Sistematizacija visokočvrstih čelika

Horvatek, Nikola

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:122:877193

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

University North Digital Repository

Sveučilište
Sjever

Završni rad br. 290/PS/2019

Sistematizacija visokočrvstih čelika

Nikola Horvatek, 1520/336

Varaždin, srpanj 2019. godine

Sveučilište Sjever

Odjel za Proizvodno strojarstvo

Završni rad br. 290/PS/2019

Sistematizacija visokočvrstih čelika

Student

Nikola Horvatek, 1520/336

Mentor

Marko Horvat, dipl.ing.

Varaždin, srpanj 2019. godine

Sveučilište Sjever
Sveučilišni centar Varaždin
104. brigade 3, HR–42000 Varaždin

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za strojarstvo

STUDIJ preddiplomski stručni studij Proizvodno strojarstvo

PRISTUPNIK Nikola Horvatek | MATIČNI BROJ 1520/336

DATUM 08.07.2019. | KOLEGIJ Materijali II

NASLOV RADA Sistematizacija visokočrvstih čelika

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Systematization of high strength steels

MENTOR Marko Horvat, dipl. ing. | ZVANJE predavač

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. dr. sc. Zlatko Botak, viši predavač
2. Marko Horvat, dipl.ing., predavač
3. Katarina Pisačić, dipl.ing., viši predavač
4. Veljko Kondić, mag. ing. mech., predavač
5.

Zadatak završnog rada

BROJ 290/PS/2019

OPIS

U Završnom radu je potrebno obraditi slijedeća područja:
- prikazati ulogu čelika kao tehničkog materijala
- dati uvod u ulogu, svojstva i primjenu visokočvrstih čelika
- prikazati sistematizaciju visokočvrstih čelika
- opisati osnovne mehanizme očvrsnuća visokočvrstih čelika
- opisati osnovne grupe visokočvrstih čelika obzirom na prikazanu sistematizaciju
- u zaključku dati osvrt na temu Završnog rada

ZADATAK URUČEN 09.07.2019 | POTPIS MENTORA

REPUBLIKA HRVATSKA SVEUČILIŠTE SJEVER KOPRIVNICA

Sažetak

U ovom završnom radu se obrađuje tema sistematizacije visokočvrstih čelika. Visokočvrsti čelici se danas sve više upotrebljavaju u autoindustriji te za izradu posebnih konstrukcija koje zahtjevaju materijale boljih svojstava od konvencionalnih čelika. Visokočvrsti čelici se i dalje razvijaju, a prošli su kroz mnoge faze razvoja, stoga ih prema tim fazama možemo podjeliti u generacije, što je vrlo bitno za sistematizaciju samih visokočvrstih čelika.

U završnom radu se ukratko obrađuju čelici općenito, način proizvodnje, svojstva, legiranje i podjela čelika. Potom se veći dio rada odnosi na same visokočvrste čelike. Obrađuje se razvoj i ideja visokočvrstih čelika, mehanizmi očvršnuća, te sistematizacija prema različitim svojstvima i osobinama. Razrađuje se podjela visokočvrstih čelika na generacije, te se svaka generacija i vrsta čelika opisuje zasebno.

Ključne riječi: čelik, visokočvrsti čelik, sistematizacija, generacije

Abstract

In this thesis, the topic of systematization of high strength steels is discussed. High-strength steels are increasingly used in the auto industry and in the manufacture of special structures that require materials that have conventional steel. High-strength steels are still developing and have undergone many stages of development, so we can raise them to these phases in generations, which is very important for the systematization of high-strength steel itself.

In the thesis, the steels in general, the method of production, the properties, the alloy and the division of steel are briefly processed. Then, most of the thesis relates to high-strength steel itself. The development of high-quality steel, hardening mechanisms, and systematization according to different properties and characteristics are also dealt with. The division of high-strength steel on the generations is elaborated, and each generation and type of steel is described separately.

Key words: steel, high strength steel, systematization, generation

Popis korištenih oznaka i kratica

Oznaka	Opis oznake	Mjerna jedinica
A	koeficijent smika	-
A	Koeficijent interakcije dislokacija	-
b	Burgersov faktor	-
C	Koeficijent atoma legiranog elementa	-
D_z	Promjer zrna	nm
G	modul smika	N/mm^2
K	Koeficijent djelovanja granice zrna	$Nmm^{-3/2}$
K_i^F	Koeficijent očvrsnuća ferita	$N/mm^2/\%Le$
M	Masa	Kg
m	Faktor orijentacije	-
Re	granica razvlačenja	N/mm^2
Rm	vlačna čvrstoća	N/mm^2
T_{prij}	Prijelazna temperatura	°C
W_i^F	Maseni udio pojedinog elementa u feritu	-
$\Delta\tau_D$	Smično naprezanje	N/m^2
ρ	Gustoća dislokacija	mm/mm^3
λ	Međusobna udaljenost između središta čestica	nm
$(\Delta R_e)_Z$	Povećanje čvrstoće mehanizmom očvrsnuća	N/mm^2
$(\Delta R_e)_p$	Porast granice razvlačenja povišenjem udjela perlita	N/mm^2
$\Delta(\%P)$	Prirast masenog udjela ugljika	-
2,4 $((N/mm^2)/\%P)$	Iskustveni koeficijent	-

Kratica	Opis kratice
AHSS	Napredni visokočvrsti čelik (Advanced High Strenght Steel)
AUST.SS	Austenitni nehrđajući čelici
AIN	Nitrid
Al_2O_3	Aluminijev oksid
BCT	Volumno centrirana tetragonalna rešetka
BCC	Prostorno centrirana kubična rešetka
C	Ugljik
Cr	Krom
CP	Čelik sa složenom fazom (Complex Phase)
DP	Čelik sa duplom fazom (Dual Phase)
FCC	Plošno centrirana kubična rešetka
Fe	Željezo
HSS	Visokočvrsti čelik (High strenght steel)
L-IP	Lagani čelici sa induciranom plastičnošću
MS	Martenzitni čelik
Mn	Mangan
Mo	Molibden
Medium-Mn	Čelici sa srednjim sadržajem mangana
Nb	Niobij
Ni	Nikal
P	Fosfor
Q&P	Čelici dobiveni gašenjem i odvajanjem (Quenching and Partitioning)
S	Sumpor
Si	Silicij
Ti	Titan
TRIP	Čelici sa plastičnošću induciranom transformacijom
TWIP	Čelici sa plastičnošću induciranom pojavom dvojnih faza
TBF	TRIP potpomognuti bainitno feritni čelici (TRIP-aided Bainitic Ferrite)
V	Vanadij
W	Volfram
WPS	Specifikacije postupaka zavarivanja (Welding Procedure Specification)
δ – TRIP	Čelik sa δ feritom

Sadržaj

Uvod 1
1. Čelici 2
1.1. Važnost čelika 2
1.2. Svojstva čelika 3
1.3. Sistematizacija čelika 4
1.4. Proizvodnja čelika 6
1.5. Dezoksidacija 7
1.6. Legiranje čelika 8
1.7. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata 10
2. Konstrukcijski čelici 11
3. Visokočvrsti čelici 12
3.1. Razvoj 12
3.2. Općenito o visokočvrstim čelicima 14
3.3. Sistematizacija visokočvrstih čelika 15
3.4. Mehanizmi očvrsnuća 18
3.4.1. Očvrsnuće stvaranjem kristala mješanaca 19
3.4.2. Očvrsnuće dislokacijama 21
3.4.3. Očvrsnuće stvaranjem dispergiranih čestica ili izlučivanjem, precipitacijom 23
3.4.4. Očvrsnuće usitnjenjem kristalnih zrna 24
3.4.5. Očvrsnuće povišenjem udjela perlita 24
3.5. Problematika zavarivanja 28
3.6. Generacije visokočvrstih čelika 31
3.7. Visokočvrsti čelici prve generacije 32
3.7.1. High strenght low-alloy steel (HSLA) 32
3.7.2. Dual phase steel (DP) 34
3.7.3. Complex phase steel (CP) 36
3.7.4. Transformation Induced Plasticity steels (TRIP) 38
3.7.5. Martensitic steels 40
3.8. Visokočvrsti čelici druge generacije 41
3.8.1. Twinning-induced plasticity steel (TWIP) 42
3.8.2. Light weight steels with induced plasticity (L-IP) 43
3.8.3. Austenitic stainless steels 44
3.9. Visokočvrsti čelici treće generacije 45
3.9.1. Medium-Mn steel 47
3.9.2. TRIP-aided Bainitic Ferrite steel (TBF) 48
3.9.3. Quenching and Partitioning steels (Q&P) 49
3.9.4. δ – TRIP steel 50
4. Zaključak 52
5. Literatura 53

Popis slika 55
Popis dijagrama 56
Popis tablica 57

Uvod

Visokočrvrsti čelici pripadaju skupini konstrukcijskih čelika. Zanimljivi su zbog visoke granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, te ujedno i visokog dopuštenog naprezanja u eksploataciji.

Zahvaljujući ovakvim svojstvima, primjena visokočvrstih čelika omogućuje izrade konstrukcija manjeg nosivog presjeka, što rezultira manjom masom i volumenom same konstrukcije, sniženjem ukupne cijene materijala. Primjenom ovakvih čelika kod izrade motornih vozila, snizujemo ukupnu masu vozila, te samim time potrošnju goriva.

Zbog relativno skupe proizvodnje ovakve vrste čelika, koriste se za izradu djelova i konstrukcija koji će biti visokoopterećeni za vrijeme eksploatacije. To su dijelovi vozila, radnih strojeva, zrakoplova, kranova i dizalica, dijelovi oružja i drugi.

Ovim radom će najprije biti opisan čelik, njegova zanimljivost te primjena čelika u današnjem svijetu. Ukratko će biti navedena podjela čelika, te svojstva pojedine grupe čelika. Potom se obrađuje tema ovog završnog rada, odnosno visokočvrsti čelici. Navesti će se njihova svojstva i primjena, mehanizmi očvrsnuća, te obraditi sistematizacija visokočvrstih čelika. Nakon toga će se navesti podjela prema generacijama, te razraditi pojedina generacija visokočvrstih čelika.

1. Čelici

1.1. Važnost čelika

Željezo kao tehnički materijal, zbog lošijih mehaničkih svojstava, loše preradljivosti, rijeđe se primjenjuje za tehničku upotrebu. Dok čelik, kao legura željeza sa najviše 2% ugljika te ostalih legirnih elemenata predstavlja tehnički materijal mnogo boljih mehaničkih svojstava. Zbog toga, pronalazi široku upotrebu u današnjoj tehnici. [1]

Postupci proizvodnje čelika su se razvijali kroz povijest, što je rezultiralo bržim razvojem tehnologije, njegovom primjenom u industriji te razvojem samog društva. Danas se napredak industrije, gospodarstva, tehnologije bez čelika ne može zamisliti. Proizvodnja i potrošnja čelika predstavlja mjerilo industrijskog razvoja pojedine države. Industrija proizvodnje, prerade i prodaje čelika zapošljava velik broj radnika, te donosi veliki kapital, što sam čelik čini vrlo važnim materijalom u strateškom, gospodarskom i tehnološkom smislu. [2]

Čelik se najviše koristi od svih željeznih legura, te se nalazi na trećem mjestu iza drveta i cementa na ljestvici najviše korištenih materijala u industriji, graditeljstvu i drugim granama, što je još jedan pokazatelj njegove izrazite važnosti. Jedna od prednosti čelika te vrlo važno svojstvo je što se može potpuno reciklirati, što ga čini prihvatljivim za okoliš, te ujedno i najrecikliranijim materijalom. Naziva se još ”Zeleni maaterijal”. [2]

Veliku ulogu čelika u današnjem svijetu prikazuju podaci da se proizvodi deset puta više čelika u odnosu na druge metale i legure zajedno. Prosječna potrošnja čelika po glavi stavnovnika u Japanu iznosi 659 kg, u SAD-u 450 kg, Njemačkoj 500kg, dok u svijetu iznosi oko 150kg po glavi stanovnika, što neke organizacije UN-a uzimaju kao stupanj razvijenosti industije pojedine države. [3]

Jedno od svojstava čelika koje ga ističe pred drugim materijalima predstavlja mogućnost dobivanja željenih svojstava legiranjem i toplinskom obradom. Mogu se postići različite kombinacije svojstava kao što su tvrdoća, žilavost, čvrstoća, rastezljivost, oblikovljivost, zavarljivost te mnoge druge. Zahvaljujući takvim povoljnim svojstvima, čelik pronalazi raznovrsnu primjenu u svim granama industrije, građevinarstvu, prometu, poljoprivredi i drugim djelatnostima.

Velika važnost čelika u tehnici pridonosi razvoju novih vrsta čelika, odnosno razvoju boljih svojstava, jednostavnijih i jeftinijih postupaka proizvodnje i prerade, što omogučuje čeliku konkurentnost pred drugim materijalima, te profitabilnost u gospodarskom smislu. [2]

1.2. Svojstva čelika

Čelik je metastabilno kristalizirana legra željeza (Fe) i ugljika (C). Maksimalni sadržaj ugljika u čeliku iznosi 2% mase, dok ostali udio iznosi željezo, primjese, nečistoće i legirni elementi. U čeliku se javljaju korisne primjese kao što su krom (Cr), molibden (Mo), nikal (Ni), te štetne primjese kao što su fosfor (P) i sumpor (S). [4]

Promjenom sastava dodavanjem legirnih elemenata, toplinskom obradom, deformacijom i drugim postupcima, dobivaju se različite kombinacije svojstava koja ovise o kemijskom sastavu, mikrostrukturi, obliku i dimenzijama samog proizvoda. Velik utjecaj na svojstva čelika ima udio ugljika u njegovoj masi, odnosno, povećanjem udjela ugljika raste prokaljivost, tvrdoća, što rezulzira slabijom zavarljivošću, te otpornošću na plastičnu deformaciju, dok manjim udjelom ugljika dobivamo veću žilavost, manju tvrdoću, te bolju zavarljivost. Poboljšana čvrstoća može se dobiti hladnom deformacijom. [2]

Uz dobra mehanička svojstva, lako se mogu obrađivati odvajanjem čestica, te spajati sa drugim metalima i legurama gotovo svim postupcima spajanja kao što su zavarivanje, lijepljene i lemljenje. Jedan od nedostataka je što vrlo lako korodiraju na određenim okolnim uvjetima, no mogu se zaštitit od korozije raznim postupcima. [3]



Slika 1.1 *Zavarivanje čelika [5]*

1.3. Sistematizacija čelika

Čelici se mogu podijeliti prema [2]:

a) načinu proizvodnje
b) svojstvima
c) mikrostrukturi
d) kemijskom sastavu
e) primjeni
f) obliku i stanju

a) Prema načinu proizvodnje, čelici se proizvode [2]:
   - pretaljivanjem
   - sekundarnom metalurškom obradom
   - dobivanjem u konvertorima
   - elektropretaljivanjem

b) Čelici mogu posjedovati karakteristična svojstva kao što su [2]:
   - oblikovljivost
   - otpornost na trošenje i na visoke temperature
   - visoka granica razvlačenja
   - visoka vlačna čvrstoća
   - žilavost pri niskim temperaturama
   - zavarljivost i druga.

c) Prema tipu mikrostrukture, postoje čelici [2]:
   - austenitni
   - feritni, perlitni
   - feritno-perlitni
   - martenzitni i drugi.

d) S pogledoma na kemijski sastav, mogu se okarakterizirati prema [2]:
   - stupnju legiranosti
   - vrsti legirnih elemenata u sastavu
   - udjelu ugljika u masi
   - plemenitosti i kvaliteti

Prema stupnju legiranosti mogu biti [2]:

- nelegirani
- legirani

Legirni elementi koji se koriste su Ni, Cr, Si, Mn, W, Mo, V, ili kombinacije tih elemenata [2].

Prema udjelu ugljika u masi čelici mogu biti [2]:

- niskougljični
- srednjeugljični
- visokougljični.

e) Prema primjeni, čelici se dijele na dvije osnovne skupine [2]:

- konstrukcijski
- alatni čelici

Konstrukcijski čelici se koriste za proizvodnju nosivih konstrukcija, za izradu strojnih dijelova kao što su vratila, osovine, zupčanici i dugi. S druge strane, alatni čelici se koriste za izradu alata za rad u hladnom i toplom stanju, za izradu brzoreznih čelika. [2]

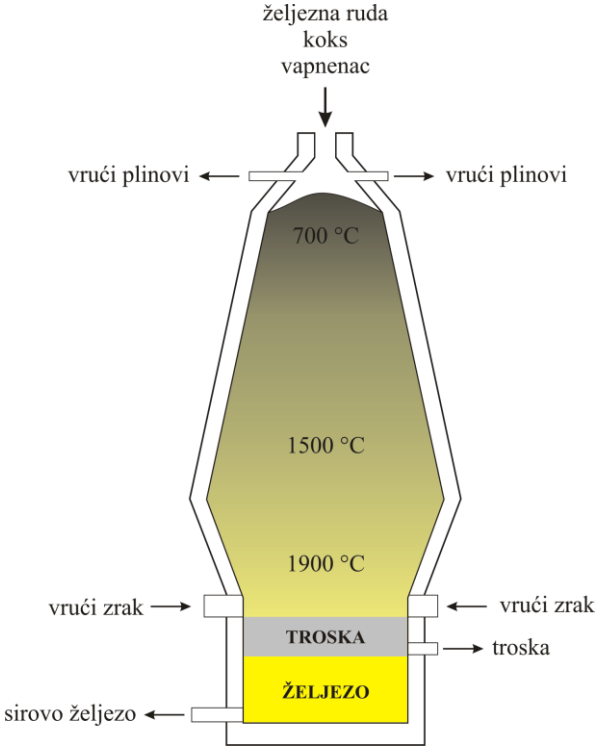
Prema navedenim karakteristikama, pojedina vrsta, odnosno pojedini čelik može sadržavati kombinaciju navedenih svojstava i karakteristika koje ga čine prihvatljivim i visoko korištenim tehničkim materijalom u svim granama industrije. Zbog dobrih mehaničkih svojstava, mogućnosti raznolike primjene, čelik se najviše koristi od svih tehničkih materijala. [2]



Slika 1.2 *Čelični proizvodi [6]*

1.4. Proizvodnja čelika

Čelik se dobiva preradom i taljenjem željezne rude. U prirodi, željezna ruda se javlja u obliku sulfida, karbonata i oksida. Prije taljenja, željezna ruda se usitnjuje, melje, prži, suši te obogaćuje kako bi se dobila lakše topiva troska. Željezna ruda i ugljen se zagrijavaju u visokoj peći (**slika 1.3**). Dodaje se vapnenac koji omogućuje čišćenje nečistoća, koji se taljenjem topi i pretvara u trosku, koja se kasnije odstranjuje. Polaganim hlađenjem dobiva se sivo sirovo željezo iz kojeg je izlučen grafit, dok se naglim hlađenjem dobiva bijelo sirovo željezo iz kojeg se nije stigao izlučiti grafit. Bijelo sirovo željezo se koristi za proizvodnju čelika, čeličnih lijevova te bijelog tvrdog lijeva, dok se sivo sirovo željezo koristi za proizvodnju sivog lijeva. Sirovo željezo se najčešće ne hladi, nego se odmah prerađuje u čelik. Daljnjom preradom u čeličanama, oslobađa se višak ugljika iz sirovog željeza, dodaju se legini elementi te optimizira kemijski sastav čime se dobiva sirovi čelik. [7]



Slika 1.3 *Visoka peć [8]*

Ljevovi određenog sastava se lijevaju u kokile, odnosno kalupe koji im daju potreban konačan oblik ili oblik potreban za danju obradu. Razlikujemo kokile za proizvodnju proizvoda u obliku ingota spremnog za danju obradu deformiranjem kao što su prešanje, kovanje, valjanje i drugi postupci. Dok sa druge strane postoje kokile za lijevanje gotovih proizvoda, koji se dalje obrađuju obradom odvajanjem čestica i spremni su za upotrebu. [3]

1.5. Dezoksidacija

Dezoksidacija predstavlja otklanjanje kisika tijekom proizvodnje čelika. Čelik dolazi u dodir sa kisikom i dušikom i pri višim temperaurama može otopiti velike količine plinova. Stoga se prema načinu pretaljivanja i stupnju dezoksidacije razlikuju:

a) Nesmireni čelici
b) Polusmireni i smireni čelici
c) Posebno smireni čelici

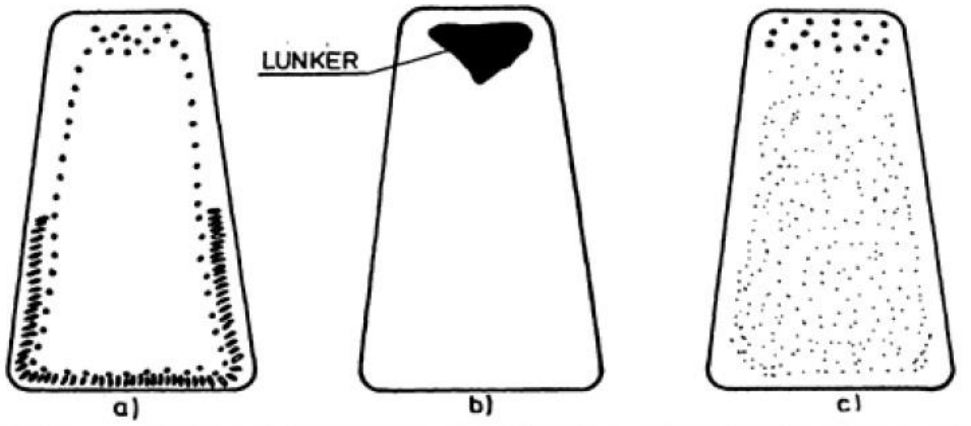
Nesmireni čelici su čelici kod kojih jako razvijanje plinova uzrukuje ”kuhanje” rastaljenog metala što nazivamo nemirnim ”skrućivanjem”. Tijekom skrućivanja se u kokili pojavljuju plinski mjehurići koji kompenziraju smanjenje volumena ingota tijekom hlađenja, te sprječavaju nastanak pukotina. Plinski mjehurići se mogu odstraniti tako da se zatvaraju uslijed obrade deformiranjem. Moguća je pojava oksidacije u plinskim mjehurićima koja kasnije uzrukuje sitne napukline koje izazivaju koncentraciju naprezanja. Ti čelici su skloni starenju, imaju višu prijelaznu temperaturu, te su slabije zavarljivi. [4]

