



Nenad Radović, Dragomir Glišić

SAVREMENI ČELICI: DVOJNIKOVANJEM IZAZVANA PLASTIČNOST

Originalni naučni rad / Original scientific paper

UDK / UDC: 669.141:539.214

Rad primljen / Paper received:

Januar 2014.

Ključne reči: nerđajući čelici, zavarivanje, heat tint, korozija, nagrizanje

Adresa autora / Author's address:

Katedra za metalurško inženjerstvo, Tehnološko metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu, Karnegijeva 4, 11120 Beograd

email: nenrad@tmf.bg.ac.rs

Keywords: stainless steels, welding, heat tint, corrosion, pickling

Izvod

Dvojnikanjem izazvana plastičnost (TWIPing Induced Plasticity – TWIP) u čelicima je fenomen koji je omogućio razvoj zasebne grupe čelika za koju se pretpostavlja da će imati masovnu upotrebu, naročito u autoindustriji. Mikrostruktura ovih čelika na sobnoj temperaturi se sastoji od austenita koji je stabilisan značajnim dodatkom mangana. U toku deformacije dolazi do dvojnikanja koje značajno povećava otpor deformaciji, uz zadržavanje odlične plastičnosti, tako da su čvrstoće od 1300-2000 MPa praćene izduženjem od minimalno 45%. Sa vremena istraživanja su više usmerena na ispunjenje tehnoloških zahteva, kao što su zavarljivost, koroziona postojanost, mašinska obradljivost i sl.

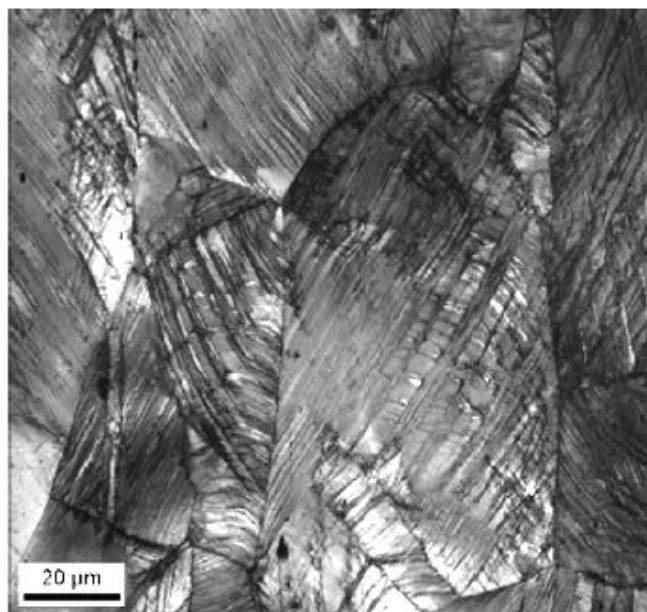
TWIP čelici

Stalni zahtevi za povećanjem energetske efikasnosti vozila su jedan od glavnih pokretača usavršavanja postojećih čelika ili razvoja novih čelika za nove generacije automobila. Univerzalni cilj je uvek da se smanje masa vozila, potrošnja goriva i emisija CO₂. Ovaj cilj se postiže korišćenjem čelika povišene do vrlo visoke čvrstoće, uz ispunjenje dodatnih veoma oštih zahteva za garantovanom žilavošću i/ili tehnološkim zahtevima kao što su sposobnost oblikovanja, zavarljivost, otpornost na koroziju i sl. Sadašnji trend razvoja je okrenut razvoju čelika koji će omogućiti oblikovanje dubokim izvlačenjem do veoma velikog stepena deformacije i odgovarajuće visoke čvrstoće u hladno-deformisanom stanju [1-9].

Limovi od TWIP čelika poseduju veoma visok nivo zahtevanih mehaničkih osobina, kao što su visoka vrednost čvrstoće i duktilnosti, što omogućava njihovo korišćenje za izradu autodelova. Glavni legirajući element u ovim čelicima je mangan, i to u količini koja može varirati između 15 i 35%. Pored mangana, ovi čelici mogu sadržati do 3%Al, do 3%Si, do 1.5%C, a nekada se dodaju i mikrolegirajući elementi [1-5]. Ovaj način legiranja obezbeđuje prisustvo austenita (površinski centrirane rešetke) na sobnoj temperaturi, čija je dodatna karakteristika veoma niska energija greške u redosledu (EGR) čime je omogućena pojava dvojnikanja, slika 1.

Abstract

A significant increase in the research activity dedicated to high manganese TWIP steels has occurred during the past few years, motivated by the breakthrough combination of strength and ductility possessed by these alloys. Here a short review of the relations between microstructure and mechanical properties is presented. This summarized knowledge explains why TWIP steel metallurgy is currently a topic of great practical interest of especially automotive industry.

