

Čelici za primjene u brodogradnji

Lonić, Petar

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:991157>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-04**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering
and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Petar Lonić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Danko Čorić, dipl. ing.

Student:

Petar Lonić

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Danku Ćoriću i asistentu Tomislavu Rodingeru, mag. ing. mech. na dobroj volji, savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem i svojim prijateljima i obitelji, posebno svojim roditeljima na potpori i povjerenju tijekom studija.

Petar Lonić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Petar Lonić**

Mat. br.: 0035215309

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Čelici za primjene u brodogradnji**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Steels for shipbuilding applications**

Opis zadatka:

U radu je potrebno opisati čelike primjerene za primjene u brodogradnji vodeći se Pravilima za klasifikaciju brodova Hrvatskog registra brodova. Za čelike iz sljedećih skupina:

- čelici normalne i povišene čvrstoće,
- nelegirani konstrukcijski čelici za zavarane konstrukcije,
- visokočvrsti čelici,
- toplinski postojani čelici,
- čelici žilavi pri sniženim temperaturama,
- korozijski postojani čelici

potrebno je navesti kemijski sastav, mikrostrukturu, postupke razornih i nerazornih ispitivanja, primjenjive postupke toplinske obrade, postiziva mehanička i tehnološka svojstva, stanje isporuke, kvalitetu površine i tolerancije debljine, zavarljivost i druge tražene karakteristike.

Zadatak zadan:

30. studenoga 2020.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Danko Čorić

Datum predaje rada:

1. rok: 18. veljače 2021.

2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.

3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 22.2. – 26.2.2021.

2. rok (izvanredni): 9.7.2021.

3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA.....	IV
POPIS TABLICA	VI
POPIS OZNAKA.....	VIII
POPIS KRATICA.....	X
SAŽETAK	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD	1
2. ČELICI NORMALNE I POVIŠENE ČVRSTOĆE.....	5
2.1. Čelici normalne čvrstoće.....	5
2.1.1. <i>Kemijski sastav</i>	6
2.1.2. <i>Zavarljivost</i>	7
2.1.3. <i>Mehanička svojstva</i>	7
2.1.4. <i>Kvaliteta površine i tolerancije debljine</i>	8
2.2. Čelici povišene čvrstoće	10
2.2.1. <i>Kemijski sastav i zavarljivost</i>	13
2.2.2 <i>Mehanička svojstva</i>	16
2.2.3 <i>Kvaliteta površine i tolerancije debljine</i>	17
3. NELEGIRANI KONSTRUKCIJSKI ČELICI ZA ZAVARENE KONSTRUKCIJE	18
3.1 Zavarivanje u brodogradnji.....	18
3.2 Primjenjivi čelici	18
3.3 Stanje isporuke i toplinska obrada	19
3.4. Tolerancije debljine	19
3.5 Razorna i nerazorna ispitivanja.....	20
3.5.1 <i>Ispitivanje kemijskog sastava</i>	20
3.5.2 <i>Statičko vlačno ispitivanje</i>	20
3.5.3 <i>Ispitivanje udarnog rada loma</i>	20
4. VISOKOČVRSTI ČELICI.....	21
4.1 Mehanizmi očvršnuća visokočvrstih čelika	21

4.2	Visokočvrsti čelici za zavarene konstrukcije	22
4.2.1	Kemijski sastav i zavarljivost.....	24
4.2.2.	Mehanička svojstva	28
4.2.2.1	Statičko vlačno ispitivanje	28
4.2.2.2	Ispitivanje udarnog rada loma.....	28
4.3.	YP47 čelični limovi	30
4.3.1	Tehnički podaci materijala	31
4.3.2	Razorna i nerazorna ispitivanja	32
4.3.2.1	Ispitivanje udarnog rada loma.....	32
4.3.2.2	Ostala ispitivanja.....	33
4.4	Čelici otporni krhkom lomu.....	33
4.4.1	Tehnički podaci materijala	34
5.	TOPLINSKI POSTOJANI ČELICI	36
5.1	Prikladni čelici	39
5.2.	Kemijski sastav	40
5.3	Mehanička svojstva.....	40
5.3.1	Statičko vlačno ispitivanje	41
5.3.2	Ispitivanje udarnog rada loma	42
6.	ČELICI ŽILAVI PRI SNIŽENIM TEMPERATURAMA	43
6.1	Prikladni čelici	44
6.2	Kemijski sastav i zavarljivost	45
6.3	Mehanička svojstva.....	46
6.4	Razorna i nerazorna ispitivanja.....	48
6.4.1.	Statičko vlačno ispitivanje	48
6.4.2	Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom.....	48
6.4.3	Ispitivanje padajućim utegom	49
6.4.4	Ultrazvučno ispitivanje	49
6.5.	Tolerancije debljine i hrapavost.....	49
7.	KOROZIJSKI POSTOJANI ČELICI.....	50
7.1	Odabir čelika	52
7.2	Tolerancije debljine	53

7.3 Kemijski sastav	53
7.4 Razorna i nerazorna ispitivanja.....	53
7.4.1 Statičko vlačno ispitivanje	53
7.4.2 Ispitivanje udarnog rada loma	54
7.4.3 Ispitivanje otpornosti na interkristalnu koroziju	54
8. PREVUČENI LIMOVİ.....	55
8.1 Metode prevlačenja i stanje isporuke.....	55
8.2 Dimenzije, tolerancije i kvaliteta površine	56
8.3 Zahtjevi na prevučene materijale	56
8.3.1 Istezljivost	56
8.3.2 Smična čvrstoća	57
8.3.3 Prionjivost.....	57
8.3.4 Mehanička svojstva	57
8.3.5 Tehnološka svojstva	58
8.3.6 Otpornost na interkristalnu koroziju	58
8.4 Razorna i nerazorna ispitivanja.....	58
8.4.1 Ispitivanje otpornosti na interkristalnu koroziju	58
8.4.2 Statičko vlačno ispitivanje	58
8.4.3 Ispitivanje smicanjem	58
8.4.4 Ispitivanje bočnim savijanjem	59
8.4.5 Ispitivanje udarnog rada loma	60
8.4.6 Ispitivanje kvalitete površine i dimenzija.....	60
8.4.7 Nerazorna ispitivanja	60
9. ČELIČNI LIMOVİ I ŠIROKE TRAKE S ODREĐENIM MINIMALNIM SVOJSTVIMA U SMJERU DEBLJINE (ČELICI "Z" KVALITETE)	61
9.1 Postupak ispitivanja	62
10. ZAKLJUČAK	65
11. LITERATURA.....	67

POPIS SLIKA

Slika 1 . Grčka Trirema, 5. stoljeće pr.Kr [1]	1
Slika 2. Portugalska karavela [2]	1
Slika 3. Gajeta Falkuša [3].....	2
Slika 4 . SS Great Britain, prvi prekoceanski brod od kovanog željeza [4]	2
Slika 5. Brodski vijak po uzoru na SS Great Britain [4].....	3
Slika 6. MS Carolinian, prvi komercijalni kompletno zavaren brod [5]	3
Slika 7. Struktura čelika s 0,18 % ugljika [8]	6
Slika 8. Shema procesa konvencionalnog, normaliziranog i termomehaničkog valjanja [10].	10
Slika 9. Shematski prikaz zbivanja pri kontroliranom valjanju [7]	11
Slika 10. Normalizacija [11]	11
Slika 11. Usporedba veličine zrna "običnog" i sitnozrnatog čelika [7].....	12
Slika 12. Struktura normaliziranog čelika s 0,18 % ugljika [8]	12
Slika 13. Usporedba C_{eq} nakon normalizacije i termomehaničkog valjanja [13]	15
Slika 14. Roboti za zavarivanje [14].....	18
Slika 15. Prikaz promjene troškova s porastom R_e na primjeru dijela valjkastog spremnika [15]	21
Slika 16. "Offshore" platforma Labin [15]	22
Slika 17. Postupak poboljšavanja [17].....	23
Slika 18. Dijagram σ - ϵ za različita stanja čelika u postupku poboljšavanja [17]	24
Slika 19. Trend godišnjeg povećanja broja kontejnera na nosačima kontejnera [18]	30
Slika 20. Brod za prijevoz kontejnera CMA CGM Benjamin Franklin [19].....	31
Slika 21. Pozicija uzimanja ispitnog uzorka s lima [6].....	33
Slika 22. Promjena mehaničkih svojstava s povišenjem temperature [23].....	36
Slika 23. Promjena savojne dinamičke izdržljivosti čelika X10NiCrWTi36-15 s povišenjem temperature [23]	37
Slika 24. Pojava puzanja pri visokim temperaturama [22]	37
Slika 25. Brodski pomoćni kotao [24]	38
Slika 26. Brodski izmjenjivač topline [24]	38
Slika 27. Shematski prikaz ponašanja čelika pri kratkotrajnom statičkom razvlačenju pri $\vartheta > 450^\circ\text{C}$ [23]	42

Slika 28. Materijali koji se koriste za rad na niskim temperaturama u ovisnosti o tlaku skladištenja i temperaturama ukapljivanja korištenih plinova [25]	43
Slika 29. Spremnik za UNP (ukapljeni naftni plin) [26]	44
Slika 30. Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi za odabrane čelike [27]	46
Slika 31. Direktni troškovi korozije u SAD-u [28]	50
Slika 32. Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa nehrđajućih čelika i strukturni Schaefflerov dijagram [29]	51
Slika 33. Cijevni sustav od nehrđajućeg čelika na palubi broda [30]	51
Slika 34. Metode zaštite od korozije [29]	52
Slika 35. Protektorska zaštita podvodnog dijela čeličnog trupa broda žrtvujućim anodama od cinka. [29]	52
Slika 36. Prevučeni materijal [31]	55
Slika 37. Zavarivanjem eksplozijom [32]	55
Slika 38. Ispitivanje smicanjem [6]	59
Slika 39. Ispitivanje bočnim savijanjem [6]	59
Slika 40. Prikaz ispitnih osi [6]	61
Slika 41. Lamelarne pukotine [33]	61
Slika 42. Pozicija ispitnog uzorka na limovima i širokim trakama [6]	62
Slika 43. Dijagram kriterija prihvatljivosti ispitivanja i prihvatljivosti ponovnog ispitivanja [6]	63

POPIS TABLICA

Tablica 1. Stanje isporuke čelika normalne čvrstoće [8]	5
Tablica 2. Kemijski sastav čelika normalne čvrstoće [6]	6
Tablica 3. Minimalna istezljivost za razne debljine čelika normalne čvrstoće [6]	7
Tablica 4. Ispitivanje žilavosti Charpyjevim batom čelika normalne čvrstoće [6]	8
Tablica 5. Stanje isporuke čelika povišene čvrstoće [6]	13
Tablica 6. Kemijski sastav čelika povišene čvrstoće [6]	14
Tablica 7. C_{eq} za čelike povišene čvrstoće debljine do 100mm obrađene termomehaničkim valjanjem [6]	15
Tablica 8. Minimalna istezljivost čelika povišene čvrstoće za različite debljine [6]	16
Tablica 9. Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće čelika povišene čvrstoće [6]	16
Tablica 10. Ispitivanje žilavosti čelika povišene čvrstoće Charpyjevim batom [6]	17
Tablica 11. Granične vrijednosti legirnih elemenata i primjesa za nelegirane konstrukcijske čelike za zavarene konstrukcije [6]	19
Tablica 12. Negativne tolerancije ovisno o nominalnoj debljini	20
Tablica 13. Kategorije visokočvrstih čelika za zavarene konstrukcije [6]	23
Tablica 14. Maksimalne debljine visokočvrstih čelika za zavarene konstrukcije [6]	24
Tablica 15. Kemijski sastav visokočvrstih čelika za zavarene konstrukcije [6]	26
Tablica 16. Maksimalne vrijednosti C_{eq} , CET, P_{cm} visokočvrstih čelika za zavarene konstrukcije [6]	27
Tablica 17. Mehanička svojstva visokočvrstih čelika za zavarene konstrukcije [6]	29
Tablica 18. Istezljivost uzorka traka širine 25 mm i mjerne duljine 200 mm [6]	30
Tablica 19. Stanje isporuke, kategorija i mehanička svojstva YP47 čeličnih limova [6]	31
Tablica 20. Kemijski sastav i dezoksidacija YP47 čeličnih limova [21]	32
Tablica 21. Zahtjevi za čelike otporne krhkom lomu [21]	34
Tablica 22. Kemijski sastav i dezoksidacija čelika otpornih krhkom lomu [21]	35
Tablica 23. Mehanička svojstva nekih toplinski postojanih čelika [7]	41
Tablica 24. Najniže proračunske temperature za čelike žilave pri niskim temperaturama [6]	45
Tablica 25. Zahtjevi za udarni rad loma za čelike žilave pri sniženim temperaturama [6]	47
Tablica 26. Negativne tolerancije ovisno o debljini materijala prevlake [6]	56
Tablica 27. Veličina ispitne serije ovisno o vrsti proizvoda i udjelu sumpora [6]	62

Tablica 28. Prihvatljive vrijednosti smanjenja površine [6]	63
---	----

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm^2	Površina
A_5	%	Istezljivost
CET	/	Ekvivalent ugljika
Ceq	/	Ekvivalent ugljika
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
E_ϑ	N/mm^2	Modul elastičnosti pri nekoj temperaturi
F	N	Sila
K_{ca}	$\text{N/mm}^{3/2}$	Lomna žilavost
KV	J	Udarni rada loma po Charpyju (epruveta s V zarezom)
L_0	mm	Početna mjerna duljina
N	/	Broj ciklusa pri ispitivanju dinamičke izdržljivosti
P_{cm}	/	Osjetljivost na hladno pucanje
R_e	N/mm^2	Granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
$R_{m/\vartheta}$	N/mm^2	Vlačna čvrstoća pri nekoj temperaturi
$R_{p0.2}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
$R_{p0.2/\vartheta}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja pri nekoj temperaturi
S_0	mm^2	Početna površina poprečnog presjeka epruvete
S_A	mm	Nazivna debljina materijala prevlake
S_G	mm	Nazivna debljina osnovnog materijala
S_{pl}	mm	Nazivna debljina prevučenog čelika
t	mm	Debljina
t_a	h	Vrijeme austenitizacije
T_r	K	Radna temperatura
T_t	K	Temperatura tališta
$(\Delta R_e)_1$	N/mm^2	Promjena granice razvlačenja stvaranjem kristala mješanca
$(\Delta R_e)_2$	N/mm^2	Promjena granice razvlačenja umnažanjem dislokacija
$(\Delta R_e)_3$	N/mm^2	Promjena granice razvlačenja usitnjenjem zrna
$(\Delta R_e)_4$	N/mm^2	Promjena granice razvlačenja precipitacijom
ε	mm/mm	Istezanje
ϑ_a	°C	Temperatura austenitizacije
ϑ_p	°C	Temperatura popuštanja
σ_A	N/mm^2	Minimalna vrijednost vlačne čvrstoće ili granice razvlačenja ili konvencionalne granice razvlačenja (0,2%) za materijal prevlake
σ_{dop}	N/mm^2	Dopušteno naprezanje