Sadrže maksimalno 0,3% C i 0,02% Si. Površinski sloj im je mekši što im omogućava lakšu obradu deformiranjem u hladnom stanju. Koriste se za izradu šipki i limova. [9]

Smireni čelici nastaju procesom dezoksidacije kod kojeg se dodaje manja količina silicija, mangana i drugih elemenata koji na sebe vežu kisik, što omogućuje stvaranje oksida koji se izdvajaju u trosku. U smirenim ingotima nema pojave plinskih mjehurića i nije izražena segregacija, no u glavi ingota dolazi do pojave šupljina, koju je potrebno odstraniti odsjecanjem prije obrade valjanjem. Odlikuje ih homogena mikrostruktura, dobra mehanička svojstva te dobra zavarljivost, mogućnost toplinske obrade, te otpornost na snižene temperature. Smireni čelici sadrže više od 0,3% C i od 0,15 do 0,6% Si. [4]

Polusmireni čelici kao dezoksidanse sadrže mangan i slicij, te im se još dodaje silikokalcij i aluminij koji na sebe veže preostali kisik tvoreći Al_2O_3 i dušik tvoreći AlN. Polusmireni čelici su žilavi, sadrže mali maseni udio nečistoća, te su slabo osjetlivi na krhki lom. [4]

Koriste se za izradu profila i debljih limova. Sadrže od 0,3 do 0,9% C i oko 0,15% Si. [9]



Slika 1.4 *Presjek ingota: a) nesmireni, b) smireni, c) polusmireni [10]*

1.6. Legiranje čelika

Jedna od glavnih prednosti čelika u odnosu na druge materijale je mogućnost širokog opsega mjenjanja svojstava legiranjem. Legirani čelik osim željeza, ugljika i primjesa sadrži jedan ili više legirnih elemenata. Dodavanjem određenog legirnog elementa, dobivamo željena svojstva ili kombinaciju više svojstva. Ta svojstva se mogu poboljšati, dok se u isto vrijeme određena svojstva pogoršavaju, što zahtjeva određeni kompromis između tih svojstava. [7]

Prema europskim normama, čelik je legiran ako sadrži jedan ili više legirnih elemenata čiji maseni udio prelazi vrijednosti navedene u **tablici 1.1** [4]:

Legirni elementi	Granični maseni udio [%]
Aluminij	0,10
Bor	0,0008
Krom	0,30
Kobalt	0,10
Bakar	0,40
rijetke zemlje - lantanidi	0,05
Mangan	1,60
Molibden	0,08
Nikal	0,30
Niobij	0,05
Olovo	0,40
selen; telur	0,10
Silicij	0,50
Titan	0,05
volfram, vanadij	0,10
Cirkonij	0,05
ostali elementi (osim c, p, s ,n i o)	0,05

Tablica 1.1 *Granični maseni udio legirnih elemenata [4]*

Čelici se prema masenim udjelima legirnih elemenata dijele na [4]:

a) Niskolegirane – čelici sa masenim udjelom legirnih elemenata do 5%
b) Visokolegirane – čelici sa masenim udjelom legirnih elemenata većim od 5%

Čelik se najčešće legira elementima kao što su: krom, nikal, vanadij, volfram, mangan, silicij i molibden, dok se u posebnim slučajevima još koriste: kobalt, titan, aluminij, niobij i drugi elementi. S druge strane, postoje elementi koji u manjim masenim udjelima daju bolja svojstva čelika, dok u većim masenim udjelima znatno pogoršavaju svojstva. Ugljik predstavlja jedan od tih elemenata. Povećanjem njegovog masenog udjela, čeliku se povećava tvrdoća, no smanjuje se rastezljivost, zavarljivost, oblikovljivost i druga svojstva. Postoje elementi kao što su vodik, sumpor i kisik koje je potrebno izbjegavati, odnosno, potrebno ih je istisnuti iz legure upotrebom drugih legirnih elemenata. [4]

Legirni elementi se u čelicima mogu pojaviti [1]:

a) Rastvoreni u α-željezu ili γ-željezu, odnosno BCC i FCC rešetci
b) Kao spojevi sa željezom ili međusobno, tvoreći tako karbide i intermetalne spojeve
c) Kao nemetalni uključci (oksidi, nitridi, fosfidi i sulfidi)

Prema utjecaju legirnih elemenata na Fe-C dijagram, legirni elementi se djele na [1]:

a) Gamagene elemente – elementi koji proširuju austenitno područje, to su nikal mangan kobalt
b) Alfagene elemente – elementi koji proširuju područje ferita, to su krom, volfram, molibden i vanadij

Prema čistoći, odnosno masenom udjelu fosfora i sumpora, čelici se dijele na [1]:

a) Obični čelik - ukupni maseni udio P i S zajedno smije iznositi 0,100%
b) Kvalitetni čelik – maksimalni udio P do 0,045%, te maskimalni udio S do 0,045%
c) Plemeniti čelik - maksimalni udio P do 0,035%, te maskimalni udio S do 0,030%

Legirani čelici imaju višu cijenu zbog skupih legirnih elemenata, no ta cijena je opravdana zbog dobrih mehaničkih svojstava i veće mogućnosti primjene, izrade lakših konstrukcija, veće trajnosti i pouzdanosti. [1]

1.7. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata

Ugljik (C) je sastavni element čelika, pa ga i ne svrstavamo u grupu legirnih elemenata, no povećanje njegovog masenog udjela znatno utječe na svojstva čelika. Čelik može maksimalno sadržavati 2,03% ugljika. On omogućuje dobru zakaljivost, odnosno dobru tvrdoću svih čelika, dok nekaljivim čelicima povisuje čvrstoću i granicu razvačenja, no smanjuje duktilnost. [4]

Mangan (Mn) djeluje kao dezoksidator, a na sebe veže sumpor, čime se smanjuje njegovo štetno djelovanje i stvaranje FeS u obliku sulfida. Legiranjem sa manganom, poboljšava se prokaljivost. U nezakaljenim čelicima povećava čvrstoću i žilavost. [4]

Silicij (Si) također djeluje kao dezoksidator. Često se koristi kao legirni element u čelicima za opruge, zbog dobrog utjecaja na povišenje granice elastičnosti, čvrstoće i otpornosti na trošenje. [4]

Molibden (Mo) se najčešće ne koristi zasebno, nego u kombinaciji sa drugim legirnim elementima. Molibden utječe na povišenje prokaljivosti, granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i granice puzanja. [4]

Nikal (Ni) je gamageni element, odnosno proširuje područje austenita. Većinom se koristi u kombinaciji sa drugim elementima zbog svoje visoke cijene. Koristi se za čelike kojima je potrebna kemijska i korozivna postojanost, vatrootpornost, otpornost na povišene i niske temperature. [4]

Krom (Cr) je alfageni element, odnosno, proširuje područje ferita, što omogućuje dobru prokaljivost i sniženje temperature početka stvaranja martenzita. Krom je jak karbidotvorac, odnosno tvori vrlo tvrde karbide od cementita. Legiranje kromom daje dobru korozijsku postojanost, te snizuje toplinsku vodljivost i rastezljivost čelika. [4]

Aluminij (Al) djeluje kao dezoksidator. Daje dobru otpornost na koroziju pri povišenim temperaturama. [4]

Titan (Ti) je poznat kao najjači karbidotvorac, jer tvori karbide koji su otporni na povišene temperature. Titan sužava austenitno područje, daje sitnozrnatu strukturu. [4]

Vanadij (V) se zbog visoke cijene najčešće koristi u kombinaciji sa drugim elementima. Stvara karbide, čime povećava tvrdoću i trajnost pri povišenim temperaturama. Koristi se za legiranje čelika za opruge, jer povišava granicu razvlačenja. [4]

Volfram (W) tvori vrlo tvrde i postojane karbide pri povišenim temperaturama. Koristi se za brzorezne čelike jer daje dobru otpornost na trošenje. Daje još i povišenu granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću. [4]

2. Konstrukcijski čelici

Konstrukcijski čelici su najkorišteniji čelici. Koriste se za izradu nosivih i zavarenih konstrukcija kao što su mostovi, dijelovi vozila, brodske konstukcije, te za izradu dijelova strojeva koji izvršavaju razne funkcije poput vratila, opruga, ventila, vijaka. [1]

Kako bi mogli obavljati svoju funkciju, konstrukcijski čelici moraju imati određena mehanička svojstva, otpornost na trošenje i koroziju, te određena tehnološka svojstva. Svi konstrukcijski čelici sadrže neka od navedenih svojstva ili kombinaciju istih. Stoga je potrebno poznavati svojstva pojedinih konstrukcijskih čelika kako bismo ih mogli pravilmo primjeniti. [4]

S pogledom na mehanička svojstva, konstrukcijski čelici moraju imati visoku granicu razvlačenja uz prisutnost dobre plastične deformabilnosti, zadovoljavajuću žilavost i dinamičku izdržljivost i čvrstoću. S obzirom na otpornost na trošenje, moraju imati što manji gubitak mase kod međusobnog djelovanja elemenata u dodiru s drugim elementima. Vrlo je bitna i otpornost na koroziju, time konstrukcijski čelici moraju imati određenu otpornost prema koroziji i djelovanju agresivnih tekućina, otpornost prema oksidaciji pri povišenim temperaturama. Kako bi zadovoljili određene tehnološke zahtjeve, konstrukciji čelici moraju biti obradivi obradom odvajanjem čestica, obradivi hladnom deformacijom, te povrh svega dobro zavarljivi. [7]

Danas se primjenjuje velik broj različitih konstrukcijskih čelika, neki od njih su [7]:

- Opći konstrukcijski čelici za nosive konstrukcije
- Čelici povišene čvrstoće
- Čelici za opruge
- Čelici za poboljšavanje
- Čelici za rad pri povišenim temperaturama
- Visokočvrsti čelici i drugi.



Slika 2.1 *Čelici za nosive konstrukcije [11] i čelici za opruge [12]*

3. Visokočvrsti čelici

3.1. Razvoj

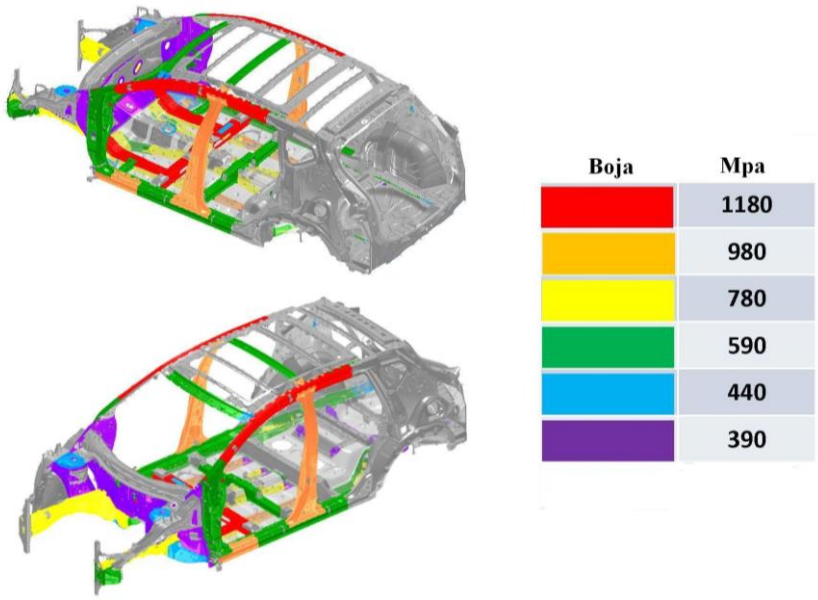
Visokočvrsti čelici pripadaju skupini konstrukcijskih čelika. Sve bržim razvojem tehnologije, konstrukcija, strojeva i njihovih dijelova, vozila, povećavaju se zahtjevi na što bolja svojstva materijala, u pogledu mehaničkih svojstava, ekonomičnosti, sigurnosti, ekološke prihvatljivosti i mnogih drugih. Kao glavni i najkorišteniji materijal, čelik nije zadovoljio te zahtjeve, pa se javila potreba za novim, boljim materijalima. Kod konstruiranja konstrukcija, strojeva i određenih dijelova, povećanjem poprečnog presjeka postizala se veća nosivost, odnosno veće dozvoljeno naprezanje. No, povećanje poprečnog presjeka sa sobom nosi veću masu konstrukcije, veći utrošak materijala, težu obradu i rukovanje istim. Kod kompliciranijih konstrukcija gdje nije moguće povećati masu, odnosno poprečni presjek, javlja se potreba za novim rješenjem, čime dolazi do razvoja visokočvrstih čelika. [3]

Autoindustrija nastoji smanjiti masu vozila čime se želi postići manja potrošnja goriva, lakša konstrukcija, manje emisije štetnih plinova, te povećana sigurnost vozila kod sudara. Razlog zbog čega su za redukciju mase i postizanje boljih performansi vozila izabrani napredni čelici, odnosno čelici visoke čvrstoće je dominantnost čelika u većini vozila. Čelik je izabran zbog dugogodišnjeg iskustva sa čelicima, te prvenstveno zbog niže cijene u odnosu na druge materijale kao što su aluminij, magnezij, karbon. Primjenom visokočvrstih čelika, konstrukcija i karoserija automobila je tanja, lakša, snažnija u odnosu na karoserije izrađene od drugih materijala. Trenutno, visokočvrsti čelici su najbolji materijali koji mogu pružiti rješenja na zahtjeve za konstruiranje automobila današnjice i automobila budućnosti. Zbog takvih prednosti, visokočvrsti čelici se sve više i više upotrebljuju u autoindustriji, što je prikazano **dijagramom 3.1**. [13]

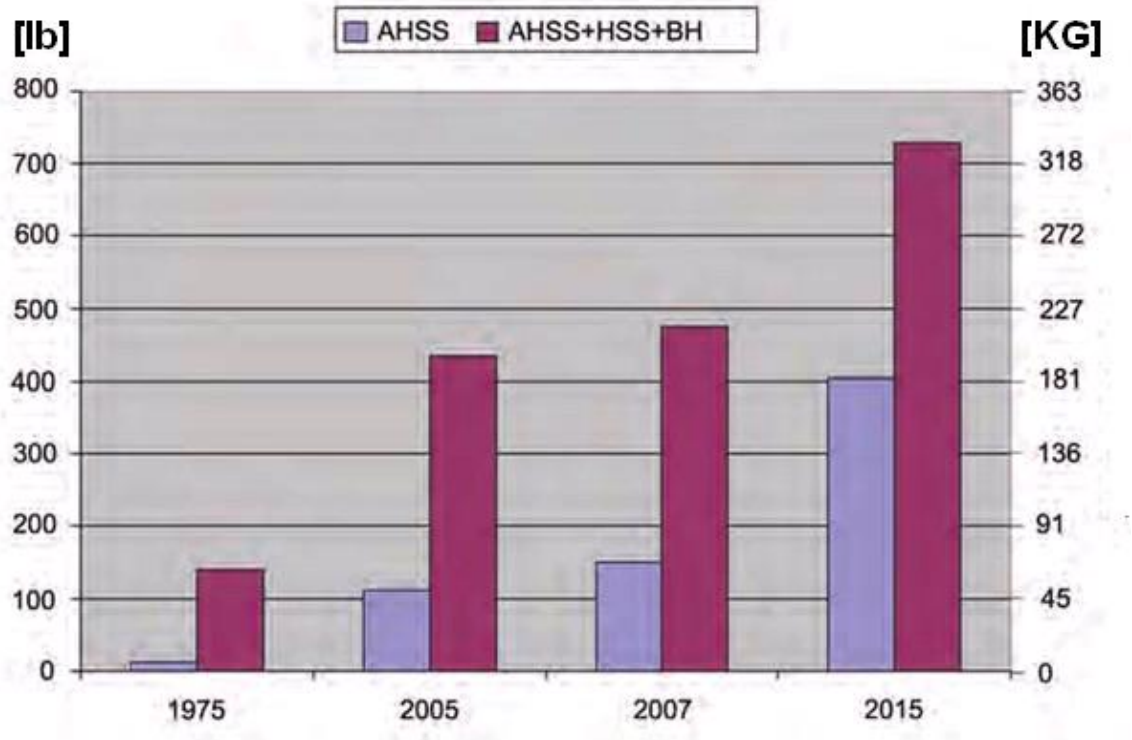
Materijal	**Smanjenje mase (%)**	**Relativni troškovi po pojedinom dijelu**
Visokočvrsti čelik	10-25	1
Aluminij	40-60	1.3-2
Magnezij	60-75	1.5-2.5
Karbon	50-60	2-10

Tablica 3.1 *Troškovi materijala u odnosu na smanjenje mase [14]*

Pojedini proizvođači automobila, visokočvrste čelike upotrebljavaju za izradu dijelova karoserije (**slika 3.1**) kao što su unutarnji branici vozila, ojačanja srednjih nosača (B nosači), poprečne grede krova vozila, poprčne grede u vratima i još mone druge, čime se postiže potrebna sigurnost putničkog prostora pri sudaru vozila. [15]



Slika 3.1 *Primjer vlačnih čvrstoća materijala različitih dijelova šasije [16]*



Dijagram 3.1 *Upotreba visokočvrstih čelika (AHSS, AHSS+HSS+BH) u američkim vozilima [13]*

3.2. Općenito o visokočvrstim čelicima

Visokočvrsti čelici se biraju prvenstveno zbog visoke vlačne čvrstoće (Rm), no posjeduju i druga dobra svojstva. Posjeduju visoku granicu razvlačenja (Re), visoku žilavost i dinamičku izdržljivost, otpornost na koroziju i postojanost pri povišenim i visokim temperaturama, prokaljivost, mogućnost toplinske obrade, dobru obradljivost i zavarljivost. S pogledom na ta svojstva, visokočvrsti čelici otvaraju novo široko polje primjene. Zahvaljujući boljim svojstvima, oni omogućavaju izradu lakših, manjih konstrukcija, uz bolje iskorištenje samog materijala te samnjenje ukupnih troškova samog materijala. Primjenjuju se u izradi vozila, strojeva, kranova i dizalica, zrakoplova, brodova i tako dalje. [7]

$$\Rightarrow\!\!>> R_e \Rightarrow\!\!>> R_m \Rightarrow\!\!>> \sigma_{dop} \Rightarrow\!\!<< m$$

Slika 3.2 *Smanjenje mase konstrukcije [17]*

Povećanjem granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, povećava se dopušteno naprezanje (σ_{dop}) koje određena konstrukcija izrađena iz visokočvrsog čelika može podnjeti, odnosno samnjuje se potreban poprečni presjek konstrukcije, a time i sama masa konstrukcije, što je prikazano formulom na **slici 3.2.** [17]

Kako bi se postigla što bolja mehanička svojstva, visokočvrsti čelici moraju posjedovati homogenu sitnozrnatu strukturu, prilikom proizvodnje, mora se težiti što višoj čistoći čelika uz što manje udjele štetnih primjesa i uključaka. Ta svojstva se postižu metodama kao što su pretaljivanje i pročišćavanje, te toplinska i termomehanička obrada. Navedene metode i zahtjevi poskupljuju cijenu viskokočvrstih čelika, no zbog prednosti u svojstvima i širokoj mogućnosti primjene pred drugim materijalima, sama cijena je opravdana. Stoga se ti čelici upotrebljavaju za skuplje i posebne konstrukcije. [4]

Obično, visoka vlačna čvrstoća sa sobom nosi negativne posljedice kao što su sniženje plastičnosti i otpornosti na krhki lom, što loše utječe na primjenu tih materijala u konstrukcijama gdje se prije svega zahtjeva konstrukcijska čvrstoća, odnosno skup mehaničkih svojstrava kao što su vlačna čvrstoća, žilavost, granica razvlačenja, prijelazna temperatura žilavosti. Kod konstrukcija tankih presjeka kao što su dizalice, kranovi, mostne konstrukcije, koje su tlačno opterećene, moguća je pojava povećanog izvijanja, te veliki progib kod savijanja. Pri tim uvijetima opterećenja, primjena visokočvrstih čelika za takve konstrukcije ne donosi bitne prednosti pred ostalim čelicima. [1]

Stoga se razvijanjem visokočvrstih čelika nastoji postići kompromis između dobre vlačne čvrstoće i otpornosti na krhki lom, odnosno, nastoji se postići dobra plastična rezerva što znači

povoljan omjer između granice razvlačenja (Re) i vlačne čvrstoće (Rm) čime u slučaju pojave prevelikog opterećenja prvo dođe do plastične deformacije, a ne do loma konstrukcije. [1]

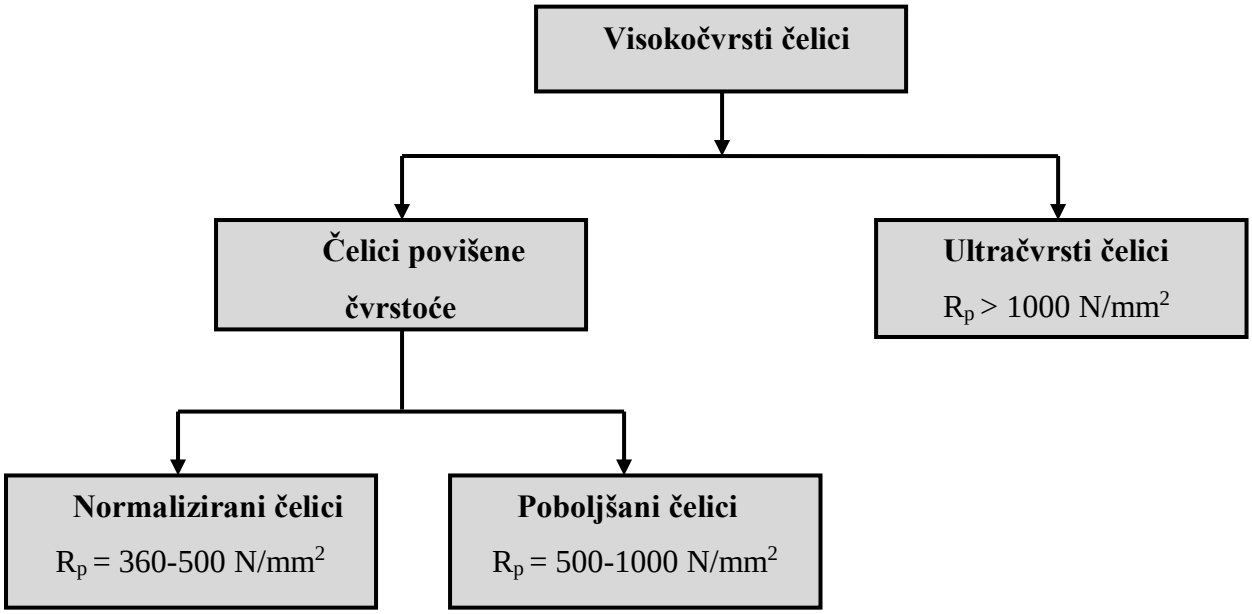
Također jedan od problema korištenja visokočvrstih čelika za konstrukcije predstavlja korozija koja dodatno može smanjiti presjek konstrukcije, te nosivost presjeka i same konstrucije, o čemu je potrebno voditi računa pri konstruiranju i dimenzioniranju takvih konstrukcija. [4]

Visokočvrsti čelici se dijele na [3]:

- Niskolegirani niskopopušteni čelici
- Visokolegirani visokopopušteni čelici
- Termomehanički obrađeni čelici
- Hladnom deformacijom očvrsnuti nelegirani i niskolegirani čelici
- Korozijski postojani percipitacijski očvrsnuti čelici

3.3. Sistematizacija visokočvrstih čelika

Prema granici razvlačenja, visokočvrsti čelici se mogu podjeliti na [3]:



Slika 3.3 *Podjela visokočvrstih čelika prema granici razvlačenja [3]*

Visokočvrsti čelici se mogu okarakterizirati s obzirom na sljedeća obilježja [18]:

- Svojstva
- Podjela
- Mehanizmi očvrsnuća
- Primjena

Pojedini visokočvrsti čelici mogu sadržavati određena istaknuta svojstva i kombinaciju svojstava kao što su visoka granica razvlačenja (Re), visoku žilavost i dinamičku izdržljivost, otpornost na koroziju i postojanost pri povišenim i visokim temperaturama, prokaljivost, mogućnost toplinske obrade, dobru obradljivost i zavarljivost. Takva svojstva ih čine prihvatljivim i sve više korištenim tehničkim materijalima [7].