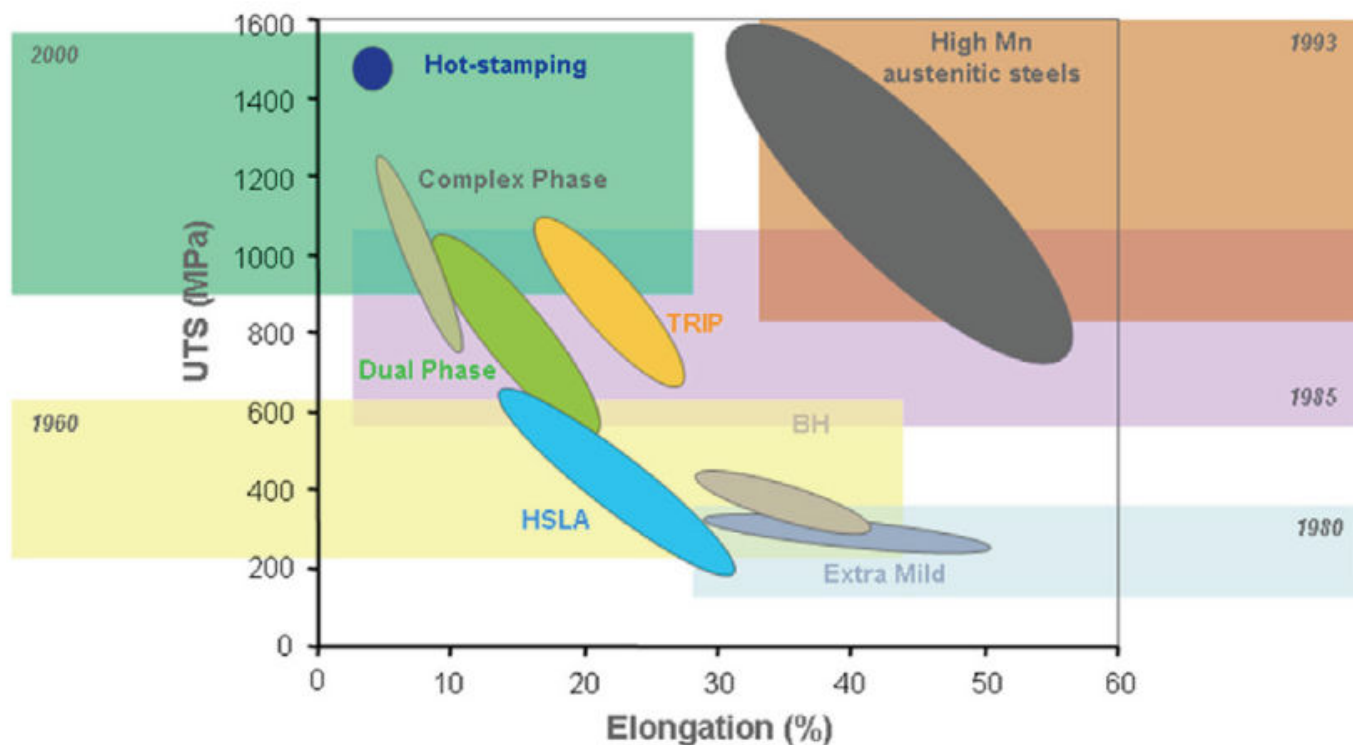


Slika 1. Tipična struktura Fe-22Mn-0.6C TWIP čelika nakon deformacije 0.3. [1]



U toku deformacije, dvojnokovanje dovodi do dodatnog povećanja čvrstoće, ali i poboljšanja duktilnosti. Ovakvo ponašanje TWIP čelika obezbeđuje značajno bolje osobine u poređenju sa drugim čelicima, slika 2. U prethodnom periodu su razvijani čelici kod kojih je uvek bio prisutan kompromis između čvrstoće i plastičnosti. Korišćenje čelika sa povišenom čvrstoćom je omogućilo smanjenje težine pojedinačnih komponenti, ali je uvek iziskivalo promene u montaži. Da bi se zadržalo zavarivanje kao osnovni način spajanja delova, dodatni uslov pored mehaničkih osobina je bila kontrola sadržaja legirajućih elemenata, kako bi se zadržala zavarljivost.

Rukovodeći se ovom idejom, razvijani su HSLA (niskolegirani čelici povišene čvrstoće), dvofazni čelici, višefazni čelici. U grupi višefaznih čelika, posebnu grupu čine čelici kod kojih, zahvaljujući prisutnom zaostalom austenitu, u toku deformacije dolazi do pojave transformacijom izazvane plastičnosti (TRIP) čime je omogućeno istovremeno povećanje i čvrstoće i plastičnosti. Njihovim ispitivanjem je utvrđeno da prisutni austenit obezbeđuje dobru žilavost, ali da dolazi do velike brzine deformacionog ojačavanja, tako da sam efekat povećanja plastičnosti nije tako veliki, kao što je to u slučaju TWIP čelika [1-8].



Slika 2. Čvrstoća i izduženje različitih čelika namenjenih autoindustriji. ((TRIP- transformacijom indukovana plastičnost; HSLA – niskolegirani čelici povišene čvrstoće; BH – Bake hardening čelici; Dual Phase – dvofazni čelici; Extra mild - niskougljenični čelici) [1,2]

Porast čvrstoće praćen povećanjem plastičnosti u TWIP čelicima ima veliki značaj sa industrijskog stanovišta, jer omogućava da se u jednoj operaciji presovanja izradi deo veoma kompleksnog oblika. U toku presovanja (plastična deformacija) dolazi do značajnog deformacionog ojačavanja, tako da finalni deo ima dovoljno veliku čvrstoću koja omogućava konstruktoru značajne redukcije poprečnog preseka i smanjenje težine bez uticaja na sigurnost vozila i zadržavanje sposobnosti apsorpcije udara. Prema sadašnjim odnosima cena čelika, ovi čelici su između 60 i 80% skuplji od klasičnih čelika koje treba da zamene, ali je to trošak koji je isplativ na duže staze eksploatacije vozila [1-4].

