

Primljen / Received: 25.9.2012.  
 Ispravljen / Corrected: 21.12.2012.  
 Prihvaćen / Accepted: 27.12.2012.

Dostupno online / Available online: 15.1.2013.

# Raspodjela tvrdoće u poprečnom presjeku žljebaste tračnice

## Autori:



Prof. dr. sc. **Stjepan Lakušić**, dipl.ing.građ.  
 Sveučilište u Zagrebu  
 Građevinski fakultet, Zavod za prometnice  
[laki@grad.hr](mailto:laki@grad.hr)



**Maja Ahac**, dipl.ing.građ.  
 Sveučilište u Zagrebu  
 Građevinski fakultet, Zavod za prometnice  
[mahac@grad.hr](mailto:mahac@grad.hr)

Izvorni znanstveni rad

**Stjepan Lakušić, Maja Ahac**

## Raspodjela tvrdoće u poprečnom presjeku žljebaste tračnice

Radi produljenja ciklusa zamjene tračnica na zagrebačkim je tramvajskim kolosijecima uvedena primjena tračnica s povećanom tvrdoćom glave. Prilikom savijanja takvih tračnica, za potrebe ugradnje u krivinama, došlo je do njihova pucanja. Kako bi se utvrdilo leži li razlog u neuobičajenim mehaničkim karakteristikama čelika tračnica, provedena su mjerenja tvrdoće temeljem kojih se proračunski definirala vlačna čvrstoća. Ispitivanja su pokazala da su izmjerene vrijednosti tvrdoće, iako znatno variraju duž poprečnog presjeka tračnice, veće od propisanih minimalnih vrijednosti. Može se pretpostaviti da problemi vezani uz ove tračnice mogu biti posljedica promjena u mikrostrukтури čelika zbog povećanja tvrdoće glave tračnice njezinom termičkom obradom.

### Ključne riječi:

žljebaste tračnice, povećanje tvrdoće glave tračnice, mjerenja tvrdoće, vlačna čvrstoća

Original scientific paper

**Stjepan Lakušić, Maja Ahac**

## Hardness distribution over cross-section of grooved rails

Head hardened rails have been introduced in order to extend the rail-replacement cycles for Zagreb tram tracks. During their precurving, the rail cracking occurred. Hardness tests were performed and tensile strength was calculated to establish whether unusual mechanical properties of rail steel are responsible for the cracking. Tests have shown that hardness values, despite significant variation over the rail cross-section, are higher than the prescribed minimum. It is assumed that rail problems encountered may be due to changes in rail steel microstructure resulting from an increase in rail head hardness during its thermal treatment.

### Key words:

grooved rails; rail head hardening; hardness measurements; tensile strength

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Stjepan Lakušić, Maja Ahac**

## Härteverteilung im Querschnitt von Rillenschienen mit erhöhter Kopfhärte

Mit dem Ziel die Häufigkeit des Schienenersatzes im Strassenbahnnetz der Stadt Zagreb zu reduzieren, sind Schienen mit erhöhter Kopfhärte eingeführt worden, bei deren Vorbiegung jedoch wiederholt Bruchbeschädigungen aufgetreten sind. Um die entsprechenden Ursachen zu ermitteln und einen möglichen Zusammenhang mit den außergewöhnlichen mechanischen Stahleigenschaften festzustellen, sind Messungen der Schienenhärte und Berechnungen der zugehörigen Zugfestigkeit durchgeführt worden. Die ermittelte Härte weist zwar deutliche Abweichungen entlang des Querschnitts vor, liegt jedoch über den vorgegebenen Minimalwerten. Die auftretenden Mängel der Schienen können durch die Veränderung der Stahlstruktur, aufgrund der thermischen Bearbeitung zum Erzielen erhöhter Kopfhärte, bedingt sein.

### Schlüsselwörter:

Rillenschienen, erhöhte Schienenkopfhärte, Härtemessungen, Zugfestigkeit

## 1. Uvod

Tračnice su najvažniji i najskuplji element kolosiječne konstrukcije. One su mjesta kontakta kolosijeka i tračničkog vozila, a ponašaju se kao kontinuirani gredni nosači preuzimajući opterećenja vozila i prenoseći ih na donje dijelove kolosiječne konstrukcije. Pri tomu su njihovi temeljni zadaci sigurno vođenje tračničkih vozila te osiguranje što dulje eksploatacije kolosijeka.

Na kontaktnoj površini između kotača i tračnica dolazi do prijenosa sila od vozila na donje dijelove kolosiječne konstrukcije. Može se reći da ovaj prijenos opterećenja, prema promjeni veličine površine preko koje se odvija, ima formu "pješčanog sata" [1]. Tijelo vozila prenosi opterećenje preko podvozja i kotača na tračnicu pri čemu, zbog smanjivanja kontaktnih površina između navedenih elemenata, dolazi do postupnog povećanja iznosa naprezanja. Maksimalna naprezanja na kontaktnoj površini između kotača i tračnice, u slučaju zagrebačkih tramvajskih kolosijeka, mogu dosegnuti vrijednosti i do 350 N/mm<sup>2</sup>. Opisana naprezanja uzrokuju reakcije u materijalu njima izloženih elemenata. Tako se primjerice materijal tračnica i kotača deformira, zbog čega dolazi do određenih promjena u njegovim mehaničkim svojstvima. Ova činjenica dovodi do pitanja utjecaja svojstava i kvalitete materijala na ponašanje i karakteristike cijelog sustava vozilo-kolosijek tijekom eksploatacije.

Tijekom eksploatacije, zbog kretanja vozila po kolosijeku, tračnica je kontinuirano izložena istrošenju od strane kotača pri čemu se razlikuje visinsko istrošenje glave tračnice na dijelovima trase u pravcu i dodatno bočno istrošenje glave vanjske tračnice u krivini. Na veličinu ovih istrošenja utječe niz čimbenika, a u prvom redu kvaliteta ugrađenih tračnica definirana njihovom tvrdoćom. Tvrdoća čelika tračnice mora osigurati zadovoljavajuće istrošenje glave tračnice odnosno uobičajene cikluse održavanja kolosijeka. Iskustvo je pokazalo da u krivinama malih polumjera do dopuštenog istrošenja tračnica dolazi prije nego do zamora materijala dok kod kolosijeka u pravcu vrijedi upravo suprotno. Brzina napredovanja bočnog istrošenja može biti i do 10 puta veća od visinskog istrošenja tračnica u pravcu [2]. Iz navedenog se razloga na zagrebačkim tramvajskim kolosijecima u pravcu ugrađuju tračnice uobičajene odnosno normalne kvalitete čelika minimalne vlačne čvrstoće ( $f_u$ ) 680 N/mm<sup>2</sup> i tvrdoće 200 HBS, dok se na dijelovima kolosijeka u krivini te u zonama sklopova (na mjestima pojave većih opterećenja) ugrađuju tračnice otpornije na trošenje, minimalne vlačne čvrstoće ( $f_u$ ) 880 N/mm<sup>2</sup> te njoj odgovarajuće tvrdoće od 260 HBS.