σ_G	N/mm ²	Minimalna vrijednost vlačne čvrstoće ili granice razvlačenja ili konvencionalne granice razvlačenja (0,2%) za osnovni materijal
σ_{pl}	N/mm ²	Minimalna vrijednost vlačne čvrstoće ili granice razvlačenja ili konvencionalne granice razvlačenja (0,2%) za prevučene čelike

POPIS KRATICA

CAT (eng. Crack Arrest Temperature) - Temperatura otpornosti krhkom lomu

CTOD (eng. Crack Tip Opening Displacement) - Kritična vrijednost otvaranja vrška pukotine

N - Normalizacija

NR (eng. Normalizing Rolling) - Normalizirajuće valjanje

QT (eng. Quenching and Tempering) - Poboljšavanje

TMCP, TM (eng. Thermo-Mechanical Controlled Processing, Thermo-Mechanical Rolling) - Termomehaničko (kontrolirano) valjanje

ZUT - Zona utjecaja topline

SAŽETAK

Pravila za klasifikaciju brodova Hrvatskog registra brodova opisuju čelike za primjenu u brodogradnji. U ovom radu opisani su sljedeći čelici i čelični proizvodi: konstrukcijski čelici normalne i povišene čvrstoće namijenjeni za brodski trup, nelegirani konstrukcijski čelici za zavarene konstrukcije, visokočvrsti čelici za zavarene konstrukcije, YP47 čelični limovi, čelici otporni na krhki lom, toplinski postojani čelici, čelici žilavi pri sniženim temperaturama, korozijski postojani čelici, prevučeni čelični limovi i čelični limovi i široke trake s određenim minimalnim svojstvima u smjeru debljine. Opisana su njihova mehanička svojstva, kemijski sastav, zavarljivost, stanje isporuke, toplinska obrada, primjenjivi postupci razornih i nerazornih ispitivanja, tolerancije debljine i kvaliteta površine te druge specifične tražene karakteristike vodeći se Pravilima za klasifikaciju.

Ključne riječi: brodogradnja, čelik, Hrvatski registar brodova

SUMMARY

Rules for the classification of ships by Croatian register of shipping describe steels for shipbuilding applications. In this thesis following steels and steel products are described: normal and higher strength hull structural steels, unalloyed structural steels for welded structures, high-strength steels for welded structures, YP47 steel plates, brittle crack arrest steels, high-temperature steels, steels tough at sub-zero temperatures, stainless steels, clad plates and steel plates and wide flats with specified minimum through thickness properties. Their mechanical properties, chemical composition, weldability, condition of supply, heat treatment, applicable destructive and non-destructive tests, thickness tolerances and surface quality along with specific requirements for each steel category are described following Rules for the classification.

Key words: shipbuilding, steel, Croatian register of shipping

1. UVOD

Povijesno gledano brodograđevnu djelatnost prati duga evolucija od vremena prapovijesti kada su prva plovila bila debla slučajno oborenih stabala, pogonjena dlanovima. Zatim se došlo na ideju vezivanja više debla u splav te zamjene dlanova s veslima. Splav je bila teška za izvlačenje i neprikladna za upravljanje, pa se došlo na ideju dubljenja debelog debla, te se tako dobio prostor za sigurnu plovidbu i za smještaj tereta. Razvoj se nastavlja kroz stari vijek i egipatske, grčke, kineske te onda i rimske brodove. Grčka trirema primjer je ratnog broda starog vijeka (slika 1).



Slika 1 . Grčka Trirema, 5. stoljeće pr.Kr [1]

Kroz srednji vijek u Europi se razvijaju razne varijante brodova. U sjevernom dijelu Europe grade se brodovi po uzoru na vikinške dok jug nastavlja rimsku tradiciju. U 15. stoljeću u Portugalu razvijen je jedrenjak Karavela (slika 2.) za istraživanja obale Afrike i istraživanja Atlantskog oceana te su jedni od najvažnijih brodova iz doba velikih geografskih otkrića. Karavela je koristila latinsko jedro koje joj je omogućavalo jedrenje uz vjetar. Latinsko jedro je imala i hrvatska gajeta, Falkuša (slika 3.). Falkuša je ribarski čamac zaobljena trupa, šiljata pramca i krme, gradila se u Komiži, na otoku Visu.

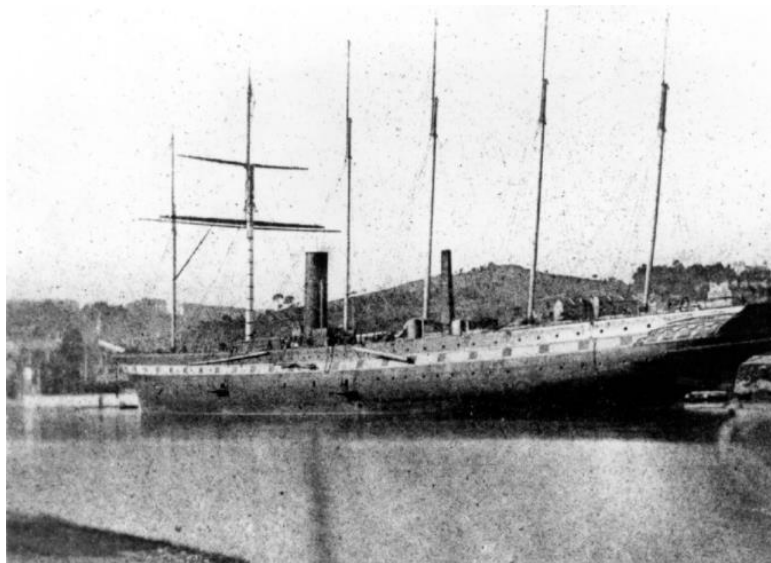


Slika 2. Portugalska karavela [2]



Slika 3. Gajeta Falkuša [3]

Do 19. stoljeća brodovi su bili izgrađeni gotovo samo od drva, no u 19. stoljeću, u jeku industrijske revolucije željezo zamjenjuje drvo kao glavni brodograđevni materijal. Željezni brodovi su mogli biti puno veći, imali su puno više mjesta za teret i njihovo održavanje nije tražilo ni približno puno posla. 1843. izgrađen je prvi prekooceanski brod od kovanog željeza, britanskog inženjera Isambarda Kingdom Brunela (slika 4.)



Slika 4 . SS Great Britain, prvi prekooceanski brod od kovanog željeza [4]

SS Great Britain je također prvi brod pogonjen brodskim vijkom (slika 5.), koji se pokazao puno efikasnijim načinom pogona od vesla. Međutim, parobrodi su još imali velikih problema. Velika količina ugljena je bila potrebna i za manja putovanja te bi se pri većim putovanjima moglo dogoditi da se nigdje nema opskrbiti dodatnim ugljenom. Iz tog razloga su parobrodi i dalje imali jedra.



Slika 5. Brodski vijak po uzoru na SS Great Britain [4]

1880-ih umjesto željeza sve se više počinje primjenjivati čelik u brodogradnji što je smanjilo masu brodova te ih učinilo jeftinijima. U 20. stoljeću zavarivanje postaje sve zastupljenije u brodogradnji. Godine 1930. u SAD-u napravljen je prvi komercijalni kompletno zavaren brod (slika 6.). Prije zavarivanja, spajanje limova zakovicama bila je glavna metoda brodogradnje.



Slika 6. MS Carolinian, prvi komercijalni kompletno zavaren brod [5]

Od 1940-ih do danas brodovi su gotovo isključivo rađeni od čelika. Osim u izradi trupa broda, čelik se primjenjuje i u izradi razne brodske opreme; cijevnih sustava, tlačnih posuda, kontejnera, spremnika za teret i raznih “offshore“ instalacija itd. Različiti proizvodi eksploatiraju se u različitim radnim uvjetima što znači da se postavljaju i specifični zahtjevi na svojstva materijala. To je dovelo do primjene više različitih vrsta i kategorija čelika. U Hrvatskoj tijelo koje je zaduženo za određivanje traženih vrijednosti za tehničke specifikacije

tih materijala te nadgledanje njihove proizvodnje i obrade, ispitivanja i ispitnih uzoraka je Hrvatski Registar Brodova (dalje u radu samo Registar).

2. ČELICI NORMALNE I POVIŠENE ČVRSTOĆE

Čelici normalne i povišene čvrstoće jesu zavarljivi čelici koji se primjenjuju kao toplo valjani limovi, široke trake, šuplji i puni profili i namijenjeni su poglavito za izradu brodskog trupa, ali i za ostale dijelove broda. Ovi čelici koriste se prvenstveno za limove i široke trake čija debljina ne prelazi 100 mm te za šuplje i pune profile čija debljina ne prelazi 50 mm. [6]

2.1. Čelici normalne čvrstoće

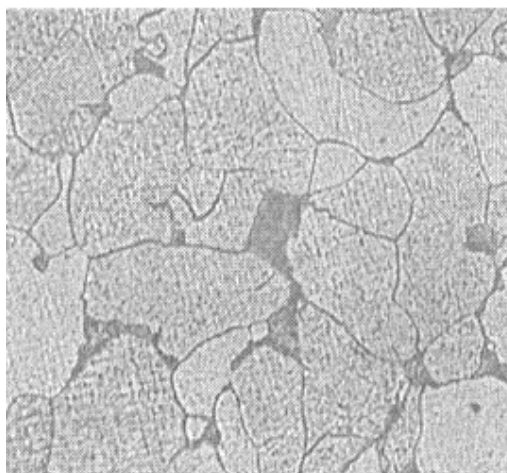
Određene su četiri vrste čelika normalne čvrstoće: A, B, D i E na osnovi zahtjeva za ispitivanjem žilavosti. Prema kemijskom sastavu, mikrostrukтури, a time i po svojim svojstvima ovi čelici djelomično odgovaraju općim konstrukcijskim čelicima, no za dvije najbolje kategorije D i E pored normalizacije predviđena je i termomehanička obrada (valjanje). Za sve kategorije propisano je smirivanje čelika. Smireni čelici dobivaju se tako da se u procesu dezoksidacije dodaje manja količina silicija, mangana i drugih elemenata koji vežu kisik i stvaraju okside koji se izdvajaju u trosku. Smireni čelici imaju homogenu mikrostrukturu, bolja mehanička svojstva i zavarljivost, prikladniji su za toplinsku obradu i manje osjetljivi na snižene temperature od nesmirenih čelika. Za čelike kategorije D debljine veće od 50 mm potrebno je uz smirivanje i usitnjavanje zrna. Čelici kategorije E svih debljina moraju biti podvrgnuti i usitnjavanju zrna [7]. Stanje isporuke i postupak dezoksidacije za svaku kategoriju čelika prikazani su tablicom 1.

Tablica 1. Stanje isporuke čelika normalne čvrstoće [8]

KATEGORIJA		A	B	D	E
Dezoksidacija	$t \leq 25$	Svaki postupak	Svaki postupak	Svaki postupak	Smiren i obrađen na sitno zrno
	$t \leq 50$	Svaki postupak	Svaki postupak	Svaki postupak	
	$t > 50$	Smiren	Smiren	Smiren i obrađen na sitno zrno	
Stanje isporuke	$t \leq 35$	Nije ograničeno	Nije ograničeno	Nije ograničeno	Normalizirano ili termomehanički valjano
	$t < 50$			Normalizirano ili termomehanički valjano	
	$t \leq 100$	Normalizirano ili termomehanički valjano	Normalizirano ili termomehanički valjano		

2.1.1. Kemijski sastav

Propisani su maksimalni ili minimalni udjeli C, Mn, Si, P i S te i Al za kategorije D i E. Umjesto aluminija mogu se koristiti i drugi prikladni elementi koji pridonose sitnozrnatoj mikrostrukturi, slika 2. Za široke trake i limove čija debljina prelazi 50 mm dopuštena su manja odstupanja u kemijskom sastavu uz odobrenje Registra. Propisani sastav za ove čelike prikazan je u tablici 2.