Sa druge strane, iako imaju odličan odnos čvrstoća/plastičnost/cena, TWIP čelici još uvek nisu masovno prisutni u proizvodnji auto delova. Glavna prepreka širokoj upotrebi ovih čelika je ograničeno poznavanje i razumevanje mehaničkog ponašanja, kako bi se predvideo odgovor materijala na preradu u alatima, zavarivanje i apsorpciju udara.

Deformaciono ponašanje

TWIP čelike karakteriše niska vrednost energije greške u redosledu (EGR). Energija greške u redosledu je veličina koja određuje rastojanje između parcijalnih dislokacija. Parcijalne dislokacije su istog znaka i uvek teže da se odbiju, dok EGR teži da ih spoji u jediničnu. Ravnotežno rastojanje parcijalnih dislokacija zato zavisi od rezultujućeg dejstva ova dva suprotna faktora. U slučaju kada je EGR mala, parcijalne dislokacije se nalaze na velikom rastojanju, odnosno kada su na velikom rastojanju, EGR ima veliku vrednost. Prema tome, dodatak velike količine mangana ima za cilj da obezbedi austenitnu strukturu na sobnoj temperaturi, kao i veoma malu EGR [1,2,6-8,10].

Zato u toku deformacije dolazi do istovremenog dejstva (preplitanja) nekoliko fenomena/mehanizama: klizanja dislokacija, deformacionog dvojnokovanja i martenzitne transformacije. Idealno deformaciono ponašanje bi

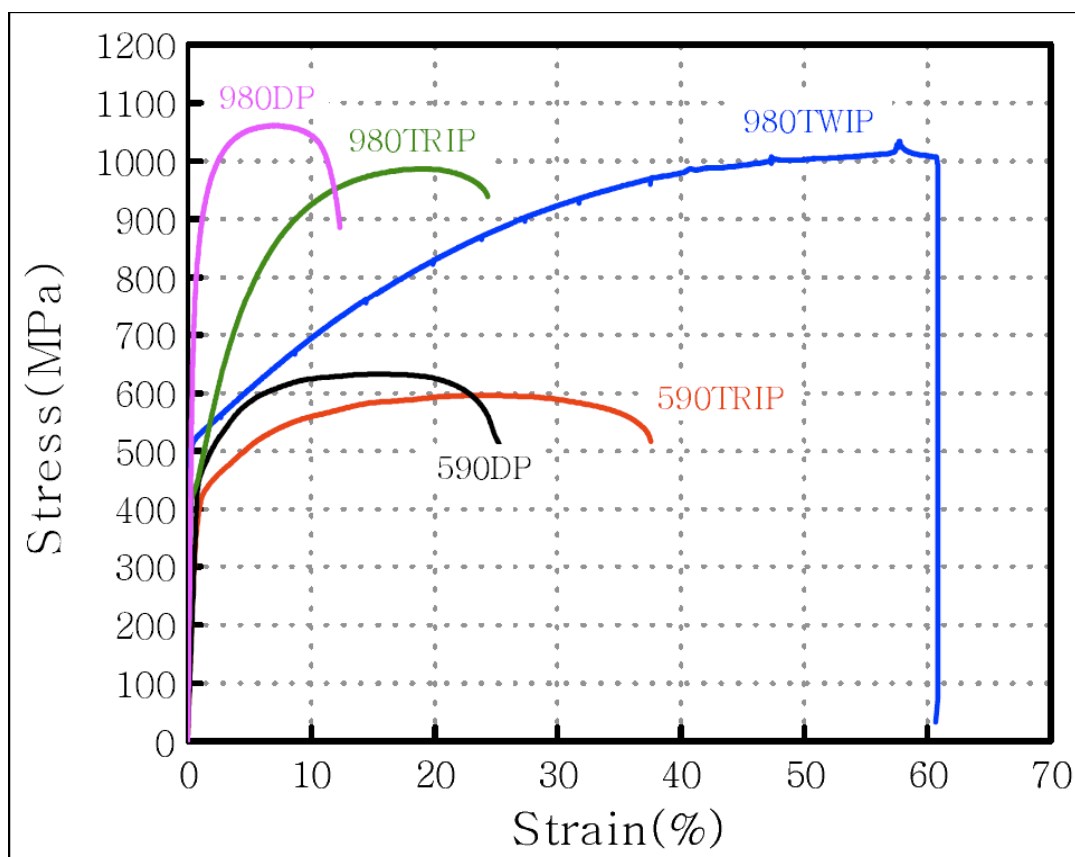


obuhvatilo u potpunosti sprečavanje martenzitne transformacije, iako klizanje dislokacija do dostizanja nekog kritičnog stepena deformacije, kada se aktivira i deformaciono dvojnikanje. Kritični stepen deformacije je oko 5% i zavisi od EGR, veličine zrna i temperature. Dok se on ne dostigne, ojačavanje se zasniva na potrebi za spoljnim naprezanjem koje će dovesti do spajanja parcijalnih dislokacija u jediničnu i njeno dalje kretanje.

