

TERMOMEHANIČKA OBRADA ČELIKA

THERMOMECHANICAL TREATMENT OF STEEL

V. prof. dr. sc. Omer Beganović, viši naučni saradnik
Univerzitet u Zenici, Institut “Kemal Kapetanović” Zenica
Travnička cesta br. 7, Zenica

REZIME

Termomehanička obrada čelika u širem smislu predstavlja bilo kakav kombinovani mehanički (plastična deformacija) i termički uticaj na radni komad. Provođenje bilo kojeg postupka vruće prerade (valjanje, kovanje, istiskivanje) predstavlja primjere takvog tipa termomehaničke obrade. Tokom vruće prerade, odnosno deformisanja čelika na dovoljno visokim temperaturama radni komad se bez većih poteškoća preoblikuje iz polaznog u finalni (zahtijevani) oblik, uz poboljšanje njegovih svojstava, posebno otpornosti na udar i dinamička opterećenja. Dodatno unapređenje ovih svojstava moguće je postići sniženjem temperature na kojoj se izvodi završna deformacija, kontrolom iznosa deformacije i ubrzanim hlađenjem. Postupci koji uključuju kontrolu nekih od navedenih procesa spadaju u grupu termomehanički kontrolisanih postupaka prerade. Termomehanički kontrolisanim postupcima prerade, osim postizanja optimalnog odnosa između strukture i svojstava čelika, odnosno poboljšanja kvaliteta proizvoda, moguće je značajno skratiti proizvodne linije, smanjiti troškove proizvodnje, te povećati produktivnosti. U ovom radu izvršena je podjela termomehanički kontrolisanih postupaka prerade prema efektima koje se njome žele postići, te su opisani neki od tih postupaka.

Ključne riječi: Ubrzano hlađenje, direktno kaljenje, usitnjenje zrna

SUMMARY

Thermomechanical processing of steel in a broader sense represents any combined mechanical (plastic deformation) and thermal impact on a workpiece. Carrying out any hot working process (rolling, forging, extrusion) is an example of this type of thermomechanical processing. During hot processing, i.e. deformation of steel at sufficiently high temperatures, the workpiece is transformed from the initial to the final (required) shape without significant difficulties, while improving its properties, especially resistance to impact and dynamic loads. Additional improvement of these properties can be achieved by lowering the temperature at which the final deformations are performed, controlling the amount of deformation and accelerated cooling. Processes that include the control of some of the mentioned processes belong to the group of thermo-mechanical controlled processes. Thermo-mechanical controlled processes, in addition to achieving the optimal relationship between the structure and properties of steel and improving product quality, can significantly shorten production lines, reduce production costs, and increase productivity. This paper divides thermo-mechanical controlled processes according to the effects they aim to achieve, and describes some of these processes.

Keywords: Accelerated cooling, direct quenching, grain refinement

1. UVOD

Termomehanička obrada čelika u širem smislu predstavlja bilo kakav kombinovani mehanički (plastična deformacija) i termički uticaj na radni komad. Provođenje bilo kojeg postupka vruće prerade (valjanje, kovanje, istiskivanje) predstavlja primjere takvog tipa termomehaničke obrade. Tokom vruće prerade, odnosno deformisanja čelika na dovoljno visokim temperaturama radni komad se bez većih poteškoća preoblikuje iz polaznog u finalni (zahtijevani) oblik, uz poboljšanje njegovih mehaničkih svojstava, posebno otpornosti na udar i dinamička opterećenja. Poboljšanje vrijednosti navedenih mehaničkih svojstava rezultat je smanjenja ili potpune eliminacije negativnog uticaja određenih nesavršenosti ili grešaka koje karakterišu lijevanu strukturu polufabrikata, odnosno ingota ili kontinuirano lijevani polufabrikata. Lijevani polufabrikati karakterišu se hemijskom i strukturnom nehomogenošću, te prisustvom drugih grešaka, kao što su nemetalni uključci, plinski mjehurovi i različiti drugi tipovi poroznosti (mikropukotine i eventualno lunke). Hemijska nehomogenost je posljedica neujednačene raspodjele pojedinih primjesnih i legirajućih elemenata u različitim dijelovima polufabrikata, dok se strukturna nehomogenost ogleda kroz neujednačenost oblika i veličine pojedinih kristalita (zrna) u očvrslom polufabrikatu. Poroznosti nastaju na mjestima gdje usljed nemogućnosti dotoka tečnog metala ne dolazi do popunjavanja praznina nastalih kao posljedica skupljanja metala tokom prelaska iz tečnog u čvrsto stanje i njegovog kasnijeg hlađenja. Plinski mjehurovi nastaju kao posljedica nemogućnosti isplivavanja plinskih produkata koji nastaju pri hemijskim reakcijama u tečnom, neočvrslom dijelu polufabrikata.

Tokom vruće plastične prerade, u fazi zagrijavanja pred deformaciju, fazi dogrijavanja između dvije sekvence procesa deformisanja i tokom samog procesa defirmisanja, odnosno sve vrijeme dok je radni komad zagrijan na dovoljno visoke temperature, dolazi do difuzije atoma pojedinih elemenata iz zona povišene koncentracije u zone snižene koncentracije čime se sadržaj pojedinih elemenata postupno ujednačava po presjeku radnog komada. Također, tokom plastične deformacije kristali se postupno plastično deformišu, lome i usmjeravaju u pravcu najveće deformacije. Tokom same plastične deformacije i/ili prilikom dogrijavanja komada u pećima dolazi do rekristalizacije i postupne zamjene heterogene strukture (zrna različite veličine od kojih su neka izuzetno krupna - nekoliko milimetra ili desetina milimetara, u zavisnosti od dimenzija polufabrikata) finom strukturom sa zrnima ujednačene veličine s promjerima od nekoliko desetina do nekoliko stotina mikrona. Isto tako, tokom vruće plastične prerade lijevanih polufabrikata dolazi do postupne eliminacije plinskih mjehurova i poroznih mjesta usljed zavarivanja njihovih unutrašnjih, međusobno suprotnih, površina koje se pri smanjenju presjeka radnog komada dovode u direktni kontakt. Nemetalni uključci prisutni u lijevanim polufabrikatima se tokom vruće plastične prerade lome, usitnjavaju i usmjeravaju u pravcu najveće deformacije. Na ovaj način se smanjuje njihov negativan uticaj na vrijednosti mehaničkih svojstava iako, u većoj ili manjoj mjeri, dovode do anizotropije svojstava deformisanog komada u uzdužnom i poprečnom pravcu.

Osnovni cilj vruće plastične prerade je preoblikovanje polaznog komada u odgovarajući proizvod traženog oblika i dimenzija, te postizanje odgovarajućih mehaničkih svojstava, sa ili bez primjene naknadne termičke obrade. Ovaj koncept prerade metalnih materijala na povišenim temperaturama primjenjivan je stotinama, pa i hiljadama godina. Uvođenje zavarivačkih procesa i produbljivanjem znanja o različitom ponašanju istog čelika na različitim temperaturama u pogledu otpornosti na udar, odnosno postojanju temperaturnog intervala u kojem žilavi materijal može da pređe u krto stanje, doveo je razvoja koncepta ojačavanja čelika usitnjenjem zrna prema jednačini Hall-Petcha:

$$\sigma_y = \sigma_o + \frac{k_y}{\sqrt{a}} \quad (1)$$

gdje je σ_y napon tečenja, σ_o otpor rešetke prema pomjeranju (klizanju) dislokacija, a k_y je konstanta.

Zbog potrebe ostvarivanja potpune rekristalizacije, odnosno izbjegavanja pojave deformacionog ojačavanja tokom provođenja nekih od postupaka vruće plastične prerade ti postupci se, u slučaju prerade čelika, završavaju na temperaturama iznad 900 °C do 950 °C, pa i višim. Ovako visoke temperature završetka vruće prerade nisu omogućavale značajnije usitnjenje zrna. Značajnije usitnjenje moguće je ostvariti samo provođenjem plastične deformacije radnog komada na nižim temperaturama, odnosno kontrolom odvijanja rekristalizacionih procesa. Navedeno uz kontrolu hlađenja, a time i faznih transformacija, dovelo je do razvoja različitih termomehanički kontrolisanih postupaka prerade (TMCP - thermomechanical controlled processes). Vremenom ovi postupci su postali optimizirani postupci plastične prerade, jer su osigurali dostizanje poboljšanih svojstava čelika uz minimiziranje troškove proizvodnje. Razvoj i unapređenje TMPC postupaka, osim iskoraka postignutih u oblasti mehaničke metalurgije (plastične prerade), posljedica je produbljivanja saznanja do kojih je doprla Nauka o materijalima (Fizika metala), u pogledu utvrđivanja međuzavisnosti između mikroskopske građe (mikrostrukture) i makroskopskih svojstava. U tom pogledu cilj savremenih istraživanja u području metalnih materijala bazirao se iznalaženje mogućnosti dobivanja materijala povišenih čvrstoćnih osobina, bez dodavanja skupih legirajućih elemenata, ili svođenjem njihovog sadržaja na najmanju moguću mjeru, postizanjem optimalne mikrostrukture i svojstava uz minimalne troškove u svim etapama proizvodnje [1].

