

RAZVOJ ČELIKA ZA IZRADU ŠINA

Olivera Popović¹, Radica Prokić-Cvetković¹, Radomir Jovičić²

Kategorizacija rada: PREGLEDNI RAD

ADRESA:

- 1) Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd
- 2) Inovacioni centar Mašinskog fakulteta u Beogradu

REZIME: Železničke šine predstavljaju najvažniji i najskuplji deo koloseka, pa je prioritet u istraživanjima produžetak njihovog radnog veka. Pošto je šina pored oblika, određena i materijalom od kog je izrađena, brojni su pokušaji u pronalaženju što kvalitetnijeg čelika koji će da odgovori svim postavljenim zahtevima. U radu je prikazan hronološki razvoj čelika za šine, počev od prvog korišćenog ugljeničnog čelika perlitne mikrostrukture, preko postupka otvrdnjavanja glava i dobijanja premium šina, pa do najnovijih generacija beinitnih čelika. Veliki broj istraživača u svetu intenzivno radi na ovoj problematici, i preliminarni rezultati pokazuju superiorna svojstva novih čelika u pogledu tvrdoća, žilavosti, habanja i otpornosti na kontakti zamor.

KLJUČNE REČI: železnička šina, perlitni čelik, beinitni čelik, habanje, žilavost

1. UVOD

Moderni železnički sistemi su izloženi intenzivnom saobraćaju, velikim brzinama i opterećenjima, pa je veoma važno da materijal od koga su izrađene železničke komponente odgovori postavljenim zahtevima. Postoji mnogo kriterijuma koji određuju pogodnost nekog materijala za primenu u železnici. Najvažniji zahtev koji se postavlja pred materijal je strukturni integritet, koji se u eksploataciji narušava zamornim mehanizmima, nedostatkom otpornosti prema krtom lomu, lokalizovanom plastičnošću i intenzivnim habanjem.

Obzirom da je čelik materijal sa velikom vrednošću modula elastičnosti, dobre čvrstoće, žilavosti i otpornosti na habanje; da se masovno proizvodi i da ima relativno nisku cenu, skoro svi točkovi i šine su napravljeni upravo od čelika. Još od uvođenja čeličnih šina, sredinom XVIII veka, šine i točkovi su uglavnom zadržali svoj prvobitni oblik.

Sve što su istraživači uradili u poslednjih 150 godina po pitanju čelika za šine je što su poboljšali kvalitet čelika, i to pre svega povećanjem čistoće preko smanjenja sadržaja štetnih primesa, zatim sprečavanjem pojave mekih komponenti ferita i poboljšanjem osobina odgovarajućim legiranjem. Zbog sve većih zahteva u pogledu čvrstoća i tvrdoća čelika, u skorije vreme pojavila se nova generacija beinitnih šina, poboljšanih mehaničkih svojstava, ali je njihova upotreba još uvek ograničena.

2. ISTORIJSKI RAZVOJ MATERIJALA ZA IZRADU ŠINA

Prve metalne šine, korišćene u Engleskoj u rudnicima i za tramvaje u 18. veku, bile su izrađene od livenog gvožđa. Ovaj materijal je bio krt i nesposoban da opterećenje apsorbira kao plastičnu deformaciju, pa nije čudno što su lomovi šina bili veoma česti. Tako je pri javnoj demonstraciji prve parne mašine, 1808. godine u Londonu, došlo do loma šine, a time i loma lokomotive, čime je neslavno završena prezentacija novog tehnološkog čuda.

Intenzivno habanje je takođe bilo problem, pa je u cilju njegovog smanjenja, brzina voza na prvoj nemačkoj pruzi smanjena sa početnih 40 km/h na 24 km/h. Problem habanja se uvek provlačio kroz stalne zahteve za povećanjem kvaliteta i čvrstoće čelika.

Sledeći korak u razvoju šina su bile uzdužne drvene grede obložene gvozdanim trakama, koje su korišćene kao jeftina alternativa gvozdanim prugama početkom 19. veka, npr. u Nemačkoj i u Severnoj Americi. Gvozdene trake debljine oko 25 mm su se savijale pod uticajem kontaktnih napona. Ovaj kompozit se može usvojiti kao prva primena otvrdnjavanja glava, koja je sada u upotrebi.

Čelik je ušao u praktičnu upotrebu sredinom 19. veka. Tačnije, prvi čelik koji je korišćen za šine je upotrebljen u Engleskoj 1857. godine. Mikrostruktura ovih šina je u suštini jednaka današnjim šinama-perlitna struktura ugljenično-manganskog sastava.

Karakteristike čelika za šine, posebno njegova čvrstoća i žilavost, su mnogo bolje od livenog gvožđa i njegov razvoj je suštinski omogućio širenje mreže železnica širom sveta. Prvi britanski standard za čelike

za šine napisan je 1903. godine, i zahtevao je minimalnu zateznu čvrstoću od 618 Nmm-2. Interesantno je primetiti da su četiri od prvih jedanaest britanskih standarda bili vezani za železnicu, što samo govori o važnosti ovog segmenta za industrijski razvoj zemlje. Sadašnji zahtevi za čvrstoću su 710 Nmm-2 za normalnu klasu i 880 Nmm-2 za klasu otpornu na habanje /1/.