Na taj način se stvara ćelijska struktura i povećava lokalno naprezanje. Ovo naprezanje služi kao pokretač deformacionog dvojnikanja. Dvojnici koji nastaju su ograničeni ćelijskim zidovima, te se dvojnici koji imaju sočivast oblik ponašaju kao prepreke za kretanje dislokacija. Prema tome, istovremeno dolazi do smanjenja veličine zrna i ojačavanja usled prisustva dvojnika. U nekim slučajevima se mogu pojaviti sekundarni dvojnici koji dodatno ojačavaju čelik. Sumarno, formiranje dvojnika deformacije, ne samo da stvara nove orijentacije unutar zrna, već i smanjuje dužinu putanje kojom se kreću dislokacije, formirajući

novu graničnu površinu koja je prepreka kretanju dislokacija [1,2,6-8].

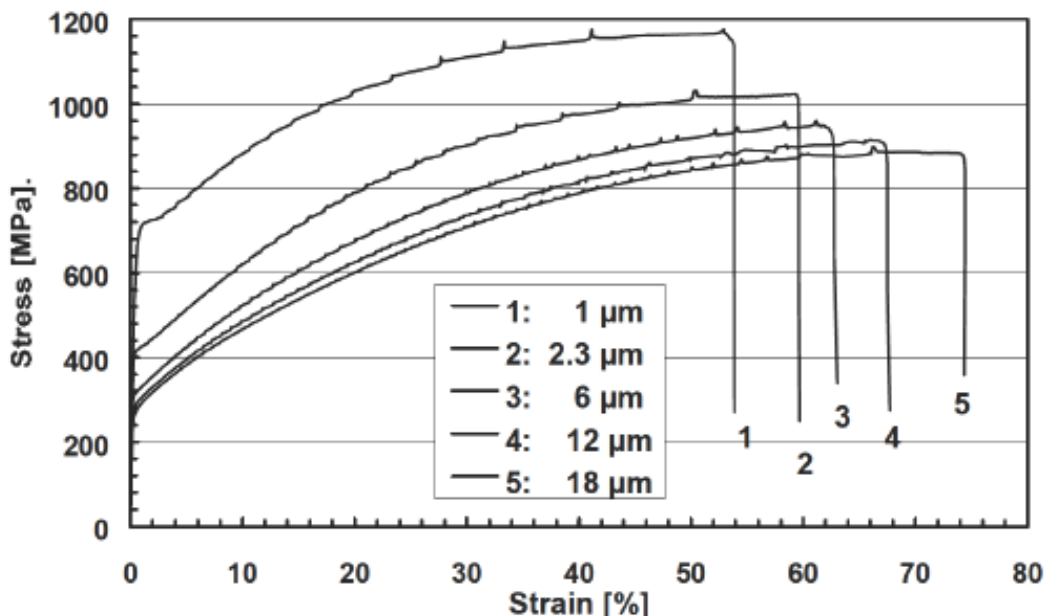
Granice dvojnika se mogu aproksimirati koherentnim granicama koje dislokacije mogu da prođu (efekat taložnog ojačavanja). Usled promene orijentacije unutar dvojnika, potrebno je primeniti veće naprezanje, što rezultuje velikom brzinom deformacionog ojačavanja, koja je praćena velikim izduženjem. Na slici 3 su prikazane krive ojačavanja različitih čelika povišene čvrstoće. Klasa čelika zatezne čvrstoće 980MPa se razvija za izradu apsorbera udara. Dijagram ukazuje da se sa povećanjem količine austenita u strukturi povećava ukupna energija deformacije pre pojave loma. Ono što je glavna razlika TWIP u odnosu na ostale prikazane čelike, je niža vrednost granice tečenja. (Napomena: ovde je reč o čelicima kod kojih je prioritet energija ispod krive, a ne granica tečenja!). Zato se pretpostavlja da TWIP čelici mogu imati veoma značajnu ulogu u ovoj oblasti.



Slika 3. Krive ojačavanja različitih čelika visoke čvrstoće. (DP-dvofazni čelici; TRIP – čelici kod kojih je transformacijom izazvana plastičnost; TWIP - Fe-18Mn-1.5Al-0.6C [1,2,6-8])

Da bi se povećala granica tečenja, klasični pristup je smanjenje veličine austenitnog zrna, koje se izvodi prethodnom deformacijom. Na slici 4 je prikazan uticaj veličine zrna na deformaciono ponašanje Fe-22Mn-0.6C TWIP čelika. U rasponu veličine zrna između 1 i 18 μm , sa smanjenjem veličine zrna, granica zrna se povećava, a smanjuje se duktilnost.

Ovo ponašanje u potpunosti odgovara Hall-Petch zavisnosti, iako je ona u osnovi razvijena za slučaj deformacije klizanjem u toku koje ne dolazi do dvojnikanja. Smatra se da se smanjenjem veličine zrna dodatno teže formiraju ćelije ubnutar zrna u kojima će se stvoriti finiji dvojnici, koji na taj način povećavaju i granicu tečenja i brzinu deformacionog ojačavanja.