Prije 1960 godine finoizrnuti visokočvrsti čelici su dobiveni legiranjem i termičkom obradom. Šezdesetih godina prošlog vijeka razvijeni su HSLA (High Strength Low Alloy) niskolegirani čelici visoke čvrstoće. Visoka čvrstoća ovih čelika rezultat je primjene mikrolegirivanja (V, Nb, Ti) i postupaka termomehaničkog valjanja. Energetska kriza sedemdesetih godina prošlog vijeka uslovlila je razvoj čelika sa povišenom granicom tečenja, poboljšanom žilavošću na sniženim temperaturama, te dobrom zavarivošću kako bi mogli biti upotrijebljeni za gradnju gasovoda na Aljasci i u Sibiru [2, 3]. Razvoj ovakvih čelika uslovio je dalji razvoj i unapređenje temperaturno kontrolisanih postupaka valjanja. Ovakvi postupci, ne samo što osiguravaju postizanje mehaničkih svojstava koja su bolja, ili u najmanju ruku jednako vrijedne onima koje se mogu postići klasičnim postupcima vruće plastične prerade, uz naknadnu termičku obradu, doprinose značajnom skraćanju proizvodne linije, te smanjenju troškova proizvodnje budući da se za njihovo odvijanje uglavnom koristi toplota koju vruće deformisani komad već posjeduje. Međutim, da bi se mogao primjeniti neki od postupaka temperaturno kontrolisanog valjanja, osim što je neophodno proizvesti čelik potrebne čistoće i željenog hemijskog sastava potrebno je raspolagati sa odgovarajućom opremom koja će omogućiti kontrolu temperature, odnosno stepena deformacije na različitim temperaturama.

2. OPTIMIZACIJA SVOJSTAVA ČELIKA

Kao rezultat dugogodišnjeg sistematskog izučavanja svojstava različitih vrsta čelika došlo se do saznanja koja omogućavaju da se sa zadovoljavajućom tačnošću predvide mehanička svojstva određenog čelika na osnovu poznavanja njegove mikrostrukture. Također, utvrđeno je da mikrostrukturu nekog čelika određuje veći broj faktora kojima se može upravljati tokom proizvodnje, prerade i eventualne završne termičke obrade određenog čelika. Najvažniji od tih faktora su:

- a) hemijski sastav od kojeg zavisi mogućnost formiranja neke faze,

- b) stepen i brzina plastične deformacije, te temperatura na kojoj se odvija plastična deformacija,
- c) način hlađenja tokom odvijanja nekog od temperaturno kontrolisanih postupaka valjanja ili termičke obrade čelika.

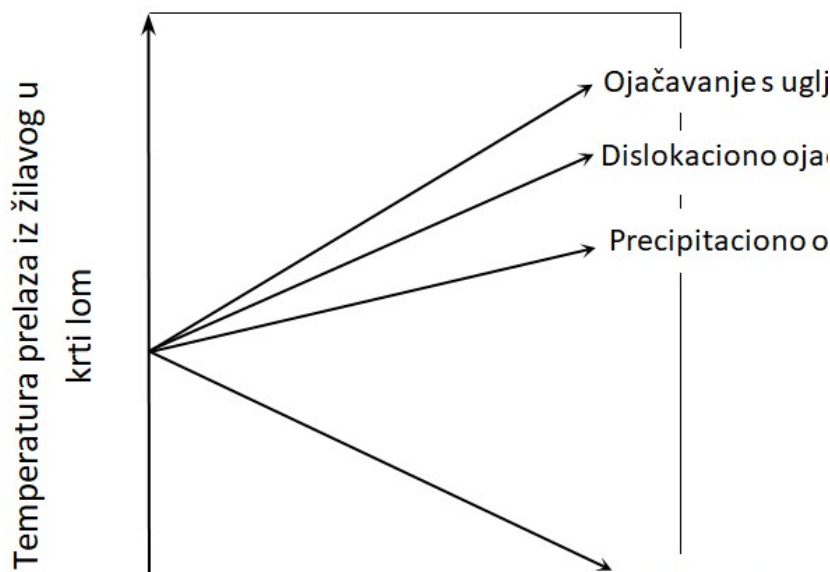
Pri razvoju novog čelika ili optimiranju svojstava i postupaka proizvodnje poznatih čelika potrebno je uzeti u obzir sve navedene faktore, odnosno parametre kojima se osigurava njihova efikasna kontrola kako bi se dostigle optimalna svojstva čelika, sa stanovišta njegove namjene, uz minimalne troškove u svim etapama proizvodnje i prerade. Pod optimalnim svojstvima čelika, iz kojeg se izrađuje neki konstruktivni element, podrazumjeva se optimalni odnos čvrstoćnih i duktilnih svojstava pri zadovoljavajućem nivou udarne žilavosti. Naravno, teži se da čvrstoćne osobine budu što više kako bi se smanjila težina čelične konstrukcije, što je opet povezano sa manjim utroškom materijala, a time i manjim troškovima energije za njegovu proizvodnju. Dodatne uštede se mogu ostvariti primjenom jeftinijih čelika, sa manjim sadržajem skupih legirajućih elemenata povišenog nivoa čvrstoćnih svojstava, ili istih čelika kod kojih se traženi nivo optimalnih svojstava postiže primjenom unapređenih (optimalnih) postupaka plastične prerade, odnosno postupaka koji karakterišu niži troškovi. To su postupci koji koriste toplotu koju polufabrikat sadrži nakon završene prethodne faze prerade, a što je najčešće povezano i sa skraćivanjem proizvodnih linija. Iz svega navedenog jasno je da se optimiranje svojstava nekog čelika ne može ostvariti bez istovremenog optimiranja postupaka njegove prerade, odnosno jedna optimizacija je uslovljena drugom.

2.1 Mehanizmi ojačavanja čelika

Čvrstoćna svojstva čelika određena su pokretljivošću dislokacija, stoga svi mehanizmi koji obezbjeđuju povećan otpor kretanju dislokacija u osnovnoj matrici čelika vode ka povećanju čvrstoće. Ojačavanje čelika se može postići na slijedeće načine:

1. Formiranjem supstitucijskog, a posebno intersticijskog čvrstog rastvora sa C ili N (tačkasti defekti kristalne rešetke) u kojem rastvoreni elementi izazivaju elastičnu deformaciju rešetke željeza, što predstavlja prepreku za kretanje dislokacija,
2. Povećanjem gustine dislokacija (linijski defekt kristalne rešetke). Budući da dislokacije međusobno reaguju povećanje gustine dislokacija ima za posledicu smanjenje njihove pokretljivosti,
3. Smanjenjem veličine zrna, odnosno povećanjem gustine granica zrna (površinski defekt kristalne rešetke). Smanjenjem veličine zrna povećava se gustina granica zrna. Budući da granice zrna predstavljaju značajnu zapreku kretanju dislokacija profinjenje zrna predstavlja efikasan način blokiranja dislokacija.
4. Izdvajanjem (precipitacijom) čestica sekundarne faze (volumenski defekt kristalne rešetke) koje takođe predstavlja prepreku kretanju dislokacija. Efekat ojačanja ovim mehanizmom zavisi od veličine čestica, njihovog međusobnog rastojanja i volumnog učešća.

U određenom čeliku dostignuti nivo čvrstoće najčešće je rezultat djelovanja više navedenih mehanizama, odnosno ugrađenih grešaka kristalne rešetke, međutim sa stanovišta upotrebe veoma je značajno koji je od mehanizama opredjeljujući. Budući da jedino mehanizam ojačavanja profinjenjem zrna rezultira sniženjem prelazne temperature krtosti (slika 1.), dok drugi mehanizmi, uz određene izuzetke (npr. nikl u supstitucijskom čvrstom rastvoru) izazivaju njeno povišenje, preferira se ojačavanje profinjenjem zrna. Ovaj mehanizam se u manjoj ili većoj mjeri kombinira sa drugim mehanizmima ojačavanja (precipitacija i dislokaciono/deformaciono ojačavanje).



Slika 1. Uticaj različitih mehanizama ojačavanja na prelaznu temperaturu krtosti

Ojačavanje sa C i nekim drugim legirajućim elementima se izbjegava, ne samo zbog izrazito negativnog uticaja na energiju udara, nego i zbog zahtjeva za dobrom zavarivošću savremenih tehničkih materijala. Negativni uticaj N u čeliku, koji se odražava kroz formiranje Fe-nitrida, koji povećavaju krtost, eliminiše se umirivanjem čelika sa Al [4, 5]. Al sa N formira AlN koji, osim što u znatno manjoj mjeri pogoršava žilavost čelika, sprječava porast austenitnog zrna tokom rekristalizacije (do temperatura 950°C) što doprinosi postizanju ferita sa manjim zrnom, zbog čega se Al smatra blagim mikrolegirajućim elementom.

2.2 Uticaj temperature transformacije

Intenzitet ojačavanja, po svim navedenim mehanizmima, uveliko zavisi od temperature transformacije (preobražaja), odnosno temperature na kojoj se odvija fazna transformacija. Generalno se može reći da su efekti ojačavanja izražajniji što je temperatura preobražaja niža, budući da sa sniženjem ove temperature dolazi do profinjenja zrna produkata preobražaja, povećanja gustine dislokacija, profinjenja čestica izlučene sekundarne faze i njihove finije disperzije, a moguće je ostvariti i veće presićenje čvrstog rastvora, što sve ima odraza na povećanje čvrstoće. Navedeno ukazuje na mogućnost da se kontrolom temperature, na kojoj se odvija fazna transformacija, odnosno povećanjem brzine hlađenja odmah nakon završnog procesa plastične prerade, mogu dobiti čelični proizvodi sa različitim strukturnim karakteristikama, a time i svojstvima u dosta širokom opsegu. Dodatno unapređenje svojstava može se postići vođenjem procesa na način da se osim kontrole temperature ostvari određeni stepen plastične deformacije u definisanom području temperatura.

Dakle, da bi se dobio čelik optimalnih svojstava, pored upravljanja njegovim hemijskim sastavom u fazi proizvodnje, neophodno je osigurati dosta zahtjevno upravljanje procesom njegove plastične prerade, koja se najčešće treba obaviti pod strogo kontrolisanim uvjetima, unutar uskih granica kontrolisanih parametara kao što su temperatura, brzina i stepen deformacije, te brzina hlađenja.