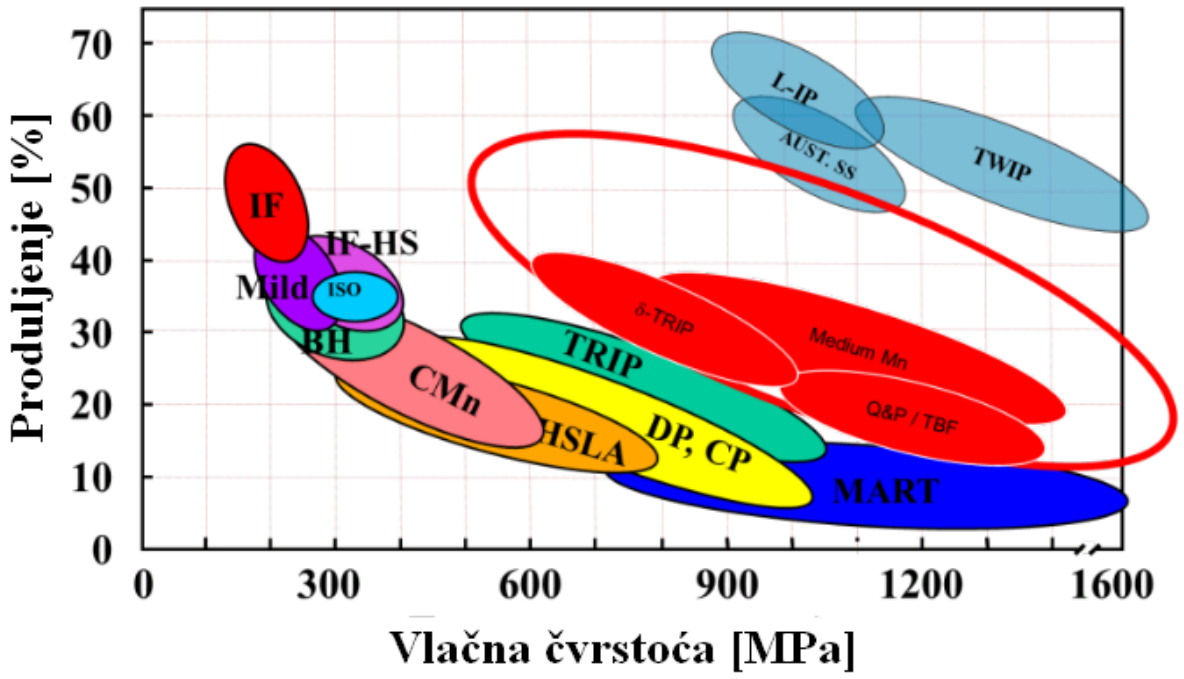
Visokočvrsti čelici se dijele na [18]:

a) Termomehanički obradivi visokočvrsti čelici (TMO), mogu biti izvedeni postupcima termomehaničle obrade:
   - Periforming postupak
   - Ausforming postupak
   - Isoforming postupak
   - TRIP postupak
   - Marforming postupak
b) Visokočvrsti čelici za poboljšavanje, prema stupnju legiranosti i prema toplinskoj obradi mogu biti:
   - niskolegirani niskopopušteni
   - visokolegirani visokopopušteni
c) Nehrđajući precipitacijski očvrsnuti (PH) visokočvrsti čelici prema tipu mikrostrukture dijele se na:
   - austenitni
   - poluaustenitni
   - martenzitni
d) Maraging visokočvrsti čelici

Prema tipu mehanizmima očvrsnuća visokočvrsti čelici mogu biti očvrsnuti [18]:

a) stvaranjem kristala mješanaca
b) očvrsnućem dislokacijama
c) očvrsnućem usitnjenjem kristalnih zrna
d) očvrsnućem stvaranjem dispergiranih čestica ili izlučivanjem, odnosno precipitacijom
e) očvrsnućem povišenjem udjela perlita

Prema omjeru vlačne čvrstoće i produljenju, čelici se mogu podjeliti u sljedeće skupine [19]:



Dijagram 3.2 *Podjela čelika prema omjeru vlačne čvrstoće i produljenja [19]*

a) Čelici normalne i povišene čvrstoće [19]:

- IF čelik - međuprostorno slobodni čelik (interstitial free steel)
- Mild čelik - niskougljični čelik
- IF-HS čelik - međuprostorno slobodni visokočvrsti čelik (interstitial free high strenght steel)
- BH čelik – bake hardening čelik
- CMn čelik – ugljičnomanganski čelik

b) Visokočvrsti čelici prve generacije [19]:

- HSLA čelik - High strenght low-alloy steel (Mikrolegirani normalizirani sitnozrnati čelik)
- DP čelik - Dual phase steel (čelik sa duplom fazom)
- MS čelik – Martensitic steel (martenzitni visokočvrsti čelik)
- CP čelik - complex phase steel (čelik složene faze)
- TRIP čelik - Transformation induced plasticity steel (čelik kod kojeg je plastičnost inducirana transformacijom)

c) Visokočvrsti čelici druge generacije [19]:

- TWIP čelik - Twinning-induced plasticity steel (čelik kod kojeg je plastičnost inducirana pojavom dvojnih faza)
- L-IP - light weight steel with induced plasticity (lagani čelik sa induciranom plastičnošću)
- Aust. SS - Austenitic stainless steels (austenitni nehrđajući čelik)

d) Visokočvrsti čelici treće generacije [19]:

- Medium-Mn - Čelik sa srednjim sadržajem mangana
- TBF čelik - TRIP-aided Bainitic Ferrite steel (TRIP potpomognuti bainitno feritni čelik)
- Q&P - Quenching and Partitioning (čelici dobiveni gašenjem i odvajanjem)
- δ – TRIP čelik

3.4. Mehanizmi očvrsnuća

Otpornost prema promjeni oblika je osnovno svojstvo visokočvrstih čelika. Vosoka granica razvlačenja (Re) i visoka vlačna čvrstoća (Rm) najviše utječu na otpornost čelika prema promjeni oblika. Manjim ili većim otežavanjem gibanja dislokacija i strukturnih pogrešaka postiže se povišena čvrstoća kod visokočvrstih čelika. Stoga je kod očvrsnuća potrebno odabrati potreban kompromis između granice razvlačenja i sposobnosti promjene oblika, kako bismo dobili povoljna mehanička svojstva. Gustoća dislokacija najviše utječe na čvrstoću, dok se maksimalna čvrstoća postiže sa što manjim ili što većim brojem dislokacija, što je prikazano u **dijagramu 3.3**. [20]



Dijagram 3.3 *Ovisnost čvrstoće materijala o gustoći dislokacija [21]*

Gibanje dislokacija u materijalu mora uvijek biti omogućeno, jer kada bismo im potpuno onemogućili gibanje, materijal bi izgubio sposobnost promjene oblika, što bi predstavljalo velik problem za konstrukcijske materijale. No kako bismo imali povoljan odnos između čvrstoće i duktilnosti, dislokacije se moraju teško kretati, no ne smiju biti u potpunitosti nepokretne. Udarni rad loma, istezljivost i suženje najviše utječu na svojstvo sposobnosti promjene oblika. [20]

Osnovni mehanizmi očvrsnuća koji se koriste kod proizvodnje visokočvrstih čelika su [20]:

- Očvrsnuće stvaranjem kristala mješanaca
- Očvrsnuće dislokacijama
- Očvrsnuće usitnjenjem kristalnih zrna
- Očvrsnuće stvaranjem dispergiranih čestica ili izlučivanjem, odnosno precipitacijom
- Očvrsnuće povišenjem udjela perlita

3.4.1. Očvrsnuće stvaranjem kristala mješanaca

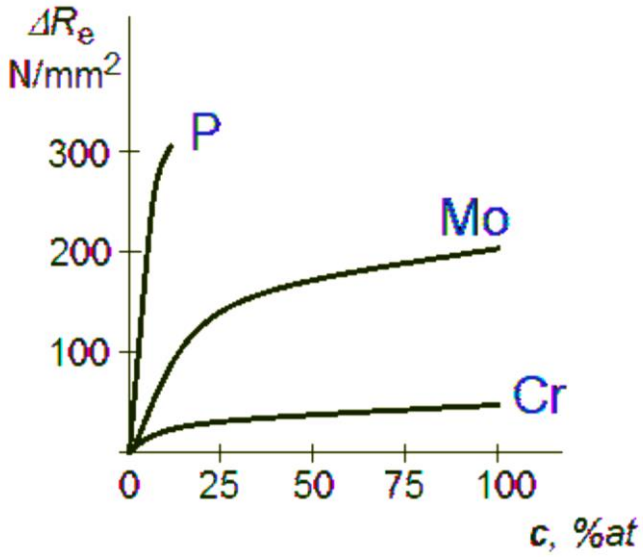
U osnovni materijal se dodaje novi element koji može biti metalan ili nemetalan. Isti elemen ulazi u kristalnu rešetku osnovnog materijala. Prisutnost atoma stranog elementa u rešetci uzrukuje stvaranje supstitucijskih ili intersticijskih kristala mješanaca. Uzrukuje se iskrivljenje kristalne rešetke i napetosti koje koče gibanje dislokacija i samim time povećavaju čvrstoću materijala. Intersticijski kristali mješanci nastaju kada atomi stranog elementa ulaze u praznine između atoma osnovnog materijala, dok supstitucijski kristali mješanci nastaju kada atomi stranog elementa zamjenjuju atome osnovnog materijala. [20]

$$(\Delta R_e)_M = A \cdot G \cdot c^{1/2}$$

A – koeficijent koji ovisi o razlici modula smika te o razlici radijusa atoma između osnovnog i legirnog elementa, za čelike iznosi od 0,5 do 1,0

G – modul smika koji za željezo iznosi $G = 84 \cdot 10^3 \, N/mm^2$

c - koncentracija atoma legirnog elementa



Dijagram 3.4 *Utjecaj legirnih elemenata na granicu razvlačenja [20]*

Dijagram 3.4 prikazuje ovisnost porasta granice razvlačenja o udjelu pojedinih legirnih elemenata. Fosfor (P) kao legirni element stvara intersticijske kristale mješance, no mogu ih još činiti i ugljik (C) i dušik (N), dok krom (Cr) i molibden (Mo) stvaraju supstitucijske kristale mješance. Za supstitucijske legirne elemente koriste se još mangan (Mn) i nikal (Ni). Može se dodati jedan ili istovremeno više elemenata. [20]

Prema dijagramu možemo uočiti veliku razliku između ove dvije vrste kristala mješanaca u djelovanju na granicu razvlačenja. Fosfor pri manjem udjelu daje veću granicu razvlačenja u odnosu na krom i molibden, odnosno intersticijski kristali mješanci slabo topivi u feritu, no jako povisuju čvrstoću. S druge strane imaju loš utjecaj na žilavost legure. Dok supstitucijski legirni elementi molibden, krom, mangan i nikal dobro utječu na žilavost, ali manje povisuju čvrstoću. Trebali bi se dodati u većim udjelima, no to nije opravdano sa tehničkog i ekonomskog stajališta.

Također možemo primjetiti da manji udjeli legirnih elemenata daju veća povećanja granice razvlačenja u odnosu na veće udjele legirnih elemenata koji daju znatno manja povećanja. [20]

U praksi se za proračun ΔR_e najčešće koristi formula za računanje kada se koristi istodobno više legirnih elemenata [20]:

$$(\Delta R_e)_M = \sum_{i=1}^{n} K_i^F \cdot w_i^F$$

K_i^F - koeficijent očvrsnuća ferita, odnosno predstavlja prirast ΔR_e pri otapljanju 1% nekog legirnog elementa

W_i^F - maseni udio pojedinog elementa u feritu

Legirni element	Polumjer atoma – r [nm]	Topivost u feritu, max. % mase	Koeficijent očvrsnuća – K N/mm^2/% Le
(C+N)	0,077	$2 \cdot 10^{-7}$	4670
Si	0,118	14,5	85
Mn	0,1598	12	35
P			690
Cr	0,1248	100	30
Ni	0,1245	25	30
Mo	0,1362	5	10
V	0,1316	28	3
Co	0,1252	80	30
Ti	0,1457	22	80
Cu	0,1277	0,4	40
Al	0,143	30	60

Tablica 3.2 *Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na očvrsnuće čelika [20]*

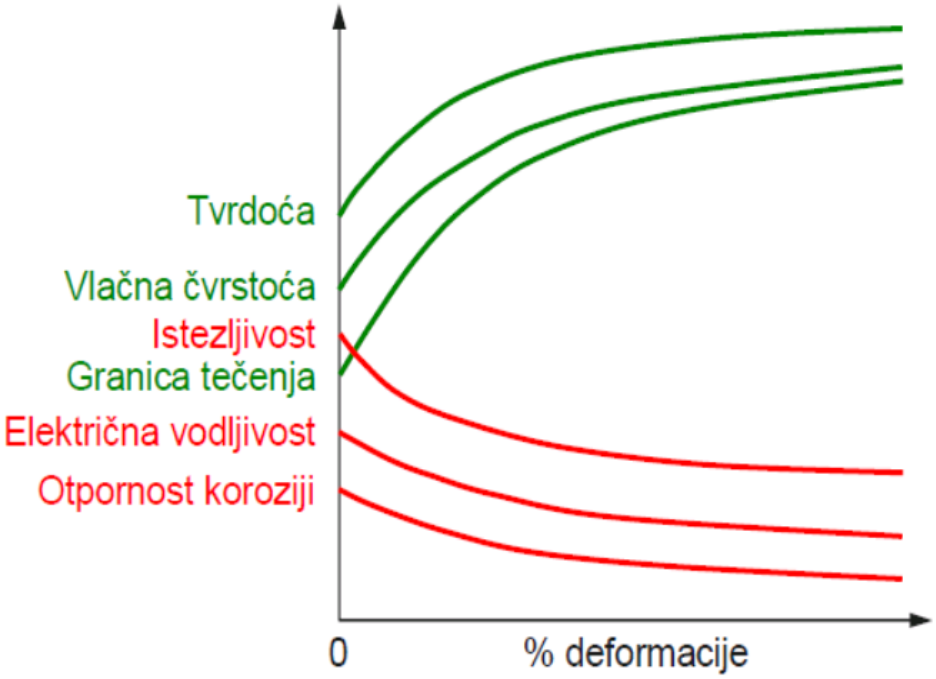
Prisilno otapanje ugljika u martenzitu pri kaljenju čelika će se djelomično uvrstiti u ovaj mehanizam očvrsnuća, iako ugljik u čeliku nije legirni element. Dodavanjem ugljika povisuje se čvrstoća kao posljedica distorzije BCC rešetke α-željeza zbog prevelike količine otopljenog ugljika, odnosno pretvorbe BCC rešetke u BCT. [20].

Očvrsnuće pri kaljenju je dominantan mehanizam očvrsnuća zbog toga što se unose nove dislokacije u rešetku, a ne očvršćuje se zbog stvaranja kristala mješanaca. [20]

3.4.2. Očvrsnuće dislokacijama

Ovaj mehanizam očvrsnuća temelji se na unošenju novih dislokacija u materijal, mogu se unijeti hladnom deformacijom, kaljenjem i termomehaničkom obradom. Nove dislokacije otežavaju gibanje već postojećih dislokacija. Kod postupka očvrsnuća hladnom deformacijom, što je viši stupanj deformacije, veća je gustoća dislokacija i vrijednost granice razvlačenja, no s druge strane, znatno se smanjuje žilavost. S obzirom na postignuto očvrsnuće, ovaj mehanizam je vrlo učinkovit, te se primjenjuje za očvrsnuće materijala sa plošno centriranom kubičnom rešetkom (FCC). Ako se gustoća dislokacija povisi tako da su razmaci između dislokacija

jednaki razmacima između atoma, gustoća dislokacija je postigla graničnu vrijednost koja za čelike iznosi približno 10^{13} mm/mm^3. U tom slučaju, u materijalu se mogu pojaviti naprezanja koja uzrukuju pukotine i lom. [20]



Dijagram 3.5 *Promjene mehaničkih svojstava uslijed hladne deformacije [22]*

Smično naprezanje raste s porastom gustoće dislokacija, a prirast se može izračunati [20]:

$$\Delta\tau_D = a \cdot m \cdot G \cdot b \cdot \rho^{1/2}$$

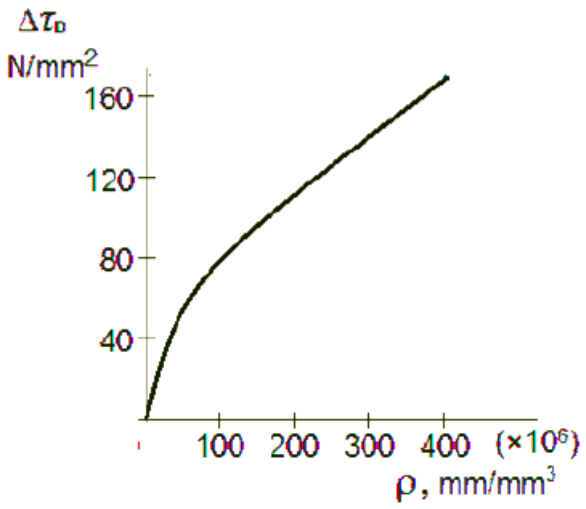
a - koeficijent interakcije između novonastalih i već postojećih dislokacija

m – faktor orijentacije, za željezo iznosi 2,75

b – Burgersov vektor, za željezo iznosi 2,75

ρ – gustoća dislokacija [mm/mm^3],

Gustoća dislokacija (ρ) za čelike u normaliziranom stanju iznosi 10^4-10^5 mm/mm^3, za hladnodeformirane čelike iznosi više od 10^8 mm/mm^3, dok za kaljene čelike iznosi približno 10^{10} mm/mm^3. [20]



Dijagram 3.6 *Ovisnost smičnog naprezanja α – željeza o gustoći disokacija [20]*

3.4.3. Očvrsnuće stvaranjem dispergiranih čestica ili izlučivanjem, precipitacijom

Ako se u čeliku nalaze vrlo tvrde submikroskopske čestice promjera od 5 do 15nm na razmaku od od 15 do 45 nm, one će učinkovito otežavati gibanje dislokacija. Takve čestice su najčešće intermetalne faze ili nitridi, karbonitridi i karbidi. [20]

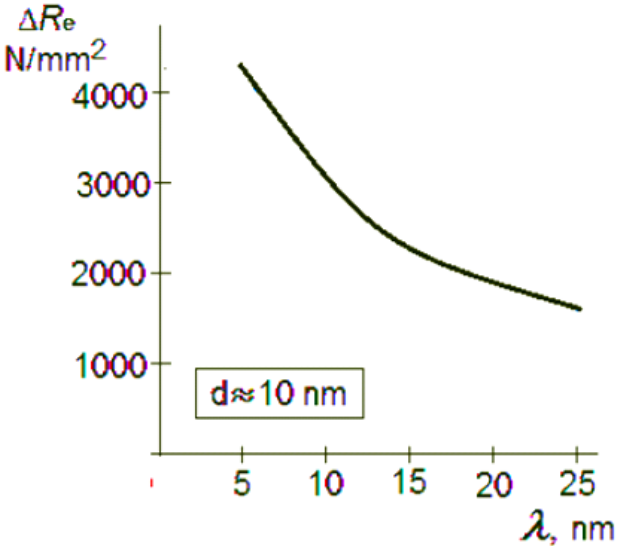
Porast granice razvlačenja se računa prema formuli [20]:

$$(\Delta R_e)_{\mathrm{Pr}} = \frac{(3 \cdot G \cdot b)}{\lambda}$$

G – modul smika, za željezo iznosi $84 \cdot 10^3$ N/mm^2

b – Burgersov vektor

λ – međusobna udaljenost između središta čestica [nm]