Slika 4. Uticaj veličine zrna na deformaciono ponašanje Fe-22Mn-0.6C TWIP čelika [2]

Na granicu tečenja i deformaciono ponašanje veliki uticaj ima i sadržaj legirajućih elemenata. Dodatak legirajućih elemenata ima za cilj da pored povećanja granice tečenja, spreči izdvajanje cementita u toku žarenja i da smanji sklonost ka vodoničnoj krtosti.

Uopšte uzev, razvoj TWIP čelika se zasniva na ispunjenju sledećih zahteva [4]:

1. zadržavanje austenitne strukture u celom temperaturnom intervalu prerade
2. sprečavanje pojave martenzita u toku hladne prerade
3. povećanje granice tečenja na sobnoj temperaturi
4. sprečavanje stvaranja karbida
5. omogućavanje prerade na postojećoj opremi (konvencionalne linije kontinuiranog livenja i tople valjaonice)
6. odlaganje početka dvojnikanja ka većim stepenima deformacije, kroz kontrolu EGR.

Smatra se da veoma povoljan uticaj na povećanje granice tečenja mogu imati mikrolegirajući elementi, kroz

uticaj na kinetiku rekristalizacije, kao i izdvajanje finih karbida. Za legiranje TWIP čelika u ovom cilju se koriste elementi koji imaju veliki afinitet prema ugljeniku i lako stvaraju fine karbide, kao što su vanadijum, niobijum, titan, hrom. Smatra se da karbidi ovih elemenata zbog svojih veoma malih dimenzija (oko 30nm!) otežavaju kretanje dislokacija i povećavaju granicu tečenja, dok sa druge strane ne utiču na dvojnikanje. Na primer, u Fe-22Mn-0.6C TWIP čeliku, dodatak 0.25Si-0.25V-0.20Cr povećava granicu tečenja na 580MPa, a zateznu čvrstoću na 1160MPa [1-4].

Dodatak aluminijuma u količinama između 1.5 i 2.0% ima za cilj da spreči stvaranje cementita nakon toplog valjanja ili žarenja. Takođe, dodatak aluminijuma poboljšava homogenost u toku same deformacije, tako da izostaje pojava diskontinuiteta. Sličan efekat ima i silicijum, ali njegov sadržaj zavisi i od ostalih legirajućih elemenata, pošto utiče na livkost čelika.

U tabeli 1 je dat pregled uticaja pojedinih legirajućih elemenata na osobine TWIP čelika.

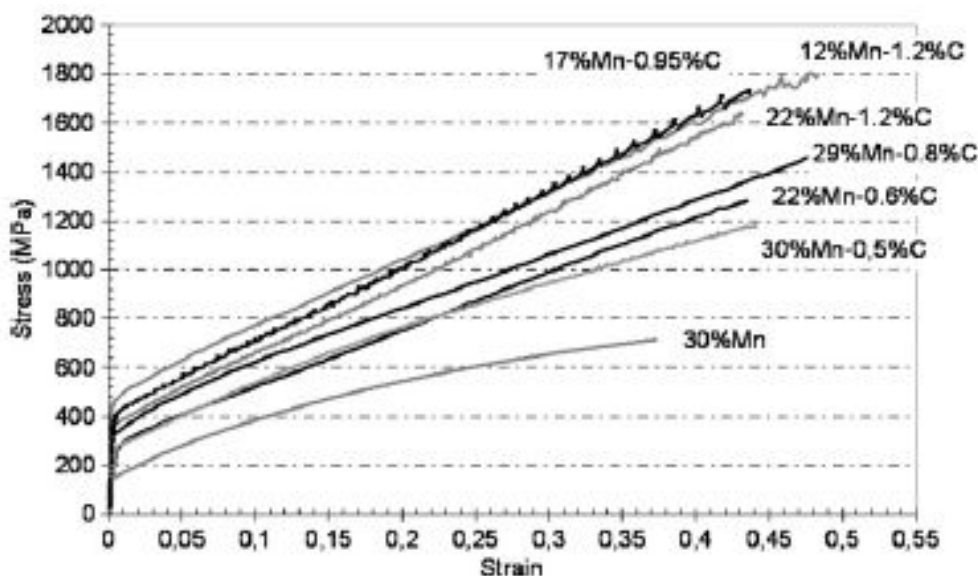
Tabela 1. Uticaj pojedinih legirajućih elemenata na osobine TWIP čelika [3]

Efekat	C	Mn	Si	B	Ti	N	Al
Stabilizacija austenita	√	√				√	√
Rastvarajuće ojačavanje austenita	√		√			√	√
Usitnjavanje ε martenzita			√				√
Topla prerada				√	√		