3. VRSTE TERMOMEHANIČKIH KONTROLISANIH POSTUPAKA PRERADE

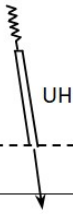
Vruća plastična deformacija se odvija na temperaturama koje su više od temperature rekristalizacije. Stoga je vruće deformisani čelik pogodan za provođenje jednog od termomehanički kontrolisanih postupka prerade. U zavisnosti od toga što se želi postići nekim od ovih postupaka [4-6] razlikuju se:

1. Postupci ubrzanog hlađenja iz austenitnog područja,
2. Kaljenje sa naknadnim samopopuštanjem ili napuštanjem,
3. Termomehanički kontrolisani postupci koji uključuje kontrolisanu deformaciju ili kombinaciju kontrolisane deformacije sa naknadnim ubrzanim hlađenjem, odnosno direktnim kaljenjem sa popuštanjem.

U prva dva slučaja temperaturno kontrolisanim postupcima mogu se dobiti strukture i osobine čelika kao pri naknadnoj termičkoj obradi, međutim njihovom primjenom u praksi ostvaruju se znatne uštede u energiji, jer se za njihovo odvijanje koristi toplota koju materijal već posjeduje, a uz to značajno se skraćuju proizvodne linije. Za ove postupke od prvorazredne važnosti je kontrola temperature sa kojom se završava proces deformisanja i način naknadnog hlađenja. Sa druge strane, u slučaju termomehanički kontrolisanih postupaka, pored kontrole temperature, na kojoj se ostvaruju završne deformacije, veoma je značajan stepen te deformacije. Budući da se ovakvom kontrolom procesa deformisanja ostvaruje polazna struktura za faznu transformaciju, koja se ne može postići bilo kakvim naknadnim zagrijavanjem, to se termomehanički kontrolisanim postupcima mogu postići strukture i svojstva, koje se za posmatrani materijal, ne mogu postići bilo kakvom naknadnom termičkom obradom.

3.1 Postupci ubrzanog hlađenja iz austenitnog područja

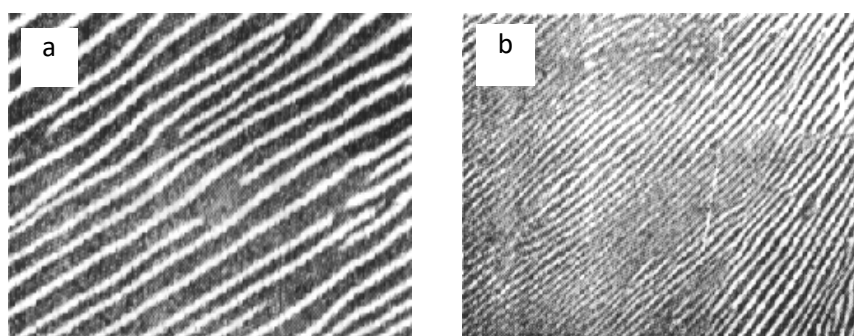
Ovi postupci osiguravaju postizanje feritno-perlitne strukture. U zavisnosti od toga do koje se temperature obavlja ubrzano hlađenje, sa temperature vrućeg valjanja, moguće je regulisati veličinu zrna i debljinu cementitnih lamela u perlitu. Ukoliko se čelik sa temperature vrućeg valjanja/kovanja ubrzano hladi samo do temperature normalizacije, uz kasnije prirodno hlađenje, dobiva se struktura koja je bliska onoj koja se dobije nakon standardnog normalizacionog žarenja (normalizaciono valjanje ili normalizaciono kovanje), a ukoliko se ubrzano hlađenje produži do nižih temperatura dobivaju se strukture sa finijim cementitnim lamelama i malim međulamelarnim rastojanjem (slika 2.).

Struktura	Temperatura	Vruća deformacija + ubrzano hlađenje (UH) do temperature normalizacije	Vruće ubrzano postizanje
Rekristalisani (ekvivalentni) austenit, $\gamma_{\text{rekr.}}$	"Normalna temperatura prerade"		
-----	Temperatura normalizacije		
Austenit i ferit, $\gamma + \alpha$	A_{r3}		
Ferit α Ferit + perlit Ferit + bainit	A_{r1}		

Slika 2. Postupci ubrzanog hlađenja iz austenitnog područja

Pod normalizacionim valjanjem/kovanjem podrazumjeva se takav tip vrućeg prerade nakon koje proizvod poprima strukturu kao da je bio podvrgnut normalizacionom žarenju [7-8]. Da bi se ovo postiglo posljednje deformacije u okviru vruće prerade u austenitnom području treba da se obave na temperaturi na kojoj deformisani austenit potpuno rekristalizira. Nakon toga se vrši ubrzano hlađenje do temperature normalizacije, kako bi se spriječila sekundarna rekristalizacija, odnosno povećanje promjera rekristaliziranih austenitnih zrna, a sve da bi se nakon naknadnog prirodnog hlađenja dobila normalizovana struktura sa što sitnijim feritnim zrnima. Normalizacionim valjanjem se dobivaju gotovi proizvodi kao što su nosači i limovi od konstrukcionih čelika, šine itd.

Zbog relativno male brzine hlađenja sa temperature normalizacije ugljik tokom fazne transformacije austenita u ferit i perlit u mogućnosti je da difundira na veća rastojanja zbog čega se formiraju deblje lamele, uz veće interlamelarno rastojanje. Povećanjem brzine hlađenja fazna transformacija će biti potisnuta prema nižim temperaturama (ispod A_1), a to znači da će se odvijati u uslovima otežane difuzije ugljika, odnosno mogućnosti njegovog difundiranja samo na manja rastojanja što rezultira pojavom finolamelarnog perlita sa malim interlamelarnim rastojanjima (slika 3., tabela 1.).



Slika 3. Izgled perlita nakon sporog (a) i ubranog hlađenja (b)

Tabela 1. Modifikacije lamelarnog perlita

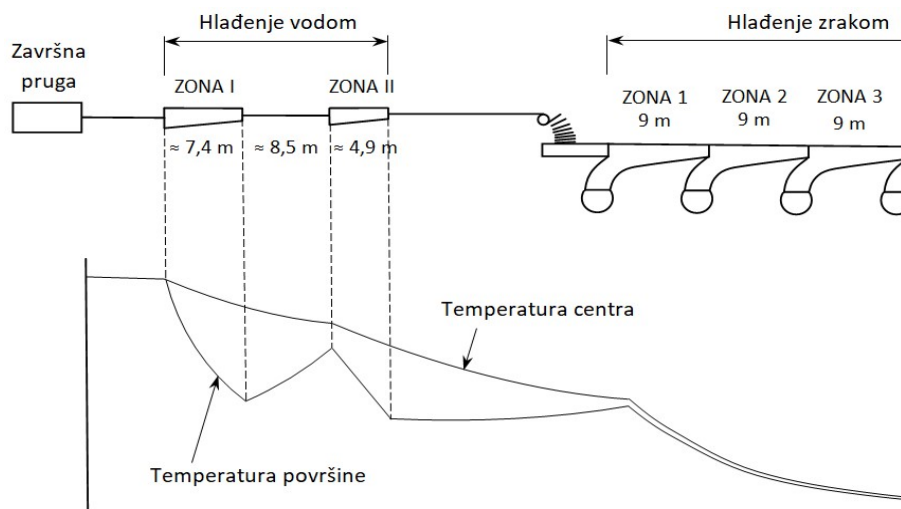
Modifikacija	Temperatura transformacije (°C)	Debljina jednog para feritne i cementitne lamele (μm)
Perlit	723	0,60 - 0,70
Sorbit	600 - 650	≈ 0,25
Trustit	500 - 600	≈ 0,10

Ubrzanim hlađenjem postiže se povoljna polazna mikrostruktura za hladnu preradu, kao što je slučaj sa žicom za hladno oblikovanje vučenjem, ili vruće valjanim trakama za hladno valjanje.

3.1.1 Ubrzano hlađenje žice

Postupak ubranog kontrolisanog hlađenja žice, nakon njenog izlaska iz završne pruge, sastoji se iz vodenog i zračnog hlađenja (slika 4.). Vodeno hlađenje se ostvaruje prskanjem vode pod pritiskom putem mlaznica koje su smještene u dvije vodene kutije. Vodene kutije se nalaze na određenom rastojanju da bi se obezbijedilo izjednačenje temperature po presjeku hladene žice. Intenzitet vodenog hlađenja se podešava prema presjeku komada, vrsti čelika, odnosno temperaturi koju je potrebno ostvariti. Poslije vodenog hlađenja žica se preko glave

za polaganje polaže na pomični konvejer u vidu rastrešenih namotaja. Tokom ovog transporta žica se dodatno hladi putem zračnih komora duvanjem zraka pomoću ventilatora [9]. Zračno hlađenje se podešava tako da se transformacija austenita potpuno završi prije formiranja koturova.



Slika 4. Šema načina kontrolisanog hlađenja vruće valjane žice po Stelmor postupku

Brzina vodenog i zračnog hlađenja podešava se prema vrsti čelika i zahtjevanim osobinama valjane žice. Vodenim hlađenjem je potrebno spriječiti pojavu sekundarne rekristalizacije kako bi se nakon zračnog hlađenja obezbijedila finožrnasta struktura. U slučaju da je valjana žica namjenjena za hladno vučenje neophodno je postići finožrnastu sorbitnu strukturu [10-11] kako bi ona bila odmah spremna za hladnu preradu bez provođenja prethodnog olovnog patentiranja. Osim toga ovim postupkom se postiže ravnomjerna struktura po cijeloj dužini žice, a time i ujednačene osobine.