3. PERLITNI ČELICI

Standardni čelici za šine sadrže oko 0.7% C i perlitne su mikrostrukture. Perlit se sastoji od mešavine mekog ferita i tvrdog, relativno krtoog karbida železa, tj. cementita. Svaka kolonija perlita je bikristal cementita i ferita koji se u dvodimenzionalnom preseku javlja kao naizmenične lamele ferita i cementita /2/. Tvrdoća raste sa smanjenjem interlamelarnog prostora, ili sa povećanjem udela cementita u perlitu. Perlit poseduje dobru otpornost na habanje zbog tvrdog cementita u kombinaciji sa plastičnijim feritom. Prosečna vrednost tvrdoće prirodno hlađenih standardnih šina je oko 300 HB.

Čestice cementita u perlitu, koje doprinose tvrdoći, su krte, pa perlitni čelici stoga nisu žilavi. Zbog sve većih brzina vozova i sve većih osovinskih opterećenja, za poslednjih dvadesetak godina je karakteristično dalje povećanje čvrstoća, tako da postoje i premium šine zateznih čvrstoća oko 1300-1400 Nmm-2. Ovako visoka čvrstoća je postignuta smanjenjem rastojanja između perlitnih lamela kontrolisanjem brzine rasta perlita.

Legirajući elementi, poput hroma i nikla, mogu se dodati čeliku u cilju poboljšanja osobina. Takođe se može povećati brzina hlađenja radi smanjenja vremena potrebnog za difuziju. Šine se takođe mogu termički obrađivati, što je prvi put korišćeno 1985. godine. Najbolji rezultati se postižu kombinacijom legiranja i termičke obrade.

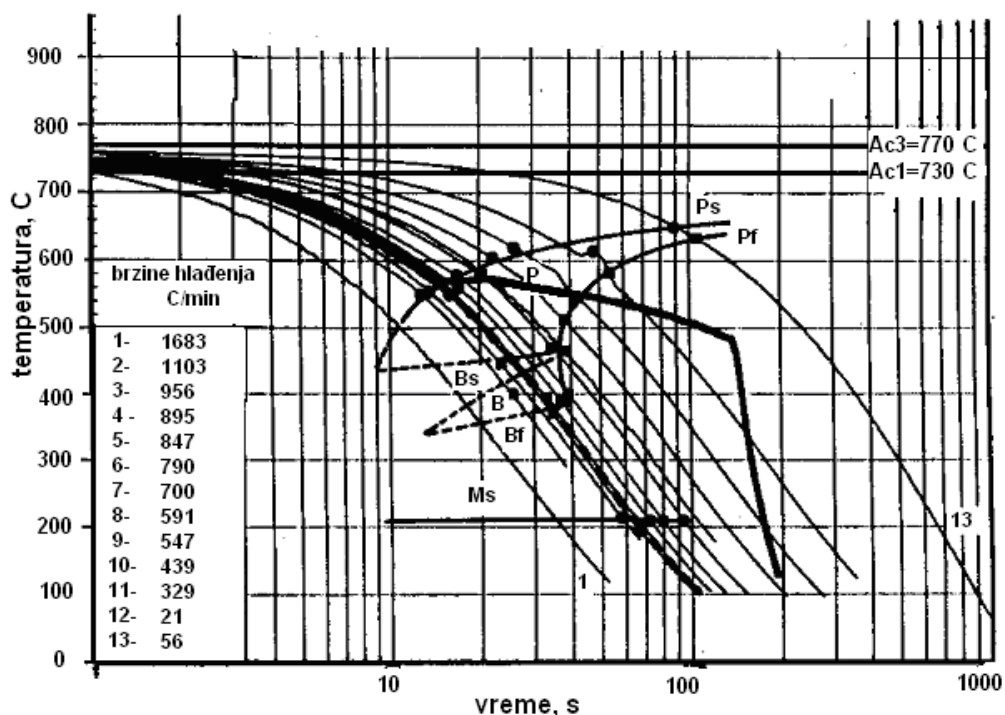
3.1. Koncept ubrzanog hlađenja

Prosečna vrednost tvrdoće perlitnih čelika je oko 300 HBS. Dalje povećanje tvrdoće je moguće postići kontrolisanjem brzina hlađenja, odnosno povećanjem brzina hlađenja, gde se usitnjavanje perlitne strukture postiže snižavanjem temperature transformacije. Prosečna tvrdoća ovakvih šina je 350-390 HB, i to su tzv. premium šine zateznih čvrstoća 1300-1400 MPa /3/. Osamdesetih godina prošlog veka počela je proizvodnja ovih šina, koje su otporne na kontaktni zamor i greške, i imaju veću tvrdoću. One su u početku bile 20-30% skuplje,

uglavnom zbog malih serija izrade, što se promenilo devedesetih godina prošlog veka, kada su velike čeličane u Americi počele da proizvode premium šine otvrdnutih glava, čime se značajno poboljšao kvalitet i snizila cena. Za ravne deonice i deonice sa zakrivljenjem do 2-3o koriste se normalne šine, dok se u krivinama koriste tvrde. Pošto tvrdoća raste sa porastom brzine hlađenja, sa istovremenim dobijanjem fine perlitne strukture, utvrđen je maksimalni nivo tvrdoće od 350-390 HB koji istovremeno obezbeđuje i poboljšanje mehaničkih osobina i otpornosti na habanje.