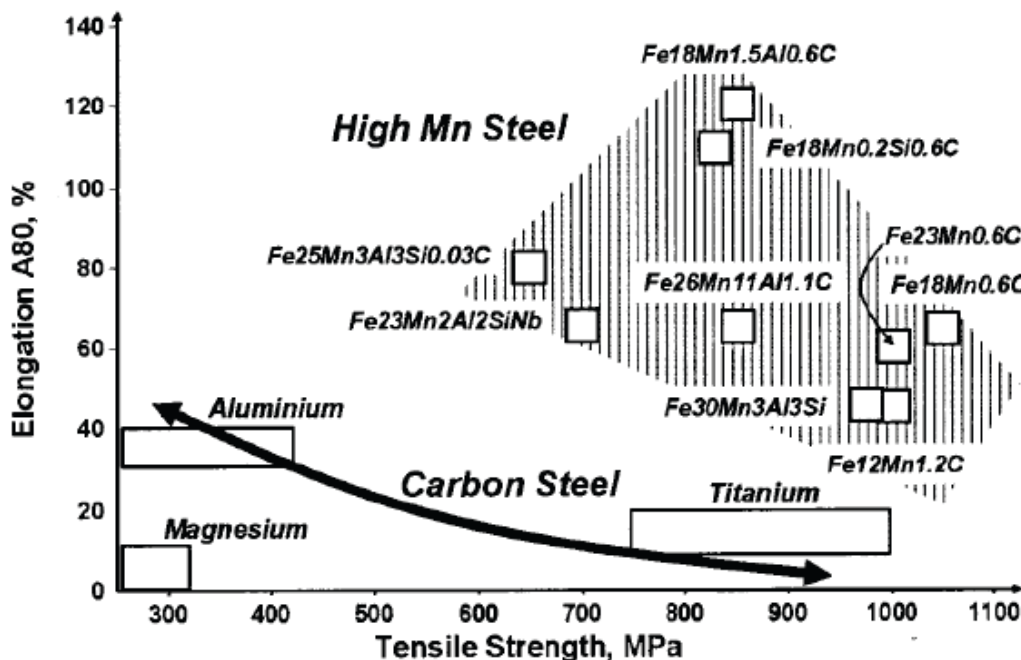


Na slici 5 su date krive ojačavanja za veći broj čelika čiji sastav se nalazi u granicama 12-30%Mn, 0.5-1.5%C. Dijagram ukazuje da na otpor deformaciji najviše utiče sadržaj ugljenika. Pri istom sadržaju mangana, dodatak ugljenika dovodi do povećanja kako granice tečenja, tako i napona u toku testa jednoosnim zatezanjem. Praktična posledica je mogućnost apsorbovanja veće

energije u toku ispitivanja. Zbirni uticaj legirajućih elemenata na odnos čvrstoće i plastičnosti je dat na slici 6. Osenčeno područje predstavlja oblast za koju se komercijalizuju TWIP čelici. U odnosu na obojene metale, TWIP čelici imaju povoljniju kombinaciju čvrstoće i plastičnosti.



Slika 5. Uticaj sadržaja ugljenika i mangana na deformaciono ponašanje TWIP čelika [2].



Slika 6. Zbirni uticaj legirajućih elemenata na odnos čvrstoće i plastičnosti [1].

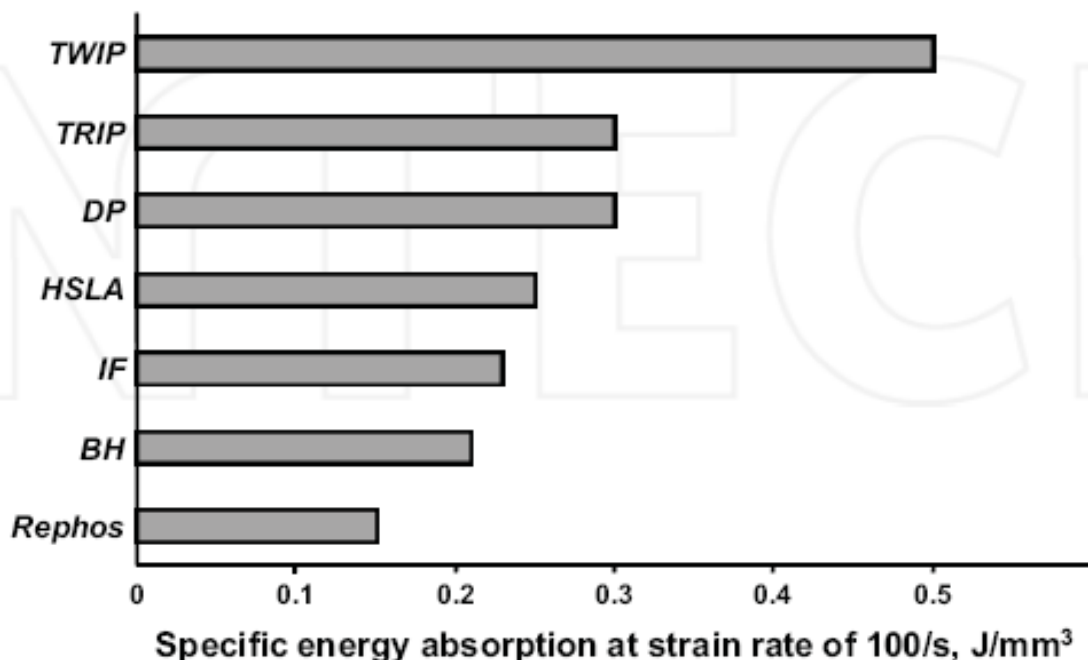
Zbog najvećeg uticaja koji na granicu tečenja imaju ugljenik i mangan, u literaturi se opis zavisnosti veličine zrna od sadržaja legirajućih elemenata svodi na uticaj ova dva elementa i opisuje jednačinom [1,2]:

$$\sigma_o = 228 + 187C - 2Mn$$



Zanimljivo je napomenuti da svi legirajući elementi u ovim čelicima imaju manju atomsku masu i gustinu od železa. Posledica ove činjenice je da svaki dodatak legirajućih elemenata ima za posledicu i smanjenje gustine čelika, što rezultuje smanjenjem težine izrađenih komponenti. Na ovaj način se smanjuje težina vozila,