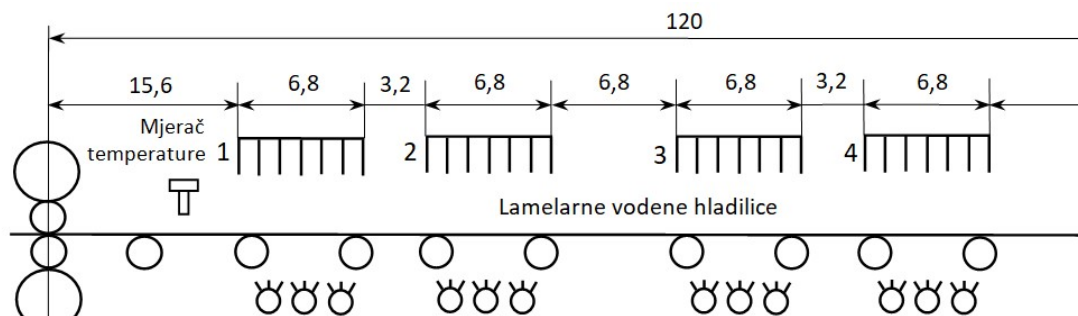
3.1.2 Ubrzano hlađenje limova i traka

Ubrzanim hlađenjem vruće valjanih limova i traka potrebno je ostvariti odgovarajuću feritno-perlitnu strukturu, u zavisnosti od hemijskog sastava valjanog čelika i naredne upotrebe valjanog lima ili trake. Osim toga, ubrzanim hlađenjem se sprječava pojava nekontrolisane transformacije i nehomogenosti strukture po dužini i širini lima odnosno trake. Kao rezultat navedenog vruće valjani limovi i trake mogu da se, bez dodatne termičke obrade, koriste kao finalni proizvodi u normalizovanom stanju ili kao poluproizvodi u slučaju narednog hladnog valjanja.

Ubrzano hlađenje se ostvaruje naprskavanjem vode sa gornje i donje strane vruće valjanog lima ili trake, dok se još uvijek nalaze na odvodnoj kotrljači koja je smještena iza zadnjeg valjačkog stana. Vruće valjani limovi se hlade do temperature $600-800^{\circ}\text{C}$ [10] prije nego što budu podvrgnuti vrućem ravnanju. Dalje hlađenje se može nastaviti na odvodnoj kotrljači, na rešetkastim ili diskovim hladnjacima.

U slučaju vruće valjanih traka hlađenje je potrebno provesti na način da se transformacija austenita završi prije nego što se traka počne namotavati u kotur. Dalje hlađenje trake se obavlja u koturu što osigurava povoljne uslove za izdvajanje precipitata ukoliko su u valjanoj traci prisutni odgovarajući elementi.

Sistem hlađenja vruće valjanih limova i traka je sličan. Na slici 5. šematski je prikazan sistem za kontrolisano hlađenje na jednoj savremenoj pruzi za valjanje traka.

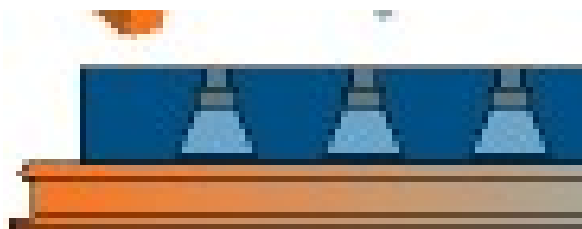


Slika 5. Šematski prikaz hlađenja na odvodnoj kotrljači u Rourkela Steel Plant, Rourkela [12]

3.1.3 Ubrzano hlađenje šina

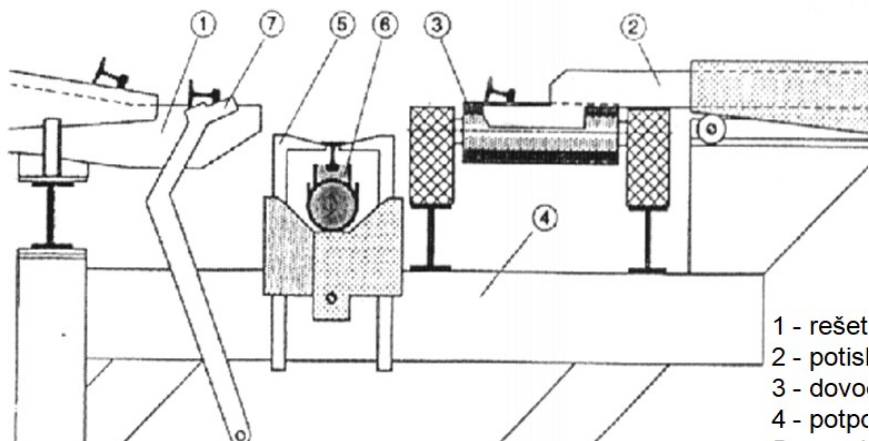
Postupcima ubrzanog hlađenja šina, koje se rade od različitih C-Mn perlitnih čelika (čelici sa $R_m < 1000$ MPa i sa 0,5-0,7% C, odnosno 1,0% Mn, odnosno čelici sa $R_m > 1000$ MPa i sa 0,7-0,8% C, 1,1% Mn, 0,9% Cr i 0,10-0,15% V) postiže se finolamelarna perlitna struktura ili po cijelom presjeku (interlamelarno rastojanje oko $0,3\mu m$) ili na površinskim slojevima glave šine (interlamelarno rastojanje od oko $0,1\mu m$ na dubini do 20 mm).

Na slici 6. prikazan je slučaj kontrolisanog hlađenja cijele šine. Šine se poslije izlaska iz završnog valjačkog stana hlade vodenim mlazovima do temperature koja će obezbjediti postizanje finolamelarnog perlita.



Slika 6. Ubrzano hlađenje cijele šine

Kako bi se dodatno povećala otpornost šina na habanje Voestalpine Schienen GmbH Donawitz-Austrija je 1990. godine uvela specijalni uređaj za ubrzano hlađenje glave šine. Šine koje proizvodi pomenuta kompanija su dužine 120 m i namjenjene su za pruge sa brzinama preko 160 km/h. Navedene šine se valjaju iz konti odlivaka dimenzija 360x250mm. Nakon valjanja šine se okreću te se glava šine ubrzano hladi (slike 7.) u specijalnoj emulziji.



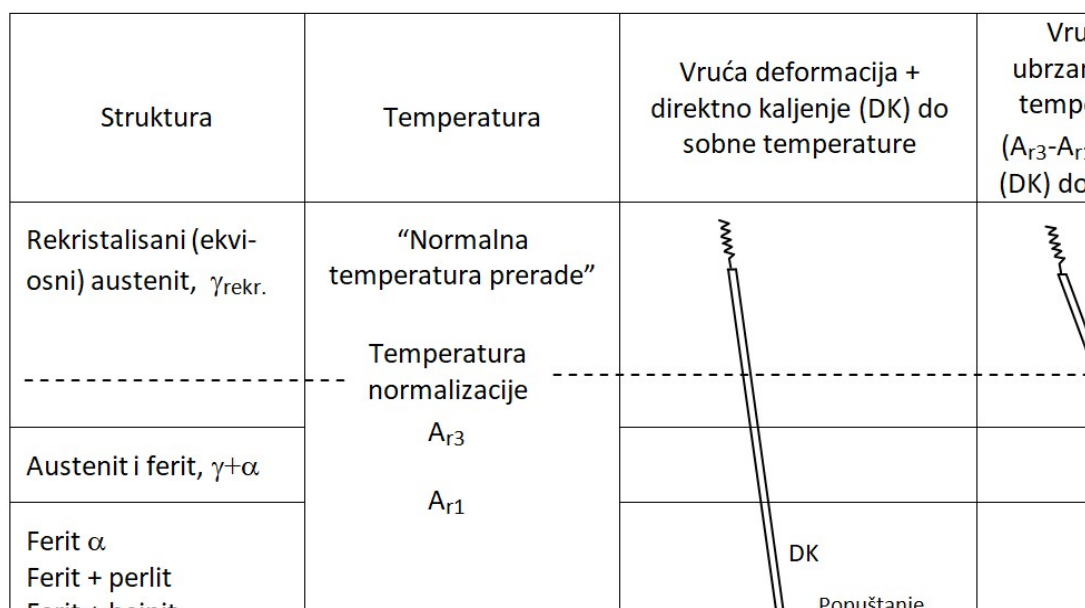
Slika 7. HSH uređaj za ubrzano hlađenje glave šine

Nakon hlađenja u HSH (Head Special Hardened) uređaju glava šine poprima finolamelarnu perlitnu strukturu (interlamelarno rastojanje $0,1 \mu\text{m}$) do dubine 20 mm, dok je ostali dio šine sa normalnim perlitom. Prelaz između ove dvije zone je postupan. Ovakve šine pokazuju duplo veću otpornost na habanje u odnosu na šine koje nisu tretirane HSH postupkom.

Dodatkom legirajućih elemenata i smanjenjem sadržaja ugljika u čeliku za šine (0,4% C; 1,44% Si; 0,84% Mn; 1,03% Cr; 0,69% Mo) te izborom odgovarajuće brzine hlađenja moguće je postići beinitnu strukturu koja osigurava veću čvrstoću šine ($R_m > 1300 \text{MPa}$) sa većom otpornošću na habanje. Takođe, žilavost ovakvih šina, kao i njihova otpornost prema pojavi loma znatno je veća od klasičnih perlitnih šina. Ubrzanim hlađenjem ovakvih šina treba se obezbijediti beinitna struktura zbog čega ovakve šine ne spadaju u grupu kontrolisano hlađenih, nego u grupu direktno kaljenih valjanih proizvoda.

3.2 Direktno kaljenje

Postupak direktnog kaljenja se izvodi nakon provedenog konvencijalnog procesa vrućeg valjanja kako bi se dobila poboljšana struktura. Poboljšanje, kao postupak termičke obrade sastoji se iz faze kaljenja i faze visokog napuštanja ili izotermalne transformacije presičenog austenita u beinit bez naknadnog napuštanja. U prvom slučaju kaljenje se provodi brzim hlađenjem sa temperature iznad temperature A_3 do sobnih temperatura, kako bi se postigla martenzitna mikrostruktura ili brzim hlađenjem sa temperatura iz temperaturnog područja A_1 do A_3 kako bi se dobila dvofazna struktura (slika 8.). Dvofazna struktura je posljedica činjenice da se jedan dio austenita u temperaturnom području A_1 do A_3 transformiše u ferit, a preostali austenit se naknadnim brzim hlađenjem transformiše u beinit ili martenzit.