Dijagram 3.7 *Ovisnost granice razvlačenja o međusobnom razmaku između čestica [20]*

Dijagram 3.7 prikazuje ovisnost porasta granice razvlačenja o međusobnom razmaku između čestica približnog promjera 10nm gašenog maraging čelika. [20]

3.4.4. Očvrsnuće usitnjenjem kristalnih zrna

Granice zrna predstvaljaju granicu klizanju dislokacija, sprečavaju njihovu pokretljivost i povećavaju granicu razvlačenja. Ovaj mehanizam učvrsnuća nije najučinkovitiji, no uz umjereno očvrsnuće, uzrukuje sniženje prijelazne temperature. Broj dislokacija koje se gomilaju na granicama zrna je ograničen i prije nego što se dostigne kritična gustoća koja može uzrukovati pukotine, javlja se klizanje dislokacija preko granice zrna u drugo zrno, ako je zrno povoljno orijentirano. Sitna zrna su učinkovitija jer je veća vjerojatnost povoljne orjentacije susjednih zrna. Usitnjenje zrna se najčešće kombinira sa drugim mehanizmima očvrsnuća. [20]

Povećanje čvrstoće mehanizmom očvrsnuća usitnjenem kristalnih zrna računa se prema formuli [20]:

$$\left(\Delta R_e\right)_Z = K \cdot \left(D_Z\right)^{-1/2}$$

K – koeficijent djelovanja granice zrna, za čelike iznosi K=18·23 $Nmm^{-3/2}$

D_Z – promjer zrna [nm]

Prijelazna temperatura ovisi o veličini zrna, a može se izračunati formulom [20]:

$$T_{prij} = 215 - 115 \cdot \ln\left(D_Z\right)^{-1/2} \ [°C]$$

3.4.5. Očvrsnuće povišenjem udjela perlita

Ovaj mehanizam očvrsnuća je moguće primijeniti samo za čelike u kojima ima perlita, odnosno za nekaljene nelegirane i niskolegirane čelike. Porast granice razvlačenja sa povišenjem udjela ugljika računa se prema formuli [20]:

$$\left(\Delta \mathrm{Re}\right)_P = 2{,}4 \times \Delta(\%P)$$

$\left(\Delta \mathrm{Re}\right)_P$ - porast granice razvlačenja zbog povećanja udjela perlita [N/mm^2]

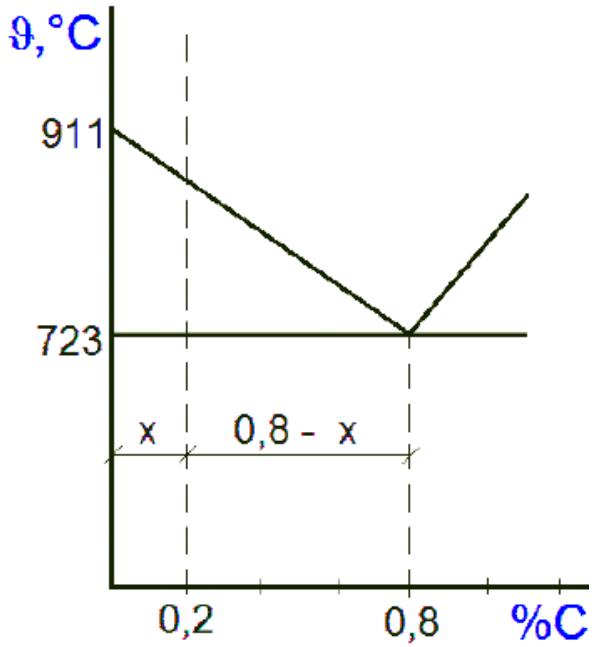
$\Delta(\%P)$ - porast masenog udjela ugljika

2,4 ($(N/mm^2)/\%P$) – iskustveni koeficijent

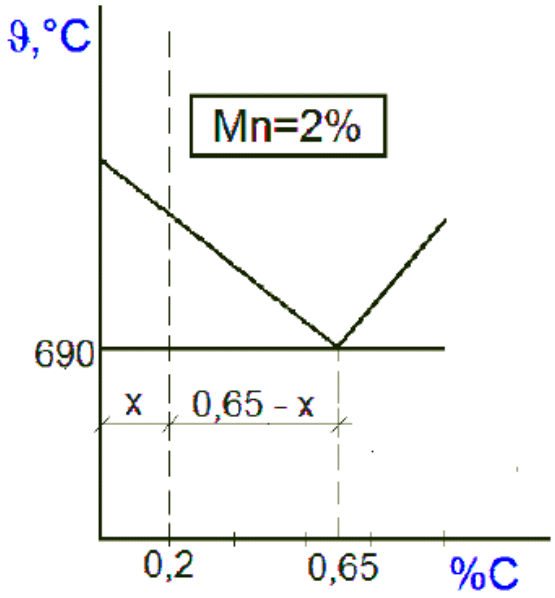
Povećanjem udjela ugljika kod ugljičnih čelika se povisuje granica razvlačenja. Prirastom masenog udjela ugljika od 0,1%, javlja se prirast perlitne faze od 12,5% i prirast granice razvlačenja od približno 30 N/mm^2. No s druge strane povećanje udjela ugljika u visokočvrstim

čelicima uzrukuje sniženje žilavosti i zavarljivosti, te povisuje prijelaznu temperaturu, što nije poželjno. [20]

No, udio prelita je moguće povećati, a bez da se povećava udio ugljika. Legirni elementi poput mangana (Mn) pomiču eutektoidnu koncentraciju u lijevo i spuštaju temperaturu eutektoidne pretvorbe. Pomicanjem eutektoidne točke ulijevo, dok se udio ugljika ne mjenja, mjenja se odnos između udjela ferita i perlita, odnosno, udio perlita se povećava. [20]



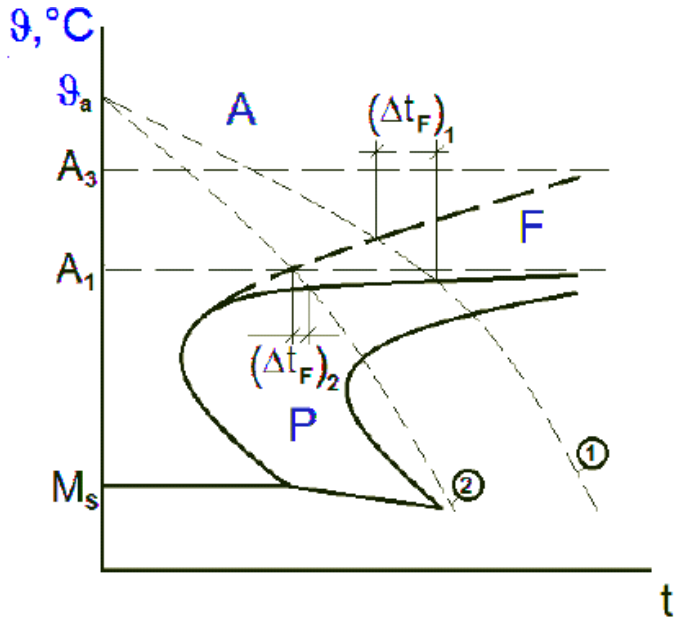
Dijagram 3.8 *Fe-C dijagram za podeutektoidni čelik s 0,2% C i 25% perlita [20]*



Dijagram 3.9 *Pseudo binarni Fe-C dijagram za čelik sa 0,2% C, 30,8% perlita i 2% Mn [20]*

Dijagram 3.8 prikazuje Fe-C dijagram iz kojeg se može vidjeti da udio perlita u čeliku s 0,2% C iznosi 25%, dok **dijagram 3.9** prikazuje slučaj u kojem se istom čeliku sa 0,2% C doda 2% Mn, maseni udio perlita će se povećati za 5,8%, odnosno s 25% na 30,8%. Prema prethodno navedenoj formuli, prirast čvrstoće zbog ovakvog porasta perlita iznosi 14 N/mm^2. [20]

Osim povećanja udjela ugljika legiranjem, sljedeći postupak povećanja udjela perlita bez da se poveća udio ugljika prikazan je **dijagramom 3.10**. Tijek hlađenja će utjecati na trajne pretvorbe austenita u ferit i na udio ferita i perlita. Krivulja 1 prikazuje režim hlađenja koji će u istom čeliku proizvesti manje perlitne faze nego režim što je prikazan krivuljom 2. Udio perlitne faze će se povećati brzim hlađenjem, no brzina hlađenja mora biti veća od donje kritične brzine hlađenja, kako se austenit ne bi transformirao u martenzit. [20]



Dijagram 3.10 *TTT dijagram za sporo i ubrzano hlađenje [20]*

Mehanizmi očvrsnuća koji se koriste za određene vrste visokočvrstih čelika [20]:

a) Normalizirani sitnozrnati čelici povišene čvrstoće
   - kristali mješanci
   - usitnjenje zrna normalizacijskim žarenjem
   - stvaranje dispergiranih čestica kao što su karbidi, nitridi, karbonitridi

b) Poboljšani sitnozrnati čelici povišene čvrstoće
   - stvaranje mješanaca
   - stvaranje dispergiranih čestica kao što su karbidi i nitridi
   - usitnjenje kristalnih zrna
   - unošenjem novih dislokacija kaljenjem

c) Ultračvrsti korozijski postojani precipitacijski očvrsnuti čelici

- martenzitni:
  - legiranje
  - precipitacija intermetalnih faza iz martenzita
  - unošenje novih dislokacija martenzitnom pretvorbom nakon žarenja i gašenja

- semiaustenitni:
  - legiranje
  - martenzitna pretvorba ostvarena hladnim oblikovanjem, žarenjem ili dubokim hlađenjem
  - precipitacija intermetalnih faza tjekom dozrijevanja iz martenzita

- austenitni:
  - hladna deformacija
  - legiranje
  - precipitacija intermetalnih faza u austenitu tijekom dozrijevanja

d) Maraging čelici

- Precipitacija intermetalnih faza u Ni-martenzitu
- gašenjem i postizanjem Ni-martenzita
- unošenje novih dislokacija hladnim oblikovanjem
- legiranje

e) Termomehanički obradivi čelici

- perliforming postupak:
  - povišenje udjela ugljika
  - usitnjenje kristalnih zrna
  - unošenje kristalnih dislokacija oblikovanjem perlita
- izoforming postupak:
  - unošenje novih dislokacija oblikovanjem perlita i austenita
  - povišenje udjela perlita
  - usitnjenje kristalnih zrna

- kaljivi čelici
    - promjena sastava martenzita pod utjecajem deformacije
    - promjena morfologije martenzita
    - prijelaz austenitnih zrna u martenzitna pri kaljenju
    - stvaranje granica podzrna u toplooblikovanom austenitu
    - stvaranje čistih jednolično raspoređenih čestica karbida pri popuštanju
    - povećanje gustoće dislokacija

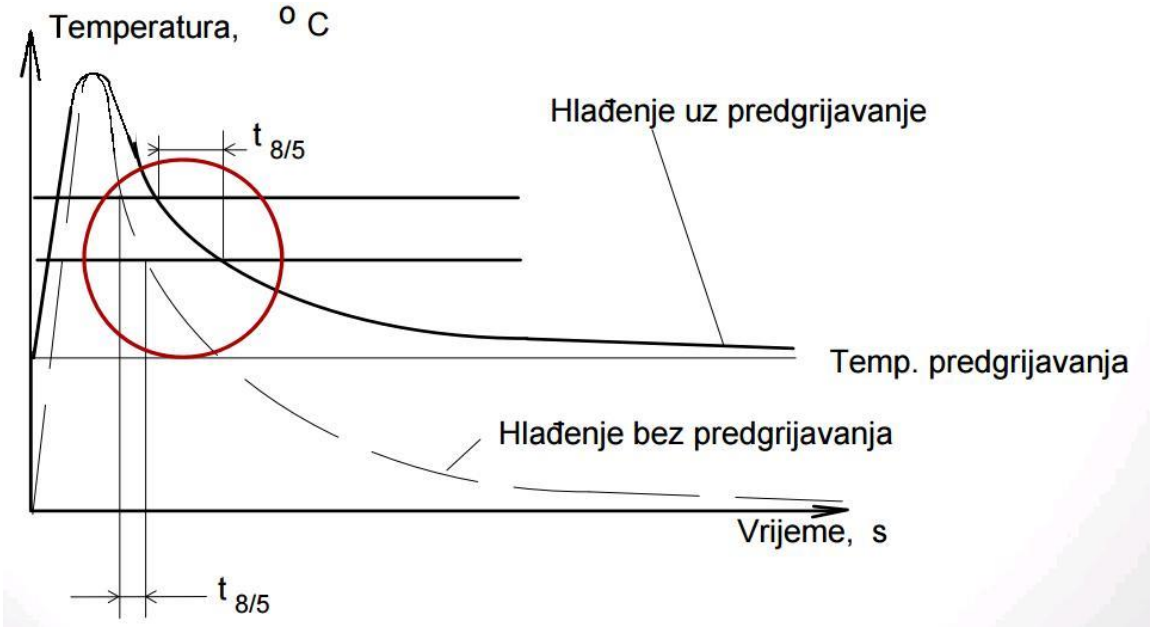
f) Hladno očvrsnuti čelici
- unošenje novih dislokacija hladnom deformacijom

3.5. Problematika zavarivanja

Za spajanje viskočvrstih čelika najčešće se koristi tehnologija zavarivanja. Zavarljivost tih čelika je vrlo dobra zvog zbog niskog masenog udjela ugljka (C) koji iznosi do 0,2%, malog udjela legirnih elemenata, te malog malog udjela sumpora i fosfora. Viskočvrsti čelici nisu skloni toplim pukotinama, no skloni su hladnim pukotinama. Dobra svojstva se narušavaju primjenom tehnologije zavarivanja zbog visokog unosa topline i naglog hlađenja, što predstavlja glavnu problematiku zavarivanja ove vrste čelika. Pošto visokočvrsti čelici omogućuju smanjenje poprečnog presjeka konstrukcije, to znatno olakšava izvođenje zavarivanja. [23]

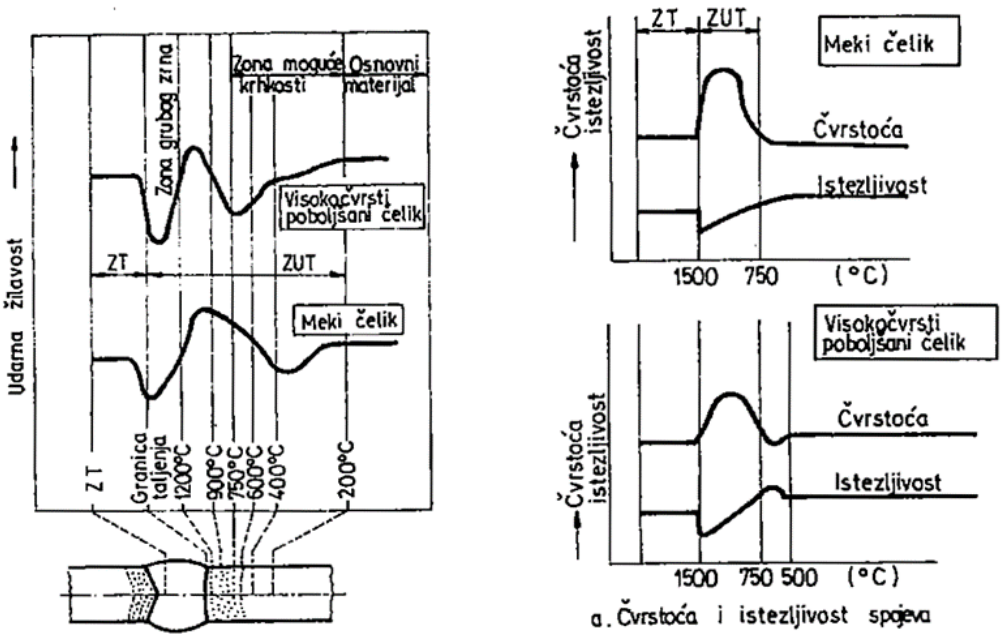
Visokočvrsti čelici se zavaruju standardnim postupcima zavarivanja kao i ostali čelici. No, zbog osjetljivosti visokočvrstih čelika na unost visoke temperature, sama tehnologija zavarivanja je kompliciranija. Zavarivanje je potebno izvoditi unutar strogo određenih parametara zavarivanja koji su propisani od strane WPS-a. Temperatura zavarivanja ne smije biti ni previsoka ni preniska, odnosno mora se nalaziti unutar određenih granica. Unošenjem prevelikog toplinskog inputa, moguće je odžariti čelik, čime je moguća pojava pada čvrstoće i pojava hladnih pukotina nakon zavarivanja. Kao rješenje, potrebno je koristiti, veliku brzinu zavarivanja, što predstavlja problem kod ručnog zavarivanja, jer mala brzina zavarivanja predstavlja veći toplinski input. S druge strane, temperatura mora biti dovoljno visoka, da se omogući difuzija vodika i spriječi pojava hladnih pukotina. [23]

Kako bismo samnjili brzinu hlađenja zavarenog spoja i vjerojatnost pojave hladnih pukotina, omogućili difuziju ugljika, koristi se predgrijavanje (**dijagram 3.11**). Pri zavarivanju visokočvrstih čelika, temperatura predgrijanja mora se držati u strogim granicama, kao i temperatura međuprolaza ako se vrši zavarivanje u više prolaza. [24]



Dijagram 3.11 *Temperatura predgrijavanja prije postupka zavarivanja [24]*

Kao posljedica korištenja nepravilnih parametara kod postupka zavarivanja, može se još javiti pad udarne žilavosti u zoni utjecaja topline i zoni taljenja, te pad same istezljivosti. Pojava promjene strukture u zoni taljenja i u zoni utjecaja topline, pojava pogrešaka i pukotina, najviše utječu na na pad svojstava visokočvrstih čelika prilikom zavarivanja. U području zone utjecaja topline koje je bilo zagrijano na temperaturu blizu tališta, dolazi do promjene mikrostrukture u krhku grubozrnatu strukturu, dok u područjima koja su bila zagrijana na približnu temperaturu do 600 °C dolazi do smanjenje čvrstoće i pojave omekšanja. Promjenu mikrostrukture i svojstava je moguće svesti na minimalnu primjenom pravilnih parametara za zavarivanje. Proizvođaći visokočvrstih čelika izdaju priručnike za zavarivanje ove vrste čelika, kako bi njihova dobra svojstva mogla biti maksimalno iskorištena. Poštivanjem tih preporuka, čvrstoća zavarenog spoja neće znatno odstupati od čvrstoće osnovnog materijala, jer u suprotnome, dobili bismo zavareni spoj loših svojstava, ćime bi upotreba samih visokočvrstih čelika u tim situacijama gubila svoju svrhu. [23]



Slika 3.4 *Promjena mehaničkih svojstava u zavarenom spoju [22]*

Kako bismo gubitak dobrih svojstava i pojavu pukotina i grešaka sveli na minimum, prilikom izvođenja zavarivanja visokočvrstih čelika potrebno je pripaziti na [23]:

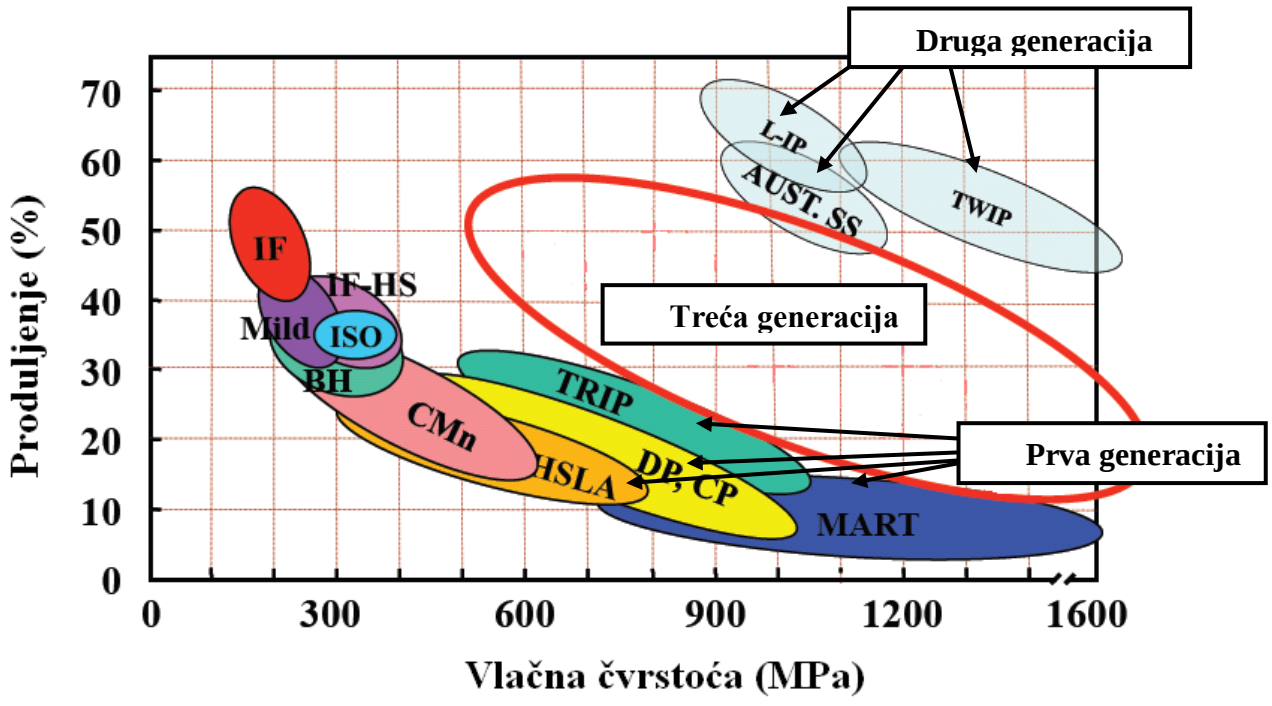
- čistoću pripremljenog mjesta za zavarivanje, odnosno odstraniti ulje, hrđu, vlagu
- odrediti pravilan slijed zavarivanja
- odrediti pravilnu veličinu zazora na mjestu zavarivanja
- izabrati pravilan dodatni materijal i zaštitnu atmosferu
- izvršiti predgrijavanje prema preporuci proizvođaća čelika i WPS-u
- odrediti pravilan toplinski input i ostale parametre za zavarivanje

