deformabilnost za jednaku razinu čvrstoće. To su obično martenzitni čelici, ponekad sa jednom ili više dodatnih faza koja poboljšava deformabilnost. [1, 2, 3,4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13]

Ova skupina materijala dijeli se u nekoliko generacija. Najpoznatiji čelik prve generacije je DP (dual-phase) čelik koji je dobiven posebnom toplinskom obradom, a čini ga feritno-martenzitna struktura. Ovaj čelik za slične vrijednosti granice razvlačenja kao HSLA, daje veće vrijednosti izduženja. Tu je još važno spomenuti CP (complex-phase) čelik u kojem se javlja i bainit, TRIP (transformation induced plasticity) čelik (austenit potaknut deformacijom prelazi u martenzit), MS (martensitic) čelik i PHS (press hardened) čelici. [1, 2, 3,4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13]

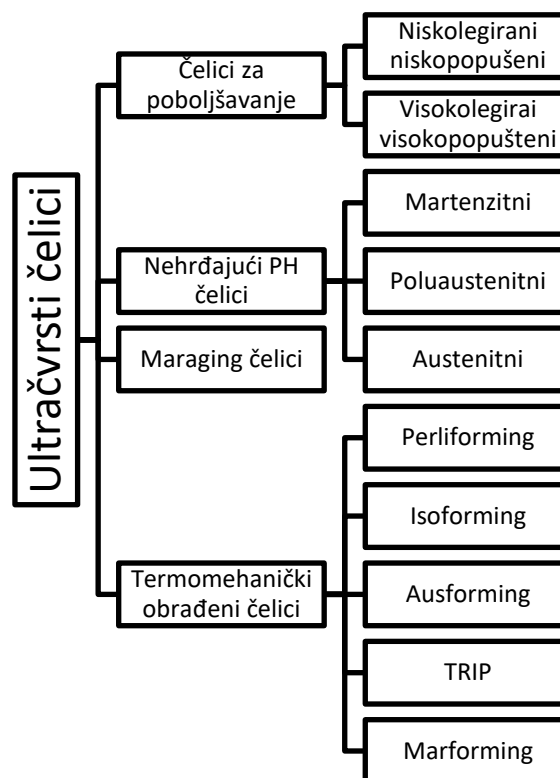
Vidljivo je da se prva generacija AHSS bazirala na visokoj čvrstoći dobivenoj temeljem martenzita i deformabilnosti koja je ostala zahvaljujući feritu. Druga generacija AHSS čelika temelji se više na zadržavanju austenitne strukture, a potaknuta je iz TRIP čelika. Tako su nastali TWIP (twinning-induced plasticity) čelici. TWIP čelici su čelici 100% austenitne strukture na sobnoj

temperaturi (zbog većeg udjela Mn) kod kojeg je deformacija izaziva pojavu tzv. "blizanaca" (dvojnikanja) što daje efekt granice zrna te dolazi do povećane čvrstoće čelika. Ovakvi čelici i kod vrijednosti čvrstoće od 1300-2000 MPa imaju minimalnu vrijednost izduženja od 45%. U drugu generaciju AHSS svakako spadaju i ASS (austenitic stainless) čelici te L-IP (light weight steel with induced plasticity) čelici. [1, 2, 3,4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13]

Treća generacija AHSS grupe materijala potaknuta je ograničenom primjenom druge generacije ovih materijala čije je osnovno ograničenje bila visoka cijena (zbog visokog udjela legirnih elemenata). Visokočvrsti čelici treće generacije se razvijaju na temelju poboljšanja svojstava DP čelika, izmjene tradicionalne TRIP obrade čelika, razvojem čelika sa ultrafinim bainitnim strukturama i upotrebom novih postupaka obrade. Tu valja spomenuti Q&P (quenching and partitioning) čelike, TBF (TRIP aided bainitic ferrite) čelike, Medium-Mn čelike i δ – TRIP čelike, NanoSteel (u razvoju) itd. [1, 2, 3,4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13]