Slika 8. Postupci direktnog kaljenja

Budući da su komadi sa martenzitnom strukturom, dobivenom nakon kaljenja, praktično neupotrebljivi, vrši se njihovo zagrijavanje do temperatura puštanja kako bi se dobila poboljšana struktura (napušteni martenzit). Cilj puštanja martenzita je izdvajanje što sitnijih fino dispergovanih karbida koji će usporavati i ograničavati kretanje dislokacija u čeliku što rezultira očvršćavanjem. Slično se dešava tokom izotermalne transformacije presičenog rastvora austenita u beinit (izotermalno poboljšanje) s tim što klasično poboljšanje (kaljenje i visoko napuštanje) ima prednost budući da je utvrđeno da pri istim vrijednostima tvrdoće u klasično poboljšanim čelicima oblik formiranih karbida je povoljniji nego u slučaju beinita.

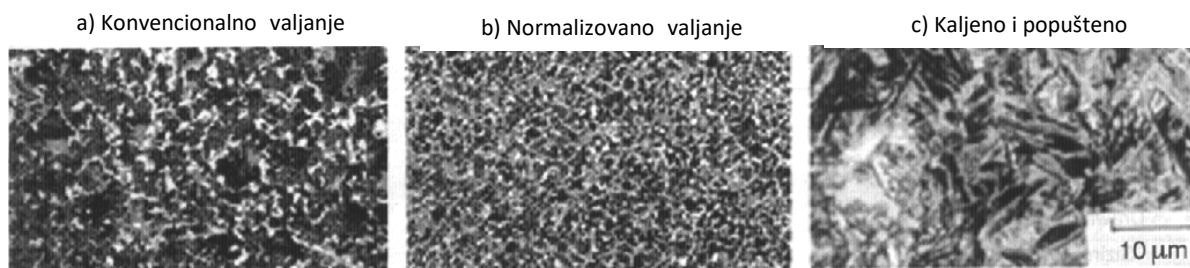
Poseban slučaj postoji kod provođenja kontrolisanog kaljenja koje je ograničeno samo na površinski dio valjanog komada. U tom slučaju nije potrebno vršiti naknadno napuštanje budući da se zakaljeni dio sam popušta toplotom koja se oslobađa iz središta tretiranog profila.

U odnosu na normalizovano valjanje, koje osigurava povoljniji odnos između karakterističnih mehaničkih svojstava (čvrstoćna svojstva - udarna žilavost) u odnosu na konvencionalno valjanje, poboljšanjem se postiže dodatno unapređenje tih svojstava (tabela 2.). Navedeno je rezultat izdvajanja karbida u vidu finih čestica, što za razliku od perlita, kod koga je željezni karbid - cementit (Fe_3C) izdvojen u obliku lamela, znatno povoljnije sa stanovišta udarne žilavosti.

Tabela 2. Unapređenje mehaničkih svojstava čelika kvaliteta 38MnSiVS5 [13]

Tehnologija	$R_{p0,2}$ (MPa)	R_m (MPa)	A_5 (%)	Z (%)	Utrošena energija udara, V zarez (J)	Mikrostrukturni konstituenti
Konvencionalno valjanje	660	960	13	35	15	40% ferita; 60% perlita veličina austenitnog zrna 4-6
Normalizaciono valjanje	620	900	16	43	36	45% ferita; 55% perlita veličina austenitnog zrna 6-8
Kaljenje i napuštanje 870°C, 20 min/voda 570°C, 120 min/zrak	800	910	18	53	48	20% beinita; 80% martenzita
Hemijski sastav 0,35-0,40% C; 0,5-0,8% Si; 1,2-1,5% Mn; 0,08-0,13% V; promjer 50 mm						

Na slici 9. prikazane su mikrostrukture dobivene tehnologijama navedenim u tabeli 1.

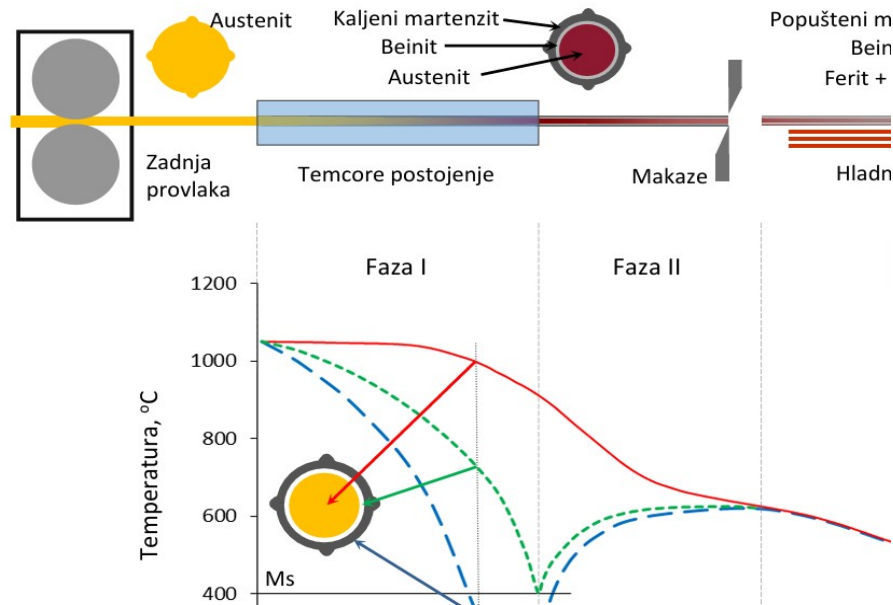


Slika 9. Mikrostruktura čelika kvaliteta 38MnSiVS5 za različite postupke valjanja i naknadnog termičkog tretmana [13]

3.2.1 Kaljenje i samopopuštanje betonskog čelika

Postupkom kaljenja i samopopuštanja moguće je dobiti betonski čelik povišenog napona tečenja i čvrstoće sa dobrom duktilnošću i zavarivošću uz smanjenje sadržaja legirajućih elemenata. Druga dva postupka, koji se mogu koristiti za povećanje napona tečenja (dodavanje legirajućih i mikrolegirajućih elemenata, te hladna deformacija – hladnim valjanjem, vučenjem ili torzijom) ne omogućavaju postizanje dobre zavarivosti i duktilnosti, posebno u slučaju primjene hladne deformacije, a osim toga troškovi koje iziskuju znatno su veći nego u slučaju primjene postupka kaljenja i samopopuštanja [6, 14]. Postupak kaljenja sa samopopuštanjem se može primjeniti kako na šipke tako i na žice koje se namotavaju u koturove. U oba slučaja kaljenje se ostvaruje brzim hlađenjem iz austenitnog područja

korištenjem sistema sa vodenim sprejom, sistema sa vodenim kutijama ili nekog drugog sistema koji obezbjeđuje dovoljno veliku brzinu hlađenja [6] da bi se u površinskim slojevima šipki ili žice ostvarila martenzitna struktura. Konačno hlađenje sa temperature izjednačenja do sobnih temperatura u slučaju šipki obavlja se na hladnjaku. Na slici 10. šematski su predstavljeni različiti koraci procesa kaljenja i samopopuštanja šipki kao i raspored postrojenja.



Slika 10. Šematski prikaz proizvodnje rebrastog betonskog čelika u šipkama [15]

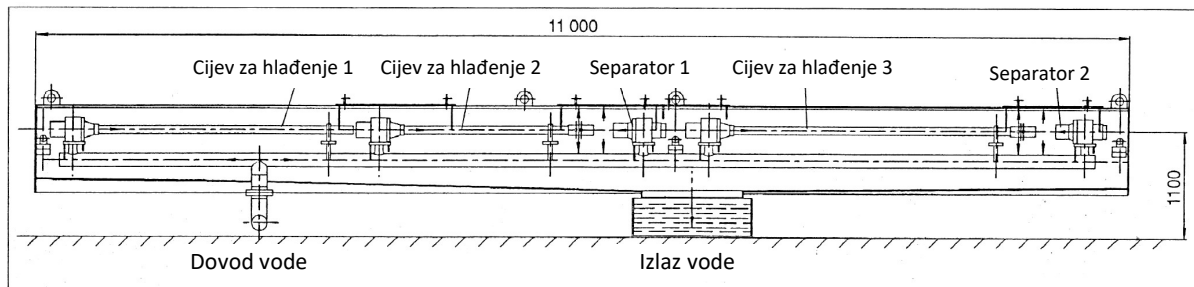
Nakon što šipka napusti završni stan valjačke pruge ona ulazi u instalaciju za izvođenje kaljenja i samopopuštanja. Pomenuto se ostvaruje u tri različita koraka. U prvom koraku dolazi do kaljenja valjane šipke do određene dubine. U dijelu šipke kod koje se hlađenjem dostigla temperatura ispod M_s formira se martenzit. Ova operacija se ostvaruje u vodenim kutijama. Dio šipke, kod kojeg temperatura nije pala ispod M_s , zadržao je austenitnu strukturu. U drugom koraku šipka napušta područje drastičnog hlađenja i biva izložena hlađenju na zraku. Budući da je koeficijent prenosa toplote u okruženje mali, a gradijent temperature po presjeku šipke veliki dolazi do ponovnog zagrijavanja martenzitnog sloja toplotom iz unutrašnjosti šipke. Pošto se martenzitni sloj popušta preostalom toplotom iz centralnih dijelova šipke, to se ovakvo napuštanje naziva samopopuštanje. Ova faza se završava izjednačenjem temperature po cijelom presjeku. Treća faza se odvija tokom hlađenja šipki na hladnjaku. U ovoj fazi preostali austenit se transformira u finostrukturalni ferit i perlit, koji osigurava zadovoljavajuću istezljivost i žilavost tretirane čelične šipke.