Na visokopterećenim tramvajskim prugama, u koje se ubrajaju i tramvajski kolosijeci u Zagrebu (pojedini kolosijeci u središtu grada na godinu imaju prometno opterećenje i do 15 milijuna bruto tona po presjeku, s frekvencijom prolaska tramvaja ispod 1 minute [3]), s visokim udjelom horizontalnih krivina malih vrijednosti polumjera ( $R_{min} \geq 18$  m), često se javlja

potreba za preuranjenom zamjenom tračnica radi brzog prekoračenja dopuštenih visinskih i horizontalnih odstupanja geometrije kolosijeka. Najveći problem pri takvom održavanju predstavlja konstrukcija tramvajskog kolosijeka na potezima na kojima tramvaj dijeli koridor s ostalim prometom (slika 1.). Na tim lokacijama zatvaranje kolosijeka asfaltom ili specijalnim armiranobetonskim pločama [4] otežava organizaciju radova na održavanju kolosijeka i ograničava odvijanje ostalog prometa. Zbog osiguranja što duljih ciklusa zamjene tračnica, u Zagrebu je počela ugradnja tračnica povećane tvrdoće glave (en. head hardened - HH). Općenito, povećanje tvrdoće glave tračnice moguće je postići na dva načina: modifikacijama u kemijskom sastavu standardnog čelika za proizvodnju tračnica ili naknadnom termičkom obradom glave tračnice (slika 2., [5]). Inozemna iskustva u primjeni tračnica s termički obrađenom glavom pokazala su da je povećanje tvrdoće čelika tračnice na mjestu njezina kontakta s kotačem vozila ekonomičan i učinkovit način produljenja uporabnog vijeka tračnice zbog trostrukog povećanja njezine otpornosti na abrazivno istrošenje [6].



Slika 1. Uobičajena konstrukcija tramvajskog kolosijeka u Zagrebu (zatvaranje prefabriciranim armiranobetonskim montažnim pločama)



Slika 2. Termička obrada glave žljebaste tračnice

Ovakva pozitivna iskustva u primjeni HH tračnica kompromitirana su nakon što je Zagrebački električni tramvaj (ZET) preuzeo i ugradio tračnice tipa Ri-60, uobičajene kvalitete i kvalitete otporne na trošenje s termički obrađenom glavom. Prve poteškoće javile su se pri savijanju tračnica u radionicama za potrebe njihove ugradnje u krivine malih polumjera, gdje je čak dolazilo do njihova pucanja, dok su tračnice ugrađene u kolosijek vrlo brzo pokazale tragove oštećenja. Budući da su izvještaji kvalifikacijskih ispitivanja proizvođača tračnica pokazivali zadovoljavajuće vrijednosti svojstava čelika od kojih su one izrađene, Zagrebački električni tramvaj je provedbom vlastitih ispitivanja želio potvrditi ili odbaciti njihove nalaze, odnosno provjeriti jesu li su za povećanu krtoš i ubrzano istrošenje ovih tračnica odgovorna mehanička svojstva samog čelika. Ispitivanja je proveo Zavod za prometnice Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

## 2. Ispitivanje mehaničkih svojstava čelika tračnica

Kako bi se definirale mehaničke karakteristike čelika tračnica, pristupilo se ispitivanju njihove tvrdoće. Iako tvrdoća ne predstavlja fizikalno egzaktno definirano mehaničko svojstvo, njezino mjerenje ustalilo se kao jedan od najraširenijih postupaka na području ispitivanja mehaničkih svojstava materijala. Razlog tome leži u činjenici što je mjerenje tvrdoće jednostavnije i prije svega brže od ispitivanja nekih drugih mehaničkih svojstava. Nadalje, za mjerenje tvrdoće nisu potrebni posebno izrađeni uzorci već je mjerenje moguće provesti na poluproizvodima ili čak na gotovim proizvodima. Također, veliku prednost predstavlja i relativno jednostavna korelacija tvrdoće s pojedinim mehaničkim svojstvima, u prvom redu vlačne čvrstoće.

Za potrebe ispitivanja odabrane su, metodom slučajnog uzorka, ukupno četiri neeksploatirane tračnice s termički obrađenom glavom – dvije standardne kvalitete te dvije otporne na trošenje. Na udaljenosti od 1 m od krajeva tračnica izrezani su te zatim ispolirani uzorci debljine 10 mm. Promatrani uzorci označeni su prema kvaliteti čelika i rednim brojem (700-1, 700-2, 900A-1 i 900A-2). Mjerenja tvrdoće čelika ovakvih uzoraka provedena su po metodi Brinella [7].

### 2.1. Minimalna zahtijevana mehanička svojstva čelika ispitivanih tračnica

U slučaju tračnica s povećanom tvrdoćom glave, mehaničke karakteristike čelika njezina vrata i nožice moraju zadovoljavati propisane vrijednosti za odgovarajuću osnovnu kvalitetu čelika dane u tablici 1 [7, 8], dok čelik u području glave (slika 3.) mora zadovoljiti i dodatne uvjete prikazane u tablici 2 [9].

### 2.2. Mjerenja tvrdoće glave tračnice

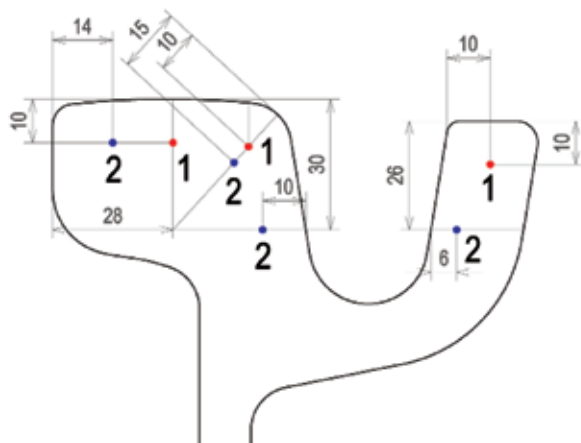
Mjerenja tvrdoće provedena su u točkama 1 i 2 poprečnog presjeka glave tračnice definiranih prema [9], na sva četiri uzorka tračnica (slika 3.). Mjerne točke, u kojima je ukupno provedeno stotinjak očitavanja tvrdoće, prikazane su na slici 4. Mjerne točke oznake 1a, 1b i 1c nalaze se na udaljenosti od 10 mm ispod vozne površine, u zoni pojave najvećih tangencijalnih naprežanja u poprečnom presjeku tračnice koja su, u slučaju prekoračenja maksimalnih dopuštenih vrijednosti za određenu kvalitetu tračnice, odgovorna za pojavu naprslina i ljuskanja tračnice (tzv. shelling effect). Lokacija mjerne točke 2a odgovara lokaciji uzimanja uzoraka tračnice za potrebe ispitivanja vlačne čvrstoće. Mjerenja tvrdoće također su provedena na voznoj površini glava tračnica (na dva mjesta označena s Ha i Hb) te na gornjoj površini vodilica tračnica (oznaka G).