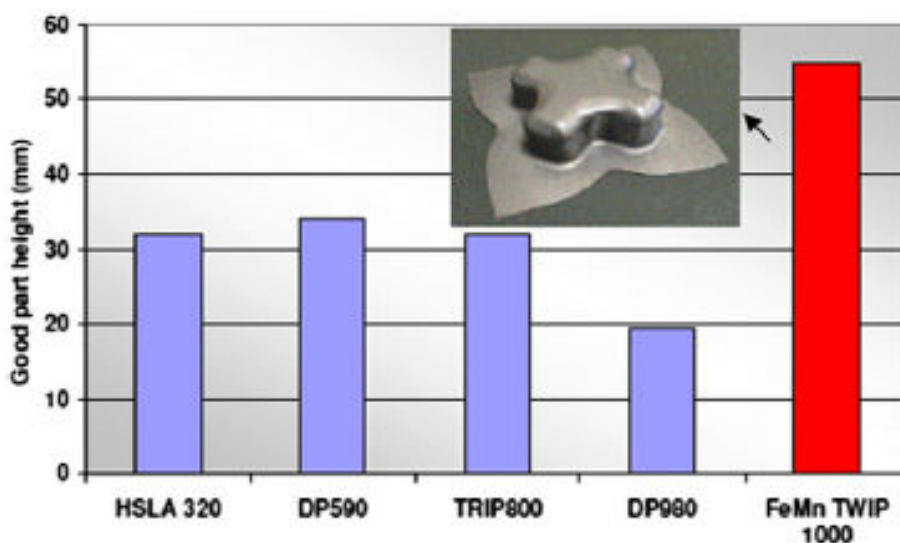
potrošnja goriva i emisija CO₂, što predstavlja stalni zahtev konstruktorima. Na slici 7 je prikazana specifična apsorbirana energija udara za različite vrste čelika koje se koriste u autoindustriji. TWIP čelici imaju superiornu moć apsorpcije udara.



Slika 7. Specifična apsorbirana energija pri brzini deformacije 100s⁻¹ [4]

Sposobnost oblikovanja TWIP čelika je jedan od dominantnih procesnih zahteva. Zbog velike plastičnosti i indeksa deformacionog ojačavanja, TWIP čelici su veoma pogodni za preradu dubokim izvlačenjem, slika 7. Za isti nivo čvrstoće, ovi čelici imaju više od dva puta bolju sposobnost oblikovanja, što omogućava da se u jednostepenoj operaciji presovanja proizvedu delovi

veoma kompleksnih geometrija, slike 8 i 9. Treba napomenuti da i u zonama u kojima se javlja dvoosno zatezanje dolazi do intenzivnijeg ojačavanja, te da će delovi imati različitu strukturu i osobine u različitim zonama. Ove nehomogenosti nisu nepovoljne pošto je čvrstoća na tim mestima veća od prosečne.



Slika 8. Maksimalna visina u testu dubokog izvlačenja 22Mn–0.6C TWIP čelika zatezne čvrstoće 1000 MPa[2].