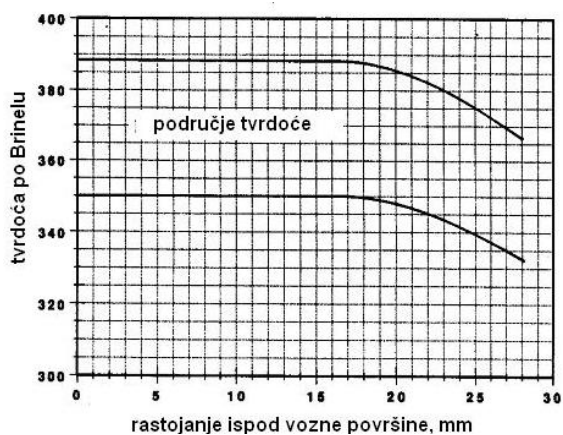
U današnje vreme, sve premium šine se proizvode procesom ubrzanog hlađenja kojim se u glavi šine se dobija fina perlitna mikrostruktura i to procesima vazdušnog hlađenja, hlađenja vodenim sprejom i kaljenja u ulju. Mada su svi procesi projektovani za dobijanje sličnih mikrostrukture, postoje značajne razlike u raspodeli tvrdoća, odnosno dubini otvrdnutog sloja, i mikrostruktura u glavi šine.

U cilju dobijanja željene otpornosti na habanje glave šine, proces ubrzanog hlađenja mora dati finu perlitnu mikrostrukturu /4/. Za dobijanje finog interlamelarnog rastojanja potrebno je sniziti temperaturu perlitne transformacije na oko 550-600°C, čime se povećavaju tvrdoća i otpornost na habanje /5,6/. To je moguće dobiti konceptom ubrzanog hlađenja, koji obezbeđuje veće brzine hlađenja, a samim tim i niže temperature transformacije. To je pokazano na slici 1., gde je dat KH dijagram čelika za šine. Temperatura početka perlitne transformacije P_s se snižava sa povećanjem brzine hlađenja (13 krivih hlađenja na dijagramu sa vrednostima brzina hlađenja u tabeli). Da bi se postigao traženi nivo tvrdoće (350-390 HB), temperatura perlitne transformacije mora biti između 550 i 600°C, odnosno brzina hlađenja mora biti oko 1100°C/min /6/. Kada se čelik hladi ovom brzinom, (kriva 2 na KH dijagramu), kao rezultat transformacije će se formirati beinit i martenzit. Iako će se pri tome postići malo interlamelarno rastojanje u perlitu, šina će biti neprihvatljiva zbog formiranih beinita i martenzita, odnosno zbog njihove male otpornosti na habanje/6/. Zato se proces mora prekinuti na ili blizu početka perlitne transformacije (5700°C), pri čemu se dobija 100% perlitna struktura. Ovo je ilustrovano podebljanom linijom na slici 1., gde je uzorak hlađen brznom od 9000°C/min do 5700°C, a zatim je hlađenje prekinuto. Ovo je suština koncepta kontrolisanog ubrzanog hlađenja kojim se dobija perlitna mikrostruktura povećane tvrdoće.



Slika 1. KH dijagrami čelika za šine sa kontinualnim hlađenjem (isprekidana linija) i diskontinualnim hlađenjem (pune linije)/4/

Tipična promena tvrdoće u glavi šine koja se može dobiti ovim postupkom prikazana je na slici 2.



Slika 2. Raspodela tvrdoće u otvrdnutoj glavi šine

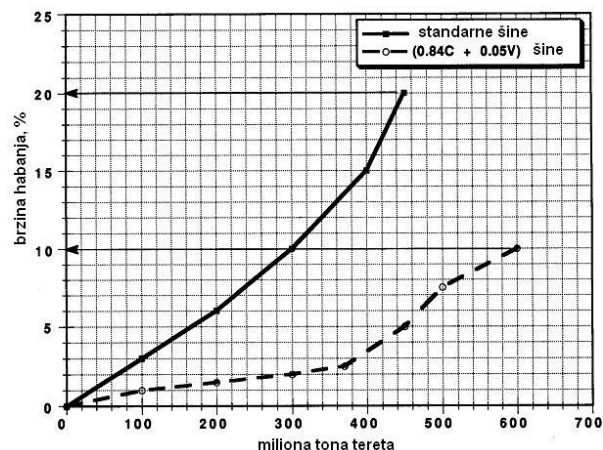
Kod nekih procesa ubrzanog hlađenja, dubina otvrdnutog sloja je ograničena pojavom krupnozrne strukture na granici između otvrdnutog sloja i osnovnog materijala.

3.2. Promena hemijskog sastava čelika u cilju povećanja tvrdoće

Još jedan od načina povećanja tvrdoće čelika za šine je i promena hemijskog sastava /7/. Poznato je da tvrdoća šina pre svega zavisi od procenta ugljenika. Maksimalni procenat ugljenika u čeliku je 0.82%, što odgovara eutektoidnom sastavu. Sve

iznad tog procenta je nadeutektoidni čelik kod koga dolazi do stvaranja precipitata cementita na granicama perlitnih kolonija (cementitna mreža) i slabljenja granica zrna.

Istraživanja su pokazala da dodavanje male količine vanadijuma (0.05%) u nadeutektoidni čelik (0.85%C) sprečava stvaranje cementitne mreže u termički obrađenoj šini. To je dovelo do povećanja tvrdoće i smanjenja brzine habanja za oko 20 %. Ovaj hemijski sastav šine je ušao u masovnu proizvodnju u Rusiji i pokazuje izuzetnu otpornost na habanje. Na slici 3. je pokazano smanjenje brzine habanja korišćenjem čelika legiranog sa vanadijumom.