Slika 7. Struktura čelika s 0,18 % ugljika [8]

Tablica 2. Kemijski sastav čelika normalne čvrstoće [6]

Kategorija	A	B	D	E
Kemijski sastav (analiza taljevine), %	Količina ugljika i 1/6 mangana ne smije premašiti 0,4%			
C maks.	0,21 ⁽¹⁾	0,21	0,21	0,18
Mn min.	2,5 x C	0,80 ⁽²⁾	0,60	0,70
Si maks.	0,50	0,35	0,35	0,35
P maks.	0,035	0,035	0,035	0,035
S maks.	0,035	0,035	0,035	0,035
Al (topljiv u kiselini) min.	-	-	0,015 ⁽³⁾⁽⁴⁾	0,015 ⁽⁴⁾
Napomene: ⁽¹⁾ Maksimalno 0,23% za šuplje profile ⁽²⁾ Kada se čelik kategorije B ispituje udarni rad loma udio mangana može se iznositi 0,6% ⁽³⁾ Za čelike kategorije D deblje od 25 mm ⁽⁴⁾ Za čelike kategorije D deblje od 25 mm i kategorije E može se odrediti ukupni udio aluminija umjesto udjela topljivog u kiselini. U tom slučaju udio aluminija ne smije biti manji od 0,02%				

2.1.2. Zavarljivost

Dobra zavarljivost čelika podrazumijeva da mogu biti uspješno zavareni sa bilo kojom konvencionalnom tehnikom zavarivanja bez dodatnih mjera opreza. Zavarljivost se definira parametrom zvanim ekvivalent ugljika. Ugljik i ostali legirni elementi utječu na metalurška svojstva taline zavara. U nepovoljnim uvjetima, moguća je pojava pukotina u talini zavara u procesu skrućivanja. To se događa zbog pojave krhke faze. Tada čelik smatramo nezavarljivim ili loše zavarljivim. Krhkost direktno ovisi o udjelu ugljika te djelomično i o ostalim legirnim elementima. Stoga, za dobru zavarljivost udio ugljika i ostalih legirnih elemenata trebao bi biti što je manji moguć. Međutim, legirni elementi pridonose mehaničkim svojstvima čelika te je potrebno naći sastav koji će imati i zadovoljavajuću zavarljivost i mehanička svojstva. Ekvivalent ugljika (C_{eq}) je vrijednost kojom mjerimo zavarljivost čelika. Za različite vrste čelika različita je i formula kojom se računa C_{eq} , a za čelike normalne čvrstoće ona glasi:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} (\%) \quad (1)$$

Zavarljivim čelicima se smatraju oni kojima je $C_{eq} \leq 0,4$ [9]

2.1.3. Mehanička svojstva

Za sve kategorije propisana je minimalna granica razvlačenja od $R_{e\ min} = 235\ N/mm^2$, te područje vlačne čvrstoće $R_m = 400 - 520\ N/mm^2$. Propisana minimalna istezljivost od 22% odnosi se na veće debljine lima ili trake (40-50 mm), dok su za manje debljine minimalne vrijednosti istezljivosti posebno propisane, tablica 3. Osnovna razlika u navedenim kategorijama koja je jasno posljedica mikrostrukture odnosno tehnološkog postupka proizvodnje čelika odnosi se na zajamčenu žilavost (udarni rad loma) na različitim temperaturama [7]. Dok se za kategoriju A iznos udarnog rada loma propisuje samo za dijelove debljine veće od 50 mm i to na temperaturi od $+20^\circ C$, za ostale kategorije navodi se zajamčena žilavost i za debljine manje od 50 mm na temperaturama određenim prema kategorijama čelika. Iznosi zajamčene žilavosti prikazani su u tablici 4.

Tablica 3. Minimalna istezljivost za razne debljine čelika normalne čvrstoće [6]

Debljina, mm	≤ 5	>5 ≤ 10	>10 ≤ 15	>15 ≤ 20	>20 ≤ 25	>25 ≤ 30	>30 ≤ 40	>40 ≤ 50
Istezljivost %	14	16	17	18	19	20	21	22

Tablica 4. Ispitivanje žilavosti Charpyjevim batom čelika normalne čvrstoće [6]

KATEGORIJA	Ispitivanje udarnog rada loma						
	Temperatura ispitivanja, (°C)	Prosječan iznos udarnog rada loma KV, (J)					
		min					
		$t \leq 50$ (mm)		$50 < t \leq 70$ (mm)		$70 < t \leq 100$ (mm)	
		L ⁽¹⁾	T ⁽¹⁾	L	T	L	T
A	+20	-	-	34 ⁽³⁾	24 ⁽³⁾	41 ⁽³⁾	27 ⁽³⁾
B	0	27 ⁽²⁾	20 ⁽²⁾	34	24	41	27
D	-20	27	20	34	24	41	27
E	-40	27	20	34	24	41	27

Napomene:
t: debljina (mm)
⁽¹⁾ L- Uzdužno
T- Poprečno
⁽²⁾ Ispitivanje udarnog rada loma za B kategoriju debljina ispod 25 mm većinom nije potrebno
⁽³⁾ Ispitivanje udarnog rada loma za A kategoriju debljina iznad 50 mm nije potrebno ukoliko je čelik obrađen na sitno zрно te normaliziran. U posebnim slučajevima odobrenim od strane Registra nije potrebno ispitivanje ni na termomehanički valjanim dijelovima

Za navedena ispitivanja utvrđena su i pravila izvođenja ispitivanja te izgled i dimenzije ispitnog uzorka. Pri ispitivanju vlačne čvrstoće za limove, široke trake i šuplje profile koriste se ispitni uzorci pune debljine proizvoda. Okrugli ispitni uzorci mogu se koristiti kad je debljina proizvoda veća od 40 mm ili za šipke punog profila. Pri ispitivanju žilavosti Charpyjevim batom koriste se ispitni uzorci s V zarezom tako da je njihov rub unutar 2 mm od valjane površine, a njihova uzdužna os paralelna (L u tablici 4) ili poprečna (T u tablici 4) na završni smjer valjanja. Zarez se izrezuje na stranici koja je originalno okomita na valjanu površinu. Pozicija zareza ne smije biti bliže od 25 mm rubu uzorka. Kod proizvoda debljih od 40 mm, uzimaju se ispitni uzorci za udarni rad loma s njihovom uzdužnom osi na mjestu četvrtine debljine. Vrijednosti u tablici 4 odnose se na normirane uzorke dimenzija poprečnog presjeka 10 mm x 10 mm. Provode se tri ispitivanja te njihova srednja vrijednost mora zadovoljiti tražene zahtjeve iz tablice 4. Samo jedna vrijednost smije biti ispod zahtijevane vrijednosti traženog prosjeka, uz uvjet da nije manja od 70% iznosa tog prosjeka. Ukoliko nije drugačije navedeno, koriste se uzdužni uzorci.

2.1.4. Kvaliteta površine i tolerancije debljine

Korišteni čelik ne smije imati površinske nepravilnosti koje mogu štetno djelovati u predviđenim eksploatacijskim uvjetima. Kvaliteta površine materijala mora biti sukladna

normama HRN EN 10163-1:2007 “Uvjeti isporuke za stanje površine toplo valjanih čeličnih ploča, širokih traka i profila -- 1. dio: Opći uvjeti“, HRN EN 10163-2:2007 “Uvjeti isporuke za stanje površine toplo valjanih čeličnih ploča, širokih traka i profila -- 2. dio: Ploča i široke trake“, HRN EN 10163-3:2007 “Uvjeti isporuke za stanje površine toplo valjanih čeličnih ploča, širokih traka i profila -- 3. dio: Profili“ ili nekoj drugoj ekvivalentnoj normi. Odgovornost postizanja tražene površinske hrapavosti leži na proizvođaču materijala, čija je zadaća da pregleda materijal prije njegovog dostavljanja. Međutim, u toj fazi, valjanje ili neka primjenjivana toplinska obrada mogli su sakriti eventualne pogreške i nepravilnosti. Ako se pri naknadnom korištenju otkriju nepravilnosti materijal se šalje na popravak ili se njegova upotreba potpuno otkazuje. Ne računa se svaka greška na površini materijala kao nepravilnost koja zahtjeva popravak. Nesavršenosti bezopasne naravi, kao što su rupice, utori, ogrebotine, udubljenja koje su dio proizvodnog procesa su prihvatljive, neovisno o njihovom broju, ako on ne premašuje onaj naveden u normi HRN EN 10163-2:2007 za razred A te ako debljina proizvoda ulazi u tolerancijsko područje definirano u daljnjem tekstu. Također, ukupna površina na kojoj se nalaze nesavršenosti ne smije premašiti 15% ukupne površine proizvoda. Zahtjevi na tolerancije debljine opisani u ovom poglavlju odnose se na limove i široke trake širine 600 mm ili veće te debljine jednake ili veće od 5 mm. Tolerancije debljine za proizvode debljine manje od 5 mm moraju biti u skladu s nacionalnim ili međunarodnim standardima npr. razred B norme ISO 7452:2013 „Hot-rolled steel plates — Tolerances on dimensions and shape“. Tolerancije debljine određenog proizvoda definirane su na sljedeći način:

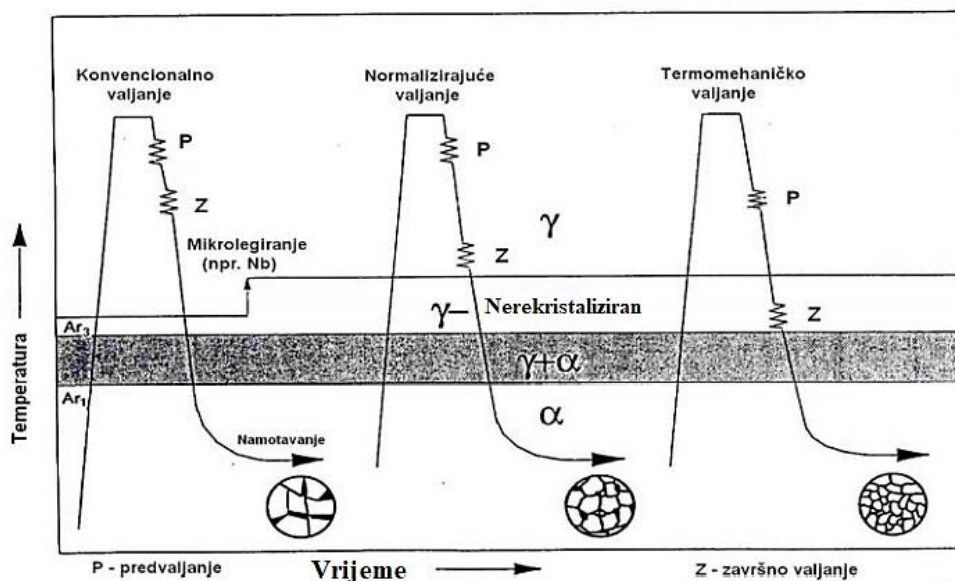
- pozitivna tolerancija je gornja granica prihvatljivog odstupanja iznad nominalne vrijednosti debljine.
- negativna tolerancija je donja granica prihvatljivog odstupanja ispod nominalne vrijednosti debljine.

Negativna tolerancija za čelike normalne čvrstoće iznosi 0,3 mm neovisno o debljini proizvoda. Pozitivna tolerancija određuje se u skladu s priznatim nacionalnim ili međunarodnim standardom.

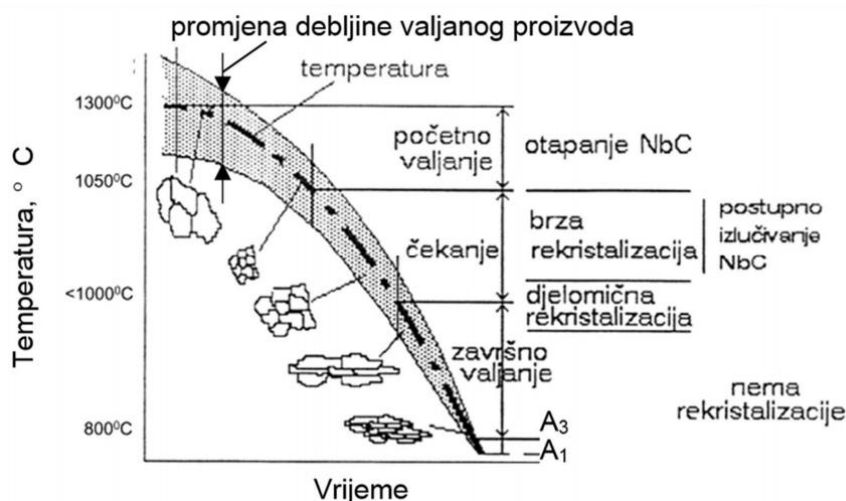
2.2. Čelici povišene čvrstoće

Za čelike povišene čvrstoće određene su tri podskupine prema vrijednostima granice razvlačenja ($315, 355$ i 390 N/mm^2) te unutar njih po četiri kategorije na osnovi temperature ispitivanja udarnog rada loma.

Za sve kategorije predviđeno je pored smirivanja i usitnjenje zrna. Za to je potrebno pored legiranja Al, kao što je to spomenuto kod čelika normalne čvrstoće i dodatno mikrolegiranje elementima kao što su V, Nb i Ti koji s ugljikom tvore karbide, a s dušikom nitride. Takve sitne čestice sprečavaju rast austenitnog zrna koje nakon pretvorbe daje sitnozrnatu feritno-perlitnu mikrostrukturu, a dodatno precipitacijski očvršćuju željeznu matricu. Uz to se zrno usitnjuje termomehaničkom obradom (kontrolirano valjanje) i/ili normalizacijskim žarenjem. Usporedba različitih procesa valjanja predočena je slikom 8. Nakon početnog valjanja na temperaturi od 1300 do 1050 °C pri kojoj se NbC i NbN otapaju u austenitu, čelik se prestaje valjati dok mu temperatura ne padne na oko 1000 °C ili nešto niže. Nakon toga se završno valja do temperature oko 800 °C u nekoliko prolaza s time da deformacija u svakom prolazu iznosi barem 15% tako da je ukupni stupanj deformacije $50\ldots 70 \%$. Dodaci Nb i V koji formiraju karbide i nitride (NbC, NbN, VC, VN) snizuju završnu temperaturu valjanja pa se čelik završno valja u austenitnoj ili austenitno-feritnoj mikrostrukturi. Osim toga ovi elementi sprečavaju brzu rekristalizaciju tako da austenitno zrno ostaje onako sitno (ali i nerekrystalizirano-usmjereno) kakvo je bilo između valjaka. Rezultat toga je formiranje vrlo sitnih feritno-perlitnih zrna usmjerenih u smjeru valjanja. Shema procesa prikazana je na slici 9. [7]

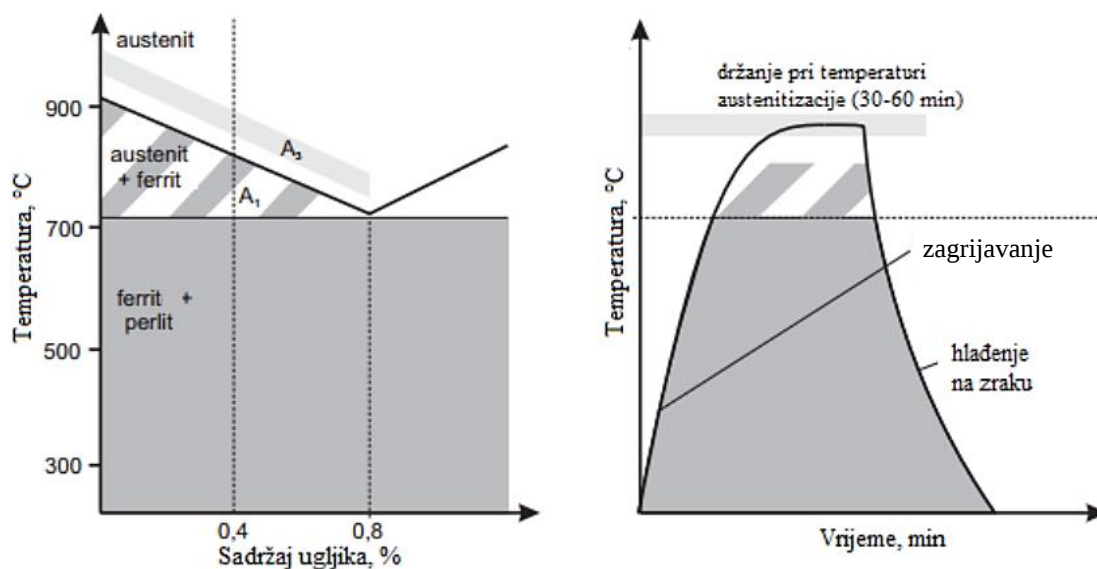


Slika 8. Shema procesa konvencionalnog, normaliziranog i termomehaničkog valjanja[10]