3.6. Generacije visokočvrstih čelika

Povijesno gledano, visokočvrste čelike možemo podijeliti u tri generacije. Prva generacija predstavlja čelike koji su prvenstveno razvijeni i korišteni od strane automobilske industrije. Ova generacija se zasniva na bazi ferita, a dijeli se u četiri vrste, a to su čelici sa duplom fazom (dual phase-DP), složeno-fazni čelici (complex phase-CP), TRIP čelici i martenzitni čelci (martensitic-MS). Visokočvrsti čelici prve generacije imaju bolju čvrstoću u odnosu na ostale čelike, no imaju slabu duktilnost, što predstavlja velik problem. [25]

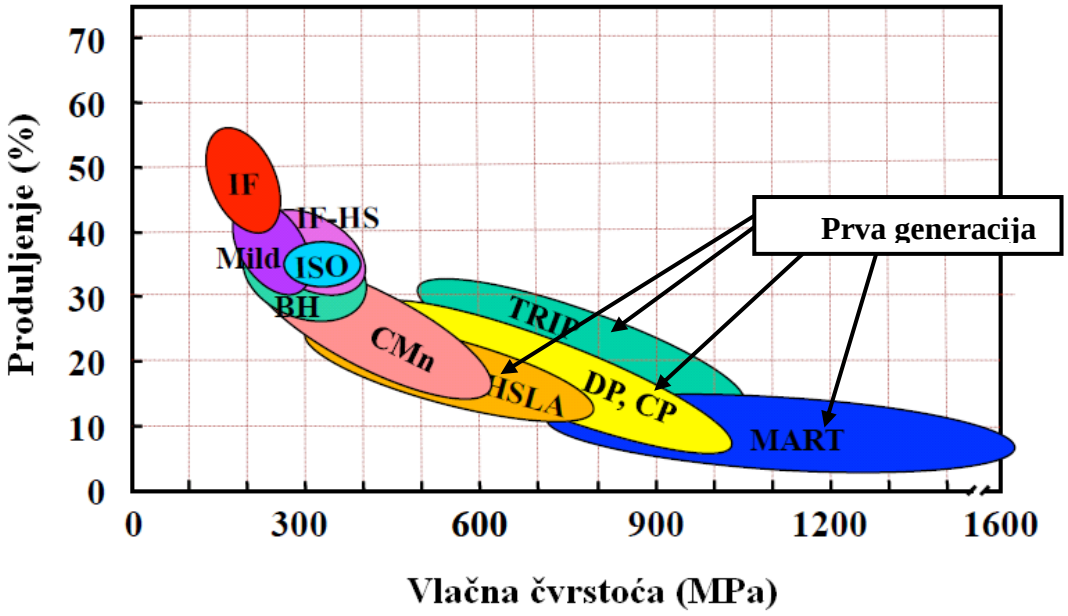
Druga generacija visokočvrstih čelika se zasniva na bazi austenita. Dijeli se na TWIP čelike, L-IP čelike i AUST.SS čelike. Visokočvrsti čelici druge generacije imaju bolju duktilnost u odnosu na prvu generaciju, no nikal i mangan koji se dodaju kao stabilizatori austenitu, znatno povećavaju cijenu čelika i s druge strane ograničavaju upotrebu tih čelika. Automobilska industrija za izradu novih aerodinamičnih, lakših, sigurnijih vozila zahtjeva materijal koji će imati prihvatljivu cijenu, a ujedno dobra svojstva kao što dobra čvrstoća i duktilnost. Slaba duktilnost prve generacije čelika ne zadovoljava te zahtjeve. Druga generacija čelika zadovoljava poglede čvrstoće i duktilnosti, no cijena predstavlja prepreku za njihovu primjenu. [25]

Kao rješenje, razvija se nova treća generacija koja će imati bolju kombinaciju čvrstoće i duktilnosti i nižu cijenu u odnosu na prvu i drugu generaciju. Mehanička svojstva treće generacije visokočvrstih čelika se nalaze između prve i duge generacije, odnosno sa vlačnom čvrstoćom od 1000 Mpa i produljenjem od 30%, što je prikazano u **dijagramu 3.12**. [25]



Dijagram 3.12 *Pojedine vrste čelika u pogledu na vlačnu čvrstoću i produljenje [26]*

3.7. Visokočvrsti čelici prve generacije



Dijagram 3.13 *Prva generacija visokočvrstih čelika [26]*

Prva generacija	Mikrostruktura	Vlačna čvrstoća [MPa]
DP	Ferit + martenzit	400-1000
MS	Martenzit	700-1600
CP	Ferit + bainit + perlit	400-1000
TRIP	Ferit + martenzit/ bainit + austenit	500-1000

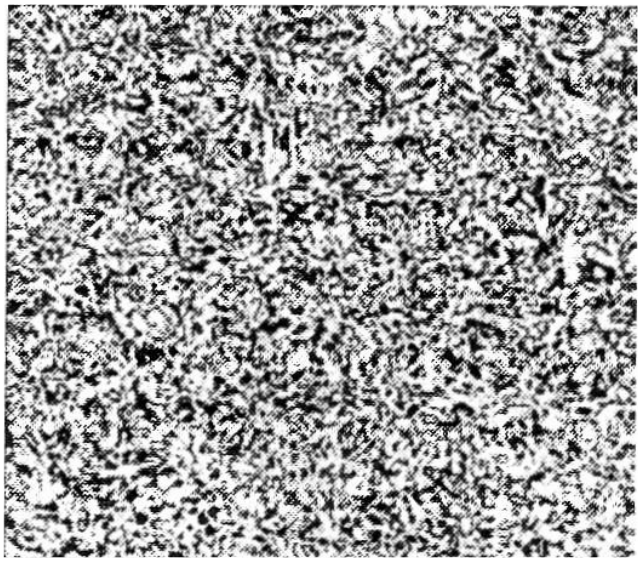
Slika 3.5 *Mikrostrukura i vlačna čvrstoća čelika prve generacije [25]*

3.7.1. High strenght low-alloy steel (HSLA)

High strenght low-alloy steels (Mikrolegirani sitnozrnati čelici) su čelici sitnije feritno-perlitne mikrostrukture razvijeni na osnovi čelika za nosive konstrukcije. Mikrolegirani su aluminijem i silicijem, što im daje takvu mikrostrukturu i dobru zavarljivost. Nisu osjetljivi na krhki lom, dok se dobra zavarljivost postiže masenim udjelom ugljika ispod 0,2% i ekvivalentom ugljika ispod 0,4. Dijele se na [1]:

- Mikrolegirani normalizirani sitnozrnati čelici
- Poboljšani mikrolegirani sitnozrnati čelici

Prilikom razvoja takvih čelika, visoka čvrstoća se pokušala postići povećanim udjelom perlita u mikrostrukturi, no time opadaju žilavost i zavarljivost. Potom se povećana čvrstoća pokušala dobiti mehanizmom očvrsnuća stvaranjem kristala mješanaca dodavanjem legirnih elemenata kao što su mangan, nikal i krom, no time su rasla zakaljivost materijala prilikom zavarivanja i neka druga tehnološka svojstva. [1]



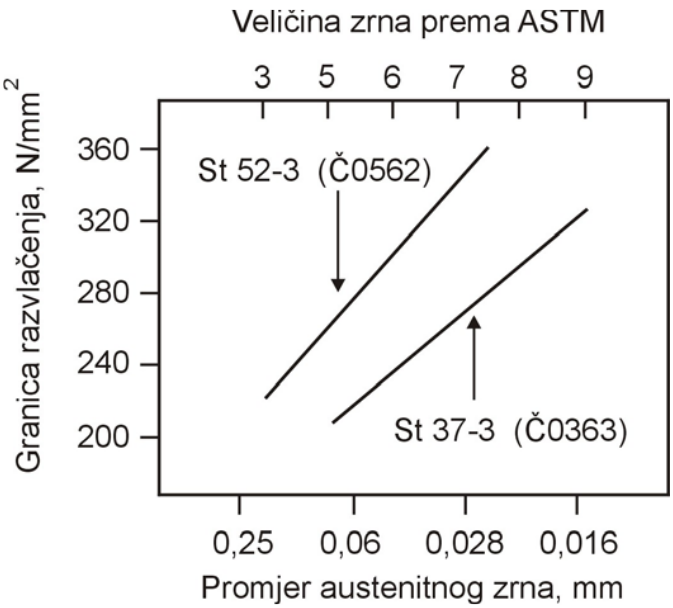
Slika 3.6 *Mikrostruktura mikrolegiranog čelika [1]*

Razvoj sitnozrnatih čelika počeo se otkrićem povoljnog utjecaja nitrida AIN na fitnozrnatu strukturu. Procesom dezoksidacije taline utjecajem sekundarnog aluminija nastaju spojevi Al_2O_3 i nitrid AIN koji u većem djelu ostaje u čeliku jednoliko dispergiran u obliku vrlo finih čestica. Nitrid AIN tjekom procesa hlađenja nastaje pri temperaturi od 1200°C, dok se pri zagrijavanju raspada pri temperaturi od 1050°C. Potpuno se raspada pri temperaturi od 1350°C koja je jednaka temperaturi zavarivanja. Zagrijavanjem čelika na temperaturu od 1200°C, sitno zrno se zadržava valjanjem na normalnu temperaturu valjanja i hlađenjem na zraku. U takvoj mikrostrukturi, čestice nitrida AIN okružuju zrno austenita, te sprječavaju njegov rast. [1]

Djelovanje nitrida AIN se može pojačati dodavanjem mikrolegirajućih elemenata kao što su niobij, vanadij i titan s ciljem da se ti mikrolegirni elementi spoje sa ugljikom i dušikom u karbide i karbonitride. Sitnozrnata feritno-perlitna mikrostruktura dobiva se rekristalizacijom austenita koji se ispod A_1 linije pretvara u sitni ferit i perlit. Takva rekristalizacija se otežava sniženjem završne temperature valjanja, te utjecajem karbida i nitrida. [1]

Mikrolegirajući elementi sprječavaju rast austenitnog zrna stvaranjem precipitata kao što su karbidi NbC i VC, nitridi NbN i VN te karbonitridi V(CN) i NB(V). Takvi precipitati su tvrdi, sitni, otporni na toplinu i gusto dispergirani. Time onemogućavaju gibanje dislokacije i utječu na

usitnjenje zrna. Čelici dobiveni takvim postupkom su Mikrolegirani normalizirani sitnozrnati čelici i još se nazivaju HSLA čelci (High Strenght Low Alloyed). [1]



Dijagram 3.14 *Porast granice razvlačenja u ovisnosti od veličine zrna [1]*

Valjanje također ima važnu ulogu na smanjenje zrna. Što se više snizi završna temperatura valjanja, to će austenitno zrno ostati sitnije, pa će i tako kasnije novonastalo feritno-perlitno zrno biti sitnije. Broj feritnih klica po jedinici duljine granice austenitnih zrna je konstantan. Što je sitnije austenitno zrno, time se dobiva sitnije feritno-perlitno zrno. Sitnije austenitno zrno ima dulju ukupnu granicu u odnosu na grubo zrno, time i sitnozrnatija struktura ima veći broj feritnih klica. [1]

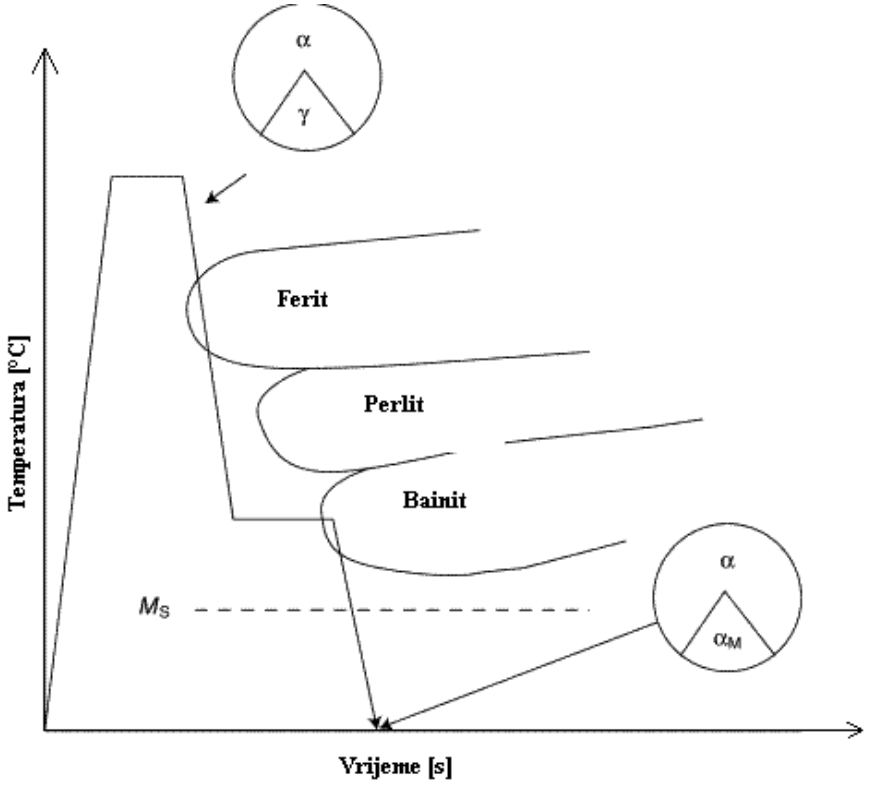
Poboljšani sitnozrnati čelici su kaljeni u vodi s temperature oblikovanja te potom popušteni pri temperaturi 680 do 710 °C. Sadrže ispod 0,2% ugljika što im omogućuje dobru zavarljivost. Dobra kombinacija čvrstoće i žilavosti se postiže pomoću niskougljičnog martenzita dok je u odnosu na feritno-perlitnu i bainitnu mikrostrukturu martenzit izrazito neosjetljiv na krhki lom. Poboljšani čelici su razvijeni u trećem stadiju razvoja čelika za nosive konstrukcije. [1]

3.7.2. Dual phase steel (DP)

Dual phase steels (čelici sa duplom fazom) su čelici koji se sastoje od dvije faze, odnosno, mikrostruktura se sastoji većim dijelom od ferita, a manjim dijelom od martenzita. [27]

Čelici sa duplom fazom se dobivaju zagrijavanjem čelika na područje interkritične temperature za žarenje, time dolazi do otapanja cementita i započinje stvaranje austenita. Cilj je

proizvesti mikrostrukturu koja se sastoji od zaostalog austenita i ferita. Vrijeme zadržavanja i temperatura određuju udio tih faza. Temperatura žarenja može biti od 770 do 850°C. Zatim se hladi na 400°C i prekida se hlađenje. To dovodi do izotermne transformacije u niskougljični bainit i visokougljični austenit. Ponovnim hlađenjem ostali austenit se pretvara u martenzit. [28]

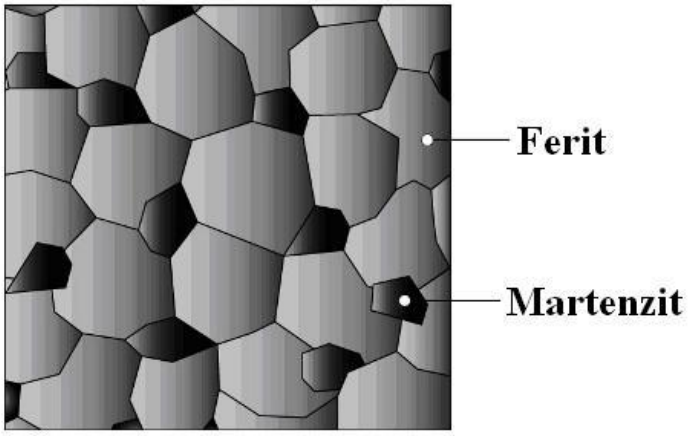


Dijagram 3.15 *T-t dijagram za čelike sa duplom fazom [28]*

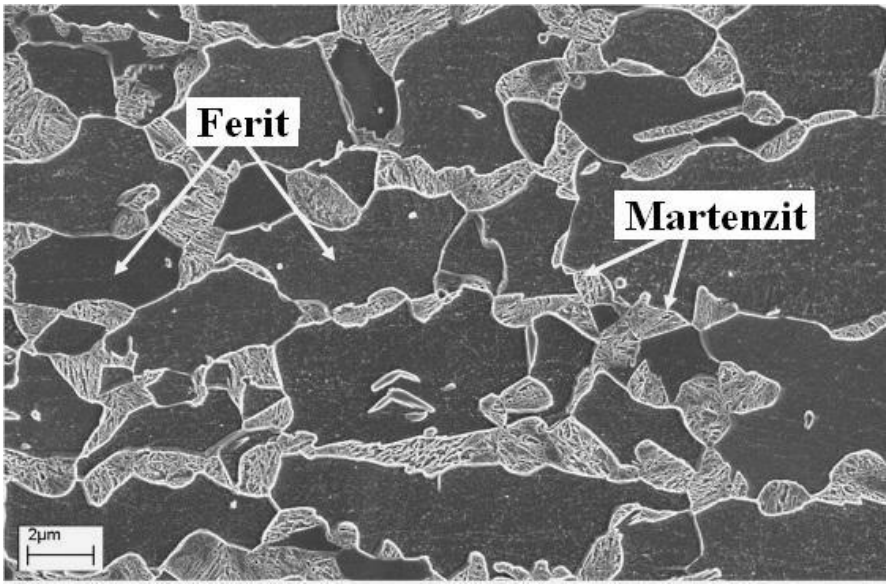
Najčešće su to niskolegirani i niskougljični čelici sa 0,06 do 0,15% C i niskim udjelom legirnih elemenata. Martenzitna faza čini od 10 do 40% ukupne mikrostrukture. [29]

Visoka čvrstoća martenzitne faze i velika plastičnost feritne faze istovremeno daju dobru čvrstoću i duktilnost. Povećanjem tvrdih faza povećava se čvrstoća čelika. Čelici sa duplom fazom se formiraju pretvorbom austenita u ferit kontroliranim hlađenjem iz austenitne faze ili austenitne i feritne faze, nakon čega slijedi brzo hlađenje kako bi se preostali austenit pretvorio u martenzit. Zbok procesa proizvodnje, mogu biti prisutne male količine drugih faza kao što su bainit i zaostali austenit. Kad se ovi čelici obrađuju deformiranjem, naprezanje se koncentrira u feritnoj fazi koja je manje čvrstoće, dajući visoku početnu brzinu otvrdnjavanja ovim čelicima. Martenzit se stvara pri određenim brzinama hlađenja što daje za rezultat povišenu čvrstoću. Čvrstoća se još može povećati dodavanjem jednog ili više elemenata kao što su nikal, molibden, krom, vanadij, mangan. [27]

Čelici sa duplom fazom sadržavaju dobru kombinaciju čvrstoće i duktilnosti, a s druge strane i niske troškove proizvodnje, koriste se u automobilskoj industriji. [29]



Slika 3.7 *Shematski prikaz mikrostrukture čelika sa duplom fazom [27]*



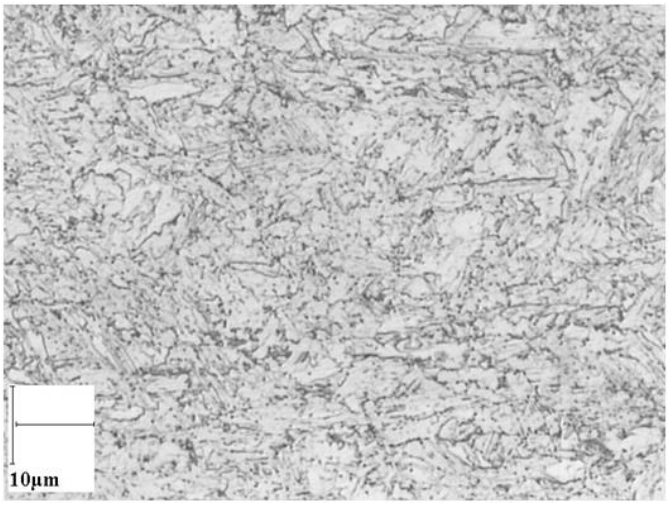
Slika 3.8 *Mikrostruktura čelika sa duplom fazom na mikroskopu [30]*

3.7.3. Complex phase steel (CP)

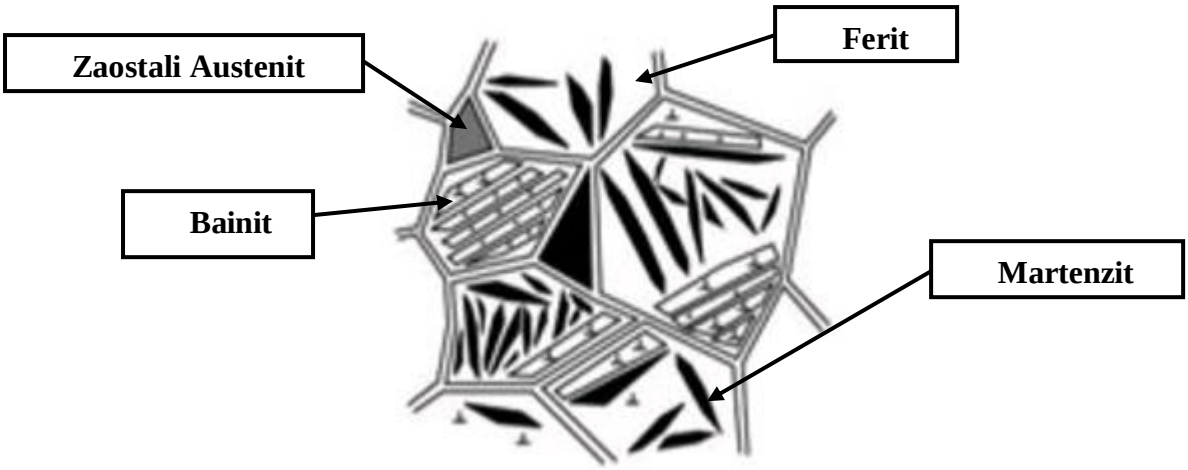
Complex phase steels (Čelici složene faze) su čelici koji imaju finozrnatu mikrostrukturu koja sadrži male količine martenzita, perlita i zadržanog austenita u feritno-bainitnoj matrici. Finozrnata struktura nastaje uslijed usporene rekristalizacije ili dodavanjem mikrolegirajućih elemenata kao što su titan (Ti) i niobij (Nb). [31]