Slika 3. Brzina habanja standardnih i legiranih šina u zavisnosti od tereta šina/7/

4. NOVI ČELICI ZA ŠINE - BEINITNI ČELICI

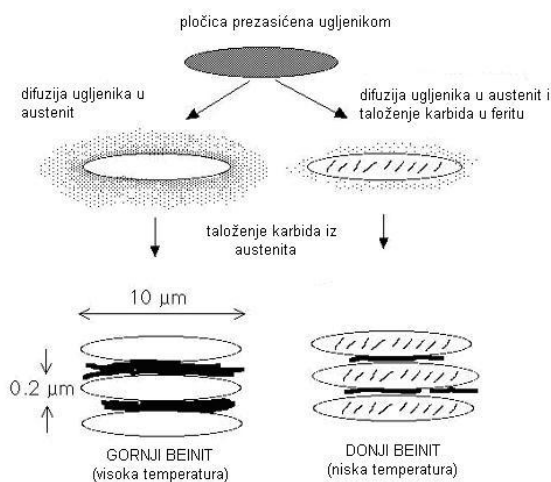
Dobijene vrednosti tvrdoća od oko 350-390 HBS su maksimalne za perlitnu strukturu, i dalje povećanje tvrdoće zahteva neki novi materijal, odnosno novu mikrostrukturu. U ovom slučaju, to je beinitna mikrostruktura, koja postiže tvrdoću od oko 450 HB. Ova struktura nije nova (koristi se od tridesetih godina prošlog veka), ali nije korišćena u ove svrhe zbog visokog procenta ugljenika i loše otpornosti na habanje. Do skora, beinit i martenzit nisu bili dozvoljeni u čeliku za šine zato što beinit nastao iz visokog procenta ugljenika (~0.7%) ima manju otpornost na habanje od finog perlita. Međutim, nove generacije niskougljeničnih beinitnih čelika kod kojih se odgovarajućim legiranjem postiže izuzetna tvrdoća, čvrstoća i otpornost na habanje, mogu zameniti perlitne šine u slučaju velikih opterećenja i intenzivnog saobraćaja.

Pravilnim legiranjem, pre svega sa Mo, B i Cr, usporava se perlitna transformacija i dobija se acikularna struktura donjeg i gornjeg beinita sa precipitatima karbida, sa čvrstoćama do 1400 MPa.

4.1. Mikrostruktura beinitnih čelika

Beinit je nelamelarni agregat karbida i pločastog ferita. Svaka pločica ferita je dugačka oko 10 μ m i debljine oko 0.2 \times 10⁻⁶m, formirajući posebnu pločicu nevidljivu na optičkom mikroskopu. Tako fina mikrostruktura pogoduje povećanju čvrstoće i žilavosti. U literaturi postoje dve jednostavne klasifikacije beinita: gornji i donji, slika 4.

Gornji beinit se sastoji od snopova paralelnih pločica beinitnog ferita, između kojih su diskontinuirano raspoređene čestice cementita. On je krupnoigličaste strukture sa prilično niskom čvrstoćom i žilavošću.



Slika 4. Mehanizam i mikrostruktura beinita u čeliku /10,11/

Donji beinit se sastoji od snopova paralelnih pločica ferita, unutar kojih su izdvojene fine čestice karbida, obično pod uglom 55-60° u odnosu na osu primarne pločice /8,9/. Pošto je temperatura transformacije snižena, određena količina ugljenika je podstaknuta da se taloži unutar pločica ferita. Donji beinit je igličaste strukture sa visokom čvrstoćom i žilavošću.

Kontinuirano hlađeni beinit je kompleksniji i sastoji se od mešavine gornjeg i donjeg beinita, s obzirom da se transformacija odigrava u temperaturnom intervalu, u odnosu na jednostavne morfologije nastale pri izotermalnom hlađenju. Takođe je zapaženo da pri kontinuiranom hlađenju može nastati i nestandardna morfologija beinita, poznata kao granularni beinit. On se karakteriše feritnom osnovom, u kojoj su dispergovana mala ostrvca sekundarne faze, granularne ili poligonalne morfologije. Fazni sastav ovih ostrvaca je ili austenit ili A/M konstituent, što pokazuje da se radi o beinitu bez karbida.

Različite vrste beinita mogu uticati na osobine na sasvim različite načine, pa je razumevanje i klasifikacija svake morfologije od velike važnosti pri projektovanju novih, odnosno pri preradi komercijalnih beinitnih čelika. Mehanizam beinitne transformacije još uvek nije u potpunosti razjašnjen i predstavlja poslednji veliki izazov koji nauka o faznim transformacijama treba da reši /12/.

