



# AHSS - KLASIFIKACIJA, SVOJSTVA I PRIMJENA AHSS - CLASSIFICATION, PROPERTIES AND APPLICATION

Marko Horvat<sup>1,\*</sup>, Zlatko Botak<sup>1</sup>, Dejan Marić<sup>2</sup>, J. Eržišnik<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sveučilište Sjever, Sveučilišni centar Varaždin, Jurja Križanića 31b, Varaždin, Hrvatska

<sup>2</sup>Sveučilište u Slavonskom Brodu, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Trg I. B. Mažuranić 2, 35 000  
Slavonski Brod, Hrvatska

\* Corresponding Author. E-mail: marko.horvat@unin.hr

## Sažetak

Posljednjih godina vidljivo je značajno povećanje primjene visokočvrstih čelika u svim granama industrije. To je posljedica specifičnih svojstava ove grupe tehničkih materijala, ali i sve složenijih zahtjeva koji se očekuju od metalnih konstrukcija. Razvoj visokočvrstih čelika dijeli se u nekoliko faza, a u radu je prikazana klasifikacija te svojstva i primjena AHSS čelika.

**Ključne riječi:** čelik, HSS, AHSS

## Abstract

In recent years, there has been a significant increase in the use of high-strength steels in all branches of industry. This is a consequence of the specific properties of this group of technical materials, but also the increasingly complex requirements expected from metal structures. The development of high-strength steels is divided into several phases, and the paper presents the classification and properties and transfer of AHSS steel.

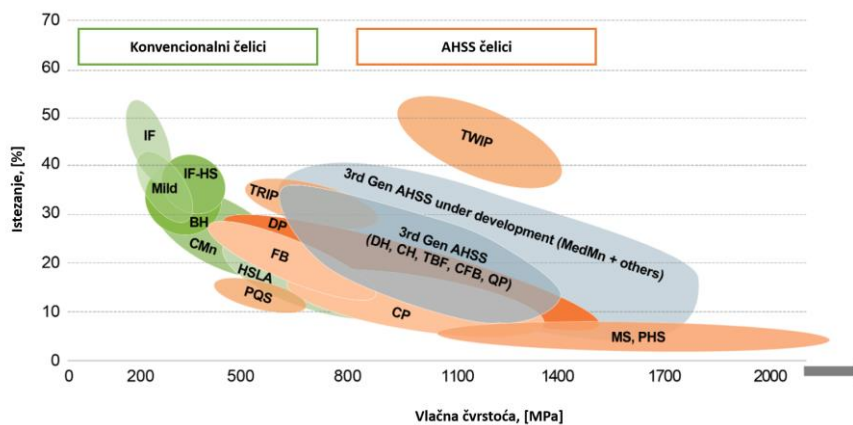
**Keywords:** steel, HSS, AHSS

## 1. Uvod

Prema definiciji, čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika ( $\leq 2\% C$ ), uz prisutne primjese i nečistoće te uz eventualni dodatak jednog ili više legiranih elemenata [1]. Čelik kao tehnički materijal poznat je nekoliko tisuća godina (prvi poznati artefakti: kaljene oštrice noževa; Cipar; 11.

stoljeće pr. Kr.), ali se i dalje smatra jednim od najvažnijih konstrukcijskih materijala. Razlog tome je stalan razvoj i napredak ove skupine tehničkih materijala. Danas je poznato preko 3500 vrsta čelika, a njihov spomenuti razvoj potaknut je sve složenijim konstrukcijsko-eksploatacijskim zahtjevima čeličnih konstrukcija, ali i ekonomsko-ekološkim aspektima. [1-3]

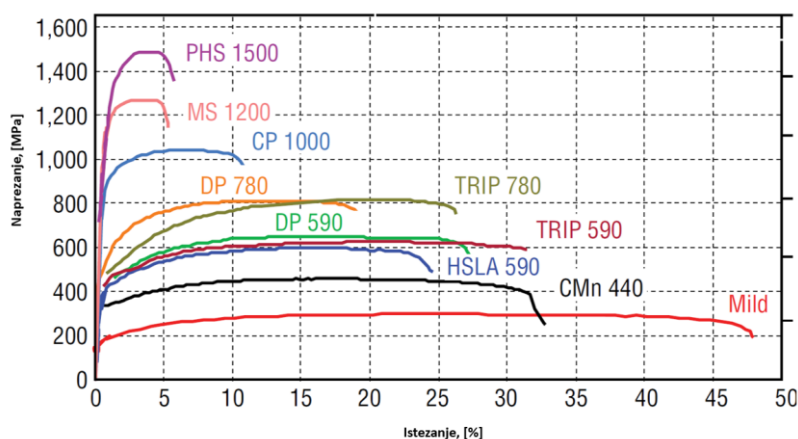
Jednu od najznačajnijih skupina čelika čine čelici istaknute čvrstoće. Ovo je grupni naziv za čelike čija su osnovna svojstva povećane vrijednosti granice razvlačenja ( $R_e$ ) i vlačne čvrstoće ( $R_m$ ), a da se pri tome ne narušavaju ostala važna mehanička i tehnološka svojstva (žilavost, istežljivost, zavarljivost i sl.). U načelu, ovu grupu čelika dijelimo u HSS (High Strength Steel) - visokočvrste/ultračvrste čelike konstrukcijskih namjena (nazivaju se još i konvencionalni HSS) i tzv. AHSS (Advanced High Strength Steel) - napredne čelike visoke čvrstoće. Kvantitativni prikaz temeljnih mehaničkih svojstava prema klasifikaciji HSS čelika dan je slikom 1.