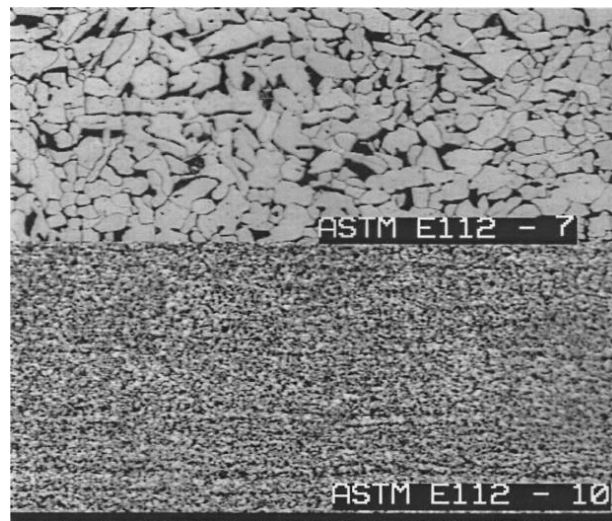
Slika 9. Shematski prikaz zbivanja pri kontroliranom valjanju [7]

Ako se nije kontrolirano valjalo do dovoljno niske temperature mikrostruktura se uvijek može popraviti normalizacijskim žarenjem. Normalizacijsko žarenje je postupak toplinske obrade koji se sastoji od zagrijavanja na temperaturu austenitizacije, 30-70 °C iznad A_3 temperature, kratkog držanja na toj temperaturi te sporog hlađenja na zraku (slika 10). Ugrijavanje na temperaturu austenitizacije trebalo bi biti sporo do temperature A_1 zbog opasnosti od pojave toplinskih naprezanja, a iznad temperature A_1 brzo, budući da se dio karbidnih čestica nastoji ostaviti neotopljen kako bi one time pridonijele usitnjenju zrna. [11]

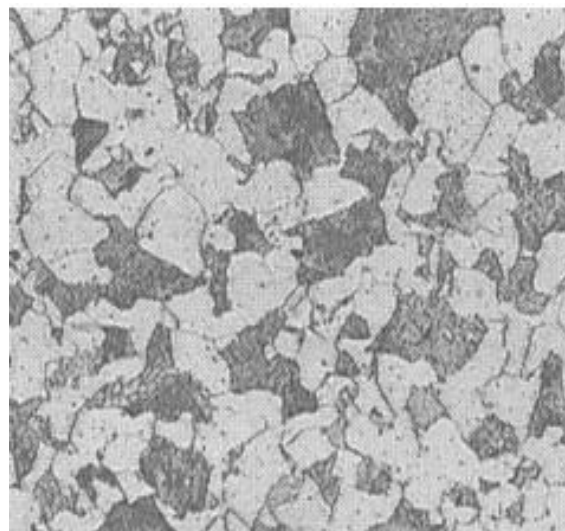


Slika 10. Normalizacija [11]

Na taj način formira se sitnozrnata feritno perlitna mikrostruktura, slike 11 i 12.



Slika 11. Usporedba veličine zrna "običnog" i sitnozrnatog čelika [7]



Slika 12. Struktura normaliziranog čelika s 0,18 % ugljika [8]

Stanje isporuke ovisi o debljini proizvoda. U tablici 5 prikazano je stanje isporuke te legirni elementi koji se koriste za usitnjavanje zrna za pojedine kategorije čelika povišene čvrstoće.

Tablica 5. Stanje isporuke čelika povišene čvrstoće [6]

Kategorija	Elementi za usitnjenje zrna	Debljina	Stanje isporuke
A32	Nb i/ili V	$\leq 12,5 \text{ mm}$	Nije ograničeno
A36		$>12,5 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$	Normalizirano, kontrolirano valjano, termomehanički valjano
A32	Al sam ili s Ti	$\leq 20 \text{ mm}$	Nije ograničeno
A36		$>20 \text{ mm} \leq 35 \text{ mm}$	Nije ograničeno, valjano stanje uz odobrenje Registra
		$>35 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$	Normalizirano, valjano pri kontroliranoj temperature ili termomehanički valjano
A40	Nije ograničeno	$\leq 12,5 \text{ mm}$	Nije ograničeno
		$>12,5 \text{ mm} \leq 50 \text{ mm}$	Normalizirano, valjano pri kontroliranoj temperaturi ili termomehanički valjano
		$>50 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$	Normalizirano, termomehanički valjano ili poboljšano
D32	Nb i/ili V	$\leq 12,5 \text{ mm}$	Nije ograničeno
D36		$>12,5 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$	Normalizirano, valjano pri kontroliranoj temperaturi ili termomehanički valjano
D32	Al sam ili s Ti	$\leq 20 \text{ mm}$	Nije ograničeno
D36		$>20 \text{ mm} \leq 25 \text{ mm}$	Nije ograničeno, valjano stanje uz odobrenje registra
		$>25 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$	Normalizirano, valjano pri kontroliranoj temperaturi ili termomehanički valjano
D40	Nije ograničeno	$\leq 50 \text{ mm}$	Normalizirano, valjano pri kontroliranoj temperaturi ili termomehanički valjano
		$>50 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$	Normalizirano, termomehanički valjano ili poboljšano
E32	Nije ograničeno	$\leq 50 \text{ mm}$	Normalizirano, valjano pri kontroliranoj temperaturi ili termomehanički valjano
E36		$>50 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$	Normalizirano, termomehanički valjano
E40	Nije ograničeno	$\leq 50 \text{ mm}$	Normalizirano, termomehanički valjano ili poboljšano
		$>50 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$	
F32	Nije ograničeno	$\leq 50 \text{ mm}$	
F36		$\leq 50 \text{ mm}$	
F40		$>50 \text{ mm} \leq 100 \text{ mm}$	
Šuplji profili kategorija A32, A36, D32 i D36 mogu biti isporučeni u valjanom stanju te kategorija E32 i E36 u valjanom i ili valjanom pri kontroliranoj temperaturi, uz uvjet da su postignuti zadovoljavajući rezultati ispitivanja udarnog rada loma, KV Kategorije F32 i F36, uz posebno odobrenje Registra, mogu biti isporučene u kontrolirano valjanom stanju			

2.2.1. Kemijski sastav i zavarljivost

Djelovanje mikrolegirajućih elemenata u čeliku je različito. Oni mogu stvarati kristale mješance (čvrste otopine) ili spojeve kao što su nitridi, karbidi i karbonitridi. Dodatak

mikrolegirajućih elemenata koji stvaraju karbide i nitride (kao npr. niobij, vanadij, titan) ima značajnu primjenu za povišenje čvrstoće u proizvodnji čelika. Najznačajnije djelovanje izraženo im je kroz usitnjenje zrna i precipitaciju (očvršćivanje izlučenim česticama). Na taj način nadomješta se pad čvrstoće izazvan sniženjem sadržaja ugljika, odnosno udjela perlita, te se omogućava daljnji porast čvrstoće. Mikrolegirajući elementi koji stvaraju stabilne karbide, nitride i karbonitride pri termomehaničkoj obradbi čelika imaju značajan utjecaj na mehanizme očvršćivanja te stoga čelici povišene čvrstoće već u valjanom stanju imaju visoka mehanička i tehnološka svojstva. [12] Propisani su maksimalni ili minimalni udjeli C, Mn, Si, P, S, Al, Nb, V, Ti, Cu, Cr, Ni, Mo i N za kategorije A32, A36, A36, A40, D32, D36, D40, E32, E36, E40, F32, F36 i F40. Za široke trake i limove čija debljina prelazi 50 mm dopuštena su manja odstupanja u kemijskom sastavu uz odobrenje Registra. Propisani udjeli prikazani su u tablici 6.

Tablica 6. Kemijski sastav čelika povišene čvrstoće [6]

KATEGORIJA ⁽¹⁾	A32	D32	E32	F32
	A36	D36	E36	F36
	A40	D40	E40	F40
Dezoksidacija	Smireno i obrađeno na sitno zrno			
C maks. (%)	0,18			0,16
Mn (%)	0,90-1,60 ⁽²⁾			0,90-1,60
Si maks. (%)	0,50			0,50
P maks. (%)	0,035			0,025
S maks. (%)	0,035			0,025
Al (top. u kis.) min. (%)	0,015 ⁽³⁾⁽⁴⁾			0,015 ⁽³⁾⁽⁴⁾
Nb (%)	0,02-0,05 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾			0,02-0,05 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾
V (%)	0,05-0,10 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾			0,05-0,10 ⁽⁴⁾⁽⁵⁾
Ti maks (%)	0,02 ⁽⁵⁾			0,02 ⁽⁵⁾
Cu maks (%)	0,35			0,35
Cr maks (%)	0,20			0,20
Ni maks. (%)	0,40			0,40
Mo maks. (%)	0,08			0,08
N maks. (%)	-			0,009 (0,012 ako je prisutan Al)
Napomene:				
⁽¹⁾ Slovo H može biti dodano iza ili ispred oznake kategorije npr. HA32, AH32 itd.				
⁽²⁾ Do debljine 12,5 mm minimalni udio mangana može se sniziti na 0,7 %				
⁽³⁾ Umjesto udjela Al topljivog u kiselini može se uzeti u obzir ukupni udio Al koji mora minimalno iznositi 0,02 %				
⁽⁴⁾ Čelik sadrži Al, Nb, V ili drugi prikladni element za usitnjenje zrna, pojedinačno ili u nekoj kombinaciji. Kad je legiran samo jednim od tih elemenata čelik sadrži naznačeni minimalni udio tog elementa. Kad je legiran nekom od kombinacija minimalni udjeli elemenata nisu primjenjivi.				
⁽⁵⁾ Kada se čelik legira kombinacijom Nb, V i Ti njihov maks. zajednički udio iznosi 0,12 %				

Za termomehanički valjanje čelike potrebno je izračunati ekvivalent ugljika kako bi se odredila zavarljivost koristeći se sljedećom formulom:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \% \quad (2)$$

Osim ekvivalentom ugljika, za određivanje zavarljivosti može se koristiti i formula za osjetljivost na hladno pucanje [6]:

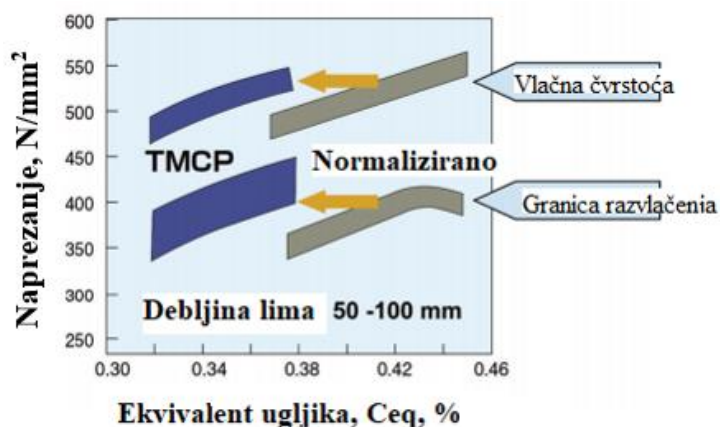
$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B, \% \quad (3)$$

Određeni su maksimalni dopušteni ekvivalenti ugljika za sve kategorije čelika povišene čvrstoće obrađenih termomehaničkim valjanjem, tablica 7.

Tablica 7. C_{eq} za čelike povišene čvrstoće debljine do 100mm obrađene termomehaničkim valjanjem [6]

KATEGORIJA	Ekvivalent ugljika, maks. %	
	$t \leq 50$	$50 < t \leq 100$
A32, D32, E32, F32	0,36	0,38
A36, D36, E36, F36	0,38	0,40
A40, D40, E40, F40	0,40	0,42
t : debljina (mm)		

Čelici obrađeni termomehaničkim valjanjem imaju vlačnu čvrstoću za otprilike 100 N/mm^2 veću od čelika obrađenih konvencionalnim metodama normaliziranog ili kontroliranog valjanja istog kemijskog sastava (slika 13) što doprinosi velikom smanjenju C_{eq} (čak s 0,4% na 0,3 %). Smanjenjem C_{eq} smanjuje se tvrdoća ZUT-a zavara i drastično povećava zavarljivost čelika. [13]



Slika 13. Usporedba C_{eq} nakon normalizacije i termomehaničkog valjanja [13]

Međutim, postoje i rizici kod zavarivanja sitnozrnatih čelika, a to su: [10]

- nastanak hladnih pukotina izazvanih vodikom u metalu zavara i zoni utjecaja topline (ZUT) i pukotina uslijed zakaljivanja u ZUT-u
- sniženje žilavosti i povećanje prijelazne temperature krhkosti uslijed nastanka grubog zrna, zakaljivanja ili izlučivanja u ZUT-u
- sniženje čvrstoće u široj zoni ZUT-a uslijed popuštanja, kod čelika kaljenog i popuštenog stanja

2.2.2 Mehanička svojstva

Vrijednosti granice razvlačenja, vlačne čvrstoće, istezljivost i udarnog rada loma propisane su za sve kategorije čelika. Vrijednosti istezljivosti variraju ovisno o debljini proizvoda, tablica 8.