3.2.2 Kaljenje i naknadno popuštanje

3.2.2.1 Kaljenje i naknadno popuštanje šipki

Jedan od načina direktnog kaljenja šipki prikazan je na slici 11. Temperatura se kontroliše linijom za hlađenje vodom. U svojstvu primjera ovdje će biti navedene prednosti primjene postupka direktnog kaljenja sa temperature valjanja sa naknadnim napuštanjem u odnosu na klasični postupak kaljenje – napuštanja u slučaju alatnog čelika X45NiCrMo4 (1.2767). Uobičajena je praksa da se ovaj čelik u obliku valjane šipke podvrgava klasičnom kaljenju i napuštanju u cilju dobivanja fine martenzitne strukture sa povećanom čvrstoćom i udarnom

žilavošću. Ovako kaljeni čelik se deformisao (savijao) tokom izvođenja kaljenja što je zahtjevalo naknadno ispravljanje šipki.



Slika 11. Linija za vodeno hlađenje N.3 na pruzi za valjanje šipki (Krupp Edelstahlprofile) [13]

Zahvaljujući tehnologiji direktnog kaljenja slična fina martenzitna struktura se može dobiti kaljenjem odmah po okončanju procesa valjanja s tim što ova tehnologija osigurava dobijanje šipki koje su veoma ravne, budući da se kaljenje odvija postupno i kontinuirano preko cijele dužine šipki. Osim toga smanjuje se broj operacija u odnosu na klasični postupak termičke obrade.

3.2.2.2 Direktno kaljenje limova

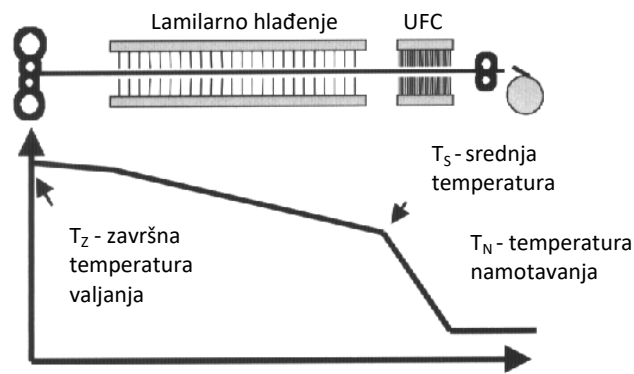
Direktno kaljenje limova može se ostvariti na postrojenjima koja su slična postrojenjima za ubrzano hlađenje, a koja se koriste u slučaju normalizacionog i termomehaničkog valjanja, s tim što je potrebno ostvariti veće brzine hlađenja. Dizajniranje univerzalnog sistema hlađenja, koje bi zadovoljilo sve zahtjeve različitih valjaonica limova je dosta teško ne samo zbog zahtjeva za različitim brzinama hlađenja, obzirom na tip primjenjenog postupka hlađenja, nego i zbog različitih debljina limova koji se valjaju.

3.2.3 Dobivanje višefaznih struktura

Visokočvrsti čelici ($R_m > 600 \text{ MPa}$) sa višefaznom strukturom (feritno-beinitna i feritno-martenzitna) pokazuju bolju deformabilnost od mikrolegiranih čelika istog nivoa čvrstoće [16]. Postizanje višefaznih mikrostruktura je dosta teško kontrolisati sa klasičnom opremom, koja se zasniva na tehnologiji lamilarnog hlađenja, budući da se brzine hlađenja kreću između 30 i 80°C/s . Otežavanju navedene kontrole doprinosi i kratko vrijeme koje stoji na raspolaganju za hlađenje (8 do 15 s), a koje zavisi od brzine valjanja. Za osiguranje pomenute kontrole bilo je potrebno dodavati legirajuće elemente (Mn, Cr, Mo) što je poskupljivalo proizvodnju.

Razvojem opreme za tzv. ultra brzo hlađenje (UFC - Ultra Fast Cooling) omogućilo je lakšu proizvodnju, odnosno bolju kontrolu transformacije tokom hlađenja. Kao rezultat toga višefazne čelike je moguće proizvoditi sa boljim osobinama i nižim cijenama. Postrojenje ne kojem se obavlja hlađenje izvaljanog komada sastoji se od klasičnog uređaja za lamilarno hlađenje i UFC – uređaja koji je smješten prije namotača (slika 12.).

U principu postupak se sastoji od djelimične transformacije austenita u ferit, tokom lamilarnog hlađenja do srednje temperature T_s , iza čega slijedi kaljenje u UFC postrojenju, pri čemu se temperatura brzo obori do temperature namotavanja, zbog čega preostali austenit prelazi u beinit ili martenzit. Postizanje željene višefazne strukture se dosta jednostavno reguliše izborom srednje temperature T_s i temperature namotavanja T_N . Temperatura T_s određuje udio ferita u strukturi, dok temperatura T_N određuje udio beinita, odnosno martenzita.



Slika 12. Postrojenje za hlađenje višefaznih čelika [16]

3.3 Termomehanički kontrolisani postupci

Na slici 13. prikazane su vrste termomehaničkih kontrolisanih postupaka s obzirom na način hlađenja (na zraku, ubrzano, naglo) nakon posljednje kontrolisane deformacije, sa napomenom da prije ove završne deformacije, u odgovarajućem programu obrade, može biti predviđen veći broj kontrolisanih provlaka u različitim strukturnim oblastima.

Struktura	Temperatura	Termomehanički postupci prerade (TM)	Termomehanički postupci prerade (TM) + ubrzano hlađenje (UH)
Rekristalisani (ekviosni) austenit γ_{rekr}	"Normalna temperatura prerade"		
Nerekristalisani (izduženi) austenit $\gamma_{\text{nerek.}}$	Temperatura normalizacije		
Austenit i ferit $\gamma + \alpha$	A_{r3}		
Ferit α	A_{r1}		
Ferit + perlit			

Slika 17. Termomehanički kontrolisani postupci prerade čelika [17-20]

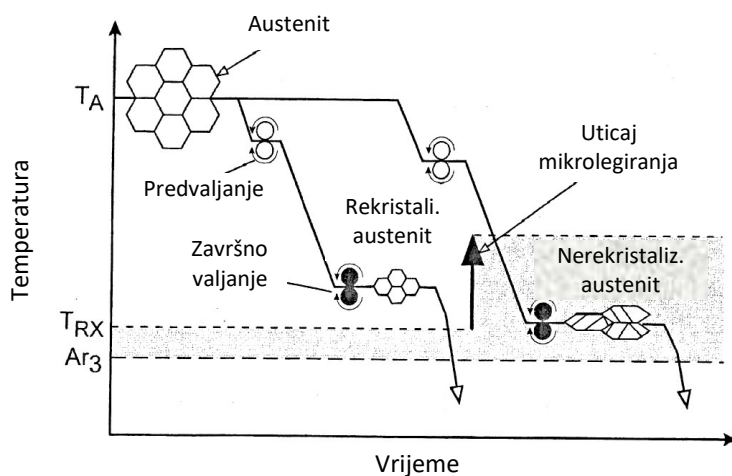
Određeni čelik, koji se dobije primjenom nekog termomehanički kontrolisanog postupka, poprima mikrostrukturu sa izuzetno sitnim zrnima. Takva struktura osigurava povišene čvrstoćne osobine uz dobru žilavost i otpornost na zamor. Pored toga, ovakav čelik pokazuje izuzetno dobru zavarivost, što je između ostalog rezultat smanjenja sadržaja C i drugih legirajućih elemenata koji je inače pogoršavaju. Ojačavajuće dejstvo ovakvih elemenata efikasno se zamjenjuje ojačavanjem usljed usitnjenja zrna koje je osnovni mehanizam ojačavanja čelika obrađenih ovim postupcima. Pored navedenog mehanizma, u zavisnosti od hemijskog sastava (sadržaj mikrolegirajućih elemenata) i temperature na kojoj se odvija termomehaničko valjanje, precipitacioni i deformacioni mehanizmi, u manjoj ili većoj mjeri

doprinosu ojačavanju. U svakom slučaju termomehantičkom kontrolom proizvedeni čelici karakterišu se poboljšanim mehaničkim svojstvima u odnosu na čelike koji se proizvode u normalizovanom stanju.

Plastična deformacija, koja je sastavni dio ovih postupaka obavlja se na temperaturama koje su niže od temperatura “normalnog ili nekontrolisanog valjanja”. Hlađenje na temperature kontrolisanog valjanja može da bude postepeno (na zraku), ubrzano ili naglo. Kontrolisano valjanje može da se obavi u austenitnom području, na temperaturama na kojima je još uvijek moguća statička ili dinamička rekristalizacija ili nešto nižim temperaturama gdje je rekristalizacija austenita spriječena, u dvofaznom području u toku odvijanja fazne transformacije ili u čisto feritnom području. Postoji mogućnost provođenja kontrolisanog valjanja u više navedenih područja u istoj proizvodnoj liniji.

I pored svih prednosti koje posjeduju čelici dobiveni termomehantički kontrolisanim procesima, njihova zastupljenost od oko 10 % u ukupnoj količini valjanih proizvoda relativno je mala. Osim toga, ovi postupci se uglavnom primjenjuju na pljosnate proizvode za cjevovode dok je njihova primjena na dugačke proizvode, na koje otpada 50 % godišnje proizvodnje skoro beznačajna. Navedeno je posljedica činjenice da najveći broj do sada korištenih postupaka termomehantičkog valjanja zahtjeva izvođenje završnog valjanja (60 do 70 % deformacije) na temperaturama nižim od temperature rekristalizacije. Ovo je direktno povezano sa povećanim opterećenjem valjačkih stanova, a time i značajnim padom produktivnosti zbog smanjene brzine valjanja, dok kod dugačkih proizvoda (npr. žice) brzine valjanja dostižu vrijednosti i do 100 m/s. Primjena kontrolisane deformacije na sniženim temperaturama, odnosno temperaturama ispod temperatura rekristalizacije, rezultat je mišljenja da se ekstremno sitno feritno zрно može dobiti samo iz deformisanog, nekristaliziranog ili ispeglanog austenitnog zrna. Ovakav pristup usmjerio je istraživanja u pravcu razvoja čelika, koji će imati što višu temperaturu završetka rekristalizacije, kako bi se planirane završne provlake mogle izvesti na što višim temperaturama čime se ostvaruje bolja plastičnost valjanog materijala.