Slika 1. Kvantitativni prikaz čelika istaknute čvrstoće [4]

AHSS čelici uglavnom se povezuju s automobilskom industrijom. Njihov razvoj započinje u 70-tim godinama prošlog stoljeća, a potaknut nestabilnim tržištem naftnim derivatima. [4-6] Takva situacija potaknula je razvoj čelika s izrazito velikim vrijednostima granice razvlačenja, ali istovremeno i istežljivosti, što bi osiguravalo izradu nosećih konstrukcijskih dijelova (dijelova karoserije vozila ili cijelih karoserija) manjih poprečnih presjeka, tj. mogućnost primjene tanjih limova (značajno smanjenje mase konstrukcije - smanjenje potrošnje pogonskih goriva), a da se pri tome ne naruše zahtjevi sigurnosti koji su vezani uz učinke udarne energije prilikom sudara te tehnološka svojstva (deformabilnost - izrada dijelova složenih geometrija deformacijskim postupcima) [6]. Iako ova kriza na tržištu naftnih derivata nije bila dugotrajna, to je razdoblje imalo revolucionaran značaj u razvoju i proizvodnji čelika (čeličnih limova). Već 1975. godine prezentirani su prvi AHSS čelici (DP - *dual phase* čelici). Ipak, kraj prošlog stoljeća obilježila je primjena konvencionalnih HSS čelika, IF - *interstitial free* i BH - *bake hardenable* čelika gdje su proizvođači tražili što bolju istežljivost, čak i na uštrb čvrstoće. Osnovni razlozi su bili potreba za razvojem i primjenom deformacijskih alata veće otpornosti na trošenje, nepredvidive elastične deformacije novih materijala, potreba za primjenom novih tehnologija spajanja i sl. [6]. Pored navedenog, kraj prošlog stoljeća u automobilskoj industriji

obilježen je i sve većom primjenom legura na bazi aluminija. Navedeni razlozi odgodili su značajniju komercijalnu primjenu AHSS čelika sve do 2000-tih godina od kada AHSS čelici imaju ključnu ulogu izradi vozila manje mase i povećane sigurnosti. Današnji trendovi u razvoju i primjeni AHSS čelika u značajnoj mjeri potaknuti su i zakonskim promjenama i zahtjevima s kojima se suočava automobilska industrija, vezano uz zahtjeve sigurnosti i potrošnje pogonskih goriva [4, 6-8].



**Slika 2.** Usporedni prikaz mehaničkih svojstava HSS/AHSS čelika koji se primjenjuju u automobilskoj industriji [7]

Razvoj AHSS čelika može se prikazati u tri osnovna smjera - generacije . Klasifikacija se temelji na osnovnim mehaničkim svojstvima i smjeru razvoja s ciljem postizanja svojstava sukladno zahtjevima autoindustrije (iako se klasifikacija ponekad prikazuje prema drugim kriterijima: npr. načinu dobivanja ili obrade poluproizvoda). U tablici 1 prikazane su osnovne kratice za čelike istaknute čvrstoće (konvencionalni HSS i AHSS čelici) koji su komercijalno dostupni ili u fazi razvoja. [4, 6-8]

**Tablica 1.** Različite vrste čelika i pridružene kratice [4]

Oznaka:	Vrsta čelika:	Oznaka:	Vrsta čelika:
IF	INTERSTITIAL FREE	CFB	CARBIDE-FREE BAINITE
IF-HS	INTERSTITIAL FREE – HIGH STRENGHT	TBF	TRIP-AIDED BAINITIC FERRITE
CMn	CARBON-MANGANESE	TR	TRANSFORMATION INDUCED PLASTICITY (TRIP)
BH	BAKE HARDENABLE	QP	QUENCHING&PARTITIONING
LA	HIGH STRENGHT, LOW ALLOY (HSLA)	TW	TWINNING-INDUCED PLASTICITY (TWIP)
DP	DUAL PHASE	Med-Mn	MEDIUM-MANGANESE
DH	DUAL PHASE HIGH DUCTILITY	RA	RETAINED AUSTENITE (obuhvaća TRIP, QP, TW, Med-Mn, ostali)
CP	COMPLEX PHASE	MS	MARTENSITIC
CH	COMPLEX PHASE HIGH DUCTILITY	PQS	PRESS QUENCHED STEEL
FB	FERRITE-BAINITE	PHS	PRESS HARDENING STEEL

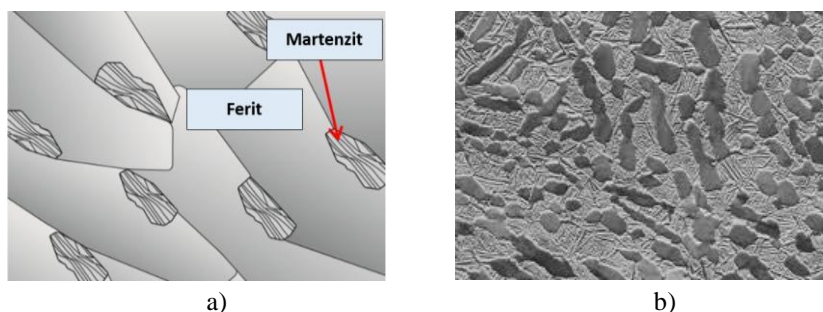
## 2. AHSS - prva generacija

### 2.1 Uvod

Čelici koji pripadaju prvoj generaciji AHSS čelika temelje se na filozofiji razvoja s ciljem zadržavanja minimalne ili veće vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće kao što to imaju HSLA čelici, uz istovremeno povećanje deformabilnosti. Ovakvi čelici u pravilu imaju martenzitnu mikrostrukturu sa dodatkom jedne ili više faza koja doprinosi boljoj sposobnosti oblikovanja. Pri tome, martenzitna struktura daje doprinos većim vrijednostima čvrstoće, a najčešće se odabire dodatak feritne faze koji osigurava dobru deformabilnost. [4, 6-8]