Tablica 1. Mehanička svojstva čelika tračnica kvalitete 700 (R200) i 900A (R260)

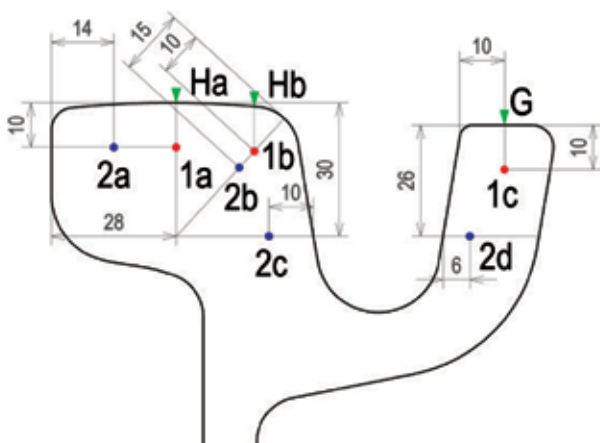
Oznaka uzorka	Vrsta čelika za tračnice			Vlačna čvrstoća $R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimalno istezanje $A_5$ [%]	Približna tvrdoća površine kotrljanja	
	Kvaliteta čelika	Oznaka čelika				[HBS]	
		UIC 860V	EN 13674-1			UIC 860V	EN 13674-1
700-1 700-2	uobičajena kvaliteta	700	R 200	680-830	14	200-245	200-240
900A-1 900A-2	otporan na trošenje	900A	R 260	880-1030	10	262-304	260-300

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika tračnica kvalitete 700 (R200) i 900A (R260) povećane tvrdoće glave

Oznaka uzorka	Oznaka čelika	Minimalna vlačna čvrstoća	Istezanje	Minimalna tvrdoća površine kotrljanja	Minimalna tvrdoća u točki 1	Minimalna tvrdoća u točki 2
		$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_5$ [%]	[HBS]	[HBS]	[HBS]
700-1 700-2	700 (R 200)	880	≥14	270	260	250
900A-1 900A-2	900A (R 260)	1175	≥12	330	320	300



Slika 3. Pozicije mjerenja tvrdoće u poprečnom presjeku glave tračnice [9]

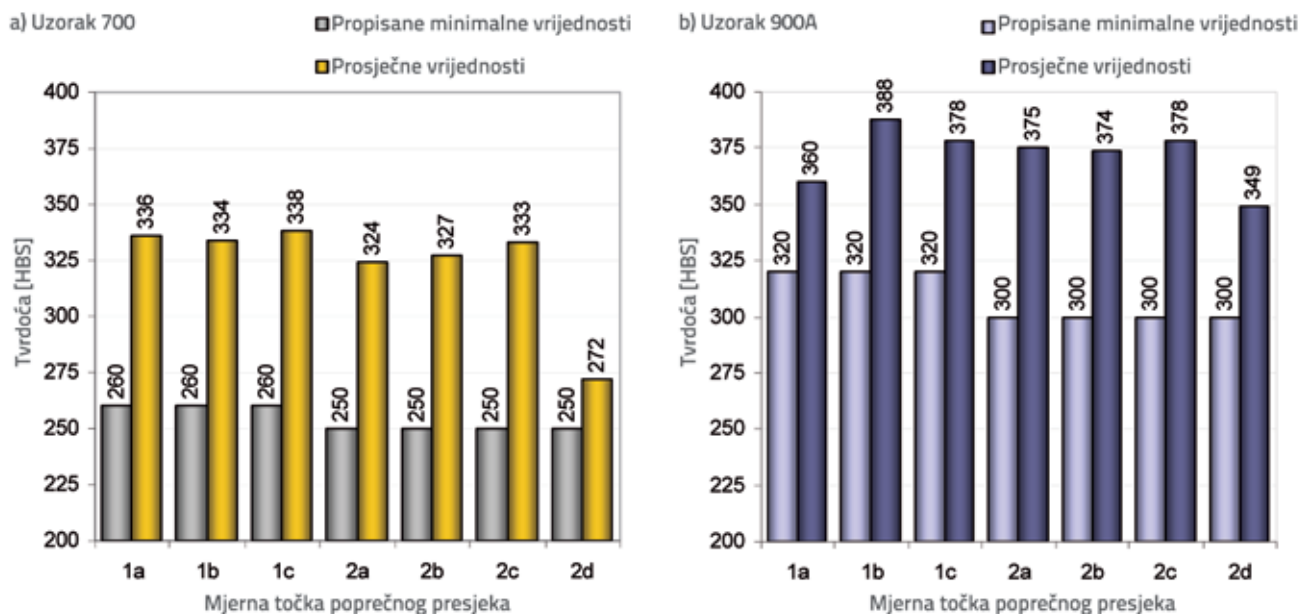


Slika 4. Pozicije mjerenja tvrdoće u poprečnom presjeku glave te na voznoj površini tračnice

Na slici 5. dan je prikaz prosječnih vrijednosti tvrdoće, proračunatih temeljem izmjerenih vrijednosti u točkama presjeka 1 i 2, u odnosu na minimalno propisane vrijednosti (tablica 2.). Razlika između prosječnih i minimalno propisanih vrijednosti tvrdoće u pojedinoj mjernoj točki dana je na slici 6. Sa slike 6. vidljivo je da su sve prosječne vrijednosti tvrdoće veće od minimalno propisanih vrijednosti, pri čemu u prosjeku ovo povećanje tvrdoće iznosi 25 %. Najveća razlika u sva četiri slučaja uočena je u mjernoj točki 2c u kojoj su prosječne vrijednosti tvrdoće veće od minimalno propisanih za 33 % (uzorak 700) odnosno 26 % (uzorak 900A).

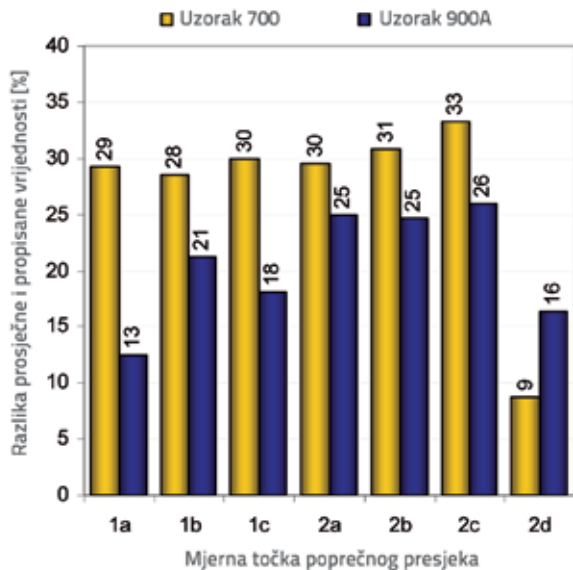
Na slici 7. dan je prikaz prosječnih vrijednosti tvrdoće dobivenih temeljem vrijednosti izmjerenih na gornjoj površini glave i vodilice tračnice. U slučaju uzoraka 900A nijedna od izmjerenih vrijednosti nije udovoljila propisanim zahtjevima (slika 8.). Ipak, ove su nepropisno male vrijednosti tvrdoće vozne površine zanemarene, budući da su ispitivanja provedena na uzorcima tračnica koje nisu bile u eksploataciji i nisu bile podvrgnute hladnom kovanju vozne površine zbog kretanja kotača vozila.