Tablica 8. Minimalna istezljivost čelika povišene čvrstoće za različite debljine [6]

Kategorija	Minimalne vrijednosti istezljivosti (%) za debljine							
	≤ 5	> 5 ≤ 10	> 10 ≤ 15	> 15 ≤ 20	> 20 ≤ 25	> 25 ≤ 30	> 30 ≤ 40	> 40 ≤ 50
A32, D32, E32, F32	14	16	17	18	19	20	21	22
A36, D36, E36, F36	13	15	16	17	18	19	20	21
A40, D40, E40, F40	12	14	15	16	17	18	19	20

Propisane vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće prikazane su u tablici 9.

Tablica 9. Vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće čelika povišene čvrstoće [6]

KATEGORIJA	Granica razvlačenja R_e (N/mm ²) min	Vlačna čvrstoća R_m (N/mm ²)
A32 D32 E32 F32	315	440/570
A36 D36 E36 F36	355	490/630
A40 D40 E40 F40	390	510/660

Ispitivanje udarnog rada loma provodi se na temperaturi 0 °C za kategoriju A, -20 °C za kategoriju D, -40 °C za kategoriju E te -60 °C za kategoriju F. Propisane vrijednosti za različite intervale debljina prikazane su u tablici 10.

Tablica 10. Ispitivanje žilavosti čelika povišene čvrstoće Charpyjevim batom [6]

KATEGORIJA	Temperatura ispitivanja (°C)	Ispitivanje udarnog rada loma					
		Prosječan iznos udarnog rada loma, (J) min					
		t ≤ 50 (mm)		50 < t ≤ 70 (mm)		70 < t ≤ 100 (mm)	
		L ⁽¹⁾	T ⁽¹⁾	L ⁽¹⁾	T ⁽¹⁾	L ⁽¹⁾	T ⁽¹⁾
A32	0	31 ⁽²⁾	22 ⁽²⁾	38	26	46	31
D32	-20	31	22	38	26	46	31
E32	-40	31	22	38	26	46	31
F32	-60	31	22	38	26	46	31
A36	0	34 ⁽²⁾	24 ⁽²⁾	41	27	50	34
D36	-20	34	24	41	27	50	34
E36	-40	34	24	41	27	50	34
F36	-60	34	24	41	27	50	34
A40	0	39	26	46	31	55	37
D40	-20	39	26	46	31	55	37
E40	-40	39	26	46	31	55	37
F40	-60	39	26	46	31	55	37
Napomene: t: debljina (mm) ⁽¹⁾ L- uzdužno T- poprečno ⁽²⁾ Za kategorije A32 i A36 Registar može dozvoliti manji broj ispitivanja ukoliko su rezultati ispitivanja zadovoljavajući							

2.2.3 Kvaliteta površine i tolerancije debljine

Zahtjevi na kvalitetu površine i tolerancije debljine opisani su u 2.1.4.

3. NELEGIRANI KONSTRUKCIJSKI ČELICI ZA ZAVARENE KONSTRUKCIJE

3.1 Zavarivanje u brodogradnji

Postoji nekoliko zastupljenih vrsta zavarivanja korištenih u brodogradnji. Oni se uvelike razlikuju u načinu prijenosa topline, pritiska te korištenoj opremi. Najzastupljeniji postupci su:

- Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (REL)
- Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom pod zaštitnom troskom (EPT)
- Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti neutralnog plina (MIG)
- Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (TIG)
- Plinsko zavarivanje

Iako se u automobilskoj industriji koristi naveliko, robotsko zavarivanje (slika 14) sve više pronalazi primjenu i u brodogradnji. Primjenjuju se elektrolučno i točkasto zavarivanje. Prednosti automatiziranog robotskog zavarivanja su povećana brzina i kvaliteta zavarivanja. Također je sigurnije i isplativije. Zavarivanje se može u potpunosti izvršiti na inače nedostupnim mjestima i poništava se faktor ljudske pogreške. [14]



Slika 14. Roboti za zavarivanje [14]

3.2 Primjenjivi čelici

Predviđeni su za plosnate proizvode, profile i šipke napravljene od nelegiranog konstrukcijskog čelika s granicom razvlačenja ne manjom od 355 N/mm^2 koji se koriste za zavarene brodske konstrukcije (npr. u proizvodnji motora), ali ne i za izradu broskog trupa. Primjenjivi su čelici sukladni normama EN 10025, EN 10210 i EN 10219 sljedećih oznaka: S275, S355, S235, osim čelika S235JR prema EN 10025-2 koji ne ulazi u primjenu. Ovi čelici mogu biti normalizacijski žareni ili normalizacijski valjani (S275NL, S355N, S355NL) te termomehanički valjani (S275M, S275ML, S355M, S355ML).

Ostali čelici mogu se primjenjivati tek nakon što se njihova priklanost utvrdi od strane Registra, pod uvjetom da kemijski sastav taline ne premaši granične vrijednosti prikazane u tablici 11.

Tablica 11. Granične vrijednosti legirnih elemenata i primjesa za nelegirane konstrukcijske čelike za zavarene konstrukcije [6]

Maseni udjel, %								
C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo
0,22	1,70	0,55	0,040	0,040	0,30	0,20	0,40	0,08

Nadalje, sitnozrnati konstrukcijski čelici trebaju imati dovoljnu količinu legirnih elemenata koji pridonose sitnozrnatoj mikrostrukturi npr. Al, Nb, V, Ti.

- a) istezljivost (A) mora biti minimalno 20% kod uzdužnih uzoraka te minimalno 18% za uzorke uzete poprečno na smjer valjanja,
- b) za sitnozrnate konstrukcijske čelike zahtijeva se vrijednost udarnog rada loma od minimalno 27 J (prosječna vrijednost) na uzorcima s V zarezom uzetih paralelno sa smjerom valjanja i podvrgnutih ispitivanju na temperaturi:
 - $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ za proizvode isporučene u normaliziranom, normaliziranom valjanom ili termomehanički valjanom stanju
 - $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ za proizvode isporučene u valjanom stanju

3.3 Stanje isporuke i toplinska obrada

Limovi i trake širine veće od 600 mm napravljeni od konstrukcijskih čelika sitnozrnate mikrostrukture isporučuju se u normaliziranom, normalizirano valjanom ili termomehanički valjanom stanju. Za sve ostale proizvode, primjenjuju se podaci iz odgovarajućih normi.

3.4. Tolerancije debljine

Negativne tolerancije debljine prikazane su u tablici 12.

Tablica 12. Negativne tolerancije ovisno o nominalnoj debljini

Nazivna debljina (t) (mm)	Negativna tolerancija (mm)
$3 \leq t \leq 5$	-0,3
$5 \leq t \leq 8$	-0,4
$8 \leq t \leq 15$	-0,5
$15 \leq t \leq 25$	-0,6
$25 \leq t \leq 40$	-0,7
$40 \leq t \leq 80$	-0,9
$80 \leq t \leq 150$	-1,1
$150 \leq t \leq 250$	-1,2
$250 \leq t$	-1,3

Pozitivna tolerancija određuje se u skladu s priznatim nacionalnim ili međunarodnim standardom.

3.5 Razorna i nerazorna ispitivanja

3.5.1 Ispitivanje kemijskog sastava

Proizvođač mora odrediti kemijski sastav svakog obratka i uz to priložiti primjereni certifikat.

3.5.2 Statičko vlačno ispitivanje

Mehanička svojstva određuju se statičkim vlačnim ispitivanjem. Proizvodi istog oblika svrstavaju se unutar raspona debljina relevantnih za granicu tečenja u ispitne serije. Uzorak se uzima iz najdebljeg djela ispitne serije. U slučaju ispitivanja limova širine veće od 600 mm uzorak se uzima poprečno na smjer valjanja. Kod ostalih proizvoda, ispitni uzorak može biti pozicioniran izrezan poprečno ili paralelno s obzirom na smjer valjanja.

3.5.3 Ispitivanje udarnog rada loma

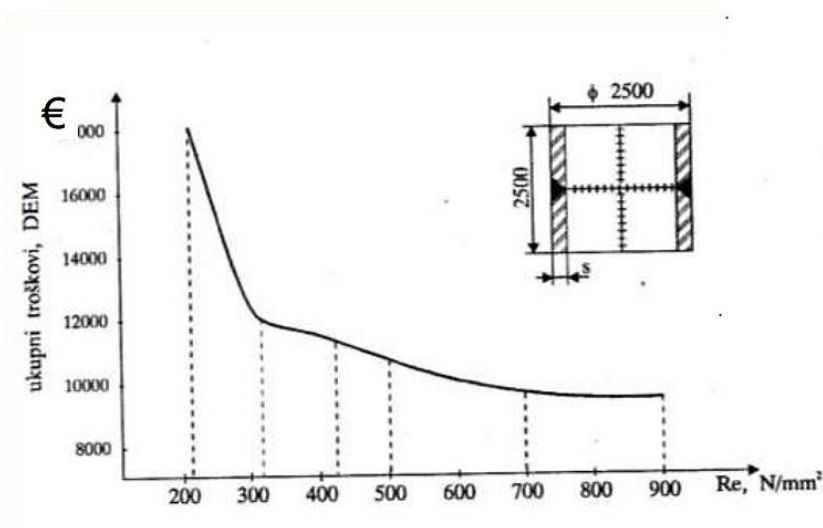
Svi proizvodi od sitnozrnatog konstrukcijskog čelika moraju biti podvrgnuti ispitivanju udarnog rada loma. Ispitivanje se provodi na Charpyjevom batu koristeći uzdužne uzorke s V zarezom. Temperature ispitivanja su u skladu s normama ili kako je navedeno u poglavlju 3.2., stavak b). Kao i kod statičko vlačnog ispitivanja, uzorak se uzima iz najdebljeg komada ispitne serije.

4. VISOKOČVRSTI ČELICI

Visokočvrsti čelici su oni koji se biraju prvenstveno zbog njihove čvrstoće, što ne znači da nemaju i druga povoljna svojstva. Cilj razvoja ovih čelika je postignuće što više granice razvlačenja R_e i vlačne čvrstoće R_m , a time i višeg dopuštenog naprezanja σ_{dop} u radu. Primjenom ovih čelika smanjuju se nosivi presjeci kod jednakih opterećenja što proizlazi iz izraza:

$$\uparrow \sigma_{dop} = \frac{F}{A}, \frac{N}{mm^2}, \rightarrow A = \frac{F}{\sigma_{dop}}, mm^2 \downarrow \quad (4)$$

Smanjenje presjeka rezultira manjom masom i volumenom konstrukcije, što dovodi do sniženja ukupnih troškova materijala, slika 15 [15].



Slika 15. Prikaz promjene troškova s porastom R_e na primjeru dijela valjkastog spremnika [15]

4.1 Mehanizmi očvršnuća visokočvrstih čelika

U mikrostrukтури svakog materijala prisutne su nesavršenosti. Kod materijala s kristalnom strukturom te nesavršenosti nazivamo nepravilnostima (defektima) kristalne građe. Nepravilnosti kristalne strukture nulte, prve, druge i treće dimenzije bitno smanjuju mehanička svojstva realnog materijala u odnosu na idealnu tvar. Posebice je važna uloga dislokacija. No te iste nepravilnosti u realnim materijalima mogu poslužiti za njihovo očvršćivanje. Stoga se svi mehanizmi ili postupci očvršnuća temelje na postojanju mikrostrukturnih prepreka koje

usporavaju ili sprečavaju gibanje dislokacija i time otežavaju plastično tečenje materijala. Zbog toga se povećava granica razvlačenja dok vlačna čvrstoća ne mora nužno rasti. [16] Kod ovih čelika prisutni su sljedeći mehanizmi očvršćivanja:

- $(\Delta R_e)_1$ – stvaranjem kristala mješanaca (manje legiranjem, više faznom transformacijom)
- $(\Delta R_e)_2$ – umnažanjem dislokacija (faznom transformacijom),
- $(\Delta R_e)_3$ – usitnjenjem zrna,
- $(\Delta R_e)_4$ – precipitacijom.

4.2 Visokočvrsti čelici za zavarene konstrukcije

Čelici iz ove skupine namijenjeni su za izradu posebno opterećenih zavarenih konstrukcija. Primjenjuju se npr. za izradu brodskih dizalica i potpornja “offshore” platformi (slika 16), ali nisu namijenjeni za izradu trupa broda.



Slika 16. “Offshore” platforma Labin [15]

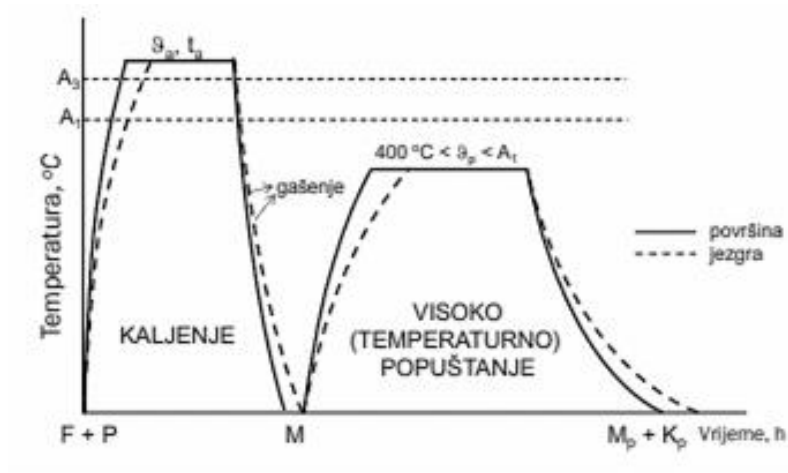
Podijeljeni su s obzirom na traženu granicu razvlačenja iznosa 420, 460, 500, 550, 620, 690, 890 i 960 N/mm². Za svaku granicu razvlačenja definirane su kategorije A, D, E i F s obzirom na temperaturu ispitivanja udarnog rada loma. Za iznose granica razvlačenja 890 i 960 N/mm² kategorija F nije definirana. Popis svih kategorija dan je u tablici 13.