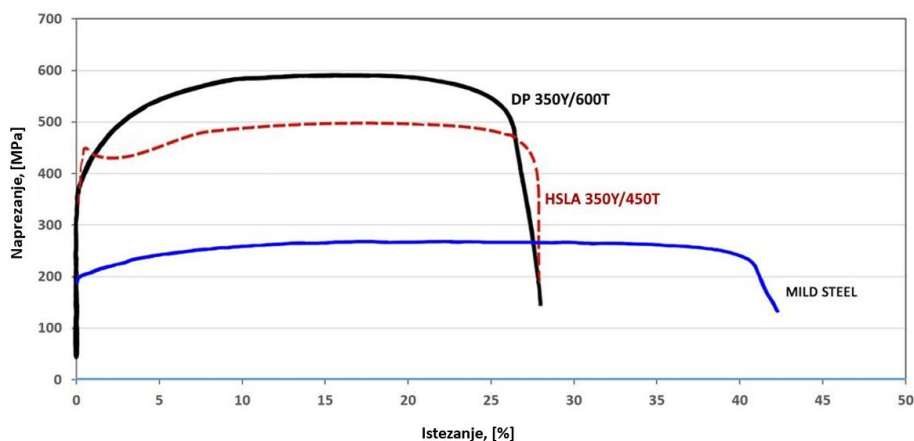
### 2.2 DP čelici

Osnovni predstavnik ove grupe čelika je tzv. DP (*dual phase*) čelik; dvofazni čelik [7]. DP čelici sastoje se od feritne matrice i termički obrađene druge faze - martenzita. Proizvode se kontroliranim hlađenjem iz austenitne faze ili iz dvojne feritno-austenitne faze (ovisno da li se radi o vruće ili hladno valjanim proizvodima). Cilj kontrolirane toplinske obrade je pretvorba dijela austenita u ferit prije nego što se preostali austenit pretvori u martenzit. Režimi toplinske obrade će zavisiti i o legirnim elementima (najčešće se dodaju u niskom masenom udjelu), a na mehanička svojstva značajan utjecaj mogu imati i disperzirane čestice (npr. karbonitridi). Disperzirane čestice unutar feritne matrice osiguravaju bolja mehanička svojstva ferita ("mekše" faze), dok manji udio istih unutar martenzitne faze može smanjiti udio ugljika i povoljno utjecati na žilavost ("tvrđe" faze). Na ovaj način ujedno se i smanjuje razlika u vrijednostima čvrstoće feritne i martenzitne faze i nesklad u deformacijskim vrijednostima ovih faza što doprinosi smanjenju rizika za nastajanje mikropukotina i općenito poboljšavanje istežljivost DP čelika. [4, 6, 7, 8, 9, 10]



**Slika 3.** a) Shematski prikaz mikrostrukture DP čelika; b)  
Mikrostruktura DP čelika [9]

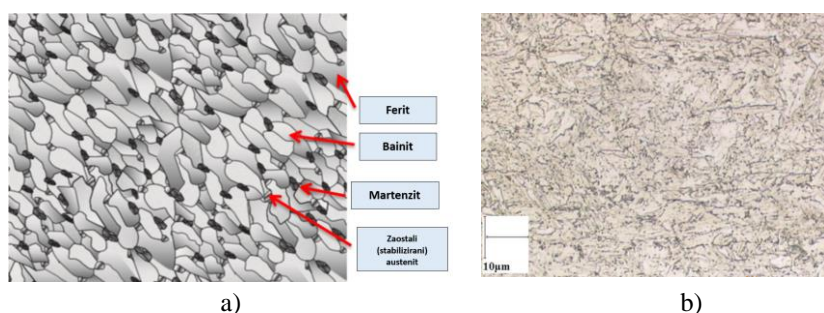
Današnji komercijalni DP čelici proizvode se do vrijednosti vlačne čvrstoće od 1200 MPa, i istežljivosti > 5%. U načelu, u autoindustriji primjenjuje se za izradu dijelova karoserija kao što su nosači odbojnika, dijelovi kabine, dijelovi krova, A i B stupa i sl. [7, 9, 10]



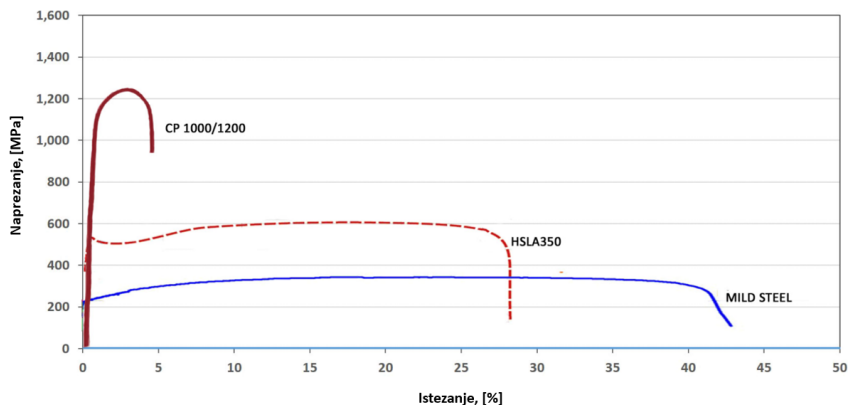
**Slika 4.** Usporedni prikaz inženjerskog dijagrama *naprezanje-istezanje* za AHSS DP čelika i konvencionalnih čelika

### 2.3 CP čelici

Unutar prve generacije AHSS čelika, osim DP čelika, razvili su se i CP (*complex phase*); višefazni čelici (složeni čelici). Ova grupa čelika pokazuje više vrijednosti granice razvlačenja, ali i deformabilnosti u odnosu na iste razrede DP čelika. Mikrostruktura CP čelika sastoji se od feritne/bainitne matrice i manjih masenih udjela martenzita, zaostalog austenita i perlita. Svojstvena im je i ekstremna rafinacija zrna koja je potaknuta usporenom kristalizacijom ili precipitacijom mikrolegiranih elemenata kao što su Ti i Cr. [4, 6, 7, 10, 11]