4.2. Legiranje beinitnih čelika

Istraživanje beinitnih čelika sa sadržajem ugljenika 0.1-0.7% je uglavnom povezano sa različitim dodatkom različitih legirajućih elemenata /5,13/. Molibden usporava formiranje ferita i perlita, omogućavajući formiranje beinita. Nikl, hrom i mangan dalje snižavaju B_s temperaturu i poboljšavaju čvrstoću. Silicijum nema uticaja na B_s , ali ojačava ferit i poboljšava otpornost na habanje. Ugljenik ima najveći uticaj na sniženje i M_s i B_s temperature, i širok spektar beinitnih mikrostruktura se može dobiti variranjem sadržaja ugljenika /14/. Bor nema uticaja na temperature transformacije, ali i te kako utiče na vremena transformacije. Stoga se sadržaj hroma i molibdena može smanjiti dodavanjem bora i time dalje usporiti perlitnu reakciju. U beinitnim čelicima za šine mogu se razviti acikularne strukture donjeg i gornjeg beinita sa precipitatima karbida. Beinitne šine

mogu dostići zateznu čvrstoću perlitnih čelika (1300 MPa), a neke klase sa sadržajem ugljenika iznad 0.3% mogu imati čvrstoću čak do 1300-1400 MPa.

4.3. Mehaničke osobine beinitnih čelika

Beinitni čelici se lako liju i imaju dobru zavarljivost. Obično sadrže 0.15-0.45% C, 0.3-2% Mn, 0.15-0.2% Si, 0.5-3% Cr i najmanje jedan element od Mo, Ni, Cu, Nb, V, Ti ili B.

U čisto perlitnim čelicima, čvrstoća i tvrdoća zavise od interlamelnog rastojanja. U čisto beinitnim čelicima, čvrstoća zavisi od dužine feritne pločice i zapreminskog udela karbidnih uključaka, kao i austenitnih i martenzitnih regiona. U zavisnosti od sastava čelika i temperature transformacije, beinitni čelici se proizvode u širokom opsegu čvrstoća. Mikrostruktura koja se sastoji od donjeg beinita i pločica otpuštenog martenzita ima najbolju kombinaciju čvrstoća-žilavost /15/. Treba naglasiti da veličina beinitnih snopova kontroliše žilavost samo kada je sadržaj ugljenika manji od 0.25%, što znači da ovo važi samo kod niskougljeničnih čelika. Kada se sadržaj ugljenika poveća iznad 0.25%, veličina snopova prestaje da igra bilo kakvu ulogu, a veličina najvećih karbida postaje najvažniji faktor koji kontroliše sklonost ka krtom lomu. Treba naglasiti i da prosečna veličina karbida ne igra nikakvu ulogu. To je u saglasnosti sa rezultatima koji pokazuju da gornji beinit, koji sadrži grube karbide, ima višu prelaznu temperaturu od donjeg beinita, koji sadrži fine karbide /16,17/.

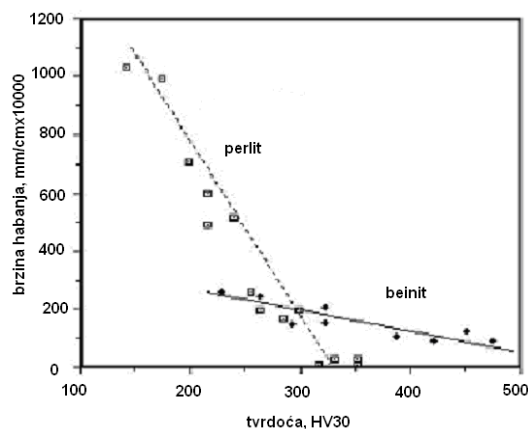
4.3.1. Otpornost na habanje

Iako se habanje definiše više kao proces, nego kao svojstvo materijala, uvek je korisno za identifikaciju važnih faktora. Pod habanjem šina se podrazumeva mehaničko habanje poput abrazivnog i adhezivnog habanja pri kontaktu šina-točak, kao i namerno habanje brušenjem. Periodično brušenje je neophodno da bi se otklonile mikroprrsline koje su glavna posledica zamora usled kotrljanja (rolling contact fatigue-RCF). Veza između habanja i tvrdoće je bila predmet mnogih eksperimenata, posebno kod perlitnih čelika /3/. U jednačini 1.1. dat je Archard-ov zakon habanja, /18/, koji se često koristi za objašnjavanje ovih pojava, mada idealan zakon habanja ne postoji.

$$V = \frac{KWL}{H}, \text{ gde je:} \quad (1.1)$$

V – gubitak zapremine usled habanja, K - koeficijent habanja,
 L - dužina klizanja, H - tvrdoća, W - normalna sila

Prema ovom zakonu, materijali veće tvrdoće bi trebalo da imaju manje izraženo habanje. Slika 5. pokazuje zavisnost brzine habanja i tvrdoće kod perlitnih i beinitnih čelika, koja je u saglasnosti sa Archard-ovim zakonom /19/. Zbog toga su proteklih godina istraživanja išla u smeru povećanja tvrdoće čelika, u cilju direktnog smanjenja habanja.



Slika 5. Zavisnost brzine habanja i tvrdoće za perlitne i beinitne čelike/19/

U literaturi /3/ su zabeležena i odstupanja od Archard-ovog zakona kod čelika za šine. Poredeći standardni perlitni čelik tvrdoće 300HB i beinitni čelik sa 0.26% C, tvrdoće 415 HB, istraživači su utvrdili da perlitni čelik manje tvrdoće ima bolju otpornost na habanje, ali lošiju otpornost na zamor. Detaljnim ispitivanjima je utvrđeno da perlitni čelici deformaciono ojačavaju pod dejstvom opterećenja, što je razlog njihove dobre otpornosti na habanje pri velikom broju ciklusa, dok su beinitni čelici pokazali manje habanje u toku prvih 100 ciklusa.