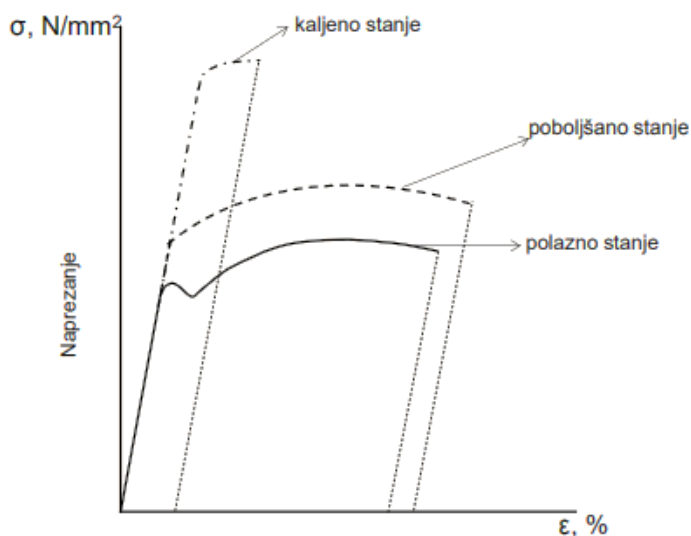
Tablica 13. Kategorije visokočvrstih čelika za zavarene konstrukcije [6]

AH420	DH420	EH420	FH420
AH460	DH460	EH460	FH460
AH500	DH500	EH500	FH500
AH550	DH550	EH550	FH550
AH620	DH620	EH620	FH620
AH690	DH690	EH690	FH690
AH890	DH890	EH890	
AH960	DH960	EH960	

Za sve kategorije propisano je smirivanje te usitnjavanje zrna. Stanje isporuke navedenih čelika može biti sljedeće:

- normalizirano/normalizirano valjano,
- termomehanički kontrolirano valjano, termomehanički kontrolirano valjano s ubrzanim hlađenjem, termomehanički kontrolirano valjano s direktnim kaljenjem i popuštanjem,
- kaljeno i popušteno; Ovi čelici popuštaju se visokotemperaturno ($400^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_p < A_1$). Postupak kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja poznat je kao poboljšavanje (slika 17) te se vrši u cilju postizanja visoke žilavosti i visoke granice tečenja (slika 18).

**Slika 17. Postupak poboljšavanja [17]**



Slika 18. Dijagram σ - ϵ za različita stanja čelika u postupku poboljšavanja [17]

Obrada toplim valjanjem s direktnim kaljenjem i popuštanjem smatra se ekvivalentom konvencionalnom kaljenju te naknadnom popuštanju. Ovi čelici se isporučuju kao limovi, trake, šuplji profili, puni profili i cijevi. Propisane su maksimalne debljine navedenih poluproizvoda s obzirom na stanje isporuke, tablica 14.

Tablica 14. Maksimalne debljine visokočvrstih čelika za zavarene konstrukcije [6]

Stanje isporuke	Maksimalna debljina (mm)			
	Limovi	Šuplji profili	Puni profili	Cijevi
N	250 ⁽²⁾	50	250	65
NR	250	⁽¹⁾		
TM	150	50	N.P	N.P
QT	150 ⁽²⁾	50	N.P	50
Napomene: ⁽¹⁾ Maksimalna debljina šupljih profila, punih profila i cijevi proizvedenih NR metodom mora biti manja od debljina onih proizvedenih N metodom ⁽²⁾ Za N čelike debljine veće od 250 mm i QT čelike debljine veće od 150 mm potrebno je posebno dopuštenje Registra N.P = Nije primjenjivo				

4.2.1 Kemijski sastav i zavarljivost

Čelici svih kategorija moraju sadržavati legirne elemente koji vežu dušik te elemente za usitnjenje zrna. Propisane vrijednosti kemijskog sastava prikazane su u tablici 15. Zavarljivost se određuje računanjem ekvivalenta ugljika. Uzorak se uzima iz taline, a maksimalni iznosi

prikazani su u tablici 16. Za sve kategorije visokočvrstih čelika može se koristiti formula međunarodnog instituta za zavarivanje:

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \% \quad (5)$$

Za čelike s granicom razvlačenja 460 N/mm² i većom može se koristiti i CET formula koja glasi:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}, \% \quad (6)$$

Za čelike dobivene termomehaničkim valjanjem te kaljenjem i popuštanjem s udjelom ugljika ne većim od 0,12% za određivanje zavarljivosti može se koristiti i formula za osjetljivost na hladno pucanje:

$$Pcm = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B, \% \quad (7)$$

Tablica 15. Kemijski sastav visokočvrstih čelika za zavarene konstrukcije [6]

Stanje isporuke	N/NR		TM		QT	
KATEGORIJE	AH420	EH420	AH420	EH420	AH420	EH420
	DH420	EH460	DH420	FH420	DH420	FH420
	AH460		AH460	EH460	AH460	EH460
	DH460		DH460	FH460	DH460	FH460
			AH500	EH500	AH500	EH500
			DH500	FH500	DH500	FH500
			AH550	EH550	AH550	EH550
			DH550	FH550	DH550	FH550
			AH620	EH620	AH620	EH620
			DH620	FH620	DH620	FH620
			AH690	EH690	AH690	EH690
			DH690	FH690	DH690	FH690
			AH890	DH890	AH890	DH890
				EH890	AH960	EH890
						DH960
						EH960
C maks. (%)	0,20	0,18	0,16	0,14	0,18	
Mn (%)	1,0 - 1,70		1,0 - 1,70		1,70	
Si maks. (%)	0,60		0,60		0,80	
P maks. ⁽¹⁾ (%)	0,030	0,035	0,025	0,020	0,025	0,020
S maks. ⁽¹⁾ (%)	0,025	0,020	0,015	0,010	0,015	0,010
Al _{ukupno} min ⁽²⁾ (%)	0,02		0,02		0,018	
Nb maks. ⁽³⁾ (%)	0,05		0,05		0,06	
V maks. ⁽³⁾ (%)	0,20		0,12		0,12	
Ti maks. ⁽³⁾ (%)	0,05		0,05		0,05	
Ni maks. ⁽⁴⁾ (%)	0,80		2,00 ⁽⁴⁾		2,00 ⁽⁴⁾	
Cu maks. (%)	0,55		0,55		0,50	
Cr maks. ⁽³⁾ (%)	0,30		0,50		1,50	
Mo maks. ⁽³⁾ (%)	0,10		0,50		0,70	
N maks. (%)	0,025		0,025		0,015	
O maks. ⁽⁵⁾ (ppm)	N.P		N.P	50	N.P	30
Napomene:						
⁽¹⁾ Za šuplje profile udio P i S može biti 0,005 % veći od propisanog u tablici						
⁽²⁾ Omjer ukupnog Al i N mora biti najmanje 2:1. Kada se koriste drugi elementi za vezanje dušika, minimalni udio aluminija i omjer Al/N se ne primjenjuju						
⁽³⁾ Ukupni Nb+V+Ti ≤ 0,26 % i Mo + Cr ≤ 0,65 %, ne primjenjuje se na QT čelike						
⁽⁴⁾ Dopusćen je veći udio Ni uz odobrenje Registra						
⁽⁵⁾ Zahtjev za maksimalni udio kisika se primjenjuje samo na kategorijama: DH890, EH890, DH960 i EH960						
N.P= Nije primjenjivo						

Tablica 16. Maksimalne vrijednosti C_{eq} , CET , P_{cm} visokočvrstih čelika za zavarene konstrukcije [6]

Kategorija i stanje isporuke	Ekvivalent ugljika (%)							
	C_{eq}						CET	P_{cm}
	Limovi			Šuplji Profili	Puni Profili	Cijevi	Sve	Sve
	$t \leq 50$ (mm)	$50 < t \leq 100$ (mm)	$100 < t \leq 250$ (mm)	$t \leq 50$ (mm)	$t \leq 250$ ili $d \leq 250$ (mm)	$t \leq 65$ (mm)	Sve	Sve
H420N/NR	0,46	0,48	0,52	0,47	0,53	0,47	N.P	N.P
H420TM	0,43	0,45	0,47	0,44	N.P	N.P	N.P	N.P
H420QT	0,45	0,47	0,49	N.P	N.P	0,46	N.P	N.P
H460N/NR	0,50	0,52	0,54	0,51	0,55	0,51	0,25	N.P
H460TM	0,45	0,47	0,48	0,46	N.P	N.P	0,30	0,23
H460QT	0,47	0,48	0,50	N.P	N.P	0,48	0,32	0,24
H500TM	0,46	0,48	0,50	N.P	N.P	N.P	0,32	0,24
H500QT	0,48	0,50	0,54	N.P	N.P	0,50	0,34	0,25
H550TM	0,48	0,50	0,54	N.P	N.P	N.P	0,34	0,25
H550QT	0,56	0,60	0,64	N.P	N.P	0,56	0,36	0,28
H620TM	0,50	0,52	N.P	N.P	N.P	N.P	0,34	0,26
H620QT	0,56	0,60	0,64	N.P	N.P	0,58	0,38	0,30
H690TM	0,56	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	0,36	0,30
H690QT	0,64	0,66	0,70	N.P	N.P	0,68	0,40	0,33
H890TM	0,60	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	0,38	0,28
H890QT	0,68		N.P	N.P	N.P	N.P	0,40	N.P
H960QT	0,75	N.P	N.P	N.P	N.P	N.P	0,40	N.P
Napomene: N.P = Nije primjenjivo t : debljina (mm) d : promjer (mm)								

Iz tablice je vidljivo da su iznosi ekvivalenta ugljika visoki te to čini zavarivanje ovih čelika jako zahtjevno u smislu količine unesene topline i izbora elektrode. Za uspješno zavarivanje potrebno je: [7]

- izbjeći stvaranje krhke faze u zavaru i ZUT-u prikladnim unosom topline. Ako je unos topline malen u odnosu na debljinu lima slijedi preoštro zakaljivanje.
- Izbjeći stvaranje ferita u zavaru, pa ohlađivanje ne smije biti ni presporo, odnosno količina unesene topline ne smije biti prevelika u odnosu na debljinu lima.

4.2.2. Mehanička svojstva

Mehanička svojstva se određuju statičkim vlačnim ispitivanjem te ispitivanjem udarnog rada loma. Registar propisuje način provedbe ispitivanja te korištene uzorke.

4.2.2.1 Statičko vlačno ispitivanje

Ispitni uzorci izrezuju se poprečno na zadnji smjer valjanja, osim u slučaju šupljih profila, punih profila, cijevi te valjanih traka širokih 600 mm ili manje, kod kojih se uzorci uzimaju uzdužno na smjer valjanja. Koriste se ispitni uzorci debljina istih kao konačni proizvod. U slučaju da debljina ispitnog uzorka premašuje kapacitet ispitnog uređaja, koriste se smanjeni uzorci koji predstavljaju ili cijelu ili pola debljine proizvoda, a sadrže jednu valjanu površinu. Mogu se koristiti i uzorci okruglog presjeka. Uzorci se uzimaju na 1/4 debljine poluproizvoda odnosno 1/2 debljine za poluproizvode deblje od 100 mm. Rezultati tih ispitivanja moraju odgovarati zahtjevima navedenim u tablici 17. Osim u slučaju limova i širokih traka, gdje se rade uzdužna ispitivanja, iznosi istezljivosti moraju biti 2% veći od poprečnih zahtjeva iznesenih u tablici 17.

4.2.2.2 Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje žilavosti vrši se Charpyjevim batom koristeći ispitne uzorke s V zarezom. Uzorci za limove i široke trake šire od 600 mm uzimaju tako da je njihova uzdužna os poprečna s obzirom na smjer valjanja, a rezultati moraju odgovarati zahtjevima za poprečan smjer danima u tablici 17. Za ostale proizvode, ispitivanje žilavosti provodi se za uzdužni smjer te rezultati ispitivanja moraju odgovarati zahtjevima navedenim u tablici 17.

Tablica 17. Mehanička svojstva visokočvrstih čelika za zavarene konstrukcije [6]

Mehanička svojstva		Min. granica razvlačenja, $R_e^{(1)}$ (N/mm ²)			Vlačna čvrstoća, R_m (N/mm ²)		Istezljivost, $A^{(2)}$ (%)		Udarni rad loma, KV		
Kategorija i stanje isporuke		Nazivna debljina (mm) ⁽⁴⁾			Nazivna debljina (mm) ⁽⁴⁾				Ispitna temperatura (°C)	min. (J)	
		≥3 ≤50	>50 ≤100	>100 ≤250	≥ 3 ≤100	>100 ≤250				T	L
H420N/NR H420TM H420QT	A D E F	420	390	365	520-680	470-650	19	21	0 -20 -40 -60	28	42
H460N/NR H460TM H460QT	A D E F	460	430	390	540-720	500-710	17	19	0 -20 -40 -60		
H500TM H500QT	A D E F	500	480	440	590-770	540-720	17	19	0 -20 -40 -60	33	50
H550TM H550QT	A D E F	550	530	490	640-820	590-770	16	18	0 -20 -40 -60	37	55
H620TM H620QT	A D E F	620	580	560	700-890	650-830	15	17	0 -20 -40 -60	41	62
H690TM H690QT	A D E F	690	650	630	770-940	710-900	14	16	0 -20 -40 -60	46	69
H890TM H890QT	A D E	890	830	N.P	940-1100	N.P	11	13	0 -20 -40	46	69
H960QT	A D E	960	N.P	N.P	980-1150	N.P	10	12	0 -20 -40	46	69

Napomene:

(1) U slučaju kada se granica razvlačenja ne može odrediti, određuje se konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0.2}$)

(2) Za uzorke traka širine 25 mm i mjerne duljine 200 mm istezljivost mora odgovarati zahtjevima navedenim u tablici 18.