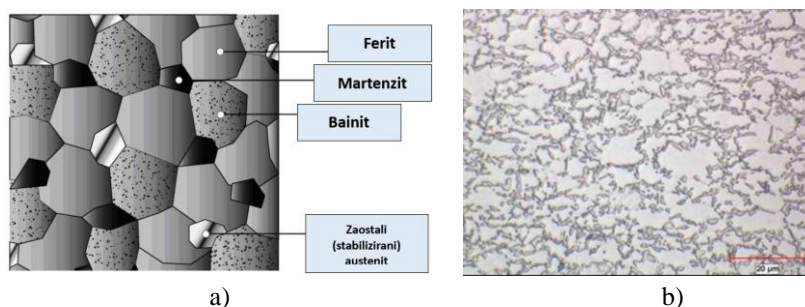
**Slika 5.** a) Shematski prikaz mikrostrukture CP sa feritno-bainitnom matricom čelika; b) Mikrostruktura CP čelika HR800Y980T-CP [11]



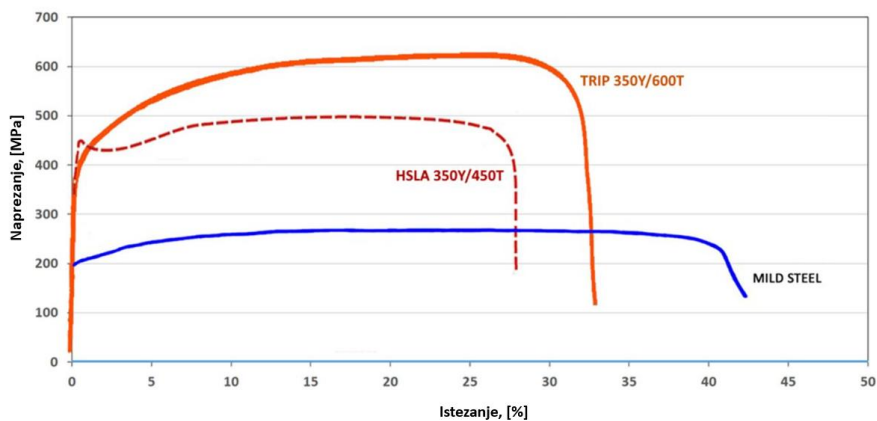
**Slika 6.** Usporedni prikaz inženjerskog dijagrama naprezanje-istezanje za AHSS CP čelik i konvencionalne čelike [11]

#### 2.4 TRIP čelici

TRIP (*transformation-induced plasticity*) su čelici koji koriste efekt transformacije (mikrostrukture) izazvane deformacijskim procesom. Mikrostruktura ovih čelika na sobnoj temperaturi sastoji se od ferita, bainita i stabiliziranog (zaostalog) austenita koji se nalazi u feritnoj osnovi (do 5%) te sa ili bez martenzita. [6, 7, 12-14] Sadrže povećani maseni udio ugljika koji osigurava stabilizaciju austenita (povećani sadržaj ugljika u austenitnom zrnu). Ovi čelici proizvode se posebnom termičkom obradom prethodno hladno deformiranog čelika koja se sastoji od primarnog žarenja u feritno-austenitnom području, sekundarnog žarenja u bainitnom području (izotermičkog karaktera) i hlađenja do sobne temperature. Kod ovako termički obrađenog (pripremljenog) čelika, uslijed djelovanja deformacijskih sila dolazi do transformacije austenitne faze u martnezitnu. Ovakav fenomen osigurava značajno povećanje brzine deformacijskog ojačavanja materijala i odgodu pojave plastične nestabilnosti, a time i deformabilnosti. TRIP čelici pokazuju veću razinu deformabilnosti od HSLA, DP i CP čelika, za iste vrijednosti čvrstoća. U automobilskoj industriji tendencija je zamjene HSLA čelika TRIP čelicima zbog značajno veće apsorpcijske energije i mogućnosti obrade deformacijskim postupcima. [6, 7, 12-14]



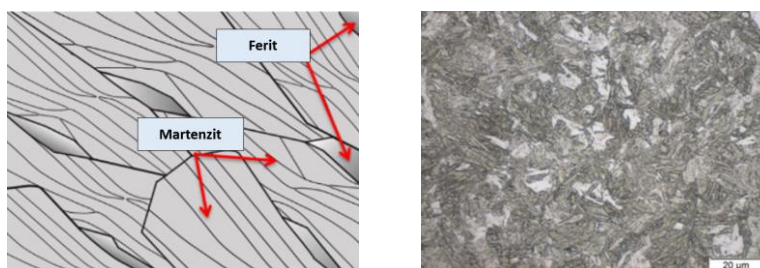
**Slika 7.** a) Shematski prikaz mikrostrukture TRIP čelika; b) Mikrostruktura TRIP čelika [13]



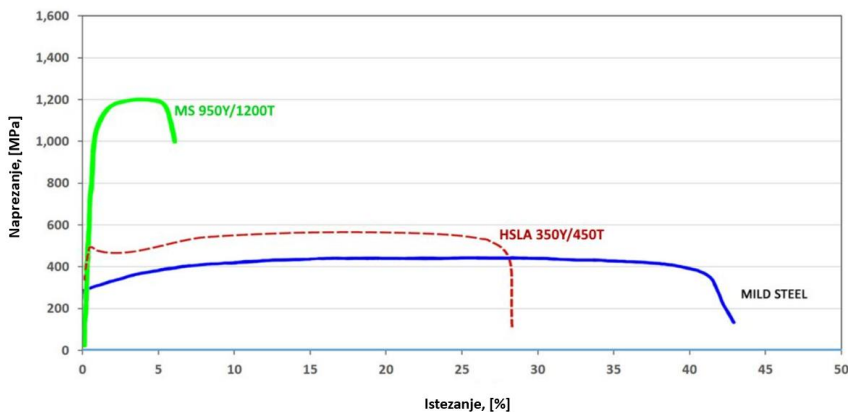
**Slika 8.** Usporedni prikaz inženjerskog dijagrama naprezanje-istezanje za TRIP i konvencionalne čelike [13]