Ekstremno profinjenje austenitnog zrna može se ostvariti putem dinamičke rekristalizacije na temperaturi koja je nešto viša od granične temperature na kojoj je rekristalizacija još uvijek moguća. Postupak zahtjeva preciznu kontrolu kako temperature tako i stepena deformacije, uz napomenu da je u čeliku neophodno prisustvo mikrolegirajućih elemenata (Nb, V, Ti) koji će potiskivati statičku rekristalizaciju (slika 14.).



Slika 14. Principijelna šema programa valjanja u području rekristaliziranog i nekristaliziranog austenita [21]

Princip se sastoji u tome da se deformacija na završnim provlakama obavi tako brzo, na dovoljno niskoj temperaturi, da ne postoji mogućnost pojave statičke rekristalizacije. Usljed značajnog akumuliranja deformacije dolazi do pojave dinamičke rekristalizacije koja osigurava postizanje sitnog austenitnog zrna koje će se nakon sporog, a naročito ubrzanog hlađenja transformirati u još sitnija zrna ferita (13 do 14 ASTM jedinica) [2, 21-23]. Smatra se da su sa tehnološkog stanovišta prednosti ove alternative naročito značajne u pogledu razvoja termomehaničkih kontroliranih postupaka valjanja dugačkih proizvoda zbog mogućnosti ostvarivanja deformacije na višim temperaturama.

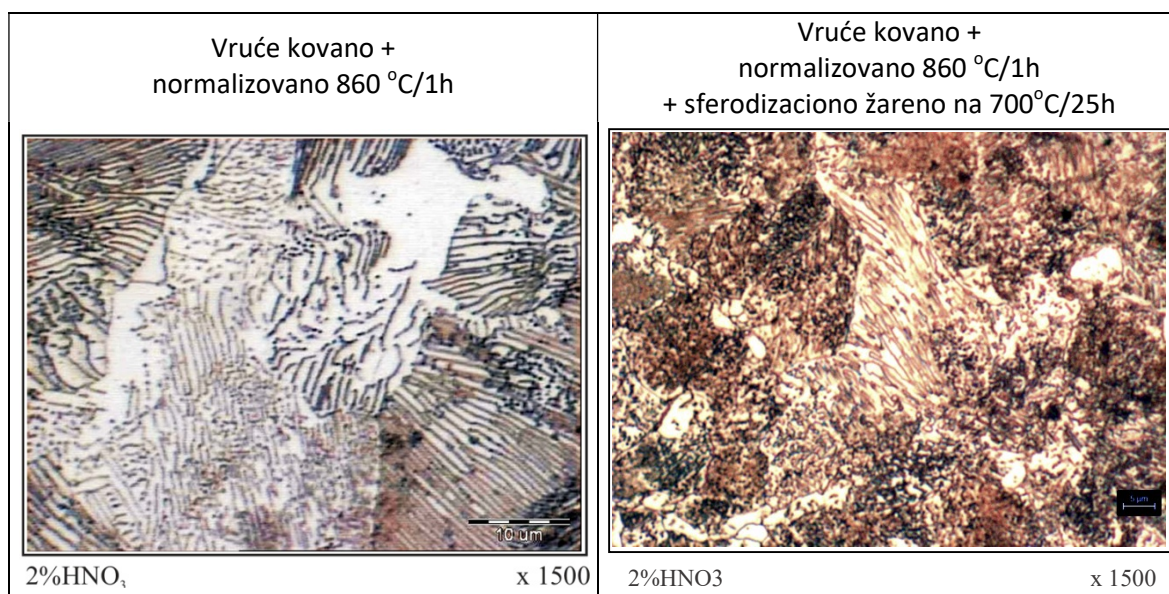
Izvođenjem deformacije za vrijeme odvijanja fazne transformacije ostvaruju se uslovi za još veće usitnjenje feritnog zrna zbog povećanja broja potencijalnih mjesta za nukleaciju ferita u deformiranoj strukturi austenita. Naime, povećanjem stepena deformacije znatno se povećava broj grešaka kristalne rešetke koje su pogodne za nukleaciju ferita (vidi 3.3.3). Navedeni efekat izostaje ako nisu ostvareni termodinamički uslovi za transformaciju $\gamma \rightarrow \alpha$, u toku odvijanja deformacije, budući da se procesima oporavljanja (formiranje dislokacione substrukture) nastale greške djelomično, ali vrlo brzo eliminišu, tako da se smanjuje broj potencijalnih mjesta za nukleaciju ferita. Budući da se tokom izvođenja ovakvog postupka termodinamičkog valjanja ostvaruje manja ili veća deformacija ferita, prirast čvrstoćnih osobina valjanog čelika, zbog deformacionog ojačanja, može biti podešavan stepenom ostvarene deformacije. Porast čvrstoćnih svojstava zbog deformacionog ojačanja redovno je praćen padom istezljivosti dok pad žilavosti može biti nadoknađen ostvarenim dodatnim profinjenjem feritnih zrna.

Izvođenjem termomehanički kontrolisanog valjanja u području ferita dolazi do dodatnog deformacionog ojačanja koje prati pad istezljivosti i žilavosti. Kod ostvarenih većih stepena deformacije javlja se i izražena anizotropija mehaničkih svojstava koja zavise od stepena razvoja deformacione teksture.

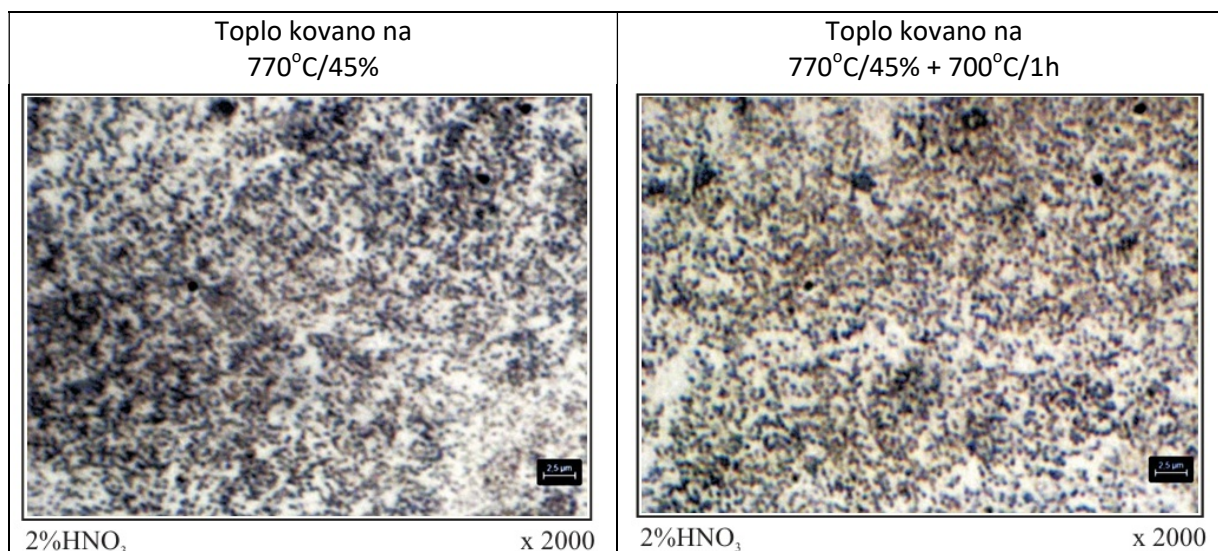
Osim usitnjenja zrna, kontrolisana deformacija u području austenita, dvofaznom austenit + ferit području i u feritnom području dovodi do ubrzane sferoidizacije cementita. U zavisnosti od temperature na kojoj se odvija kontrolisana deformacija, te kasnijeg hlađenja dolazi do mikrostrukturnih promjena koje su određene većim brojem metalurški uticajnih faktora, kao što su deformacija ferita i deformacija perlita. Ferit je duktilna faza koja se lako deformiše. Sa druge strane cementine lamele u perlitu su ekstremno tvrde i krte zbog čega se lome u manje dijelove tokom plastične deformacije [24-26]. Fragmentacijom cementitnih lamela tokom toplog valjanja ili kovanja ubrzava se proces sferoidizacije cementita tako da on značajno kraće traje [27] u odnosu na sferoidizaciju cementita tokom mekog žarenja nedeformiranog lamelnog perlita. Proces sferoidizacije cementita je određen brzinom difuzije ugljika budući da se pojedini dijelovi cementitne lamele moraju rastvotiti pri čemu rastvoreni atomi ugljika difundiraju u drugi dio cementitne lamele koja postepeno poprima sferični oblik.

Ukoliko se cementitne lamele deformacijom izlome u male fragmente, difuzija rastvorenog ugljika se odvija na manjim rastojanjima pa će proces sferoidizacije cementita biti mnogo brži. Proces sferoidizacije lamela cementita traje više sati (oko 20 sati) u slučaju provođenja mekog žarenja nedeformiranih i nefragmentiranih lamela cementita u perlitu, dok se u slučaju fragmentiranih cementitnih lamela ovaj proces završi znatno brže. Mehanizam mekog žarenja se bazira na sferoidizaciji i kagulaciji cementitnih čestica unutar feritnog matriksa, a uslovljen je težnjom sistema ka smanjenju svoje unutrašnje energije jer globularni (zaokruženi, sferoidizirani) cementit obezbeđuje najniži energetska sadržaj u odnosu na sve strukture sistema željezo-ugljik [28]. U slučaju niskougleničnog čelika proces sferoidizacije se provodi u cilju poboljšanja njegove obradivosti u hladnom stanju [28-30].