Do pojave hladnog kovanja odnosno otvrdnjavanja vozne površine tračnice dolazi zbog kontinuiranih prolazaka kotača vozila pri čemu veličina porasta tvrdoće ovisi o veličini prijednog opterećenja, osovinskom opterećenju, kvaliteti materijala tračnice, polumjeru kotača i sl. Radi definiranja stvarnih vrijednosti povećanja tvrdoće vozne površine, Zavod za prometnice je, u suradnji sa ZET-om, proveo ispitivanja tvrdoće tračnica tipa Ri-60 povećane tvrdoće glave i osnovne kvalitete 900A (R260) na tramvajskom kolosijeku u krivini neposredno prije puštanja pruge u promet i nakon mjesec dana eksploatacije odnosno nakon prolaska opterećenja od 0,5 milijuna bruto tona. Ispitivanja su provedena u šest presjeka na voznoj površini vanjske i unutarnje tračnice u krivini. Rezultati

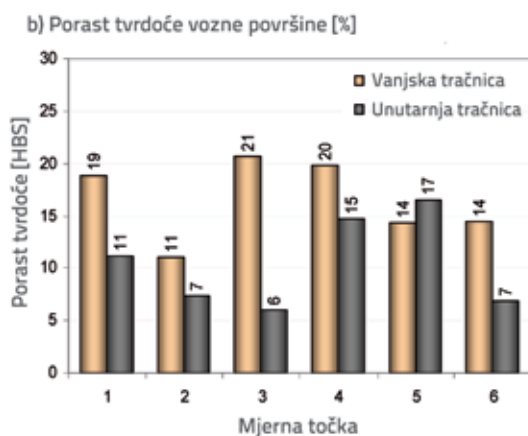
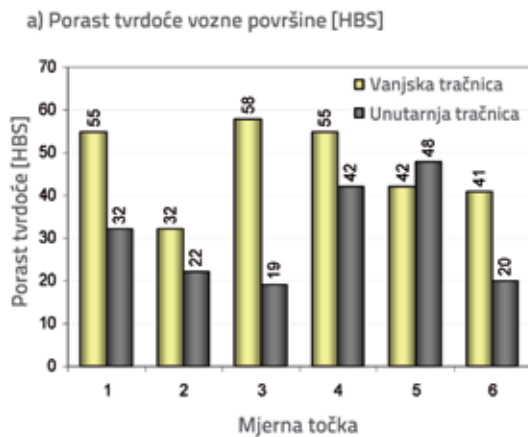


Slika 5. Prosječne vrijednosti tvrdoće u poprečnom presjeku glave tračnice: a) uzorci 700-1 i 700-2; b) uzorci 900A-1 i 900A-2

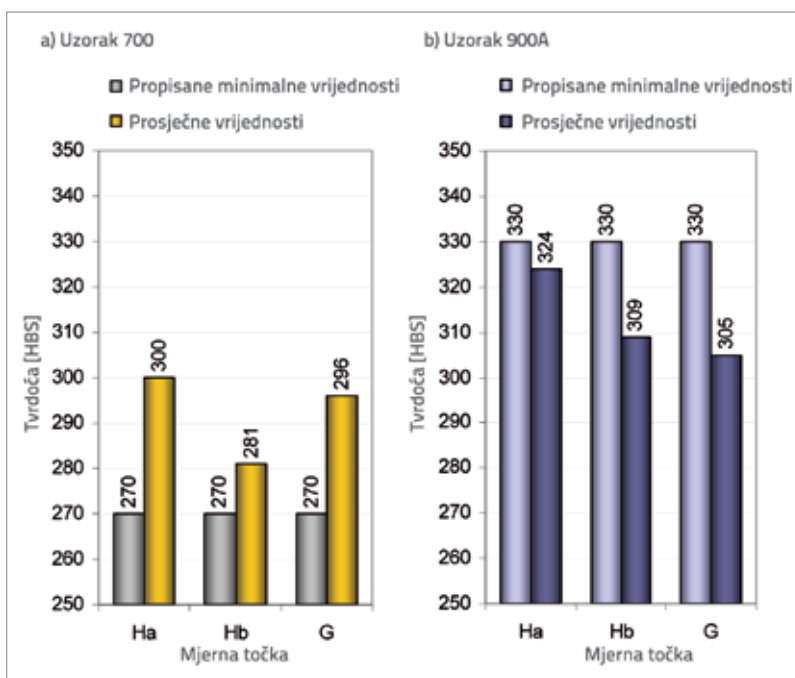
ispitivanja (slika 9.) pokazali su da je nakon mjesec dana eksploatacije, zbog hladnog kovanja, na voznim površinama glava tračnica duž promatrane krivine došlo do prosječnog porasta tvrdoće za 39 HBS (13 %). Prema očekivanjima, veći porast tvrdoće prisutan je kod vanjske tračnice u krivini budući da je ona i više opterećena. Iz navedenog se može zaključiti da bi, da su tračnice iz kojih su dobiveni ispitivani uzorci bile u eksploataciji, proces hladnog kovanja već nakon mjesec dana uzrokovao takav porast tvrdoće vozne površine koji bi zadovoljio propisane minimalne zahtjeve tvrdoće.



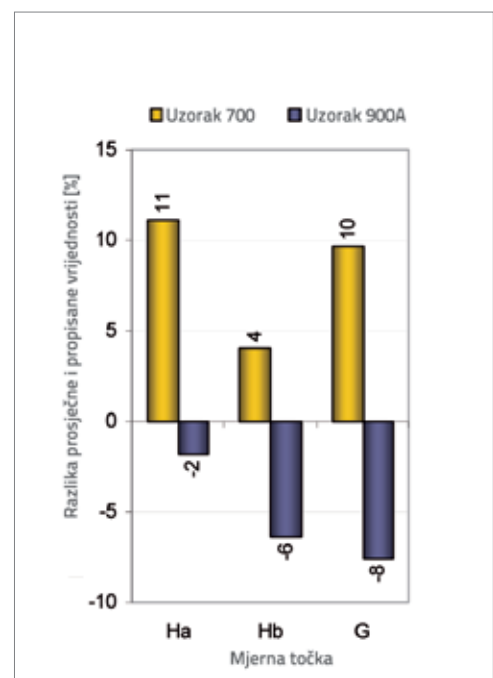
Slika 6. Razlika između proračunanih prosječnih i minimalnih propisanih vrijednosti tvrdoće u poprečnom presjeku glave tračnice



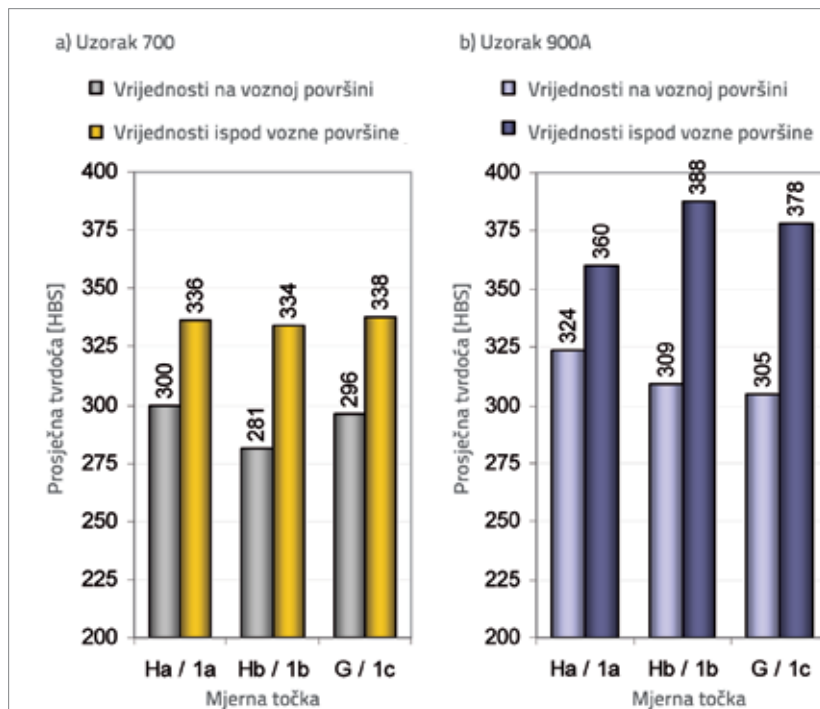
Slika 9. Porast tvrdoće vozne površine glave tračnice zbog hladnog kovanja