## 2.5 MS čelici

MS (*martensitic steel*); martenzitni čelici, prema mikrostrukturnom stanju su pretežno martenzitne strukture uz manje udjele ferita i/ili bainita. Unutar prve generacije AHSS čelika, ovi čelici pokazuju najveće vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, ali i najmanju istežljivost. Vrijednosti vlačne čvrstoće prelaze 1700 MPa. Ovo su čelici sa povećanim udjelom ugljika, a utjecaj na konačna mehanička svojstva imat će i legirni elementi Mn, Si, Cr, Mo, B, V i Ni. Zadovoljavajuće vrijednosti istežljivosti i duktilnosti dobivaju se naknadnom toplinskom obradom popuštanja (žarenja). Ipak, MS čelici se koriste najčešće za dijelove vozila i karoserija gdje se ne primjenjuje zahtjevna obrada deformiranjem, osim u slučajevima kada se martenzitna struktura formira nakon oblikovanja pozicije u procesu *zagrijavanje-oblikovanje-kaljenje-naknadna toplinska obrada*. [6, 7, 15, 16]



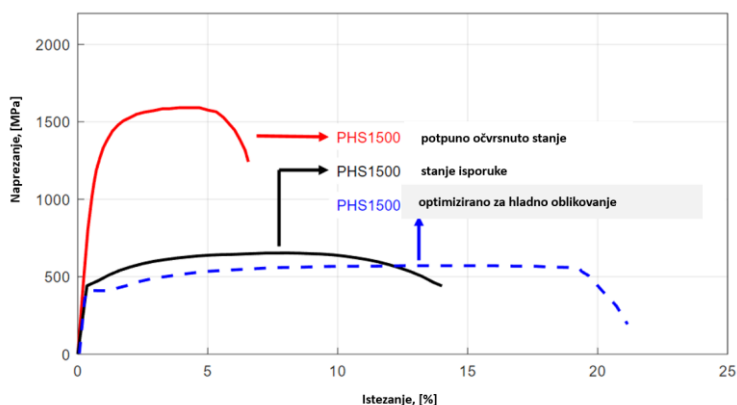
**Slika 9.** a) Shematski prikaz mikrostrukture MS čelika; b) Mikrostruktura čelika MS 950/1200 [16]



Slika 10. Usporedni prikaz inženjerskog dijagrama naprezanje-istezanje za MS čelik i konvencionalne čelike [16]

## 2.6 PHS čelici

PHS (*press-hardened steels*) su uglavnom čelici sastava C-Mn-B. Obuhvaćaju više grupa (vrsta) čelika, a konačna mehanička svojstva ovisit će o procesu oblikovanja i toplinsko-vremenskim ciklusima kojima će biti podvrgnut. Poznati su i kao HPF (*hot press forming steels*), Boron steel (iako se naziv može odnositi i na druge čelike, u automobilskoj industriji ovaj čelik obično se koristi za PHS) i HF steel (*hot formed steel*). U načelu, prije oblikovanja imaju feritno-perlitnu strukturu. Nakon toplinskih obrada (jednostavnih ili složenih), koje ovise i o masenim udjelima legiranih elemenata, te u kombinaciji sa procesima oblikovanja poprimaju konačne vrijednosti čvrstoća i istezljivosti. Kao PHS čelici ponekad se mogu koristiti i martenzitni nehrđajući čelici, čelici legirani manganom, kompozitni čelici i dr. [6, 7, 14, 17]



Slika 11. Usporedni prikaz inženjerskog dijagrama naprezanje-istezanje za AHSS PHS čelik prije i nakon obrade [17]



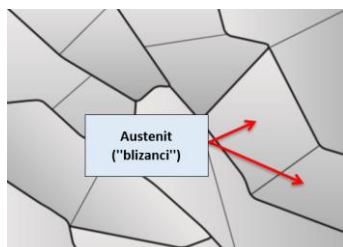
### 3. AHSS - druga generacija

#### 3.1 Uvod

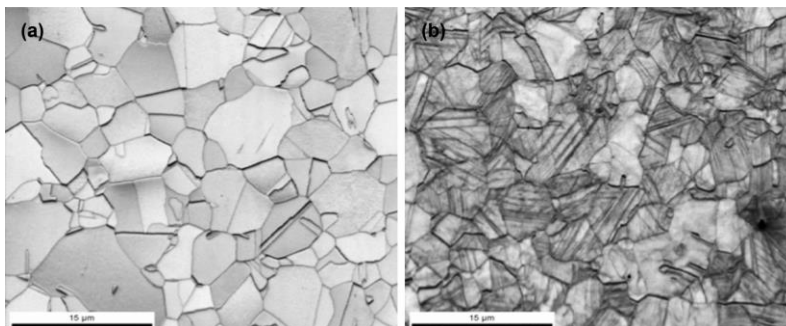
Druga generacija AHSS čelika u načelu obuhvaća čelike koji imaju u potpunosti austenitnu strukturu, a konačna mehanička svojstva dobivena su tzv. *twinning* postupkom (stvaranjem "blizanaca"). U ovu grupu čelika ponekad se svrstavaju i austenitni nehrđajući čelici zbog sličnih mikrostrukturnih svojstava. U usporedbi s čelicima prve generacije, radi se o čelicima veće cijene zbog visokog udjela legiranih elemenata i načina obrade. Njihov razvoj je potaknut osnovnim nedostacima prve generacije koja se temelji na ograničenoj sposobnosti oblikovanja deformiranjem za čelike čije vrijednosti vlačne čvrstoće prelaze 1000 MPa i izradu pozicija jednostavnijih geometrija. [4, 6-8, 18, 19]