Čelici složene faze se mogu proizvoditi vrućim i hladnim valjanjem, a još se mogu vruće pocinčati za zaštitu od korozije. Vruće valjani proizvodi su dostupni u velikom rasponu dimenzija, što omogućuje njihovu široku primjenu. [31]

Kemijski sastav i mikrostruktura ovih čelika su slični TRIP čelicima, no ovim čelicima se još dodaju elementi kao što su Ti, Nb i V koji omogućuju precipitacijsko očvršćavanje. [31]



Slika 3.9 *Mikrostruktura CP čelika [32]*



Slika 3.10 *Shematski prikaz mikrostrukture čelika složene faze [33]*

Čelici složene faze imaju veću minimalnu granicu razvlačenja u odnosu na čelike sa duplom fazom kod iste vlačne čvrstoće od 400 do 1000 MPa. U usporedbi sa čelicima sa duplom fazom, čelici složene faze imaju veći omjer između granice tečenja i vlačne čvrstoće. Odlikuje ih još visoka sposobnost na otvrdnjavanje pri malim naprezanjima, sposobnost absorbiranja energije, otpornost na trošenje, te zakaljivost. Toplinskom obradom na 500 do 700°C može se dodatno povećati granica razvlačenja za 100 MPa. Dobro su zavarljivi, mogu se zavarivati i sa drugim vrstama čelika. [31]

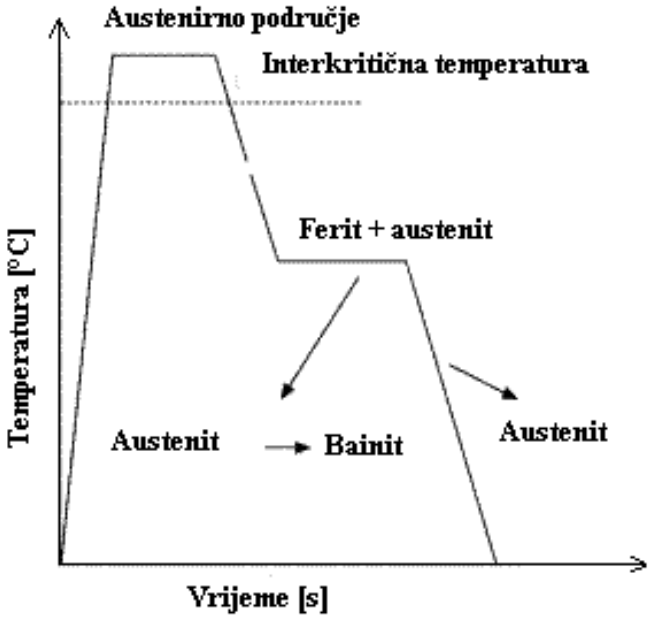
Zbog dobre sposobnosti na absorbiranje energije tijekom sudara, koriste se za izradu auto djelova poput komponenti ovjesa, šasije hladnim valjanjem, a dodatno smanjuju masu samog vozila. Najčešće su to dubokovučeni dijelovi (**slika 3.12**) vrlo složene geometrije izloženi dinamičkom naprezanju. [31]



Slika 3.11 *Komponenta šasije automobila izrađena od čelika složene faze [34]*

3.7.4. Transformation Induced Plasticity steels (TRIP)

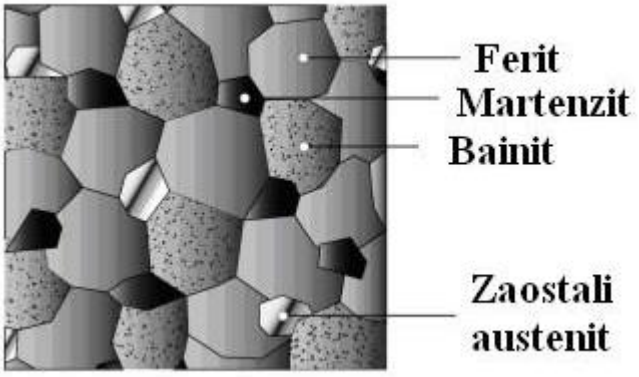
Transformation Induced Plasticity steels (plastičnost inducirana transformacijom) su čelici koji se proizvode slično kao i čelici sa duplom fazom (DP). Oba postupka zahtjevaju držanje na temperaturi prokaljivanja, no TRIP čelici se potom nešto sporije hlade, te dalje drže na temperaturi ispod interkritične temperature. Držanje na toj temperaturu dovodi do većeg udjela zaostalog austenita u mikrostrukturi. [35]



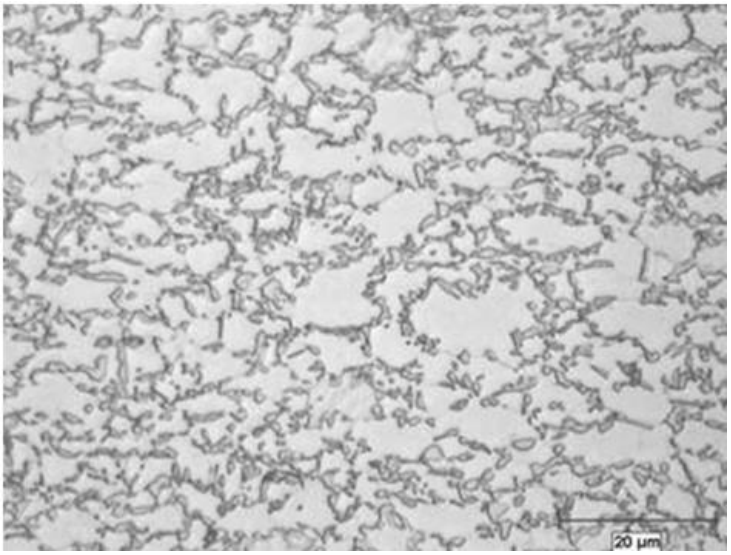
Dijagram 3.16 *T-t dijagram za TRIP čelik [35]*

Mikrostruktura TRIP čelika se sastoji od približno 5% zaostalog austenita u primarnoj feritnoj matrici, no također sadrži i tvrde faze kao što su bainit i martenzit u različitim količinama.

Sadrže veći udio ugljika (C) u odnosu na druge visokočvrste čelike prve generacije. Dodaju se silicij i aluminij kako bi se ubrzao proces stvaranja ferita i bainita, a s druge strane smanjilo nakupljanje karbida u bainitu. Povećani udio ugljika, silicija i aluminija u TRIP čelicima rezultira većim udjelom zaostalog austenita u mikrostrukturi. [36]



Slika 3.12 *Shematski prikaz mikrostrukture TRIP čelika [34]*



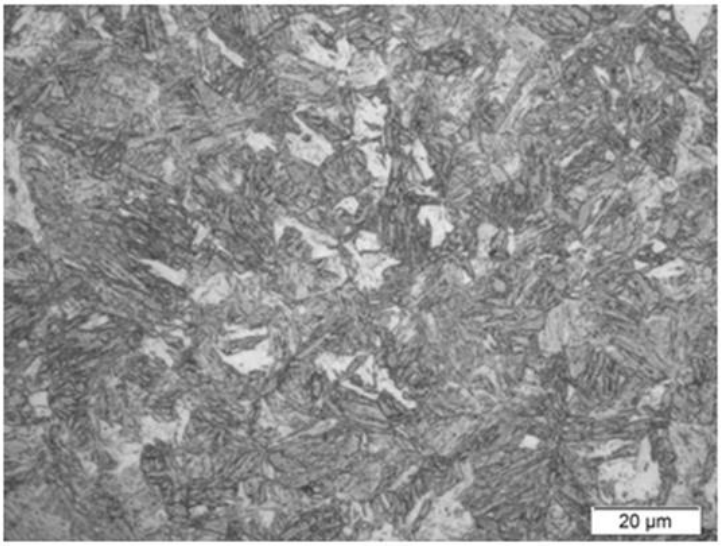
Slika 3.13 *Mikrostruktura TRIP čelika [37]*

TRIP čelici se mogu proizvoditi vruće i hladno valjani uz vruće pocinčavanje radi zaštite od korzije. Raspon vlačne čvrstoće im iznosi od 500 do 1000 MPa. [36]

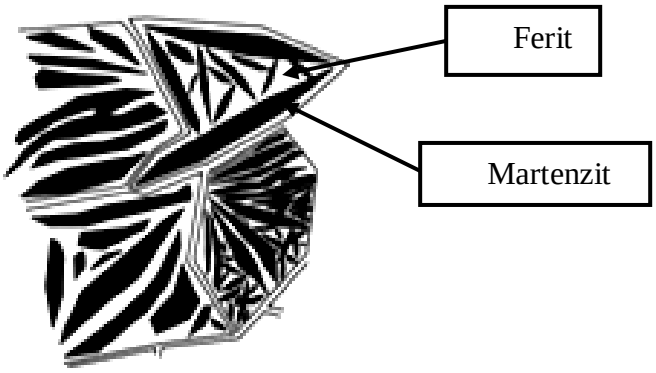
Jedno od dobrih svojstava TRIP čelika je sposobnost na brzo zakaljivanje, koje nastaje zbog tvrdih sekundarnih faza koje se tjekom deformacije raspršuju u feritu. Kao rezultat brzog zakaljivanja, pogodni su za oblikovanje rastezanjem. Mehanička svojstva i visok kapacitet zakaljivanja čine ove čelike izvrsnima za izradu automobilskih dijelova koji zahtjevaju visoku absorpciju energije. Također imaju snažno otvrdnjavanje prilikom deformacije, što daje pogodna svojstva tijekom sudara. Pogodni su za izradu složenih, teško oblikovljivih konstrukcijskih dijelova za automobilsku industriju. [36]

3.7.5. Martensitic steels

Martenzitni čelici imaju martenzitnu matricu koja sadrži male količine ferita, a može sadržavati još i bainit. Martenzitni čelici imaju najveću vlačnu čvrstoću od svih visokočvrstih čelika prve generacije, čak do 1700 Mpa. Čelik se obrađuje vrućim valjanjem ili žarenjem tjekom čega ima austenitnu strukturu. Austent se tijekom brzog gašenja gotovo u potpunitosti pretvara u martenzit. Često se naknadno toplinski obrađuju kako bi se poboljšala duktilnost, time mogu poprimiti dobru duktilnost čak i pri ekstremno visokim vlačnim čvrstoćama. [38]



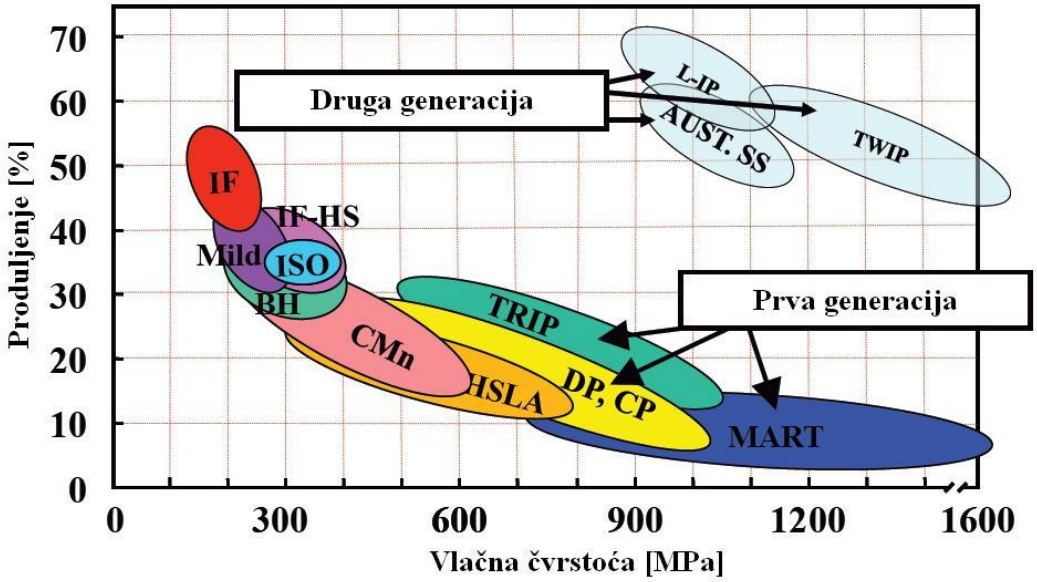
Slika 3.14 *Mikrostuktura martenzitnog visokočvrstog čelika [38]*



Slika 3.15 *Shematski prikaz mikrostrukture martenzitnog visokočvrstog čelika [33]*

Dodavanjem ugljika u martenzitne čelike povećava se tvrdoća i jača martenzit. Još se dodaju elementi poput mangana, silicija, kroma, molibdena, bora, vanadija i nikla kako bi se dodatno povećala tvrdoća. [38]

3.8. Visokočvrsti čelici druge generacije



Dijagram 3.17 *Druga generacija visokočvrtih čelika [26]*

Visokočvrsti čelici druge generacije su austenitni čelici sa visokim sadržajem mangana i usko su povezani sa konvencionalnim austenitnim nehrđajućim čelicima.. Duktilna austenitna matrica osigurava bolju sposobnost oblikovanja drugoj generaciji visokočvrstih čelika u odnosu na prvu generaciju. Međutim, sadržaj visokog austenitnog stabilizatora, odnosno 20% mangana i nikla, ograničava upotrebu druge generacije zbog relativno visoke cijene. S druge strane, obrada ovih čelika je iznimno zahtjevna, posebno TWIP čelika sa velikim sadržajem mangana, koji su skloni zakašnjelim pukotinama. **Dijagram 3.17** prikazuje razlike vlačnih čvrstoća i produljenja između čelika prve i duge generacije. [25]

Drugu generaciju visokočvrstih čelika čine [25]:

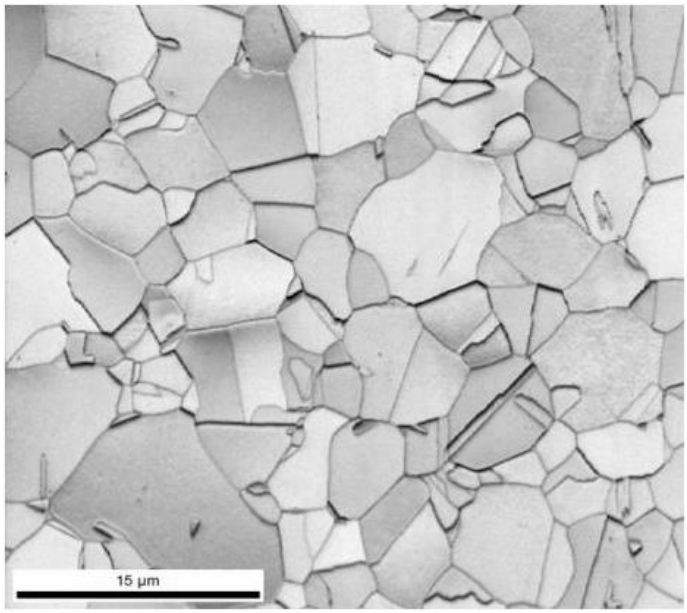
- TWIP - Twinning-induced plasticity steel (Čelici kod kojih je plastičnost inducirana pojavom dvojnih faza)
- L-IP – light weight steel with induced plasticity (Lagani čelici sa induciranom platičnošću)
- Aust. SS - Austenitic stainless steels (Austenitni nehrđajući čelici)

3.8.1. Twinning-induced plasticity steel (TWIP)

Twinning-induced plasticity steels (plastičnost inducirana pojavom dvojnih faza) su čelici koji pri sobnim temperaturama imaju potpuno austenitnu mikrostrukturu zbog velikog udjela mangana (17-24%) koji odgađa transformaciju faze tjekom hlađenja. [39]

Pored mangana, ovi čelici mogu još sadržavati do 3% aluminija (Al), 3% silicija (Si) i do 1,5% ugljika (C). Ponekad se dodaju još i neki mikrolegirajući elementi. [40]

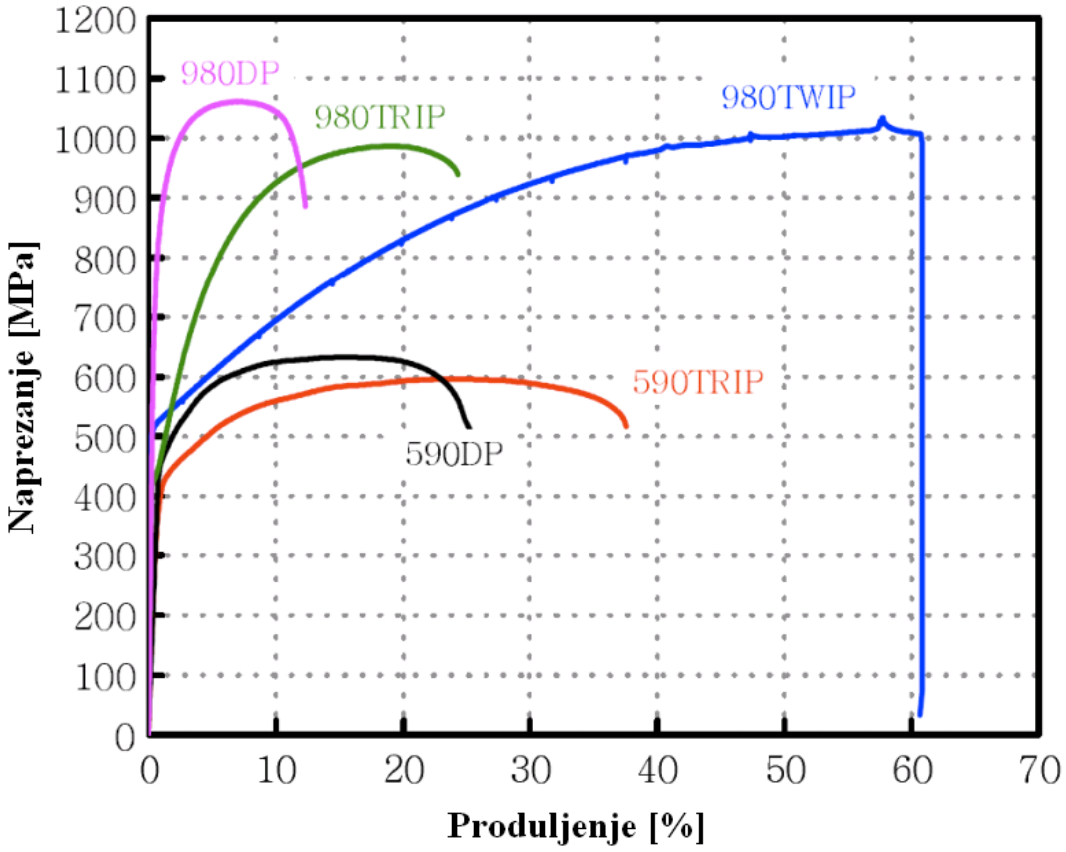
Glavni mehanizam očvrsnuća kod TWIP čelika je očvrsnuće pojavom blizanaca. Proces stvaranja blizanaca oplemenjuje mikrostrukturu, što rezultira visokom vrijednošću trenutne brzine ojačavanja prilikom deformacije, jer mikrostruktura postaje sve finija i finija. Time se dobivaju dvostruke granice koje djeluju kao granice zrna i jačaju čelik. TWIP čelici imaju veliku vlačnu čvrstoću uz dobu duktilnost, što je prikazano na **dijagramu 3.17**. [39]



Slika 3.16 *Mikrostruktura TWIP čelika [39]*

Porastom čvrstoće kod TWIP čelika, povećava se i plastičnost, koja ima veliku važnost gledajući sa industrijskog stajališta. Plastičnost omogućuje da se obradak vrlo složenog oblika izradi samo jednom operacijom prešanja. Prilikom obrade prešanja, dolazi do znatnog ojačavanja čelika, što na poslijetku omogućuje smanjenje poprečnog presjeka samog obradka. Zbog takvih svojstva, TWIP čelici se primjenjuju u autoindustriji jer omogućuju izradu lakših djelova manjih presjeka, no bez da to utjeće na sigurnost vozila i absorpciju energije prilikom sudara. Ovi čelici su čak za 60 do 80% skuplji u odnosu na klasične čelike koji se koriste u automobilskoj industiji, što predstavlja problem za primjenu TWIP čelika. [40]

Dijagram 3.18 prikazuje ponašanje visokočvrstih čelika vlačne čvrstoće 980MPa (980 DP, 980 TRIP, 980 TWIP) i 590MPa (590 DP i 590 TRIP) u pogledu na naprezanje i produljenje. Prema dijagramu se može vidjeti da se povećanjem austenita u mikrostrukturi, konkretno za TWIP čelike, povećava produljenje prije pojave loma prilikom naprezanja. [40]



Dijagram 3.18 *Dijagram naprezanaja u odnosu na produljenje za visokočvrste čelike [40]*

3.8.2. Light weight steels with induced plasticity (L-IP)

Light weight steels with induced plasticity (lagani čelici sa induciranom plastičnošću) su čelici sa specifičnom čvrstoćom koja se povećava smanjenjem gustoće legiranjem osnovne legure Fe-Mn-C-baze pomoću lakih elemenata kao što su aluminij (Al) ili silicij (Si). Takvi mehanizmi očvrsnuća povećavaju duktilnost, bez bilo kakve posebne obrade ili skupih elemenata legure. Moguće je postići smanjenje gustoće oko 18% u odnosu na konvencionalne čelike, visoke čvrstoće od 1000 do 1500 N/mm^2 sa izvrsnom duktilnošću od 80%, što im omogućuje široku primjenu. Zbog dobrih mehaničkih svojstava upotrebljavaju se u automobilskoj industriji za izradu dijelova karoserije. [41]