Na slikama 15. i 16. prikazane su mikrostrukture vruće i toplo kovanog čelika 41Cr4. Vruće kovani uzorak je normalizaciono i sferodizaciono žaren, dok je toplo kovani uzorak samo sferodizaciono žaren.



Slika 15. Mikrostruktura uzorka čelika 41Cr4 koji je vruće kovan i normalizaciono žarena na 860 °C/1h prije i nakon provedenog sferodizacionog žarenja na temperaturi od 700 °C u trajanju od 25 sati (perlitno-feritna mikrostruktura sa lamelarnim cementitom nakon provedenog normalizacionog žarenja koji nije potuno koagulirao ni nakon 25 sati sferodizacionog žarenja na 700 °C)



Slika 16. Mikrostruktura uzorka čelika 41Cr4 koji je toplo kovan sa temperature 770 °C sa iznosom deformacije od 45 % prije i nakon provedenog sferodizacionog žarenja na temperaturi od 700 °C u trajanju od jednog sata (perlitno-feritna mikrostruktura sa koaguliranim karbidima)

Toplo kovanje u dvofaznom austenit + ferit području (770 °C) osigurava dobivanje potpuno sferodiziranog cementita, koji se odatno profini sferodizacionim žarenjem na 700 °C u trajanju od jednog sata. S druge strane potpuna sferodizacija lamelnog perlita nakon vrućeg kovanja i normalizacije na 860 °C/1h nije moguća ni nakon 25 sati žarenja na 700 °C.

4. ZAKLJUČAK

Uvođenje temperaturno kontrolisanih postupaka plastične prerade omogućilo je unapređenje upotrebnih karakteristika čelika uz istovremeno smanjenje troškova njihove proizvodnje. Generalno posmatrano, primjenom nekog od temperaturno kontrolisanih postupaka plastične prerade može se ostvariti najmanje jedno, a u većini slučajeva više dole navedenih poboljšanja:

- optimalan odnos čvrstoćnih i duktilnih svojstava uz zadovoljavajući nivo žilavosti, što je rezultat preferiranja ojačavanja profinjenjem zrna kao jednim nekim mehanizmom ojačavanja,
- smanjen sadržaj skupih legirajućih elemenata u čeliku budući da se profinjenjem zrna mogu ostvariti veće čvrstoće bez opasnosti od smanjenja sigurnosti konstrukcije izrađene iz takvog čelika,
- poboljšana zavarivost čelika zbog smanjenog sadržaja legirajućih elemenata koji je pogoršavaju,
- homogena struktura po širini i dužini komada, ako se radi o jednofaznim strukturama, a u slučaju višefaznih struktura ujednačen raspored mikrostrukturnih konstituenata po dužini i širini komada, odnosno u smjeru njegovog radijusa ako se radi o šipci. Navedeno je rezultat kontinuirane obrade tretiranog komada od njegovog početka do kraja pod istim uslovima,
- smanjeni troškovi proizvodnje zbog korištenja toplote koju valjani komad posjeduje nakon završetka procesa plastične prerade, smanjenog utroška materijala zbog njegove povišene čvrstoće, te skraćivanja proizvodnih linija zbog eliminisanja potrebe za naknadnom termičkom obradom,
- mogućnost automatizacije procesa koja osigurava kontinuirano održavanje optimalnih uslova odvijanja procesa.

Prednosti temperaturno kontrolisanih postupaka, koji se zasnivaju samo na kontroli brzine hlađenja (ubrzano hlađenje i direktno kaljenje), uglavnom se ogledaju kroz eliminaciju potrebe za dodatnom termičkom obradom ili provođenjem nekih drugih naknadnih radnji kao što je slučaj sa ravnanjem. Također, ovim postupcima se ostvaruje ujednačena mikrostruktura. S druge strane termomehanički kontrolisani postupci omogućavaju dostizanje svih gore navedenih poboljšanja posebno u slučaju primjene mikrolegiranja. Međutim, glavni nedostatak ovih postupaka je u tome što se generalno ne mogu primjeniti na dugačke proizvode.

5. REFERENCE

- [1] Tomašević, S.: Osnovi fizičke metalurgije – skripta, Metalurški fakultet u Zenici, Zenica, 1987.
- [2] Tomašević, S.: Dizajniranje tehničkih materijala, Apex/izdanja nauka i industrija, Zenica, 1999.
- [3] Bimal, K.P.; Vaidyanatha, R.; Suraj, B.: Effect of thermomechanical processing on structure and properties of low carbon steels, *Steel res.* 60 (1989), No.9, pages 407/411
- [4] Acev, M.; Bajevski, V.; Jovanova, V.; Meškov, B.; Funke, P.: VIII savjetovanje valjaoničara, stranica 190/198, Opšte udruženje crne metalurgije Jugoslavije, Zenica, 1987.
- [5] Nedeljković, Lj.: Uvod u mehaniku loma i konstruiranje sa sigurnošću do loma, stranice P16-1/P16-21, Institut GOŠA, Tehnološko-metalurški institut Beograd, Beograd, 1980.
- [6] Morales, R.D.; Toledo, M.; Lopez, A. G.; Tapia, A. C.; Petersen, C.: Mathematical model for on-line heat treatment of steel bars, *Steel res.* 62 (1991), No.10, pages 433/440
- [7] Standard BAS EN 10025+A1/2003
- [8] Begovac, F.: Osobine čelika, Univerzitet u Sarajevu – Fakultet za metalurgiju i materijale, Zenica, 2000.
- [9] Mujezinović, A.; Bakić, B.: VIII savjetovanje valjaoničara, stranice 114/121, RMK-Željezara Zenica, 1987.
- [10] Čaušević, M.: Obrada metala valjanjem, Veselin Masleša, Sarajevo, 1983.
- [11] Pešić, M.; Milenković, V.: Hladno izvlačenje žica, šipki i cevi, Tehnička knjiga, Beograd, 1965.
- [12] Prasaad, A.; Jha, S.; Mishra N.S.: Modelling of microstructural evolution during accelerated cooling of hot strip on the runout table, *Steel res.* 66 (1995), No.10, pages 416/423
- [13] Kahlmann, R.; Kruse, M.; Meyer, M.; Plociennik, U.: Optimization of material properties for bars and wire rod, *MPT International*, 2/2000, pages 56/62
- [14] Kulović, H.; Kapetanović, S.; Komlenović, M.; Klobodanović, A.: Studija mogućnosti proizvodnje betonskog čelika visoke čvrstoće TEMPCORE; THERMEX postupkom u Željezari Zenica – prethodna studija, Metalurški institut “Kemal Kapetanović”, Zenica, 1995.
- [15] Purić V.; Beganović O.: (2024). Effect of Cooling Parameters on Tensile Properties of Concrete Reinforcing Steel in Coils, *Journal of Sustainable Technologies and Materials*, 4(7), 9–16. <https://doi.org/10.57131/jstm.2024.7.2>
- [16] Aurelie, L.; Pierre, S.; Guillaume. B.; Jean-Claude, H; Philipe, R.; Joeri. N.; Philipe, H.: Metallurgical Aspects of Ultra Fast Cooling in front of the Down-Coiler, *Steel res.* 75 (2004) No2, pages 139/146
- [17] ASTM A 841/A 841 M-95
- [18] Wehage, H.; Skoda-Dopp, U.; Quitmann. U.; Sauer, W.: New trends in hot flat rolling technologies and pass schedule optimization, *MPT International* 4/1998, pages 60/71
- [19] Hubo, R.; Hanus, F. E.; Streißenberger.: Manufacturing and fabrication of thermomechanically rolled heavy plates, *Steel res.* 64 (1993) No.8/9, pages 391/395
- [20] ASTM A 913/A 913 M – 95a
- [21] Kaspar, R.; Peters, A.: Efficient steel processing by disciplined hot forming and microalloying, *Steel res.* 69 (1998) No 4+5, pages 128/135
- [22] Kaspar, R.; Distl, J. S.; Pawelski, O.: Extreme austenite grain refinement due to dynamic recrystallization, *Steel res.* 59 (1988), No 9, pages 421/425
- [23] Tirnanić, S.; Čurčić, R.; Tirnanić, D.; Drobniak, Đ.; Properties of thermomechanically rolled Nb/Ti microalloyed steel sheets, *Steel res.* 60 (1989) N₀. 12, pages 561/570
- [24] Zheng, C.; Dierk R. D.: Interaction between recrystallization and phase transformation during intercritical annealing in a cold-rolled dual-phase steel: A cellular automaton model, *Acta Materialia* 61 (2013) 5504–5517
- [25] Umemoto, M.; Todaka Y.; Tsuchiya K.: Mechanical Properties of Cementite and Fabrication of Artificial Pearlite, *Materials Science Forum*, Vol. 426-432 (2003) pp. 859-864
- [26] Valberg, H.S.: Applied Metal Forming including FEM analysis, Cambridge University Press, 2010
- [27] Song, R.; Ponge D.; Raabe D.; Kaspar R.: Microstructure and crystallographic texture of an ultrafine grained C–Mn steel and their evolution during warm deformation and annealing, *Acta Materialia* 53 (2005) 845–858

- [28] Božidar, L.: Chapter 6: Steel Heat TreatmentSteel Heat Treatment (277-414), Steel Heat Treatment Handbook. Second editions, Edited by George E. Totten, CRC press Taylor & Francis Group, 2007
- [29] Bruce, L.: Structure/Property Relationships in Irons and Steels, Metals Handbook Desk Edition, Second Edition, J.R. Davis, Editor, p 153-173, ASM International, 1998
- [30] ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating, ASM International, 1991