#### 3.2 TWIP čelici

TWIP čelici na sobnoj temperaturi imaju potpuno austenitnu strukturu (FCC kristalnu rešetku). Austenitna struktura omogućena je kroz visoki maseni udio gamagenog elementa Mn (15 do 35 %). Pored mangana, ovi čelici sadrže do 3% Al, do 3% Si, i do 1% C. Ponekad se dodaju još i neki mikrolegirni elementi. U većini čelika austenitna faza nije stabilna na sobnoj temperaturi, ali u TWIP čelicima ova faza je stabilizirana upravo visokim sadržajem Mn. Kada je takav čelik podvrgnut deformacijskim postupcima, uslijed *twinning* efekta dolazi do stvaranja tzv. blizanaca zrna. Mikrostruktura postaje sve finija, a novostvorene granice zrna utječu na dislokacije te tako osiguravaju povećanje vrijednosti čvrstoće velikom brzinom. S obje strane granice nastalih zrna (blizanaca), atomi su smješteni u zrcalnim položajima. Na povoljna mehanička svojstva utječu i mikrolegirni elementi koji su birani na način da imaju veliki afinitet spajanja s ugljikom (stvaraju karbide), a da su istovremeno ti karbidi vrlo malih dimenzija te onemogućavaju kretanje dislokacija, a ne utječu na *twinning* proces. Važno je naglasiti da ovi čelici uz visoke vrijednosti čvrstoće (1300 do 2000 MPa) postižu i vrlo visoke vrijednosti istezanja (i preko 45%). Osnovna prepreka potpune komercijalizacije ove grupe čelika je nedovoljno zadovoljavanje tehnoloških svojstava kao što su zavarljivost, obrada odvajanjem čestica, korozivna postojanost i sl. [4, 6-8, 18-20]



Slika 12. a) Shematski prikaz mikrostrukture TWIP čelika [20]



**Slika 13.** a) Shematski prikaz mikrostrukture TWIP čelika u žarenom stanju; b) Mikrostruktura čelika TWIP čelika nakon *twinning* procesa [20]

### 3.3 L-IP čelici

Unutar druge generacije AHSS čelika, osim TWIP i SS (nehrđajući čelici austenitnog tipa) čelika, mogu se svrstati i L-IP čelici. L-IP (*light weight steels with induced plasticity*) čelici baziraju se na specifičnoj čvrstoći koja se povećava smanjenjem gustoće kroz legiranje osnovne baze Fe-Mn-C pomoću elemenata manje gustoće (Al i Si). Ovi mehanizmi očvršnuća povećavaju duktilnost bez potrebe za primjenom posebnih procesa obrade. U usporedbi s konvencionalnim čelicima, moguće je smanjenje gustoće i do 18%, uz vrijednosti čvrstoća od 1000-1500 MPa i duktilnošću i do 80%. [18]

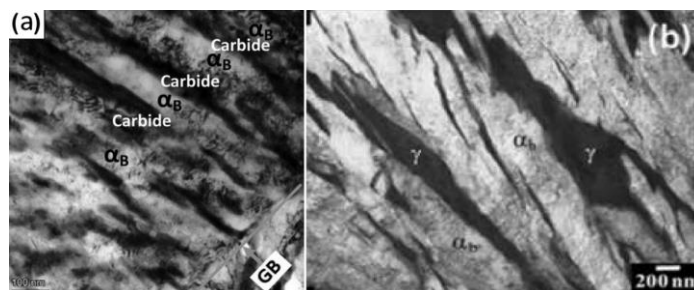
## 4. AHSS - treća generacija

### 4.1 Uvod

Posljednju generaciju AHSS čelika čine čelici višefazne strukture razvijeni s ciljem veće sposobnosti oblikovanja (posebno u hladnom stanju). Temelje se na zadržavanju austenitne strukture u bainitnoj ili martenzitnoj matrici sa potencijalnim udjelima ferita i/ili precipitata specifičnih veličina i udjela kako bi doprinijeli osiguranju traženih svojstava. Iako automobilska industrija vrlo često ima svoje kriterije prilikom klasifikacije i definicije treće generacije AHSS čelika, danas su dostupne 3 osnovne kategorije i sve se oslanjaju na TRIP efekt. [4, 6, 8, 21, 22]

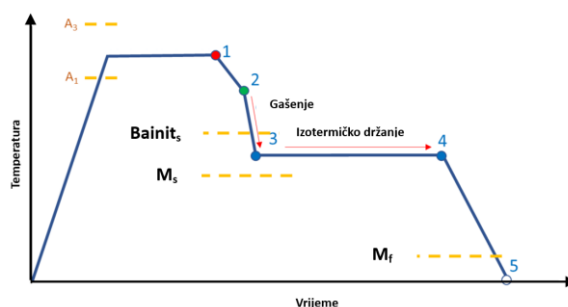
### 4.2 TBF/CFB čelici

TBF (*TRIP-Assisted Bainitic Ferrite*)/CFB (*Carbide-Free Bainite*) su čelici, koji ovisno o kemijskom sastavu i načinu toplinske obrade (vrsti i režimima toplinske obrade) osiguravaju mikrostrukturu koju čine martenzit, austenit i bainit. Bainit sadrži područja ferita obogaćenog dislokacijama (veća čvrstoća) odvojenih austenitom, martenzitom i/ili cementitom. Ove faze unutar bainita imaju relativno male razlike u tvrdoći čime je osigurana poboljšana sposobnost oblikovanja u usporedbi s dvofaznim ili TRIP čelicima prve generacije. Proizvodnja čistih bainitnih čelika je vrlo zahtjevna, stoga se u mikrostrukturi javljaju i druge faze rezultirajući bainitno-feritnom strukturom ili eventualno drugim složenim fazama.