3.8.3. Austenitic stainless steels

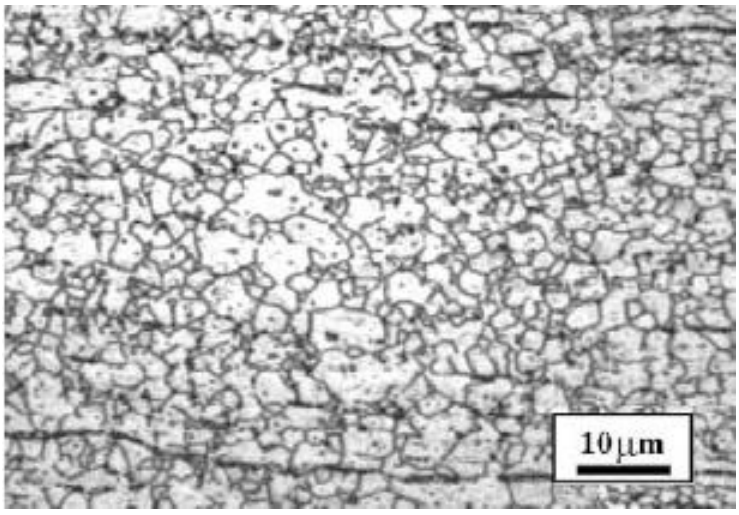
Austenitic stainless steels (Austenitni nehrđajući čelici) su nemagnetni nehrđajući čelici sa visokim masenim udjelom kroma i nikla te niskim masenim udjelom ugljika (do 0,08%). Austenitni čelici su najčešće korišteni od svih nehrđajućih čelika. Imaju dobru duktilnost i otpornost na koroziju, dobru zavarljivosti, kao i odličnu žilavost, osobito pri niskim temperaturama. Austenitni čelici također imaju nisku granicu tečenja i relativno visoku vlačnu čvrstoću. Koriste se u automobilskoj industriji, za izadu posuđa, opreme za hranu i piće i industrijsku opremu. [42]

Dodavanjem od 8 do 10% nikla u standardnu leguru sa 18% kroma dobiva se austenitna mikrostruktura sa FCC rešetkom pri sobnim temperaturama. Udio nikla u nehrđajućem čeliku sa 18% kroma minimalno mora iznositi 8% kako bi se ferit u potpunosti pretvorio u austenit. Kako bi se poboljšala otpornost na koroziju, može se još dodati oko 2% molibdena (Mo). [42]

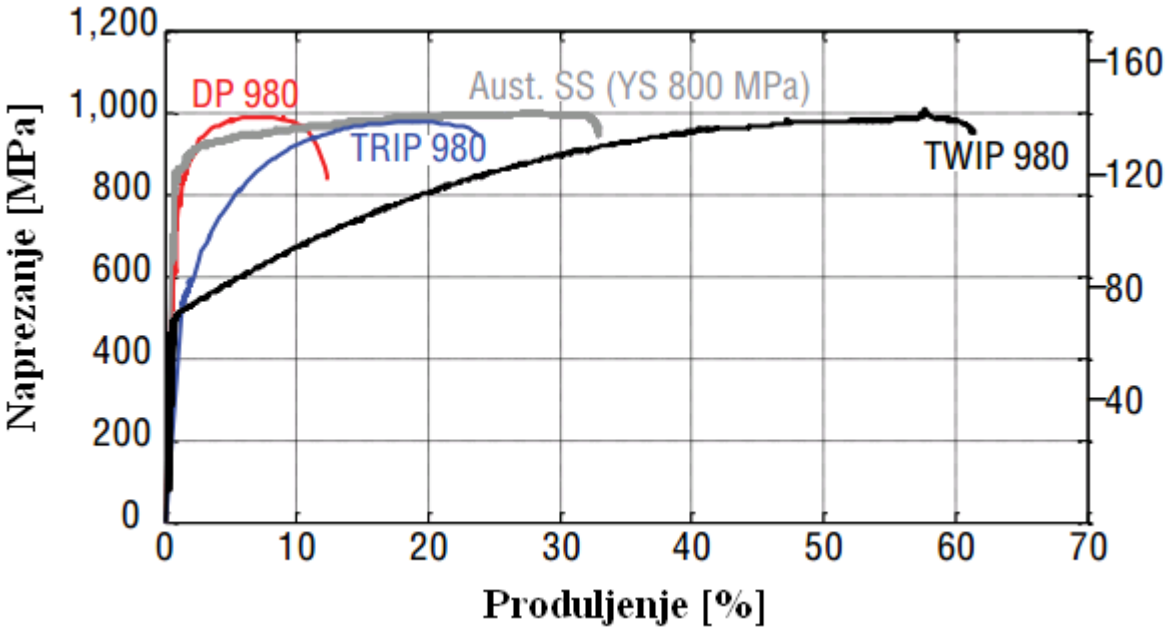
Umjesto nikla, moguće je dodati dušik u određenim količinama kako ne bi došlo do pojave poroznosti plina koji slabi leguru i stvarana nitride. Dodavanje mangana u kombinaciji sa dušikom, omogućuje dodavanje većih količina plina. Kao rezultat, ova dva elementa sa bakrom stvaraju austenitnu mikrostrukturu i najčešće zamjenjuju nikal u nehrđajućim čelicima.

Kako bi imali dobra nemagnetska svojstva, ne smiju se obrađivati toplinskom obradom, no čvrstoća i otpornost na koroziju se može poboljšati hladnom deformacijom. [42]

Austenitni nehrđajući čelici su skuplji u odnosu na feritne nehrđajuće čelike, no općenito su trajniji i otporniji na koroziju. [42]



Slika 3.17 *Mikrostruktura nehrđajućeg austenitnog čelika [43]*



Dijagram 3.19 *Dijagram produljenja i naprezanja za austenitni nehrđajući čelik i druge čelike (DP, TWIP, TRIP) [44]*

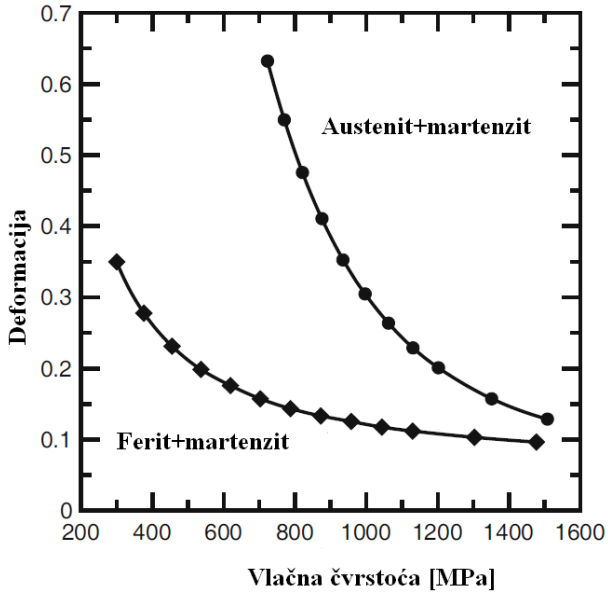
3.9. Visokočvrsti čelici treće generacije

Mikrostruktura određuje performanse i ponašanje čelika koji spadaju u prve dvije generacije visokočvrstih čelika, dok treća generacija visokočvrstih čelika ovisi o dizajnu i kontroli mikrostrukture. Prema Matlock et al. modelu, svojstva čelika treće generacije mogu biti postignuta korištenjem čelika austenitno martenzitne strukture. **Tablica 3.4** prikazuje krajnju vlačnu čvrstoću i jednoličnu deformaciju za ferit, martenzit i austenit. Može se vidjeti da martenzit ima veliku vlačnu čvrstoću, dok austenit ima dobru duktilnost. [25]

Faze	**Krajnja vlačna čvrstoća**	**Jednolična deformacija**
Ferit	300	0.3
Austenit	640	0.6
Martenzit	2000	0.08

Tablica 3.3 *Svojstva austenita, ferita i martenzita [25]*

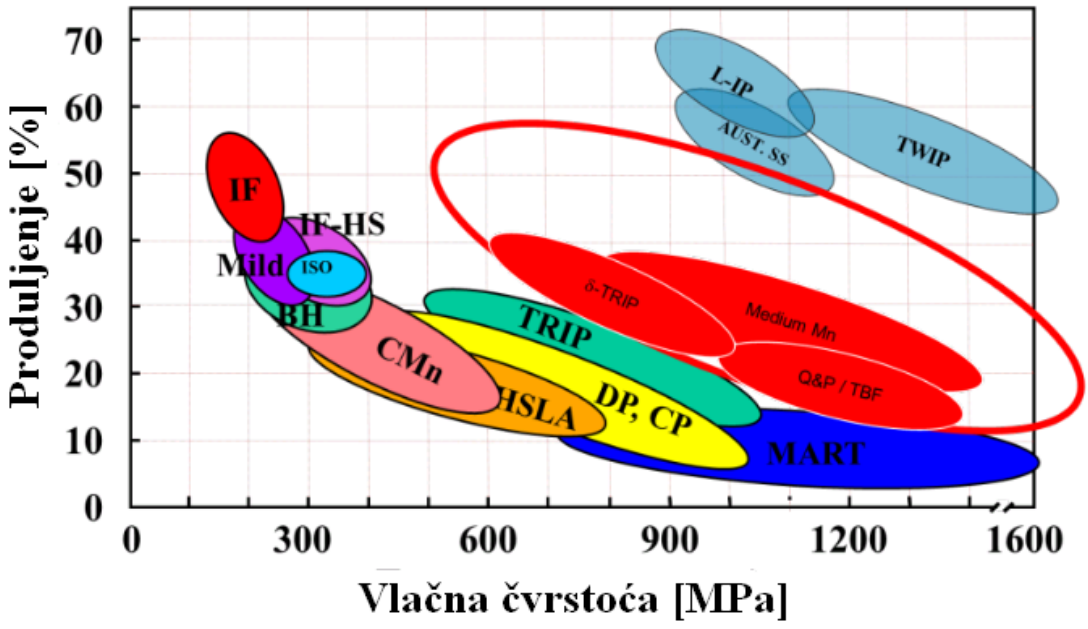
Odnos čvrstoće i duktilnosti za feritno martenzitne i austenitno martenzitne mikrostrukture predviđen je korištenjem Mileikovog modela i primjenom volumnog udjela martenzita. Kao što je prikazano u **Dijagramu 3.20**, mikrostruktura koja sadrži austenit i martenzit ima veću energiju deformacije od feritno martenzitne strukture. S druge strane, volumni udio austenita više utječe na duktilnost nego ferit. Prema tome, zahtjevana svojstva visokočvrstih čelika treće generacije mogu se postići austenitno martenzitnom mikrostrukturom. [25]



Dijagram 3.20 *Odnos vlačne čvrstoće i deformacije za različite mikrostrukure [25]*

Visokočvrsti čelici treće generacije se razvijaju na temelju poboljšanja svojstava DP čelika, izmjene tradicionalne TRIP obrade čelika, razvojem čelika sa ultrafinim bainitnim strukturama, upotrebom novih postupaka obrade. Treću generaciju visokočvrstih čelika predstavljaju [19]:

- Medium-Mn steel (Čelici sa srednjim sadržajem mangana)
- TBF - TRIP aided Bainitic Ferrite steels (TRIP potpomognuti bainitno feritni čelici)
- Q&P - Quenching and Partitioning steel (Čelici dobiveni gašenjem i odvajanjem)
- δ – TRIP čelici



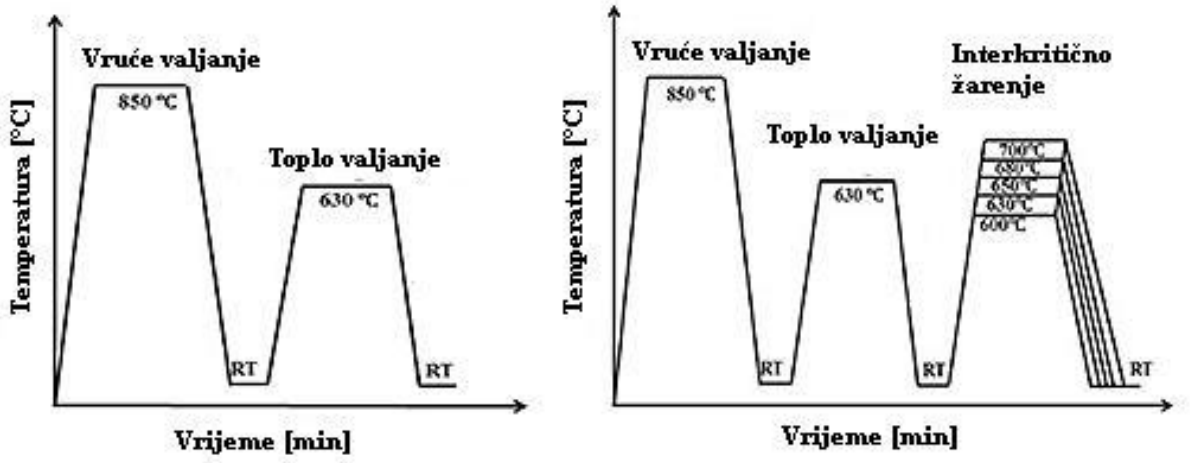
Dijagram 3.21 *Treća generacija visokočvrstih čelika [19]*

3.9.1. Medium-Mn steel

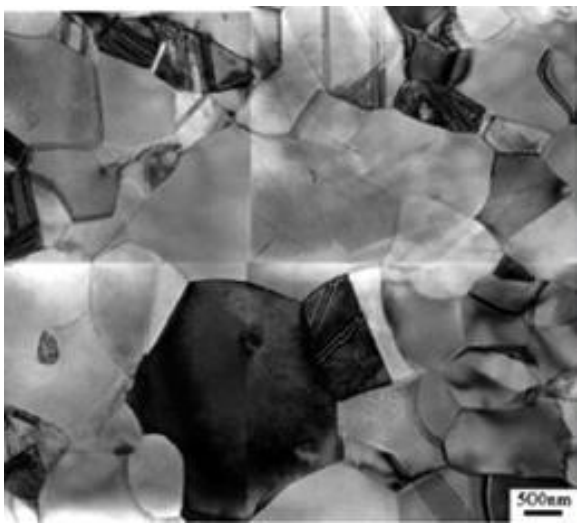
Medium-Mn čelici (Čelici sa srednjim sadržajem mangana) imaju od 3 do 12% masenog udjela mangana (Mn). Imaju ultra finozrnatu feritnu mikrostrukturu sa velikim masenim udjelom austenita do 30%. Vlačna čvrstoća im iznosi oko 1000 MPa, dok s druge strane imaju produljenje od 25 do 40%. Ovi čelici imaju bolja mehanička svojstva u odnosu na prvu generaciju visokočvrsih čelika, te manju cijenu proizvodnje u odnosu na drugu generaciju zbog manjeg sadržaja mangana. [19]

Čelici sa srednjim sadržajem mangana se mogu proizvesti pomoću dva postupka. Vrućim valjanjem na temperaturama od 850°C te potom toplim valjanjem na temperaturama od 630°C ili vrućim i toplim valjanjem pa potom interkritičnim žarenjem što je prikazano na **dijagramu 3.22**. Interkritično žarenje se provodi zagrijavanjem na područje između A_1 i A_3 linije i držanjem na toj temperaturi od nekoliko minuta, pa i do nekoliko sati koko bi se stabilizirao veliki udio zaostalog austenita protiv martenzitne transformacije izazvane deformacijom. Optimalni procesni parametri utvrđeni su mehaničkim ispitivanjima i mikroskopskim analizama kako bi se postigla odgovarajuća i uravnotežena svojstva. [45]

Složena mikrostruktura na bazi bainita sa velikim volumnim sadržajem austenita se može još postići mikrolegiranjem elementima kao što su volfram (V), titan (Ti) i niobij (Nb). [19]



Dijagram 3.22 *Valjanje i toplinska obrada čelika sa srednjim sadržajem mangana [45]*

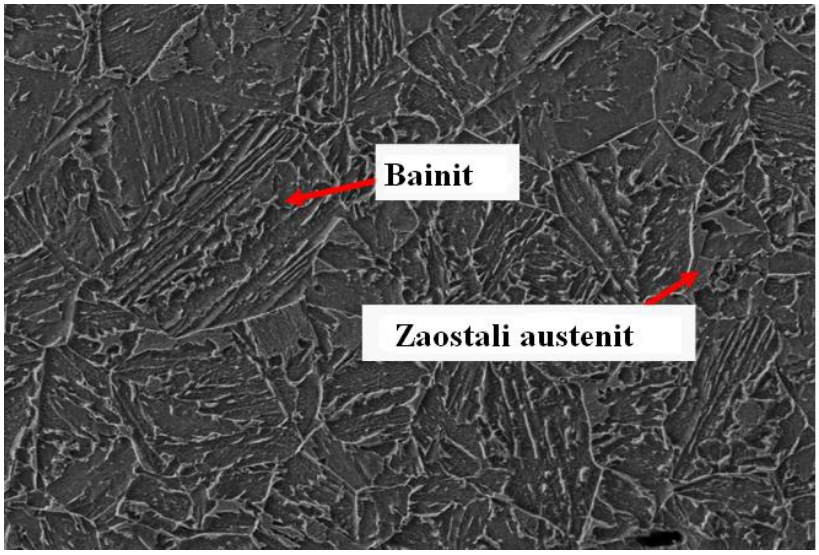


Slika 3.18 *Mikrostruktura visokočvrstih čelika sa srednjim sadržajem mangana [46]*

3.9.2. TRIP-aided Bainitic Ferrite steel (TBF)

TRIP-aided Bainitic Ferrite steels (TRIP potpomognuti bainitno feritni čelici) su čelici koji imaju bainitno feritnu strukturu sa određenim udjelom zaostalog austenita koji se prilikom obrade deformacijom pretvara u martenzit. Takva tvrda mikrostruktura će smanjiti nagomilavanje unutarnjih naprezanja. [19]

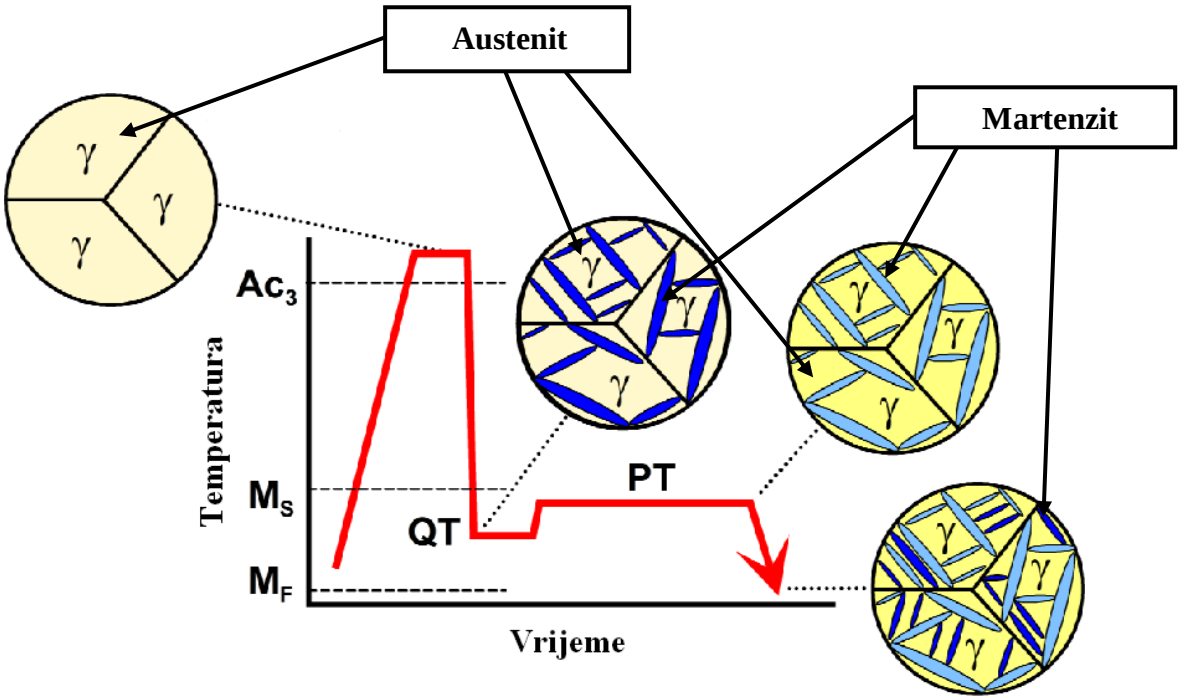
Pri stupnju zagrijavanja tokom hladnog valjanja, dolazi do statičke rekristalizacije mikrostrukture i otapanja karbida. Potom se čelik podvrgava potpunoj austenitizaciji, odnosno zagrijavanju iznad A_3 linije. Hladi se na temperaturu od 400°C, pri ćemu dolazi do izotermne bainitne treansformacije. Takav čelik treba sadržavati Si ili Al kako ne bi došlo do stvaranja karbida u zaostalom austenitu i bainitu. [19]