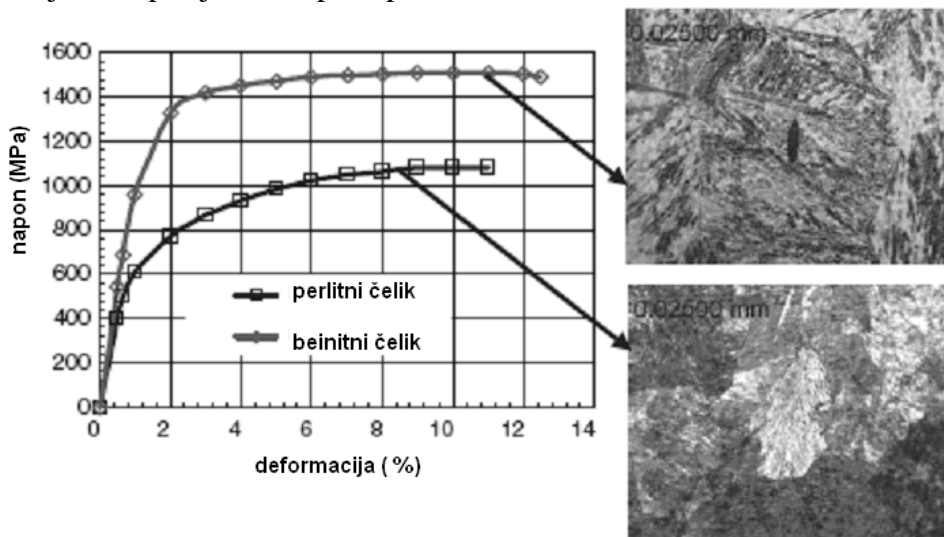
4.3.2. Poređenje mehaničkih osobina perlitnih i beinitnih šina

Veća čvrstoća i žilavost beinitnih čelika povezani su sa rasporedom karbidnih čestica, odnosno čvrstoća raste sa porastom broja karbidnih čestica. Sa sniženjem temperature beinitne transformacije, dolazi do usitnjavanja karbidnih čestica koje predstavljaju prepreku

kretanju dislokacija, usporavaju njihovo kretanje i time dovode do povećanja čvrstoće i žilavosti. Treba naglasiti da šine od beinitnih čelika postižu odlična mehanička svojstva uprkos niskom sadržaju ugljenika, zahvaljujući pravilnom legiranju i specijalnom postupku

hlađenja, nasuprot visokom sadržaju ugljenika kod perlitnih čelika /20/.

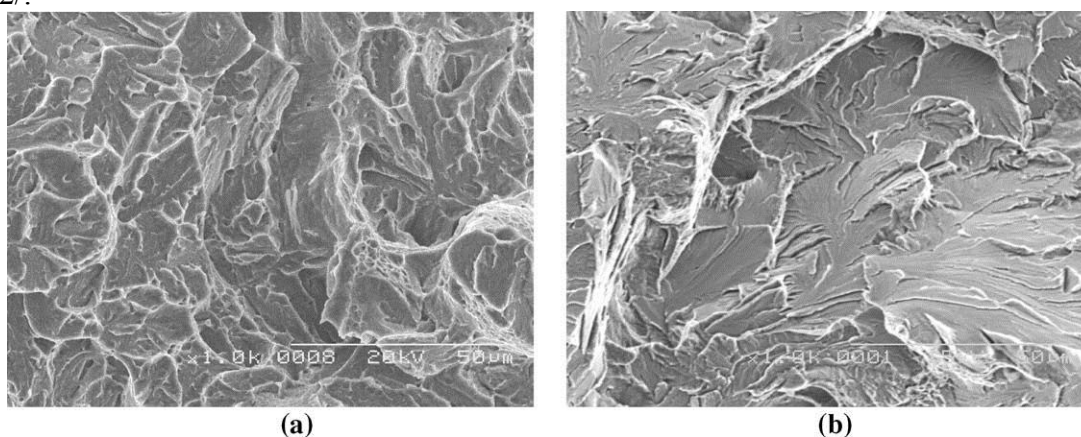
Dijagrami napon-deformacija perlitnog premium i niskougljeničnog beinitnog čelika, zajedno sa optičkim mikrostrukturama prikazani su na slici 6.



Slika 6. Poređenje mehaničkih i mikrostrukturnih osobina perlitnog i beinitnog čelika. Povećanje 600x./21/

Analizirajući prelomnu površinu kod beinitnih čelika, uočavaju se oblasti duktilnog cepanja sa karakterističnim jamicama, slika 7a., koje su jedva vidljive na perlitnom čeliku. S druge strane, na prelomnoj površini perlitnog čelika uočavaju se ravni cepanja i rečne šare, slika 7b. Često transgranularno cepanje može biti razlog relativnog porasta krtosti perlitnih čelika. Ova razlika objašnjava superiornu žilavost beinitnih čelika /22/.

Uporedna ispitivanja žilavosti loma ukazuju da je vrednost K_{Ic} beinitnih šina dva puta veća od perlitnih šina. Prosečna vrednost K_{Ic} beinitnih šina je oko $60 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, a perlitnih $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Ova superiorna žilavost loma beinita se takođe objašnjava duktilnijim mehanizmom loma koji se vidi na prelomnoj površini (više jamica i cepanja u odnosu na perlitnu prelomnu površinu).