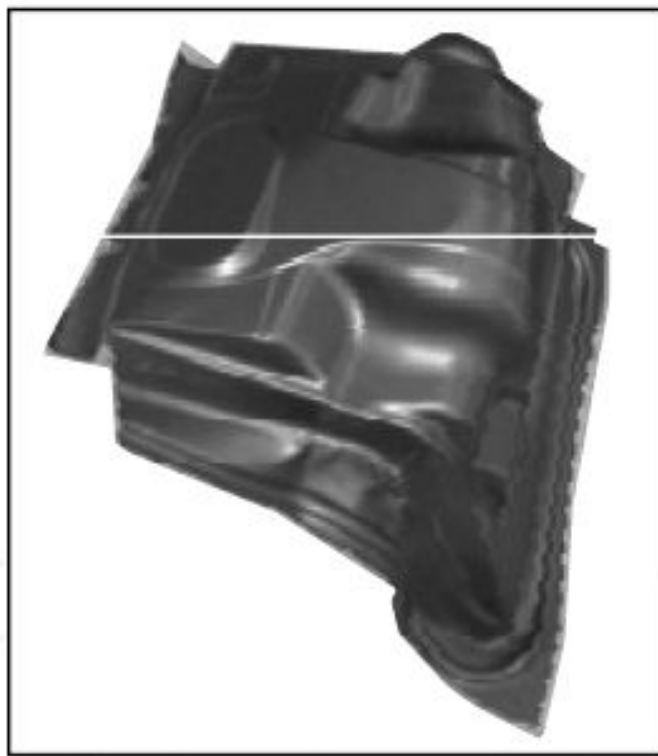


Prema tome, finalnu mikrostrukturu posle hladne deformacije karakterišu veoma visoka čvrstoća i dobra žilavost. Ove osobine su upravo i zahtev autoindustrije, ali su i veoma oštar uslov kada se npr. zahteva mašinska obradljivost. Probijanje otvora u čeliku velike žilavosti predstavlja problem sa aspekta poštovanja tolerancija dimenzija i mogućnosti da dođe do plastičnog tečenja u trenutku dodira alata sa metalom, pošto se za dobru mašinsku obradljivost traži čak i snižena žilavost. Takođe, naknadno zagrevanje TWIP čelika, do kojeg dolazi u toku npr. zavarivanja može imati poguban uticaj na mehaničke osobine, jer se može očekivati da u ZUT-u dođe do potpune rekristalizacije koja će izazvati smanjenje gustine dislokacija i nestanak dvojnika, a time i smanjenje čvrstoće. Ovi fenomeni su sada u fokusu istraživanja i oni se prevazilaze uglavnom dodatkom legirajućih elemenata (npr. Ti ili B koji smanjuju pokretljivost granica zrna i subzrna i time smanjuju efekat rekristalizacije), dodatkom Cr čak postoji intencija

da se TWIP čelici proizvedu u nerđajućoj varijanti i sl. Veoma je oštar i zahtev da se TWIP čelici proizvode na postojećoj opremi, uz minimalne korekcije/modifikacije.

Visok sadržaj mangana je veoma veliki problem zbog velikog afiniteta mangana prema kiseoniku, tako da velika količina Mn ima tendenciju da pređe u oksid i time u trosku. Ova tendencija mangana se nastavlja i pri toplom valjanju, tako da se veoma lako formiraju oksidi na površini. Sa druge strane, hladno valjanje čelika sa visokim sadržajem mangana koje dovodi do postizanja visoke čvrstoće je praćeno porastom otpora valjanju, te se kao ograničenje može javiti snaga motora na valjačkim stanovima [1-4].

Sadržaj aluminijuma je ograničen na najviše 3%, pošto se u slučaju većeg sadržaja može stvoriti Fe_2Al_5 intermetalna faza čija je tačka topljenja veoma niska (oko $1170^{\circ}C$), koja je krta i raspoređuje se po granicama zrna [1-3].



Slika 9. Auto delovi napravljeni od TWIP čelika dobijeni jednom operacijom presovanja [2,4].

UMESTO ZAKLJUČKA

Dvojnikanjem izazvana Plastičnost (TWinning Induced Plasticity – TWIP) u čelicima je fenomen koji je omogućio razvoj zasebne grupe čelika za koju se pretpostavlja da će imati masovnu upotrebu, naročito u autoindustriji. Glavni legirajući element u ovim čelicima je mangan, i to u količini koja može varirati između 15 i 35%. Pored mangana, ovi čelici mogu sadržati do 3%Al, do 3%Si, do 1.5%C. Mikrostruktura TWIP čelika na

sobnoj temperaturi se sastoji od austenita koji je stabilisan značajnim dodatkom mangana, da bi se u toku deformacije stvarali dvojnici koji značajno povećavaju čvrstoću, uz zadržavanje odlične plastičnosti, tako da su čvrstoće od 1300-2000 MPa praćene izduženjem od minimalno 45%. Prepreka potpunoj komercijalizaciji ovih čelika je još uvek nedovoljno jasno ispunjenje tehnoloških zahteva, kao što su zavarljivost, koroziona postojanost, mašinska obradljivost i sl.

**Literatura**

1. Neu, R. W., "Performance and Characterization of TWIP Steels for Automotive Applications," *Materials Performance and Characterization*, Vol. 2, No. 1, 2013, pp. 244–284, doi:10.1520/MPC20130009. ISSN 2165-3992
2. O. Bouaziz, S. Allain, C.P. Scott, P. Cugy, D. Barbier, High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 15 (2011) 141–168
3. Liqing CHEN, Yang ZHAO and Xiaomei QIN, Some Aspects of High Manganese Twinning-Induced Plasticity (TWIP) Steel, A Review, *Acta Metall. Sin. (Engl. Lett.)* Vol.26 No.1 pp. 1—15 February 2013
4. Javier Gil Sevillano and Fernando de las Cuevas, Internal stresses and the mechanism of work hardening in twinning-induced plasticity steels, *Scripta Materialia* 66 (2012) 978–981
5. B.C. De Cooman, Jinkyung Kim and Seil Lee, Heterogeneous deformation in twinning-induced plasticity steel, *Scripta Materialia* 66 (2012) 986–991
6. B. C. De Cooman, Kwang-geun Chin and Jinkyung Kim, High Mn TWIP Steels for Automotive Applications, *New Trends and Developments in Automotive System Engineering*, Edited by Marcello Chiaberge, ISBN 978-953-307-517-4, 664 pages, Publisher: InTech, (2011)
7. I.Gutierrez-Urrutia and D.Raabe, Grain size effect on strain hardening in twinning-induced plasticity steels, *Scripta Materialia* 66 (2012) 992–996
8. O. Bouaziz, Strain-hardening of twinning-induced plasticity steels, *Scripta Materialia* 66 (2012) 982–985
9. Đorđe Drobnjak, *Fizika čvrstoće i plastičnosti*, TMF Beograd (1986)
10. Lais Mujica Roncery, Sebastian Weber and Werner Theisen, Welding of twinning-induced plasticity steels, *Scripta Materialia* 66 (2012) 997–1001