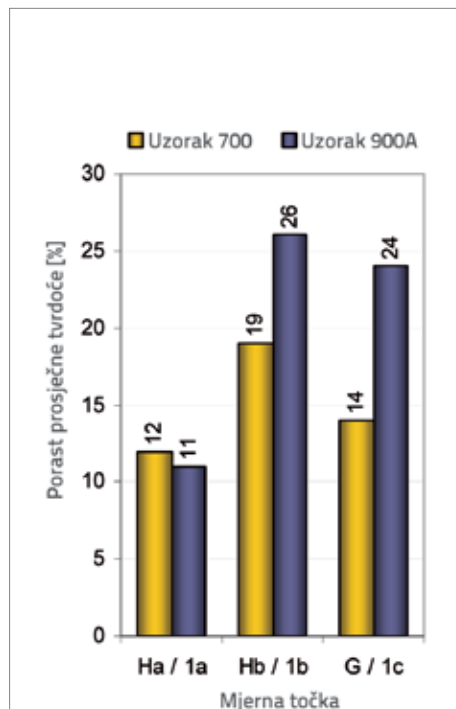
Slika 7. Proračunane prosječne vrijednosti tvrdoće na voznoj površini glave tračnice



Slika 8. Razlika između proračunanih prosječnih i min. propisanih vrijednosti tvrdoće na voznoj površini glave tračnice



Slika 10. Usporedba prosječnih vrijednosti tvrdoće na voznoj površini i 10 mm ispod vozne površine

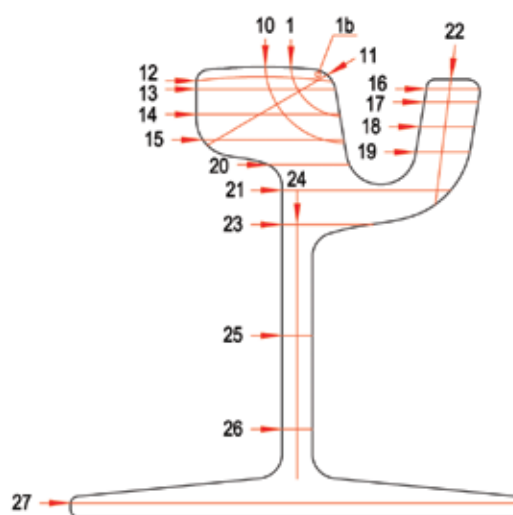


Slika 11. Razlike između prosječnih vrijednosti tvrdoće na voznoj površini i 10 mm ispod vozne površine

Na slici 10. dane su usporedbe izmjerenih tvrdoća na voznoj površini tračnice i u točkama 10 mm ispod vozne površine. Vrijednosti tvrdoće 10 mm ispod vozne površine znatno su veće od tvrdoće izmjerene izravno na voznoj površini. Razlike u prosječnim vrijednostima tvrdoće na voznoj površini i 10 mm ispod vozne površine odnosno porast tvrdoće ispod vozne površine za pojedini uzorak tračnice, prikazane su na slici 11. Analiza prikazanih rezultata pokazala je da su izmjerene vrijednosti tvrdoće 10 mm ispod površine u prosjeku veće za 22% (uzorci 700) odnosno 25% (uzorci 900A) od tvrdoće izmjerene na gornjoj voznoj površini i vodilici tračnice. Ova velika varijacija u vrijednostima tvrdoće na vrlo uskom području poprečnog presjeka širine (dubine) svega 10 mm potaknula je provedbu dodatnih ispitivanja tvrdoće uzoraka, a u cilju dobivanja što jasnije slike o stvarnoj distribuciji tvrdoće duž cijelog poprečnog presjeka tračnice.

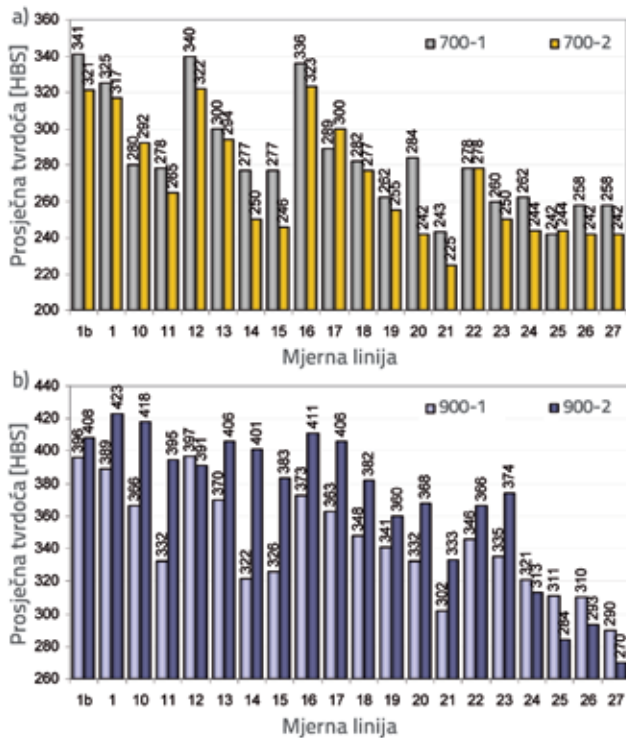
### 2.3. Mjerenje tvrdoće u poprečnom presjeku tračnice

Na svakom su promatranom uzorku provedena očitavanja tvrdoće duž 20 mjernih linija prikazanih na slici 12. Tvrdoća je mjerena u 285 mjernih točaka lociranih duž navedenih mjernih linija, što znači da se nakon mjerenja raspolagalo s ukupno 1140 pojedinačnih podataka o tvrdoći u poprečnom presjeku uzoraka. Navedene izmjerene vrijednosti računski su obrađene radi definiranja prosječne vrijednosti tvrdoće duž pojedine mjerne linije, zasebno za svaku kvalitetu tračnice, a proračunane prosječne vrijednosti tvrdoće prikazane su na slici 13.



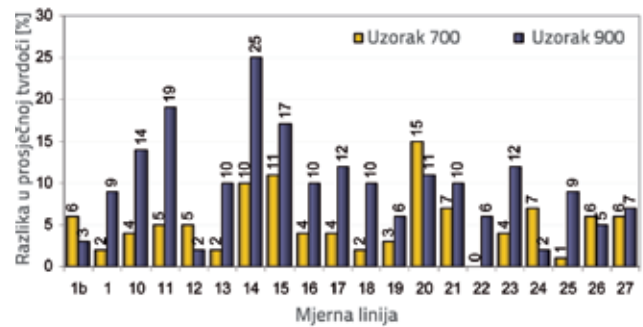
Slika 12. Mjerne linije za mjerenje tvrdoće u poprečnom presjeku

Iz slike je moguće uočiti da prosječne vrijednosti tvrdoće nisu jedinstvene duž cijelog poprečnog presjeka te da su sve izmjerene vrijednosti tvrdoće veće od minimalnih propisanih vrijednosti za određeni tip (kvalitetu) čelika tračnice i lokaciju promatrane mjerne linije u poprečnom presjeku glave tračnice. Detaljna analiza pokazala je da su izmjerene vrijednosti tvrdoće u prosjeku za 27% (uzorak 700) odnosno 26% (uzorak 900A) veće od minimalne propisane osnovne tvrdoće čelika za pojedini uzorak.