**Slika 14.** a) Tipična bainitna struktura sa lamelama ferita i međulamelnim karbidom; b) Mikrostruktura čelika TBF/CFB čelika bez karbida, sa netransformiranim zaostalim austenitom [22]

Kontroliranim kemijskim sastavom i toplinskom obradom (držanjem na specifičnim temperaturama, ili ponovnim kaljenjem) dodatno se smanjuje zrno ovakve mikrostrukture, ali i eliminira željezni karbid (cementit) iz mikrostrukture. Također, velika zrna austenita koja su tipična za TRIP čelike prve generacije svedena su na minimum te se pojavljuju kao submikronske čestice. Neki izvodi navode ovu vrstu čelika i kao čelici DP-HD (*dual phase high ductility*). Slika 15. prikazuje mogući dijagram postupka toplinske obrade za ovu grupu čelika. Isti se sastoji od međukritičnog žarenja iz područja ferit+austenit, sporo ohlađivanje s ciljem poticanja stvaranja ferita, a zatim kaljenje do temperature ispod početka stvaranja bainita, potom slijedi izotermičko žarenje iznad temperature početka stvaranja martenzita te kaljenja do sobne temperature. [4, 7, 8, 21, 22]



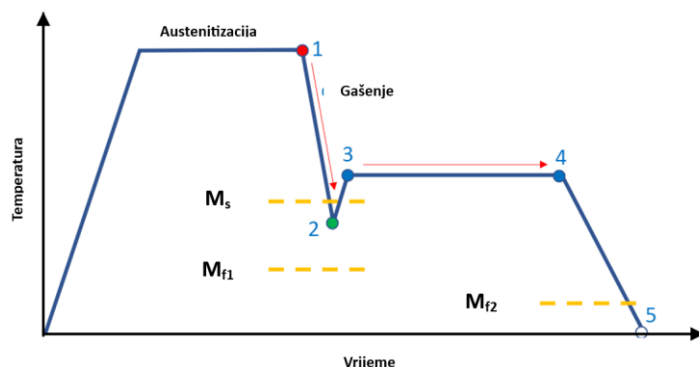
**Slika 15.** Mogući dijagram postupka dobivanja TBF/CFB čelika [22]

#### 4.3 Q&P (QP) čelici

Q&P (*Quenched and Partitioned*) čelici proizvode se složenom toplinskom obradom (toplinska obrada u više koraka) koja osigurava visoke vrijednosti vlačne čvrstoće, ukupne istezljivosti, dobru lokalnu i ukupnu duktilnost i deformabilnost. Ovaj proces prvi puta je objašnjen 2003. godine, a specifičan je po tome što se nakon prvog kaljenja čelik ponovno zagrijava i gasi.

Slika 16 prikazuje dijagram postupka toplinske obrade Q&P čelika. Prvo gašenje se odvija s temperature austenitizacije ili iz dvofaznog austenitno-feritnog područja na temperaturu koja je ispod

temperature početka transformacije u martenzit, ali iznad  $M_f$  temperature (temperature ispod koje bi se sav austenit pretvorio u martenzit). Nakon toga, u drugom koraku, temperatura se podiže iznad  $M_s$ , zadržava i kali do transformacije u martenzit (ispod  $M_f$ ). [4, 7, 8, 21, 22]



Slika 16. Dijagram postupka dobivanja Q&P (QP) čelika [22]

Nakon toplinske obrade, mikrostruktura ovakvih čelika sadrži martenzitnu i austenitnu fazu. Pojava ferita može biti posljedica provođenja prvog gašenja iz dvofaznog područja austenit+ferit. Prvi dio toplinske obrade osigurava kontrolirani volumni udio martenzita. Ponovnim podizanjem temperature i izotermičkim držanjem, provodi se proces prelaska ugljika iz dobivenog martenzita (prezasićenog ugljikom) procesom difuzije u netransformirani austenit. Obogaćivanje austenita ugljikom povećava njegovu stabilnost na sobnoj temperaturi. Budući da je temperatura izotermičkog držanja u drugom koraku toplinske obrade veća od  $M_s$  temperature, dio martenzita prelazi u popušteni martenzit koji daje bolja mehanička svojstva ove faze (veća duktilnost). Konačno gašenje daje dodatnu količinu martenzita u strukturi. [4, 7, 8, 21, 22]

#### 4.4 Medium-Mn

Medium-Mn (*Medium Manganese Steels*, Med-Mn) čelici sadrže od 3 do 12% Mn uz dodatak silicija, aluminija i mikrolegiranih elemenata. Mangan ima manju gustoću od željeza i osigurava proizvodnju čelika manjih gustoća. Ovom efektu pridonosi i dodani masni udio aluminija. Toplinska obrada ovih čelika slična je Q&P čelicima, čime se osigurava sitnozrnata višefazna struktura. Visoki maseni udjeli mangana osigurava veće količine zaostalog (stabiliziranog) austenita, a time i veću duktilnost kroz TRIP efekt (u usporedbi s Q&P čelicima istih vrijednosti čvrstoća). Osnovnu razliku u odnosu na toplinsku obradu Q&P čelika čini prvi korak gašenja do sobne temperature (a ne ispod  $M_s$  temperature), a to je moguće radi velikog udjela Mn koji pomiče  $M_f$  ispod sobne temperature čime se i potpunim gašenjem osigurava dovoljan maseni udio austenita. Prema dosadašnjim studijama, ovi čelici mogu doseći vrijednosti vlačne čvrstoće i do 1800 MPa uz istežljivost od 15%. Osim navedenog, za ovu grupu čelika, primjenjuju se i neke druge metode toplinskih obrada kao što su ART (*Austenite-Reverted Transformation*), DS (*“double-soaking”*), D&P (*Deforming and Partitioning*) i sl. Ova grupa čelika još nema široku komercijalnu primjenu. [4, 7, 8, 21, 22]



## 5. Zaključak

AHSS (*Advanced High Strength Steel*) su napredni visokočvrsti čelici čiji su intenzivan razvoj i primjena zabilježeni tek u zadnjih nekoliko desetljeća. Iako je cijena ove grupe tehničkih materijala značajno viša u odnosu na konvencionalne i konvencionalne visokočvrste čelike, ona se opravdava kroz specifična mehanička svojstva koja posjeduju ovi čelici. To se prvenstveno odnosi na visoku čvrstoću uz istovremeno zadržavanje dovoljne vrijednosti istezanja i deformabilnosti (mogućnost prerade oblikovanjem deformacijskim postupcima). Razvijeni su složenim modifikacijama mikrostrukture, kroz toplinske i/ili deformacijske procese. U radu je prikazana osnovna sistematizacija AHSS čelika kroz povijesni razvoj, a temeljem mikrostrukture i mehaničkih svojstava. U uvodu ovoga rada naglašena je i mogućnost drugačijih klasifikacija AHSS čelika, a kao zaključak dan je tablični prikaz komercijalnih AHSS čelika s dodatnim kriterijima podjele prema načinu dobivanja.