3.6 Ultračvrsti čelici

Ukoliko gledamo vrijednosti granice razvlačenja kao osnovni kriterij klasifikacije ove grupe materijala, susrećemo se i sa izrazom ultračvrsti čelici, čelici sa vrijednostima granice razvlačenja preko 1000 N/mm². Ovdje nebi trebali razlikovati HSS i AHSS, a djelomično sistematizaciju možemo i temeljiti na procesima dobivanja ovih materijala. Osnovna podjela ultračvrstih čelika (temeljem takvih kriterija) može se prezentirati kao na slici 2. [1, 2]



Slika 2. Osnovna podjela ultračvrstih čelika [1, 2]

Kod ove skupine čelika također se teži sitnozrnatosti što osigurava niske prijelazne temperature (uz uvjet izbjegavanja heterogenosti strukture) dok se osnovnim mehanizmom očvrnuća smatra mehanizam očvrnuća kristalima mješancima. Razlog tome je sklonost difuzijskim procesima (vodik) i sklonost zakašnjelom lomu (napetostna korozija + vodik). Ipak, za zadovoljavanje svih značajki ovih čelika nužno je koristiti i mehanizam transformacijskog očvrnuća, precipitacije i hladne deformacije. Također, valja istaknuti i osjetljivost ovih materijala na koncentrirana naprezanja što se djelomično izbjegava "čistoćom" čelika i posebnim metaluškim procesima koji osiguravaju izbjegvanje uključaka, neželjenih primjesa i plinova. Generalno, uvu skupinu čelika čine:

- niskolegirani niskopopušteni čelici
- visokolegirani viskopopušteni čelici
- korozijski postojani precipitacijski očvrnuti čelici
- termomehanički obrađeni čelici
- maraging čelici
- hladno oblikovani nelegirani ili niskolegirani čelici. [1, 2]

4 ZAKLJUČAK

Višim vrijednostima dopuštenih naprezanja u radu i eksploataciji, smanjuju se poprečni presjeci strojnih elemenata i konstrukcija što pozitivno utječe na niz faktora: od smanjenja mase i volumena strojnog dijela i konstrukcije, tehnoloških aspekata, transportnih troškova mehaničkih karakteristika konstrukcije pa sve do u konačnici manjih troškova izrade. Upravo to je omogućeno kroz razvoj čelika istaknute čvrstoće. Danas ova grupa materijala nalazi sve veću primjenu u metaloprerađivačkoj industriji, i to više ne samo kod specijalnih konstrukcija. Današnjim tehnološkim procesima, a posebno razvojem procesa zavarivanja, omogućena je nesmetana primjena ovakvih materijala, gdje se uz kontrolu procesa može garantirati zadržavanje mehaničkih i ostalih svojstava kakva sadrži i osnovni materijal. Za očekivati je daljni razvoj visokočvrstih čelika, ali prvenstveno sve veća primjena u svim područjima vezanim uz čelične konstrukcije s naglaskom na transportne sustave, podiznu opremu, industriju strojeva, zrakoplovnu industriju itd.

5 REFERENCE

- [1] M. Novosel, D. Krumes: Posebni čelici, Slavonski brod, 1998.
- [2] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2002.
- [3] Mahmoud Y. Demeri: Advanced High-Strength Steels: Science, Technology, and Applications, Ohio, 2013
- [4] Hao Qu: Advanced high strength steel through paraequilibrium carbon partitioning and austenite stabilization, Ohio, 2013.
- [5] H. Qu: Advanced high strength steel through paraequilibrium carbon partitioning and austenite stabilization, Ohio, 2013.
- [6] E. Billur, J. Dykeman, T. Altan: Three Generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part II, 2014.
- [7] N. Fonstein: Dual-phase steels
- [8] Advanced high strength steel through paraequilibrium carbon partitioning and austenite stabilization, Ohio, 2011.
- [9] Župančić: Svojstva naprednih čelika visokih čvrstoća u proizvodnji osobnih motornih vozila, Zagreb, 2015.

- [10] D.Krizan: Development of third generation advanced high strength steels for automotive applications, austria, 2018.
- [11] N. Radović, D, Glišić: Suvremeni čelici: Dvojnikanjem izazvana plastičnost, Beograd, 2014.
- [12] O. Zambrano: A General Perspective of Fe-Mn-Al-C Steels, Sao Paulo, 2018.
- [13] L. Samek, D. Krizan: Steel-material of choice for automotive lightweight applications, 2012.