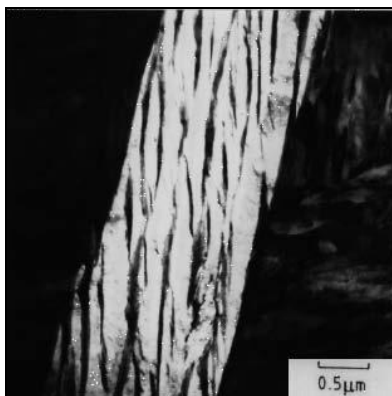
Slika 7. Prelomne površine a) beinitne šine b) perlitne šine /20/

5. NOVE GENERACIJE BEINITNIH ČELIKA - BEINITNI ČELICI ZA ŠINE BEZ KARBIDA OBOGAĆENI SILICIJUMOM

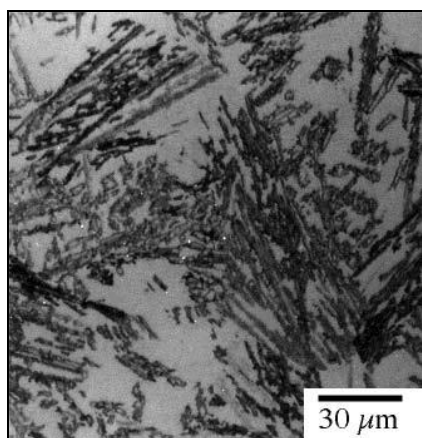
Jedan od pokušaj razvoja beinitnih čelika, tj. eliminacije njegovih loših karakteristika, je

dobijanje čelika bez karbida, gde se taloženje cementita tokom beinitne transformacije sprečava legiranjem sa oko 1,5% Si, koji ima veoma nisku rastvorljivost u cementitu i efikasno zaustavlja njegov rast /11/. Mikrostruktura koja se pri tome dobija su pločice beinitnog ferita

odvojene regionima ugljenikom zasićenog austenita, slika 8. Duktilni film austenita između pločica ferita ima efekat zatupljivanja prsline. Problem se javlja ako ostanu veliki blokovi austenita između snopova beinita, slika 9, koji se mogu transformirati u martenzit pod dejstvom opterećenja. Ovi blokovi se mogu eliminirati dodatnim transformacijama, pri čemu postoji termodinamička granica količine beinita koja se može formirati u odsustvu taloženja karbida. Ova struktura pokazuje dobra svojstva žilavosti i smanjenu brzinu habanja. Takođe, ovi beinitni čelici imaju mekši kontaktni sloj, zadržavajući vrednost ukupne tvrdoće. Odsustvo krutih faza cementita doprinosi boljoj otpornosti na kontaktni zamor. Konstatuje se značajno povećanje žilavosti, rad na niskim temperaturama i veća dozvoljena veličina greške.



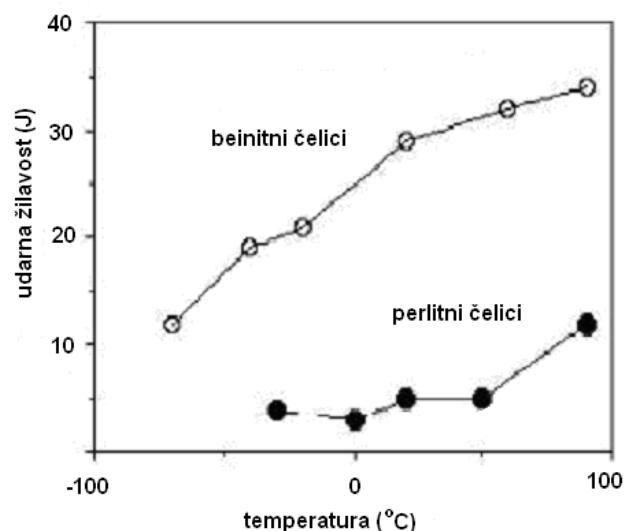
Slika 8. Transmisiona elektronska mikrografija snopa beinita koji se sastoji od finih pločica beinita odvojenih filmom ugljenikom prezasićenog zaostalog austenita /11/



Slika 9. Optička mikrografija gornjeg beinita na kojoj se vide blokovi zaostalog austenita između snopova beinita /11/

Ova mikrostruktura, dobijena jednostavnom termičkom obradom, obezbeđuje čvrstoću od ultrafinih feritnih pločica, koje su debljine mnogo manje od milionitog dela metra. To se ne može postići ni jednim drugim postupkom, pošto je poznato da je usitnjavanje mikrostrukture jedini mehanizam kojim se istovremeno poboljšavaju i čvrstoća i žilavost čelika. Difuzija vodonika u austenit je sporija nego u ferit, tako da zaostali austenit dovodi do poboljšanja otpornosti ka naponskoj koroziji.

Na slici 10. dato je poređenje žilavosti standardnih perlitnih i novih beinitnih čelika /23/. Konstatuje se značajno poboljšanje žilavosti, što omogućava rad na nižim temperaturama, kao i veću dozvoljenu veličinu greške.