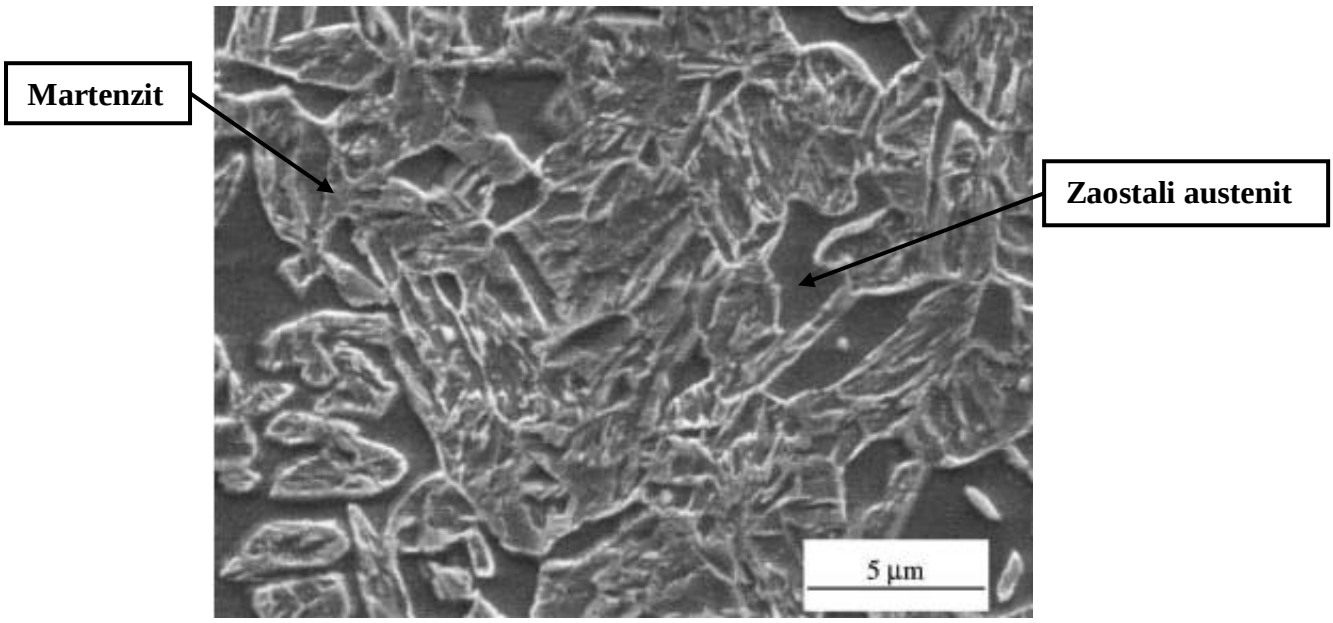
Slika 3.19 *Mikrostruktura TRIP potpomognutog bainitno feritnog čelika (TBF) [19]*

3.9.3. Quenching and Partitioning steels (Q&P)

Quenching and Partitioning steels (čelici dobiveni gašenjem i odvajanjem) su čelici koji se dobivaju novim postrupkom koji je još u razvijanju. Postupak gašenja i odvajanja je predstavljen kao novi način dobivanja martenzitnih čelika sa povećanim sadržajem zaostalog austenita. Postupak prikazan u **dijagramu 3.23** se sastoji od toplinske obrade u dva koraka. Čelik se prvo gasi do točno određene temperature (QT) u rasponu od Ms (martenzit start) i Mf (martenzit finish) linija kako bi se dobila djelomično martenzitna i austenitna struktura. Potom se provodi postupak obogaćivanja austenita ugljikom osiromašivanjem martenzita i transportom ugljika u austenit. Tako se austenit stabiliziran ugljikom zadržava u mikrostrukturi nakon gašenja do sobne temperature. Takav postupak odvajanja (Partitioning) se može izvoditi na višim temperaturama od QT temperature ili zadržavanjem na temperaturi gašenja (QT). Dodavanjem molibdena usporava se transformacija bainita te povećava sadržaj zaostalog austenita, dok zamjena aluminija silicijom ubrzava reakciju bainita i smanjuje sadržaj zaostalog austenita. Visok udio zaostalog austenita rezultira povećanom čvrstoćom i duktilnošću. [47]



Dijagram 3.23 *Postupak dobivanja Q&P čelika [47]*

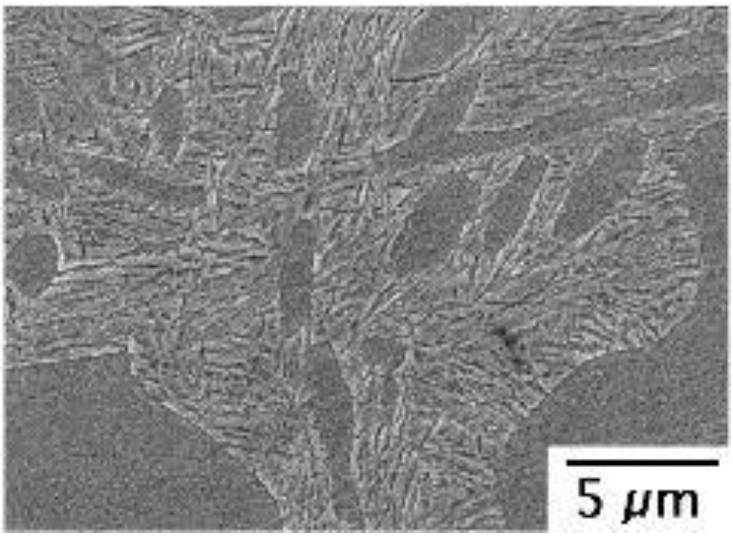


Slika 3.20 *Mikrostruktura Q&P čelika [48]*

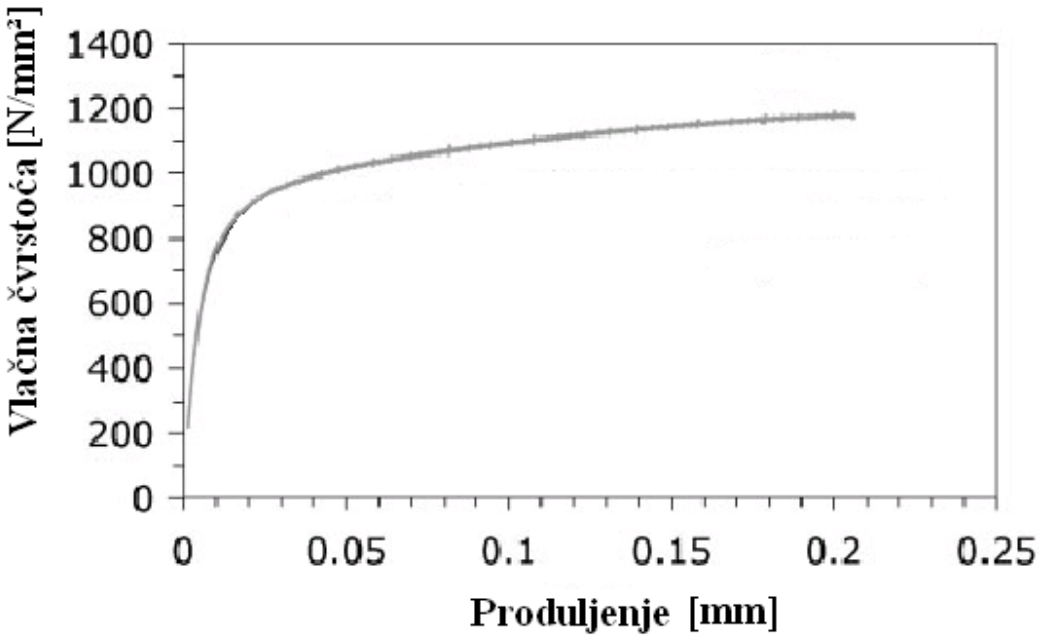
3.9.4. δ – TRIP steel

δ-TRIP steel je čelik koji ima mali sadržaj silicija što omogućuje mikrostzrukturu koja se sastoji od δ ferita i preostale faze koja je pri visokim temperaturama austenit. Takav austenit se uz određenu toplinsku obradu može transformirati u smjesu bainita, ferita i austenita obogaćenog ugljikom. Takvi čelici mogu postići vlačne čvrstoće od 1000 N/mm^2 i produljenje od 23%. [49]

δ-TRIP čelik sadrži mali udio silicija kako bi se izbjegli površinski problemi tijekom vrućeg valjanja i pocinčavanja. Pokazuju izvrsna mehanička svojstva kao što je duktilnost prilikom lijevanja, što pokazuje potencijal za postizanje mnogo boljih rezultata nakon valjanja do sitnijeg zrna. Stabilan δ ferit se zadržava na svim temperaturama. To omogućuje izbjegavanje pune krhkosti mikrostrukture martenzita u zoni utjecaja topline prilikom otpornog točkastog zavarivanja i time poboljšanje loše zavarljivosti konvencionalnih TRIP čelika. [49]



Slika 3.21 *Mikrostruktura δ-TRIP čelika [50]*



Dijagram 3.24 *Dijagram vlačne čvrstoće i produljenja za δ-TRIP čelik [49]*

4. Zaključak

Željezo kao tehnički materijal, zbog lošijih mehaničkih svojstava, loše preradljivosti, rijeđe se primjenjuje za tehničku upotrebu.

Stoga se zbog boljih svojstava primjenjuje čelik, kao legura željeza i ugljika te ostalih legirnih elemenata. Predstavlja tehnički materijal mnogo boljih mehaničkih svojstava. Zbog toga, pronalazi široku upotrebu u današnjoj tehnici. Čelik je metastabilno kristalizirana legra željeza (Fe) i ugljika (C). Maksimalni sadržaj ugljika u čeliku iznosi 2% mase, dok ostali udio iznosi željezo, primjese, nečistoće i legirni elementi. Dijele se na konstrukcijske i alatne čelike.

Konstrukcijski čelici su najkorišteniji čelici. Koriste se za izradu nosivih i zavarenih konstrukcija te za izradu dijelova strojeva koji izvršavaju razne funkcije.

Visokočvrsti čelici pripadaju skupini konstrukcijskih čelika. Kao glavni i najkorišteniji materijal, čelik nije zadovoljio zahtjeve automobilske industrije, pa se javila potreba za novim, boljim materijalima. Zbog redukcije mase i postizanja boljih performansi vozila izabrani su napredni čelici, odnosno čelici visoke čvrstoće. Trenutno, visokočvrsti čelici su najbolji materijali koji mogu pružiti rješenja na zahtjeve za konstruiranje automobila današnjice i automobila budućnosti. Zbog takvih prednosti, visokočvrsti čelici se sve više i više upotrebljuju u autoindustriji.

Visokočvrsti čelici se biraju prvenstveno zbog visoke vlačne čvrstoće (Rm), visoke granice razvlačenja (Re), visoke žilavosti i dinamičke izdržljivosti, otpornosti na koroziju i postojanosti pri povišenim i visokim temperaturama, prokaljivosti mogućnosi toplinske obrade, dobre obradljivosti i zavarljivosti.

Visokočvrsti čelici se mogu podjelici na čelike povišene čvrstoće i ultračvrste čelike. Prema omjeru vlačne čvrstoće i produljenja, mogu se podjeliti na čelike povišene čvrstoće, visokočvrste čelike prve, druge i treće generacije.

U Varaždinu, 18. Srpnja 2019. Godine

Nikola Horvatek

_____

5. Literatura

[1] https://www.simet.unizg.hr/hr/nastava/predavanja/diplomski-sveucilisni-studij-metalurgija/2-godina-diplomskog-studija/specijalni-celici/view, dostupno 09.05.2019.

[2] M. Gojić: Metalurgija čelika, Sisak, 2006.

[3] M. Novosel, D. Krumes: Posebni čelici, Slavonski brod, 1998.

[4] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2002.

[5] https://www.google.com/search?rlz=1C1GGGE_enHR378&biw=1440&bih=794&tbm=isch&sa=1&ei=zm3UXInXB43KwALz7aDQBg&q=steel+welding&oq=steel+welding&gs_l=img.3..0i19l10.2755.5882..6096...0.0..0.124.1463.1j12.....1....1..gws-wiz-img.....0j0i67j0i30.81xYuwoWXvI#imgrc=AUJZV0lV3U3NDM: preuzeto 09.05.2019.

[6] http://www.laser-ing.hr/blog/sto-je-ugljicni-celik-gdje-se-upotrebljava/, preuzeto 09.05.2019.

[7] T. Kostadin: Čelici i željezni lijevovi, Veleučilište u Karlovcu, 2007.

[8] https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=visoka+pe%C4%87, preuzeto 09.05.2019.

[9] https://ironlady003.wordpress.com/2014/01/22/celici/, dostupno 10.05.2019.

[10] https://ironlady003.wordpress.com/2014/01/22/celici/, preuzeto 10.05.2019.

[11] https://www.marinox.hr/en/offer/profiles, preuzeto 14.05.2019.

[12] https://www.hennlich.ba/proizvodi/opruge-potisne-opruge-162/potisne-opruge-od-zice-precnika-1mm-test.html , preuzeto 14.05.2019.

[13] Mahmoud Y. Demeri: Advanced High-Strength Steels: Science, Technology, and Aplications, Ohio, 2013

[14] Hao Qu: Advanced high strength steel through paraequilibrium carbon partitioning adn austenite stabilization,Ohio, 2013.

[15] I. Župančić: Svojstva naprednih čelika visokih čvrstoća u proizvodnji osobnih motornih vozila, Zagreb, 2015.

[16] https://steelguru.com/steel/posco-developing-extra-advanced-hss-for-auto-makers/442633, preuzeto 15.05.2019.

[17] https://www.scribd.com/doc/28528838/Materijali-II-drugi-Dio, dostupno 17.05.2019.

[18] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1355304452-0-pmm_2_gojko.pdf, dostupno 17.05.2019.

[19] D.Krizan: Development of third generation advanced high strength steels for automotive applications, austria, 2018.

[20] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1480940607-0-mehanizmiovrsnua_2016.pdf, dostupno 17.05.2019.

[21] K. Tandarić: Metode procjene zavarljivosti visokočvrstih čelika, Zagreb, 2015.

[22] https://www.fsb.unizg.hr/deformiranje/predavanja/ODiOO2009.pdf, preuzeto 18.05.2019.

[23] Z. Lukačević: Zavarivanje, Strojarski fakultet Slavonski Brod, Slavonski brod, 1998.

[24] B. Fakić: Uticaj postupaka zavarivanja na fiziko-metalurške karakteristike čelika: S355J2G3, 16Mo3 i 13CrMo4-5 u zoni utjecaja topline, Zenica, 2010.

[25] H. Qu: Advanced high strength steel through paraequilibrium carbon partitioning adn austenite stabilization,Ohio, 2013.

[26] Advanced high strenght steel through paraequilibrium carbon partitioning and austenite stabilization, Ohio, 2011.

[27] https://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/dual-phase-dp-steels/, preuzeto 28.05.2019.
[28] N. Fonstein: Dual-phase steels, 2017.
[29] http://www.dierk-raabe.com/dual-phase-steels/, dostupno 28.05.2019.
[30] https://www.ispatguru.com/dual-phase-steels/, preuzeto 28.05.2019.
[31] http://www.nationalmaterial.com/complex-phase-steel/, dostupno 29.05.2019.
[32] https://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/complex-phase-cp-steels/, preuzeto 29.05.2019.
[33] L. Samek, D. Krizan: Steel-material of choice for automotive lightweight applications, 2012.
[34] https://www.initiative-automotive.de/en/products/hot-and-cold-rolled-flat-products/materials/complex-phase-steels.html, preuzeto 29.05.2019.
[35] https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/dual-phase-steel, dostupno 29.05.2019.
[36] http://www.nationalmaterial.com/what-are-trip-steels/, dostupno 29.05.2019.
[37] https://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/transformation-induced-plasticity-trip-steel/, dostupno 29.05.2019.
[38] https://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/martensitic-ms-steel/, dostupno 30.05.2019.
[39] https://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/twinning-induced-plasticity-twip-steel/, dostupno 30.05.2019.
[40] httpsN. Radović, D, Glišić: Suvremeni čelici: Dvojnikovanjem izazvana plastičnost, Beograd, 2014.
[41] O. Zambrano: A General Perspective of Fe-Mn-Al-C Steels, Sao Paulo, 2018.
[42] T. Bell: The Characteristics of Austenitic Stainless Steel , 2019.
[43] G. Bregliozzi, J.M. Kenny: Friction and Wear Behaviour of Austenitic Stainless Steel: Influence of Atmospheric Humidity, Load Range, and Grain Size, Peruđa, Italija, 2004.
[44] E. Billur, J. Dykeman, T. Altan: Three Generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part II, 2014.
[45] https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=459, dostupno 15.06.2019.
[46] Y. Chang, C.Y. Wang, K.M. Zhao: An introduction of medium-Mn steel: Metallurgy, mechanical properties and warm stamping process, 2016.
[47] D. K. Matlock, J.G. Speer: Recent developments in advanced high strength sheets steels for automotive applications: An overview, Colorado, 2012.
[48] J.G. Speer, D.K. Matlock: The quenching and partitioning process: background and recent progress, Sao Carlos, 2005.
[49] D. Chatterjee, M. Murugananth: δTRIP steel, Cambridge, 2007
[50] https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2007/DTRIP/DTRIP.html, preuzeto 20.06.2019.

Popis slika

Slika 1.1 Zavarivanje čelika [5] 3
Slika 1.2 Čelični proizvodi [6] 5
Slika 1.3 Visoka peć [8] 6
Slika 1.4 Presjek ingota: a) nesmireni, b) smireni, c) polusmireni [10] 8
Slika 2.1 Čelici za nosive konstrukcije [11] i čelici za opruge [12] 11
Slika 3.1 Primjer vlačnih čvrstoća materijala različitih dijelova šasije [16] 13
Slika 3.2 Smanjenje mase konstrukcije [17] 14
Slika 3.3 Podjela visokočvrstih čelika prema granici razvlačenja [3] 15
Slika 3.5 Promjena mehaničkih svojstava u zavarenom spoju [22] 30
Slika 3.6 Mikrostrukura i vlačna čvrstoća čelika prve generacije [25] 32
Slika 3.7 Mikrostruktura mikrolegiranog čelika [1] 33
Slika 3.8 Shematski prikaz mikrostrukture čelika sa duplom fazom [27] 36
Slika 3.9 Mikrostruktura čelika sa duplom fazom na mikroskopu [30] 36
Slika 3.10 Mikrostruktura CP čelika [32] 37
Slika 3.11 Shematski prikaz mikrostrukture čelika složene faze [33] 37
Slika 3.12 Komponenta šasije automobila izrađena od čelika složene faze [34] 38
Slika 3.13 Shematski prikaz mikrostrukture TRIP čelika [34] 39
Slika 3.14 Mikrostruktura TRIP čelika [37] 39
Slika 3.15 Mikrostuktura martenzitnog visokočvrstog čelika [38] 40
Slika 3.16 Shematski prikaz mikrostrukture martenzitnog visokočvrstog čelika [33] 40
Slika 3.17 Mikrostruktura TWIP čelika [39] 42
Slika 3.18 Mikrostruktura nehrđajućeg austenitnog čelika [43] 44
Slika 3.19 Mikrostruktura visokočvrstih čelika sa srednjim sadržajem mangana [46] 48
Slika 3.20 Mikrostruktura TRIP potpomognutog bainitno feritnog čelika (TBF) [19] 48
Slika 3.21 Mikrostruktura Q&P čelika [48] 50
Slika 3.22 Mikrostruktura δ-TRIP čelika [50] 51

Popis dijagrama

Dijagram 3.1 Upotreba visokočvrstih čelika (AHSS,AHSS+HSS) u američkim vozilima 13
Dijagram 3.2 Podjela čelika prema omjeru vlačne čvrstoće i produljenja [19] 17
Dijagram 3.3 Ovisnost čvrstoće materijala o gustoći dislokacija [21] 18
Dijagram 3.4 Utjecaj legirnih elemenata na granicu razvlačenja [20] 20
Dijagram 3.5 Promjene mehaničkih svojstava uslijed hladne deformacije [22] 22
Dijagram 3.6 Ovisnost smičnog naprezanja α – željeza o gustoći disokacija [20] 23
Dijagram 3.7 Ovisnost granice razvlačenja o međusobnom razmaku između čestica [20] 23
Dijagram 3.8 Fe-C dijagram za podeutektoidni čelik s 0,2% C i 25% perlita [20] 25
Dijagram 3.9 Pseudo binarni Fe-C dijagram za čelik sa 0,2% C, 30,8% perlita i 2% Mn [20] .. 25
Dijagram 3.10 TTT dijagram za sporo i ubrzano hlađenje [20] 26
Dijagram 3.11 Temperatura predgrijavanja prije postupka zavarivanja [24] 29
Dijagram 3.12 Pojedine vrste čelika u pogledu na vlačnu čvrstoću i produljenje [26] 31
Dijagram 3.13 Prva generacija visokočvrstih čelika [26] 32
Dijagram 3.14 Porast granice razvlačenja u ovisnosti od veličine zrna [1] 34
Dijagram 3.15 T-t dijagram za čelike sa duplom fazom [28] 35
Dijagram 3.16 T-t dijagram za TRIP čelik [35] 38
Dijagram 3.17 Druga generacija visokočvrtih čelika [26] 41
Dijagram 3.18 Dijagram naprezanaja u odnosu na produljenje za visokočvrste čelike [40] 43
Dijagram 3.19 Dijagram produljenja i naprezanja za austenitni nehrđajući čelik i druge čelike (DP, TWIP, TRIP) [44] 45
Dijagram 3.20 Odnos vlačne čvrstoće i deformacije za različite mikrostrukure [25] 46
Dijagram 3.21 Treća generacija visokočvrstih čelika [19] 46
Dijagram 3.22 Valjanje i toplinska obrada čelika sa srednjim sadržajem mangana [45] 47
Dijagram 3.23 Postupak dobivanja Q&P čelika [47] 49
Dijagram 3.24 Dijagram vlačne čvrstoće i produljenja za δ-TRIP čelik [49] 51

Popis tablica

Tablica 1.1 Granični maseni udio legirnih elemenata [4] 8
Tablica 3.1 Troškovi materijala u odnosu na smanjenje mase [14] 12
Tablica 3.3 Utjecaj pojedinih legirnih elemenata na očvrsnuće čelika [20] 21
Tablica 3.4 Svojstva austenita, ferita i martenzita [25] 45

Sveučilište
Sjever

SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Nikola Horvatek pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor završnog rada pod naslovom Sistematizacija visokočvrstih čelika te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student:
Nikola Horvatek

Nikola Horvatek

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnost i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Nikola Horvatek neopozivo izjavljujem da sam suglasan s javnom objavom završnog rada pod naslovom Sistematizacija visokočvrstih čelika čiji sam autor.

Student:
Nikola Horvatek

Nikola Horvatek