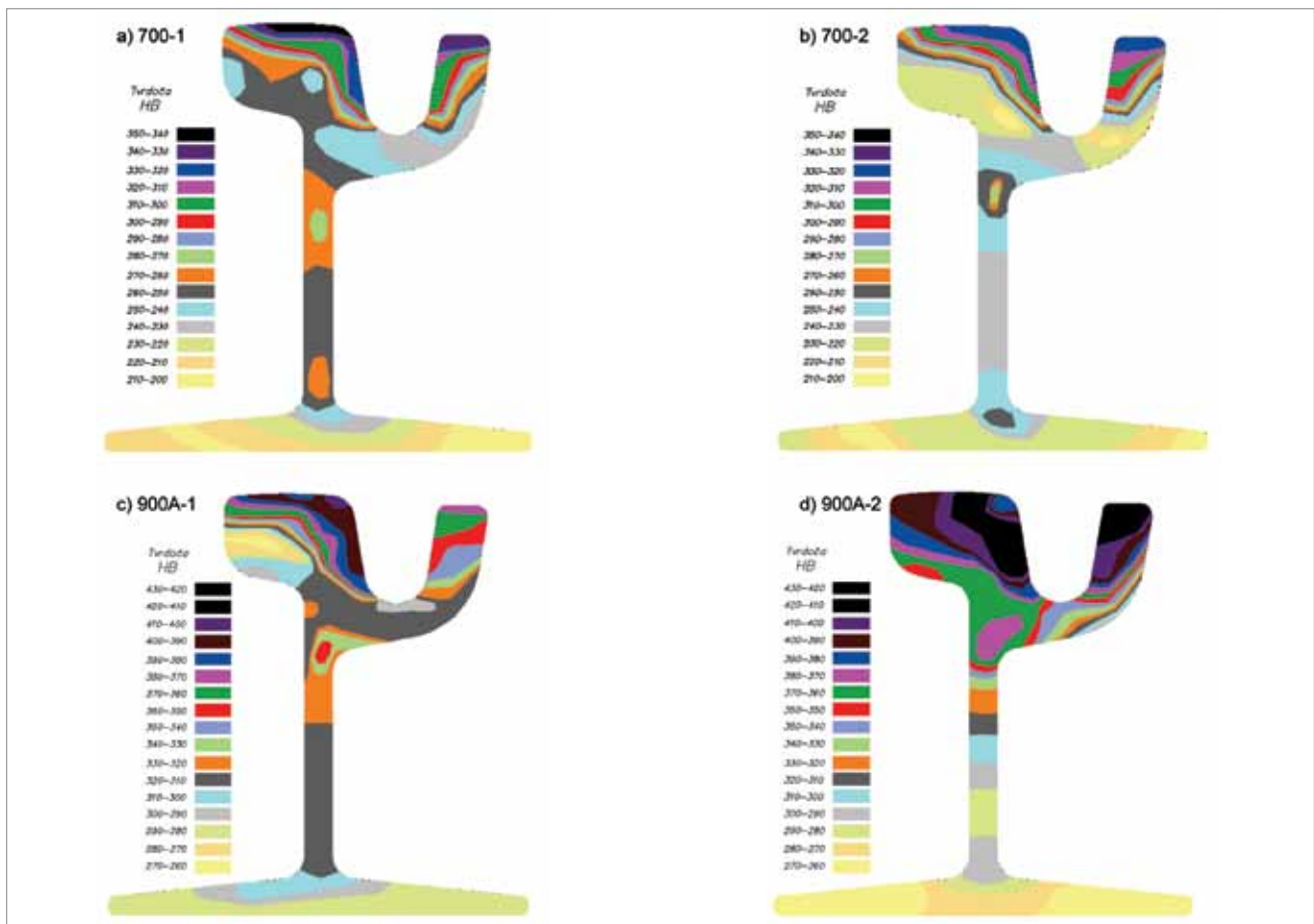


Slika 13. Prosječne vrijednosti tvrdoće ispitivanih uzoraka

Razmatrane su i razlike u dobivenim rezultatima ispitivanja tvrdoće za uzorke 1 i 2 iste kvalitete izražene u postocima (Slika 14.). Uočljivo je da su razlike kod uzoraka 900A veće od razlika koje su prisutne kod uzoraka 700 (posljednji je znatno ujednačeniji) te da razlika u tvrdoći duž mjerne linije 14 uzoraka 900A iznosi čak 25 %. Najveća razlika u slučaju uzoraka 700 iznosi 15 %, a uočena je duž mjerne linije 20. Srednja razlika u tvrdoći pojedinih strana uzoraka 900A iznosi 10 %, dok je srednja prosječna razlika na uzorku 700 upola manja i iznosi 5 %. Na temelju proračunatih prosječnih vrijednosti tvrdoće čelika tračnice duž pojedinih mjernih linija izrađeni su grafički prikazi varijacija vrijednosti tvrdoće po poprečnom presjeku, slika 15. Na slikama je jasno



Slika 14. Prosječne razlike u tvrdoći (uzorak 1-2)



Slika 15. Raspodjela vrijednosti tvrdoće duž poprečnog presjeka tračnica: a) uzorak 700-1; b) uzorak 700-2; c) uzorak 900A-1; d) uzorak 900A-2

uočljiva nejednolikost u raspodjeli prosječnih vrijednosti tvrdoće po poprečnom presjeku odnosno postupno smanjenje tvrdoće glave tračnice od vozne površine prema vratu i nožici tračnice te zone lokalnog povećanja tvrdoće na prijelazima glava-vrat i vrat-nožica tračnice.

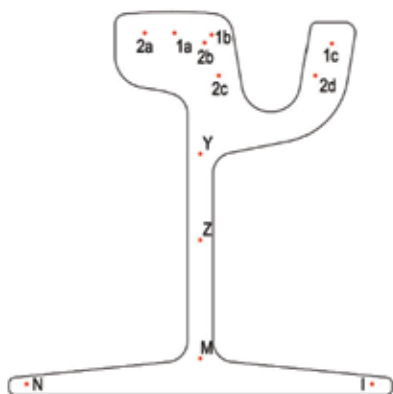
## 2.4. Određivanje vlačne čvrstoće

Prosječne vrijednosti vlačne čvrstoće u poprečnim presjecima uzoraka definirane su računskim putem temeljem prosječnih vrijednosti tvrdoće duž mjernih linija presjeka. U literaturi se često navodi da se vrijednost vlačne čvrstoće materijala  $f_u$  linearno mijenja s promjenom tvrdoće prema Brinellu (HBS) prema izrazu

$$f_u = c \times HBS \quad (1)$$

pri čemu vrijednost faktora korelacije  $c$  ovisi o vrsti čelika te vrijednostima i postupku utvrđivanja njegove tvrdoće. Pri određivanju vlačne čvrstoće u ovom je slučaju primijenjen korelacijski faktor iznosa  $c=3,45$  za koji se navodi zadovoljavajuća preciznost u slučaju čelika čije se vrijednosti vlačne čvrstoće kreću između 450 i 2350 N/mm<sup>2</sup> [10].