Slika 10. Poređenje žilavosti po Šarpiju novih i konvencionalnih čelika /23/

6. ZAKLJUČAK

Zbog sve intenzivnijeg saobraćaja i povećanja opterećenja na prugama, prioritet u istraživanjima poslednjih decenija je pronalaženje kvalitetnijeg materijala za izradu šina, pošto je najveći udeo u ceni koloseka upravo šina. Praćenjem promene kvaliteta čelika za šine, praktično se prati razvoj metalurgije čelika; pa su za proizvodnju čelika za šine korišćeni svi procesi koji su o sebi ostavili traga. Klasične šine sadrže 0.5-0.7% ugljenika i perlitne su mikrostrukture. Prosečna tvrdoća perlitnih čelika je oko 300 HBS. Osamdesetih godina prošlog veka prešlo se na otvrdnjavanje glava šina, odnosno dobijanje tzv. premium šina, čime se dobija tvrdoća 340-400 HBS. Pokazano

je da ove šine u krivinama traju 20-25% duže od klasičnih šina. Iako je proizvodnjom premium šina učinjen značajan pomak u kvalitetu čelika, tvrdoćom od 390-400 HB je postignut maksimum perlitnih šina. Veće tvrdoće se mogu postići prelaskom na beinitnu mikrostrukturu, čija je tvrdoća 450-500 HBS, uz bolje zatezne i habajuće karakteristike. Pored niskougleničnih beinitnih čelika, koriste se i beinitni čelici bez karbida obogaćeni silicijumom. Preliminarni testovi i poređenje sa premium šinama su ohrabrujući, a nizak sadržaj ugljenika u beinitnim čelicima ukazuje na bolju zavarljivost ovih čelika.

7. LITERATURA

- [1] Vitez I., Hozjan T., Usporedba normi o svojstvima čelika za železničke tračnice, *Građevinar* 55 (2003) 5, 279-284
- [2] H.K.D.H. Bhadeshia, *Steels for Rails*, Encyclopedia of materials science and technology, (2002), 1-7, Elsevier Science
- [3] Ki Myung Lee, A. Polycarpou, Wear of conventional pearlitic and improved bainitic rail steels, *Wear* 259 (2005) 391-399
- [4] B.L.Bramfitt, R.L.Cross, D.P.Wirick, Advanced in-line head hardening of rail, Proceedings of the International Symposium on: Rail steels for the 21st century, Baltimore, MD, October 17-18, (1994), 23-29
- [5] H.Ichinose, J.Takahara, N.Iwasaki, M.Ueda, An investigation on contact fatigue and wear resistance behaviour in rail steels, Proc. 1st Int.Heavy Haul Conf., Perth, Australia (1978), Session 307, paper 1.3, 1-10
- [6] J.Kalousek, D.M.Fegredo, E.E.Laufer, Proc.Int.Conf. on wear of materials, Vancouver, B.C. (1985), 212-231
- [7] A.V.Pan, E.N.Shumilin, Production of wear-resistant rails at the NTMK, Proceedings of the International Symposium on: Rail steels for the 21st century, Baltimore, MD, October 17-18, (1994), 19-22
- [8] Đ.V.Drobnjak, Morphology and properties of continuously cooled bainite, *Journal of metallurgy*, No 2, Volume 3, (1997), Beograd, 107-130
- [9] G.Spanos, H.S.Forg, H.I.Aaronson, *Metall.Trans. A*, Vol 21 (1990), p 1381
- [10] Takashi M, Bhadeshia H.K.D.H., Model for the transition from upper to lower bainite, *Materials Science and Technology*, 6, (1990), 592-603
- [11] Bhadeshia H.K.D.H., *Bainite in Steels*, 2nd edition, Institute of materials, London, (2001), 1-450
- [12] G.B.Olson, *Scripta Metall.*, Vol.21 (1987) 1023
- [13] P.Clayton, R.Devanathan, N.Jin, R.K.Steele: Rail quality and maintenance for modern railway operation, 41-51, (1993), Dordrecht, Kluwer
- [14] H.Yokohama, S.Yamamoto, M.Fujikaki, Y.Yoshida, 4th Int. Symp. on rail steels, ISS Mech. Work steel process Conf.Proc. (1997), 35. 1023-1028
- [15] Bhadeshia H.K.D.H., *Bainite in Steels*, Institute of materials, London, (1992)
- [16] P.Bowen, S.G.Druce, J.F.Knott, *Acta Metall*, Vol 34, (1986), p 1121
- [17] F.B.Pickering, Transformations and hardenability in steels, Climax molybdenum Co, Ann Arbor, MI (1967) p 109, Discussion p.130
- [18] J.F.Archard, Contact and rubbing of flat surface, *J.Appl. Phys.* 24 (1953) 981-988
- [19] Clayton P., Sawley K.J., Bolton P.J., Pell G.M., Wear behaviour of rail steel, *Wear* 120, 199-220
- [20] H. Aglan, M.Hassan, Z.Liu, M.Bhuyan, M.Fateh, Fracture behavior of bainitic and pearlitic rail steel webs, *Journal of materials science* 39, (2004), 4305-4307
- [21] H. Aglan, M.Fateh, Fatigue damage tolerance of bainitic and pearlitic rail steels, *International Journal of Damage Mechanics*, Vol.15, (2006)
- [22] Jerath V., Mistry K., Bird P., Preston R.R., British steel report collaborative research, University of Cambridge and British steel corporation, report SL/RS/R/S/1975/1/91A(1991)
- [23] S.K.Dhua, A.Ray, S.K.Seu, M.S.Prasad, K.B.Mishra, S.Jha, *J.Mater.Engng. Perform* 9(6), (2000), 700