**Tablica 2.** Pregled komercijalnih AHSS čelika [4]

HLADNOVALJANI I PREVUČENI ČELICI								
R <sub>m</sub> [MPa]	DP & DH		CP & CH		RA & TW		MS	PQS & PHS
	Oznaka:	min EI:		min EI:		min EI:	Oznaka:	Oznaka:
<500	CR260Y450T-DP	27						PQS-CR450T-LA
	CR290Y490T-DP	25						PQS-CR500T-LA
590	CR300Y590T-DP	16			CR340Y590T-RA	27		PQS-CR550T-LA
	CR340Y590T-DP	21			CR400Y600T-RA	26		PQS-CR600T-LA
	CR330Y590T-DP	17			CR400Y690T-RA	25		
	CR330Y590T-DH	26						
780	CR420Y780T-DP	15	CR570Y780T-CP	11	CR400Y780T-RA	22		
	CR500Y780T-DP	13	CR680Y780T-CP	10				
	CR440Y780T-DH	19						
900	CR690Y900T-DH	30						
980	CR550Y980T-DP	9	CR700Y980T-CP	8	CR480Y950T-TW	45		PHS-CR1000T-MB
	CR590Y980T-DP	11	CR780Y980T-CP	7	CR600Y980T-RA	20		
	CR700Y980T-DP	9						
	CR560Y980T-DH	14	CR780Y980T-CH	10				
	CR700Y980T-DH	14						
1100							CR860Y1100T-MS	
1180	CR740Y1180T-DP	7	CR900Y1180T-CP	5	CR700Y1180TmedMn	12	CR950Y1180T-MS	PHS-CR1200T-MB
	CR800Y1180T-DP	7						
	CR860Y1180T-DP	7						
	CR850Y1180T-DH	10	CR900Y1180T-CH	8	CR850Y1180-RA	12		
1300						CR1030Y1300T-MS		
1400			CR1000Y1370T-CH	5			CR1150Y1400T-MS	
1500	CR1200Y1470T	4			CR1000Y1500T-RA	12	CR1000Y1470T-MS	PHS-CR1500T-MB
							CR1200Y1470T-MS	
1700							CR1350Y1700T-MS	PHS-CR1700T-MB
1800								PHS-CR1800T-MB
1900								PHS-CR1900T-MB
2000							CR1550Y2000T-MS	PHS-CR2000T-MB
TOPLOVALJANI ČELICI								
R <sub>m</sub> [MPa]	DP		FB		CP		MS	PQS & PHS
	Oznaka:	min EI:		min EI:		min EI:	Oznaka:	Oznaka:
440			HR300Y450T-FB	25				
590	HR330Y580T-DP	20	HR440Y580T-FB	16				
780			HR600Y780T-FB	14	HR660Y760T-CP	10		
980					HR720Y950T-CP	9		
1180							HR900Y1180T-MS	
1500								PHS-HR1500T-MB
1700								PHS-HR1700T-MB
1800								PHS-HR1800T-MB
1900								PHS-HR1900T-MB
MB2000								PHS-HR2000T-MB



## 6. Reference

- [1] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2002.
- [2] World Steel Assotiation, [www.worldsteel.org](http://www.worldsteel.org), preuzeto: veljača 2023.
- [3] M. Novosel, D. Krumes: Posebni čelici, Slavonski Brod, 1998.
- [4] <https://ahssinsights.org/metallurgy/defining-steels/>, preuzeto: veljača 2023.
- [5] Župančić: Svojstva naprednih čelika visokih čvrstoća u proizvodnji osobnih motornih vozila, Vatrogastvo i upravljanje požarima, Vol. V. No. 2., 2015.; str 76-87
- [6] N. Fonstein: Advanced High Strength Sheet Steels Physical Metallurgy, Design, Processing, and Properties, Springer, USA, 2015.
- [7] E. Billur, T. Altan: Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part I, AN FMA PUBLICATION - STAMPING JOURNAL, 2013.
- [8] M. Tisza: Three Generations of Advanced High Strength Steels in the Automotive Industry, Vehicle and Automotive Engineering 3, Proceedings of the 3rd VAE2020, Miskolc, Hungary
- [9] <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/dual-phase/>, preuzeto: veljača 2023.
- [10] BAOSTEEL, Overview of BAOSTEEL Automotive AHSS, 2018.
- [11] <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/complex-phase-steel/>, preuzeto: veljača 2023.
- [12] N. Radovanović: MODERN STEELS: Transformation induced plasticity; Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 04/2011, 167-170
- [13] <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/3rdgen-ahss/transformation-induced-plasticity-trip/>, preuzeto: veljača 2023.
- [14] Mahmoud Y. Demeri: Advanced High-Strength Steels: Science, Technology, and Applications, Ohio, 2013
- [15] E. Billur, J. Dykeman, T. Altan: Three Generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part II, 2014.
- [16] <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/1stgen-ahss/martensite/>, preuzeto: veljača 2023.
- [17] <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/phs-grades/>, preuzeto: veljača 2023.
- [18] E. Billur, J. Dykeman, T. Altan: Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part II, AN FMA PUBLICATION - STAMPING JOURNAL, 2013.
- [19] N. Radovanović, D. Glišić: MODERN STEELS: Twinning induced plasticity; Zavarivanje i zavarene konstrukcije, 01/2014, 35-42
- [20] <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/ahss/twinning-induced-plasticity/>, preuzeto: veljača 2023.
- [21] E. Billur, T. Altan: Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part III, AN FMA PUBLICATION - STAMPING JOURNAL, 2013.
- [22] <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/3rd-generation-steels/>, preuzeto: veljača 2023.