Na slici 16. prikazane su sve mjerne točke u kojima su provedena ispitivanja tvrdoće radi definiranja vlačne čvrstoće čelika tračnice. Uz prethodno definirana mjerna mjesta i pripadajuće vrijednosti tvrdoće u točkama 1 i 2 poprečnog presjeka glave tračnice, mjerenja su provedena i u dodatnih pet točaka presjeka, lociranih duž vrata i na krajevima nožice tračnice, odabranih na temelju prethodno izrađenih grafičkih prikaza varijacija vrijednosti tvrdoće (slika 15.), u kojima dolazi do značajnijih promjena u tvrdoći čelika.



Slika 16. Pozicije mjerenja tvrdoće u poprečnom presjeku tračnice

U prikazanim je točkama na sva četiri uzorka provedeno ukupno dvjesto mjerenja, a rezultati su naknadno obrađeni u cilju definiranja prosječnih vrijednosti tvrdoće za pojedinu kvalitetu čelika na temelju kojih se pristupilo proračunu prosječnih vrijednosti vlačne čvrstoće prema izrazu (1). Proračunate prosječne vrijednosti tvrdoće i vlačne čvrstoće u pojedinim točkama poprečnog presjeka te na gornjoj površini glave tračnice prikazane su u tablici 3, 4 i 5.

Tablica 3. Prosječne vrijednosti tvrdoće i vlačne čvrstoće u točkama 1 poprečnog presjeka

Mjerne točke	Uzorci oznake 700		Uzorci oznake 900A	
	Tvrdoća [HBS]	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Tvrdoća [HBS]	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]
1a	336	1160	360	1240
1b	334	1153	388	1338
1c	338	1165	378	1304
Prosječne vrijednosti	336	1159	375	1295

Tablica 4. Prosječne vrijednosti tvrdoće i vlačne čvrstoće u poprečnom presjeku glave tračnice (mjerne točke 2a, 2b, 2c i 2d)

Mjerne točke	Uzorci oznake 700		Uzorci oznake 900A	
	Tvrdoća [HBS]	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Tvrdoća [HBS]	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]
2a	324	1116	375	1293
2b	327	1129	374	1289
2c	333	1148	378	1304
2d	272	938	349	1206
Prosječne vrijednosti	314	1083	369	1273

Tablica 5. Prosječne vrijednosti tvrdoće i vlačne čvrstoće u ostalim točkama poprečnog presjeka (vrat i nožica tračnice)

Mjerne točke	Uzorci oznake 700		Uzorci oznake 900A	
	Tvrdoća [HBS]	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	Tvrdoća [HBS]	Vlačna čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]
Z	257	888	309	1065
Y	233	804	341	1176
M	264	911	321	1106
N	231	796	302	1043
I	238	821	315	1088
Prosječne vrijednosti	245	844	318	1096



### 3. Rezultati ispitivanja

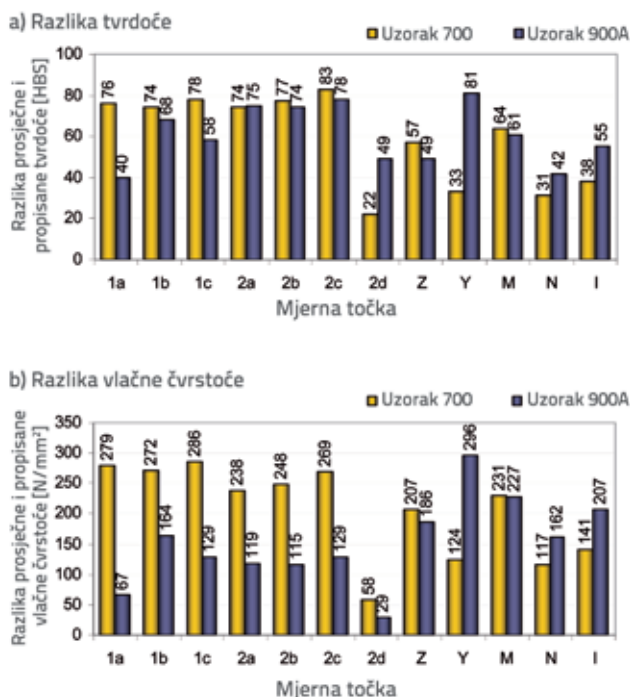
Prema normi za osiguranje kvalitete EN ISO 9001 [7], maksimalno dopušteno odstupanje izmjerenih vrijednosti od propisane tvrdoće čelika za tračnicu određene kvalitete iznosi  $\pm 30$  HBS. Usporedbom vrijednosti tvrdoće i vlačne čvrstoće, prikazanim u tablici 3, 4 i 5, s vrijednostima propisanim standardima, prikazanim u tablici 1 i 2, može se zaključiti da se u pravilu najveća odstupanja navedenih vrijednosti javljaju u točkama presjeka glave tračnice (slika 17.). Maksimalno odstupanje prosječne vrijednosti tvrdoće, a time i proračunate vlačne čvrstoće, od propisanih minimalnih vrijednosti u slučaju uzorka 700 zabilježeno je na mjernom mjestu 2c (glava tračnice), odnosno u slučaju uzoraka 900A na mjernom mjestu Y (vrat tračnice). U svim mjernim točkama poprečnog presjeka izmjerene su znatno veće vrijednosti tvrdoće i vlačne čvrstoće od minimalnih vrijednosti definiranih propisima dok su u mjernim točkama vozne površine glave tračnice 900A izmjerene vrijednosti manje od minimalnih vrijednosti propisanih standardom.

Na slici 17. prikazana je usporedba minimalnih propisanih i prosječnih proračunatih vrijednosti za cijelu voznu površinu kao i za pojedine sekcije poprečnog presjeka. Iz slika se može zaključiti da su vrijednosti mjerene u poprečnom presjeku uzoraka u prosjeku za 26 % (uzorci 700) odnosno 22 % (uzorci 900A) veće od propisanih. Kako pokazuju rezultati proračuna vlačne čvrstoće, vrijednosti proračunate u poprečnom presjeku uzoraka su zadovoljavajuće unatoč velikim međusobnim odstupanjima tvrdoće.

### 4. Diskusija

Nakon zabilježenih poteškoća u vidu pucanja tračnica povećane tvrdoće glave tipa Ri-60 kvalitete 900A pri savijanju u radionicama, te zatim ubrzanog procesa istrošenja istih i tračnica kvalitete 700 nakon ugradnje u kolosijek, željelo se ispitati jesu li za povećanu krtost i ubrzano istrošenje ovih tračnica odgovorna mehanička svojstva samog čelika (tvrdoća i vlačna čvrstoća).