(3) U slučaju da je uzorak paralelan s konačnim smjerom valjanja, rezultat ispitivanja mora odgovarati zahtjevima produljenja za uzdužni smjer

(4) Za limove i profile koji se primjenjuju u uvjetima gdje konstrukcija zahtijeva da svojstva čvrstoće ostaju jednaka za različite debljine, smanjenje čvrstoće s povećanjem debljine nije dopušteno

N.P. = nije primjenjivo

L: uzdužno

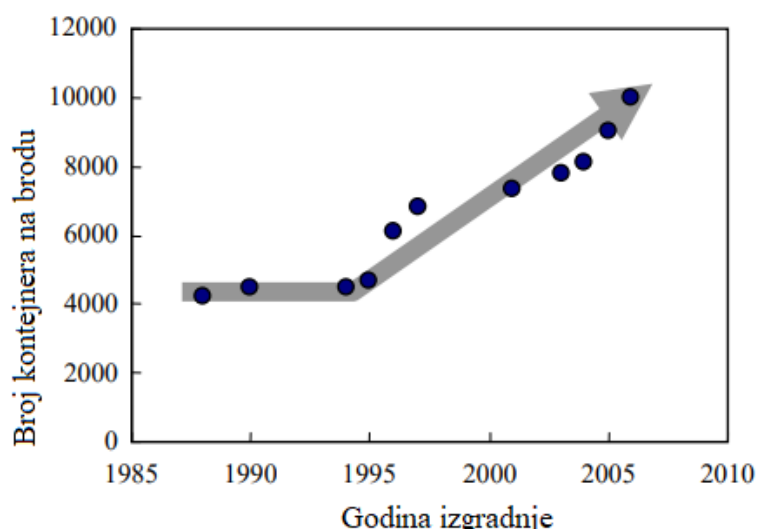
T: poprečno

Tablica 18. Istezljivost uzorka traka širine 25 mm i mjerne duljine 200 mm [6]

Kategorija	Debljina (mm)						
	≤10	>10 ≤15	>15 ≤20	>20 ≤25	>25 ≤40	>40 ≤50	>50 ≤70
H420	11	13	14	15	16	17	18
H460	11	13	13	14	15	16	17
H500	10	11	12	13	14	15	16
H550	10	11	12	13	14	15	16
H620	9	11	12	12	13	14	15
H690	9	10	11	11	12	13	14

4.3. YP47 čelični limovi

YP47 čelični limovi su limovi sa određenom minimalnom granicom razvlačenja od 460 N/mm^2 . Primjenjuju se na uzdužne strukturne dijelove na gornjem dijelu palube nosača kontejnera (kao zaštitno povišenje na otvorima palube, poklopac za otvore palube te spojene uzdužne dijelove). Zahtjevi se postavljaju na limove debljina između 50 mm i 100 mm. Povod razvoja ovih YP47 čeličnih limova je velik rast kontejnerskog transporta, a samim time i brodova za prijevoz kontejnera. Kako bi se smanjili troškovi prijevoza trend je povećanja broja kontejnera na samom brodu. Kao posljedica toga i brodovi postaju sve veći što je vidljivo iz dijagrama na slici 19. Tako je 2015. godine jedan od najvećih brodova imao kapacitet od 18000 kontejnera (slika 20), dok današnji brodovi mogu prevoziti i preko 23000 kontejnera. Povećanjem nosivosti rastu i zahtjevi za čvrstoćom i žilavošću strukturnih materijala što je dovelo do potrebe za razvojem YP47 čeličnih limova.

**Slika 19. Trend godišnjeg povećanja broja kontejnera na nosačima kontejnera [18]**



Slika 20. Brod za prijevoz kontejnera CMA CGM Benjamin Franklin [19]

4.3.1 Tehnički podaci materijala

Tablica 19 predočava stanje isporuke, kategoriju i mehanička svojstva YP47 čeličnih limova.

Tablica 19. Stanje isporuke, kategorija i mehanička svojstva YP47 čeličnih limova [6]

Stanje isporuke	Kategorija	Mehanička svojstva			Ispitivanje udarnog rada loma			
		Granica razvlačenja (N/mm ²) min.	Vlačna čvrstoća (N/mm ²)	Istezljivost (%) min.	Ispitna temp. (°C)	Prosječni udarni rad loma (J) min		
						50< t ≤ 70	70< t ≤ 85	85< t ≤ 100
TMCP	EH47	460	570/720	17	-40	54	64	75
Napomene: t: debljina (mm) Ostala stanja isporuke su moguća uz odobrenje Registra								

Registar propisuje kemijski sastav i dezoksidaciju za YP47 čelične limove. Granične vrijednosti kemijskih elemenata prikazane su u tablici 20.

Tablica 20. Kemijski sastav i dezoksidacija YP47 čeličnih limova [21]

Kategorija	EH47
Dezoksidacija	Smireno i obrađeno na sitno zrno
C maks. (%)	0,18
Mn (%)	0,90-2,00
Si maks. (%)	0,55
P maks. (%)	0,020
Al (topljiv u kiselini) min (%)	0,015
Nb (%)	0,02-0,05
V (%)	0,05-0,10
Ti maks. (%)	0,02
Cu maks. (%)	0,35
Cr maks. (%)	0,25
Ni maks. (%)	1,0
Mo maks. (%)	0,08
C_{eq} maks. (%)	0,49
P_{cm} maks. (%)	0,22

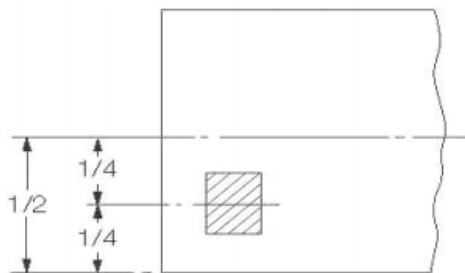
Umjesto udjela aluminija topivog u kiselini može se odrediti i ukupni udio aluminija koji tada mora minimalno iznositi 0,02 %. YP47 čelični limovi sadrže elemente za usitnjenje zrna: aluminij, niobij, vanadij ili neke druge elemente za usitnjenje strukture. Mogu biti sadržani zasebno ili u nekoj međusobnoj kombinaciji. Kada se koriste zasebno, udjeli prikazani u tablici 20 su primjenjivi, dok ako se koriste u nekoj kombinaciji, zahtjevi za njihove zasebne udjele nisu prihvatljivi već je primjenjiv uvjet za njihovim zajedničkim sadržajem koji glasi da zbroj udjela vanadija, niobija i titanija ne smije premašiti 0,12%. Ekvivalent ugljika (C_{eq}) računa se prema jednadžbi (5), a osjetljivost na hladno pucanje (P_{cm}) sukladno jednadžbi (7).

4.3.2 Razorna i nerazorna ispitivanja

4.3.2.1 Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje udarnog rada loma provodi se Charpyjevim batom na ispitni uzorci sa V zarezom. Ispitni uzorci izrezuju se iz lima uzetog s vrha ingota. U slučaju neprekidnog lijevanja ispitni

uzorak se uzima iz nasumično odabranog lima. Uzorak se uzima s ravno izrezanog kraja lima, otprilike udaljen za četvrtinu debljine od ruba (slika 21.)



Slika 21. Pozicija uzimanja ispitnog uzorka s lima [6]

S obzirom na smjer valjanja uzorci se uzimaju s vrha ili dna lima na način kako slijedi:

- za uzdužna ispitivanja udarnog rada loma: s vrha i dna lima,
- za poprečna ispitivanja: samo s vrha lima,
- Deformacijski ostvareno uzdužno ispitivanje: s vrha lima

Deformacijski ostareni uzorci se deformiraju 5 % te griju na temperaturu 250 °C i drže jedan sat prije ispitivanja.

Ispitivanja su potrebna i na četvrtini i na polovini debljine poluproizvoda. Za jedno ispitivanje koristi se set od 3 ispitna uzorka, pri temperaturi od -40 °C. Uz udarni rad loma, mora se izvijestiti o stupnju kristalnosti te bočnom širenju uzorka.

4.3.2.2 Ostala ispitivanja

Za ispitivanje inicijacije krhkog loma, određuje se kritična vrijednost otvaranja vrška pukotine (CTOD) ili se provodi test dubokog zareza. Ispitivanje padajućim utegom se provodi u skladu s normom ASTM E208: “Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels“. Određuje se temperatura nulte duktilnosti. Svojstva otpornosti krhkom lomu određuju se standardnim ESSO testom opisanim u Pravilima za klasifikaciju brodova, prilog D.

4.4 Čelici otporni krhkom lomu

Čelici otporni na krhki lom imaju sve veću važnost u brodogradnji zato što brodograđevni čelični limovi postaju deblji i čvršći. Postoje indikacije da žilavost čelika može imati utjecaj na odupiranje nastanku krhke pukotine u zavarenom spoju [20]. Čelici otporni krhkom lomu mogu biti čelici YP36, YP40 koji pripadaju čelicima opisanim u poglavlju 2. ili YP47 čelici opisani

u poglavlju 4.3, ako udovoljavaju posebnim dodatnim zahtjevima i svojstvima opisanim u ovom poglavlju. Svojstva koja definiraju čelik otporan krhkom lomu su lomna žilavost K_{ca} ili temperatura otpornosti krhkom lomu (CAT). Primjenjuju se za uzdužne strukturne dijelove gornjeg dijela palube kod brodova za prijevoz kontejnera (kao zaštitno povišenje na otvorima palube, poklopac za otvore palube te spojene uzdužne dijelove). Zahtjevi se postavljaju na limove debljina većih od 50 mm, a manjih od 100 mm.

4.4.1 Tehnički podaci materijala

Dodatna mehanička svojstva tražena od čelika otpornih krhkom lomu prikazana su u tablici 21.

Tablica 21. Zahtjevi za čelike otporne krhkom lomu [21]

Dodatak oznaci čelika	Raspon debljina	Svojstva otpornosti krhkom lomu	
		Lomna žilavost K_{ca} na -10 °C (N/mm ^{3/2})	Temperatura otpornosti krhkom lomu CAT (°C)
BCA1	50 < t ≤ 100	6000 min.	-10 ili niže
BCA2	80 < t ≤ 100	8000 min	Potvrđuje se od strane Registra

Dodaci BCA1 ili BCA2 dodaju se kao sufiks oznaci čelika (npr. EH40-BCA1, EH47-BCA1, EH47-BCA2, itd.). CAT temperatura određuje se ispitnom metodom navedenoj u Pravilima za klasifikaciju brodova, prilog D4, a vrijednost lomne žilavosti K_{ca} određuje se ispitivanjem otpornosti krhkom lomu objašnjenim u prilogu D3 navedenih Pravila. Za čelike otporne krhkom lomu propisan je kemijski sastav te dezoksidacija, tablica 22.

Tablica 22. Kemijski sastav i dezoksidacija čelika otpornih krhkom lomu [21]

Kategorija	EH36-BCA	EH40-BCA	EH47-BCA
Dezoksidacija	Smireno i obrađeno na sitno zrno		
C maks. (%)	0,18		0,18
Mn (%)	0,90-2,0		0,90-2,0
Si maks. (%)	0,5		0,55
P maks. (%)	0,020		0,020
S maks. (%)	0,020		0,020
Al (topljiv u kiselini) min (%)	0,015		0,015
Nb (%)	0,02-0,05		0,02-0,05
V (%)	0,05-0,10		0,05-0,10
Ti maks. (%)	0,02		0,02
Cu maks. (%)	0,50		0,50
Cr maks. (%)	0,25		0,50
Ni maks. (%)	2,0		2,0
Mo maks. (%)	0,08		0,08
C_{eq} maks. (%)	0,47	0,49	0,55
P_{cm} maks. (%)	-		0,24

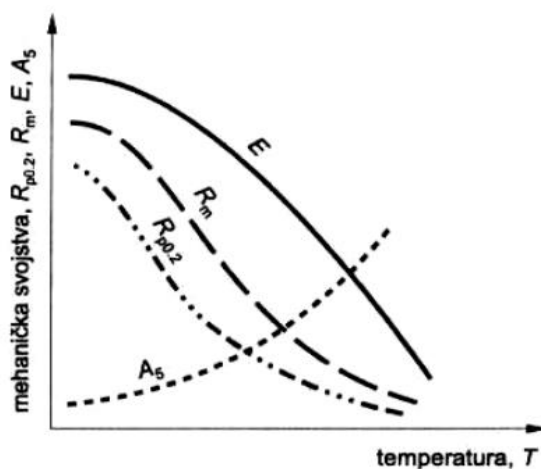
Kemijski sastav prikazan u tablici 22 za čelike otporne krhkom lomu ima prioritet nad kemijskim sastavima za odgovarajuće kategorije čelika opisanim u poglavlju 2. i 4.3. Umjesto udjela aluminijskog topivog u kiselini može se odrediti i ukupni udio aluminijskog koji tada mora minimalno iznositi 0,02 %. Čelici otporni krhkom lomu sadrže elemente za usitnjenje zrna: aluminij, niobij, vanadij ili neke druge elemente. Mogu biti sadržani zasebno ili u nekoj međusobnoj kombinaciji. Kada se koriste zasebno primjenjuju se udjeli prikazani u tablici 22, dok ako se koriste u nekoj kombinaciji, zahtjevi za njihove zasebne udjele nisu primjenjivi. Tada se primjenjuje zahtjev za njihovim zajedničkim udjelom pri čemu zbirni sadržaj vanadija, niobija i titanija ne smije prelaziti 0,12 %. Ekvivalent ugljika C_{eq} računa se iz taline prema izrazu (5), dok se osjetljivost na hladno pucanje određuje sukladno formuli (7).

5. TOPLINSKI POSTOJANI ČELICI

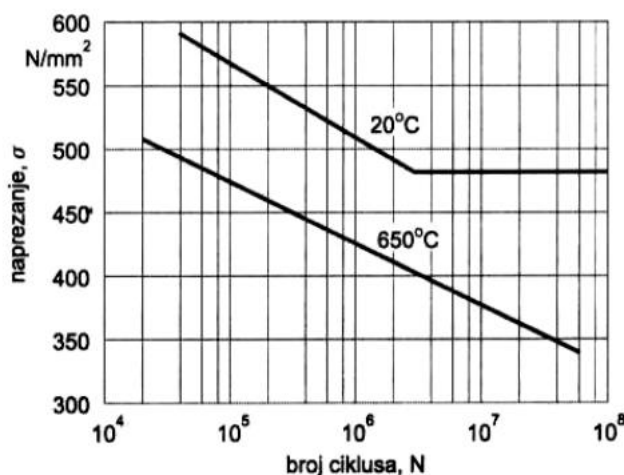
Dijelovi strojeva i uređaja mogu tijekom uporabe biti izloženi povišenim i visokim radnim temperaturama pa konstrukcijski materijal moraju zadržati mehaničku otpornost i pri tim temperaturama. Kod nekih materijala promjene mehaničkih značajki su izraženije nego kod drugih tako da se svakoj skupini može pridružiti karakteristično područje temperatura kod kojih nastupaju izraženije promjene svojstava. Visina granične temperature iznad koje dolazi do bitnije promjene svojstava ovisi o temperaturi tališta materijala (T_t). Radne se temperature (T_r) uobičajeno dijele na:

- niske temperature: $T_r < (0,25 \cdot T_t)$, za Fe-legure: $< 180\text{ }^{\circ}\text{C}$
- povišene temperature: $(0,25 \cdot T_t) < T_r < (0,4 \cdot T_t)$, za Fe-legure: $180 - 450\text{ }^{\circ}\text{C}$
- visoke temperature: $T_r > (0,4 \cdot T_t)$, za Fe-legure: $> 450\text{ }^{\circ}\text{C}$

Čelici predstavljaju materijale čije je talište relativno visoko u odnosu na primjerice aluminij, bakar i njihove legure te osobito polimerne materijale pa zbog bolje mehaničke otpornosti imaju prednost pri povišenim i visokim temperaturama. Kod čelika nema bitnije promjene mehaničkih svojstava do temperature $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ pa se te temperature smatraju niskim. Radne temperature od $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ za čelik su povišene, a one iznad $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ su visoke jer pri njima započinje puzanje čelika u uvjetima dugotrajnog djelovanja konstantnog opterećenja [22]. Povišenjem temperature dolazi do sniženja granice razvlačenja, vlačne čvrstoće i modula elastičnosti uz istovremeno povećanje istezljivosti i žilavosti (slika 22). Također dolazi do sniženja dinamičke izdržljivosti (slika 23).