Dosadašnja istraživanja i praksa pokazali su da je za usporenje abrazije i nastanka valovitih i naboranih oštećenja tračnica odnosno za produljenje njihova eksploatacijskog vijeka potrebno koristiti tračnice s povećanim vrijednostima tvrdoće glave. Povećanjem tvrdoće glave tračnice za 90 HBS moguće je smanjiti abrazivno trošenje za 50 % [6] te je istovremeno, smanjenjem pojave naboranih istrošenja, moguće umanjiti buku i vibracije generirane nepravilnostima na kontaktnoj površini kotača i tračnice [11]. Ipak, novije analize utjecaja upotrebe ovakvih tračnica daju donekle kontroverzne rezultate [1, 12]. Nove tračnice istrošenjem primaju profil koji u najvećoj mjeri odgovara profilu kotača vozila. Ovakav istrošeni profil ima veću kontaktnu površinu zbog čega dolazi do smanjenja kontaktnog pritiska kojim kotač djeluje na tračnicu. Iz navedenog se može zaključiti da tračnice s povećanom tvrdoćom glave, zbog svoje veće otpornosti na trošenje, ostaju dulje opterećene pri nepovoljnim kontaktnim uvjetima što se može negativno odraziti na njihov eksploatacijski vijek. Provedena ispitivanja tvrdoće u poprečnom presjeku tračnica opisana u ovom radu pokazala su iznimno nejednoliku distribuciju vrijednosti tvrdoće duž promatranih sekcija poprečnog presjeka pri čemu utjecaj ovakvih velikih devijacija u vrijednostima tvrdoće na ponašanje tračnica u eksploataciji nije razjašnjen. Pretpostavlja se da bi navedena pojava mogla biti povezana s uvjetima pri proizvodnji - prilikom valjanja tračnica, odnosno mogla bi biti posljedica segregacije i/ili deformacije čelika tračnice prilikom njegova očvršćivanja [13]. Također, za pojavu nejednolikih mehaničkih karakteristika čelika u poprečnom presjeku glave tračnice (tvrdoće, a time i vlačne čvrstoće) mogle bi biti odgovorne manjkavosti u procesu termičke obrade glave tračnica koja je provedena u cilju lokalnog povećanja tvrdoće. Općenito, svakom termičkom obradom dolazi do promjene u mikrostrukturi čelika. Razlika u brzini zagrijavanja i hlađenja (gašenja čelika) te nejednolika raspodjela temperature u pojedinim slojevima glave (u poprečnom presjeku i duž tračnice) uzrokuje znatnu varijaciju u mikrostrukturi što ima za posljedicu lokalna odstupanja vrijednosti tvrdoće i vlačne čvrstoće. Iskustvo je pokazalo da ovakve nepravilnosti u procesu proizvodnje tračnica s povećanom tvrdoćom čelika glave mogu uzrokovati pojavu vrlo nepovoljne martenzitne mikrostrukture termički obrađenog sloja čelika [14] odgovorne za povećanje krtosti, odnosno smanjenje lomne žilavosti čelika tračnice koja može iznositi i do 25 % [15].



Slika 17. Razlika između proračunatih prosječnih i najmanjih propisanih vrijednosti tvrdoće i vlačne čvrstoće

## 5. Zaključak

Rezultati provedenih ispitivanja pokazali su da su izmjerene vrijednosti tvrdoće na voznoj površini glave tračnice kvalitete 700 (R200) zadovoljavajuće dok su u slučaju tračnice kvalitete 900A (R260) zabilježene u prosjeku 8 % manje vrijednosti od propisanih. Ovo odstupanje može se zanemariti budući da su ispitivanja provedena na uzorcima tračnica koje nisu bile eksploatirane te nisu bile podvrgnute hladnom kovanju vozne površine koje bi rezultiralo povećanjem tvrdoće.

Izmjerene vrijednosti tvrdoće u poprečnom presjeku tračnica znatno su veće od minimalno propisanih (u prosjeku 24 %) temeljem čega se zaključilo da uzrok lošem ponašanju tračnica ne leži u niskoj tvrdoći i vlačnoj čvrstoći njihova čelika. Pucanje tračnica pri njihovom savijanju može se objasniti smanjenom duktilnosti čelika te manjom lomnom žilavosti tretiranoga površinskog dijela čelika glave tračnice kao

posljedice nehomogenosti mikrostrukture duž poprečnog presjeka odnosno formiranja martenzitne mikrostrukture pri termičkoj obradi glave tračnice. Nužno je naglasiti da je za konačnu potvrdu ove tvrdnje potrebno provesti ispitivanja mikrostrukture tračničkog čelika koja su daleko opsežnija i sofisticiranija, a time i skuplja, od ispitivanja opisanog u ovom radu.

## Zahvala

Istraživanje opisano u ovom radu provedeno je u sklopu znanstvenoistraživačkog projekta "Buka i vibracije na tramvajskim i željezničkim kolosijecima" financiranog od strane Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske. Uzorke tračnica osigurao je Zagrebački holding d.o.o. – Podružnica Zagrebački električni tramvaj. Autori zahvaljuju na pruženoj potpori.

## LITERATURA

- [1] Pointner, P.: High strength rail steels - The importance of material properties in contact mechanics problems, *Wear*, 265, pp. 1373–1379, 2008.
- [2] Olofsson, U. & Telliskivi, T.: Wear, plastic deformation and friction of two rail steels - a full-scale test and a laboratory study, *Wear*, 254, pp. 80–93, 2003.
- [3] Lakušić, S. & Ahac, M.: Vibrations on railway tracks (Chapter), *Transport infrastructure management*, ed. S. Lakušić, Faculty of Civil Engineering at Zagreb University, Zagreb, pp. 371–416, 2009. (in Croatian language)
- [4] Lakušić, S., Rukavina, T. & Dragčević, V.: Proposal for the value of permitted tolerance on width of grooved rails, *Proceedings of the 8th International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Advanced Mass Transit Systems (COMPRAIL 2002)*, eds. J. Allan, R.J. Hill, C.A. Brebbia, G. Sciotto and S. Sone, Lemnos, Greece, 12–14 June, 2002.
- [5] Rails, Brochure published by Thyssen Schienen Technik, February 2000.
- [6] Esveld, C.: *Modern railway track, Second edition.*, TU-Delft, 2001.
- [7] European Standard EN 13674-1:2004
- [8] UIC CODE 860/1986, Technical specification for the supply of rails
- [9] Oberbau-Richtlinien und Oberbau Zusatzrichtlinien (OR, OR-Z) des VDV für Bahnen nach der BOSTrab, 1997.
- [10] Pavlina, E.J. & Van Tyne, C.J.: Correlation of yield strength and tensile strength with hardness for steels, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 17(6), pp. 888–893, 2008.
- [11] Falvey, A.: Track and trackform system - track and trackform report; *Section 5 of Sydney metro network stage 2 reference design*, Sydney, 2010
- [12] Lee, K.M. & Polycarpou, A.A.: Wear of conventional pearlitic and improved bainitic rail steels, *Wear*, 259 pp. 391–399, 2005.
- [13] INNTRACK GUIDELINE: Recommendation of, and scientific basis for, optimisation of switches & crossings – part 2, *Deliverable report D3.1.6*, 2006.
- [14] Zhan, X. & Wang, S.: Research on the improvement of rail head hardening technology on railway, *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies (5)*, pp. 263 – 271, 2005.
- [15] Khourshid, A.M., Gan, Y.X. & Aglan, H.A.: Microstructure origin of strength and toughness of a premium rail steel, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 10(3) pp. 331– 336, 2001.