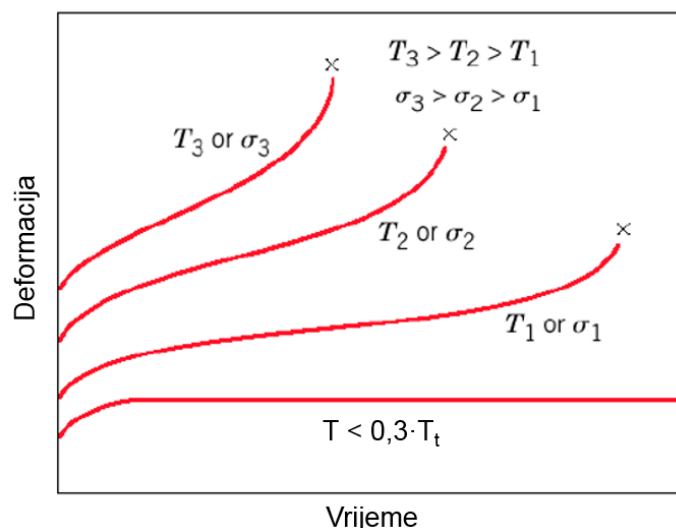


Slika 22. Promjena mehaničkih svojstava s povišenjem temperature [23]



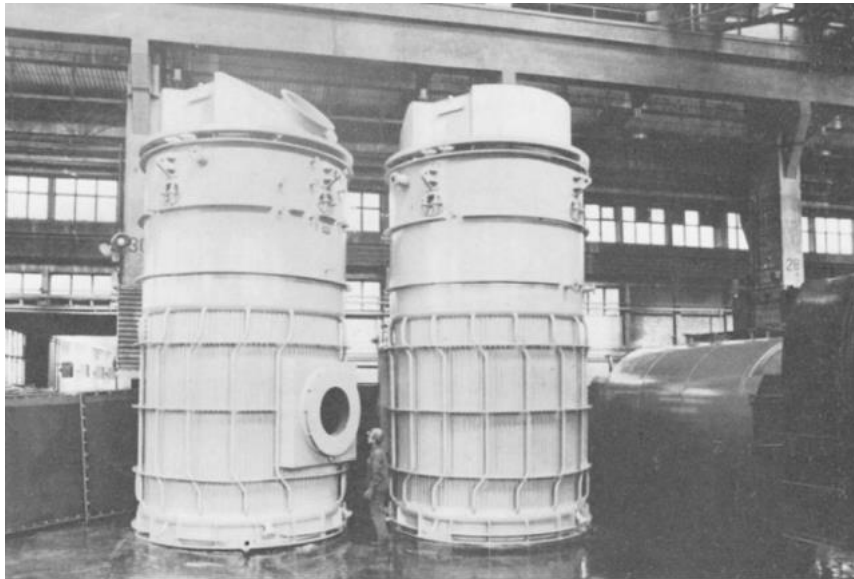
Slika 23. Promjena savojne dinamičke izdržljivosti čelika X10NiCrWTi36-15 s povišenjem temperature [23]

Pri povišenim i visokim radnim temperaturama u uvjetima djelovanja konstantnog opterećenja kroz dulji vremenski period može doći do puzanja materijala. Puzanje je toplinski aktiviran, ireverzibilan proces deformacije materijala koji se javlja pri dugotrajnom djelovanju konstantnog opterećenja na nekoj povišenoj ili visokoj temperaturi. Nakon dovoljno dugog vremena opterećivanja dolazi do loma uslijed deformacije materijala. Brzina puzanja tim je veća i vrijeme do loma tim kraće što je viša temperatura i veće narinuto napreznje, slika 24. Puzanje metala obično nastupa u temperaturnom području iznad $0,3 \cdot T_t$ (T_t u K). Na temperaturama između $1/3 \cdot T_t$ i $2/3 \cdot T_t$ brzina puzanja, pri umjerenom napreznju, ostaje duže vrijeme konstantna. [22]



Slika 24. Pojava puzanja pri visokim temperaturama [22]

Zahtjevi izneseni u ovom poglavlju odnose se na proizvode napravljene od toplinski postojanih feritnih čelika, koji su namijenjeni izradi parnih kotlova (slika 25), tlačnih posuda, izmjenjivača topline (slika 26) i ostale procesne opreme.



Slika 25. Brodski pomoćni kotao [24]



Slika 26. Brodski izmjenjivač topline [24]

Stanje isporuke i toplinska obrada toplinski postojanih čelika je u skladu s primjenjivim normama ili na zahtjev proizvođača uz odobrenje Registra.

5.1 Prikladni čelici

Prikladni su limovi od čelika za tlačne posude sukladno normi HRN EN 10028-2:2017: “Plosnati proizvodi od čelika za tlačne namjene -- 2. dio: Nelegirani i legirani čelici s utvrđenim svojstvima pri povišenim temperaturama” te oni sukladni HRN EN 10028-3: “Plosnati proizvodi od čelika za tlačne namjene -- 3. dio: Zavarljivi sitnozrnati čelici, normalizacijski žareni“. Proizvodi izrađeni od drugih čelika, koji nisu definirani navedenim normama, mogu se koristiti pod uvjetom da se njihova svojstva podudaraju s onima traženim od Registra. Zahtijevana svojstva jesu sljedeća:

- a) Istezljivost A mora biti navedena u specifikacijama čelika dostavljenima od strane proizvođača i potvrđenima od Registra. Istezljivost ne smije biti manja od 16 %.
- b) Udarni rad loma mora biti jednak ili veći od onog naznačenog normama HRN EN 10028-2:2017 i HRN EN 10028-3:2017 za čelike iste čvrstoće. U slučaju limova korištenih za prstenove i kupole tlačnih posuda proizvođač i dobavljač čelika trebaju osigurati da vrijednost udarnog rada loma bude zadovoljena.
- c) Proizvođač mora priložiti dokaze o zavarljivosti čelika uz detaljne informacije o predgrijavanju, temperaturi tijekom zavarivanja te detalje o toplinskoj obradi nakon zavarivanja.
- d) Granica razvlačenja na povišenim temperaturama te gdje je potrebno i dugotrajno naprezanje pri kojem dolazi do pucanja materijala na povišenim temperaturama, ukoliko su ova naprezanja različita od onih iznesenih u normama HRN EN 10028-2:2017 i HRN EN 10028-3:2017 trebaju biti ovjerena od strane proizvođača.

Za limove korištene za prstenove i kupole tlačnih posuda traženi su i sljedeći zahtjevi:

Za zavarene bubnjeve parnih kotlova debljine lima ≥ 50 mm i granice razvlačenja ≥ 310 N/mm² na sobnoj temperaturi udarni rad loma mora iznositi najmanje 31 J na 0 °C. Traženi iznos se odnosi na prosjek tri zasebna ispitivanja Charpyjevim batom na poprečnim uzorcima s V zarezom. Rezultat niti jednog ispitivanja ne smiju biti niži za više od 15% od traženog prosjeka (31 J).

Limovi od kojih se proizvode vatrocijevni kotlovi moraju imati adekvatnu oblikovljivost i istezljivost $A \geq 20\%$ pri 20 °C.

5.2. Kemijski sastav

Propisani su granični udjeli sljedećih legiranih elemenata : [7]

- < 0,2 % C radi zavarljivosti,
- > 0,40 (0,55) % Mn radi postojanosti na dozrijevanje,
- > 0,02 % Al radi dezoksidacije taljevine,
- < 0,30 %Cr.

Ugljični se čelici ne primjenjuju na temperaturama iznad 450°C jer dolazi do rekristalizacije matrice i koagulacije cementita. Kod niskolegiranih toplinski postojanih čelika te se pojave sprečavaju legiranjem karbidotvorcima Mo i Cr koji stvaraju kvalitetnije karbide (Cr_7C_3 , Mo_2C) u odnosu na cementit, koji koče gibanje dislokacija i usporavaju puzanje, dok Mo dodatno povisuje temperaturu rekristalizacije. Temperaturno područje primjene ovih čelika je do 550 °C jer pri višim temperaturama Mo_2C karbidi postepeno prelaze u Mo_6C i koaguliraju, a metalna matrica osiromašuje na Mo što snižava temperaturu rekristalizacije. [7]

5.3 Mehanička svojstva

Parametri čvrstoće za proračun su:

- za limove sukladne HRN EN 10028-2:2017 odnosno HRN EN 10028-3:2017 koriste se vrijednosti navedene u normi,
- za limove od čelika koji ne pripadaju navedenim normama određuju se vrijednosti na način opisan u poglavlju 5.1.

Usvojeni parametri čvrstoće pri temperaturi 100 °C vrijede do 120 °C. Ostali intervali određuju se linearnom interpolacijom između vrijednosti navedenih u normi, npr. za 180°C radi se linearna interpolacija između 150 °C i 200 °C (zaokruživanje na gornju vrijednost nije dopušteno). Mehanička svojstva nekih toplinski postojanih čelika prikazana su u tablici 23.

Tablica 23. Mehanička svojstva nekih toplinski postojanih čelika [7]

Kategorija	Granica razvlačenja $Re^{(2)}$ min. (N/mm ²)			Vlačna čvrstoća R_m (N/mm ²)	Istezljivost A (%) min.	Ispitivanje žilavosti	
	Nazivna debljina (mm)					Temperatura ispitivanja (°C)	KV (J) min.
	≤16	>16 do ≤40	>40 do ≤60 ⁽¹⁾				
H I	235	225	215	360 do 480	24	0	31
H II	265	255	245	410 do 530	22	0	31
17Mn4	290	285	280	460 do 580	21	0	31
19Mn6	355	345	335	510 do 650	20	0	31
15Mo3	275 ⁽³⁾	270	260	440 do 590	20	20	31
13CrMo4 4	300	295	295	440 do 590	20	20	31
10CrMo 9 10	310	300	290	480 do 630	18	20	31
Napomene:							
⁽¹⁾ Proizvodi debljina iznad 60 mm podliježu zahtjevima norme DIN 17155							
⁽²⁾ Ako granica razvlačenja nije prepoznatljiva, treba primijeniti ispitivanje konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$							
⁽³⁾ Za proizvode s debljinom stijenke ≤ 10 mm treba primijeniti vrijednost od najmanje 285 (N/mm ²)							

HI i HII su ugljični (nelegirani) čelici namijenjeni za rad na povišenim temperaturama do 450 °C. Oznake čelika prema HRN-u su P235GH i P265GH dok su stare oznake Č 1202 (0,16 %C) i Č 1204 (0,20%C). [7] Registar pripisuje način provedbe statičko vlačnog ispitivanja, statičko vlačnog ispitivanja na povišenoj temperaturi te ispitivanje udarnog rada loma.

5.3.1 Statičko vlačno ispitivanje

Ispitni uzorci za statičko vlačno ispitivanje uzimaju se iz proizvoda poprečnih na smjer valjanja u sljedećim količinama:

a) Za limove i ploče:

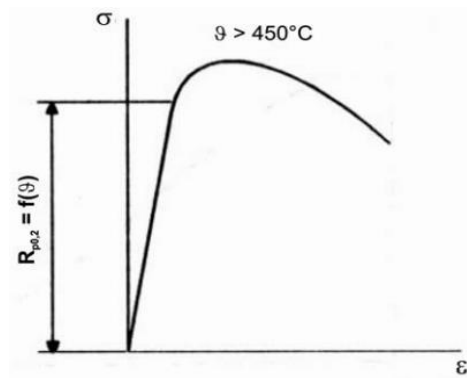
- Nelegirani čelični limovi debljine ≤ 50 mm: jedan uzorak s jednog kraja svake valjane duljine
- Nelegirane čelične ploče debljine > 50 mm: jedan uzorak s jednog kraja ako je valjana duljina ≤ 15 m, jedan uzorak sa svakog kraja ako je valjana duljina > 15 m
- Legirani čelici: jedan uzorak s jednog kraja ako je valjana duljina ≤ 7 m, jedan uzorak sa svakog kraja ako je valjana duljina > 7 m.

- b) Za limove napravljene iz toplo valjane široke trake, uzima se najmanje jedan uzorak s vanjskog kraja svakog namotaja. [1]

Dijelovi koji rade pri povišenim i visokim radnim temperaturama u području gdje još ne dolazi do puzanja, dimenzioniraju se na temelju mehaničkih svojstava utvrđenih statičkim vlačnim kratkotrajnim ispitivanjem (slika 27), ali pri definiranoj temperaturi koja obično odgovara radnoj. Za proračun se uzimaju sljedeća svojstva: [7]

- $R_{m/\vartheta}$ – vlačna čvrstoća pri nekoj temperaturi,
- $R_{p0.2/\vartheta}$ -konvencionalna granica razvlačenja pri nekoj temperaturi,
- E_{ϑ} - modul elastičnosti pri nekoj temperaturi.

Registar pripisuje ispitnu temperaturu od 300 °C, ukoliko se posebno ne odredi druga temperatura.



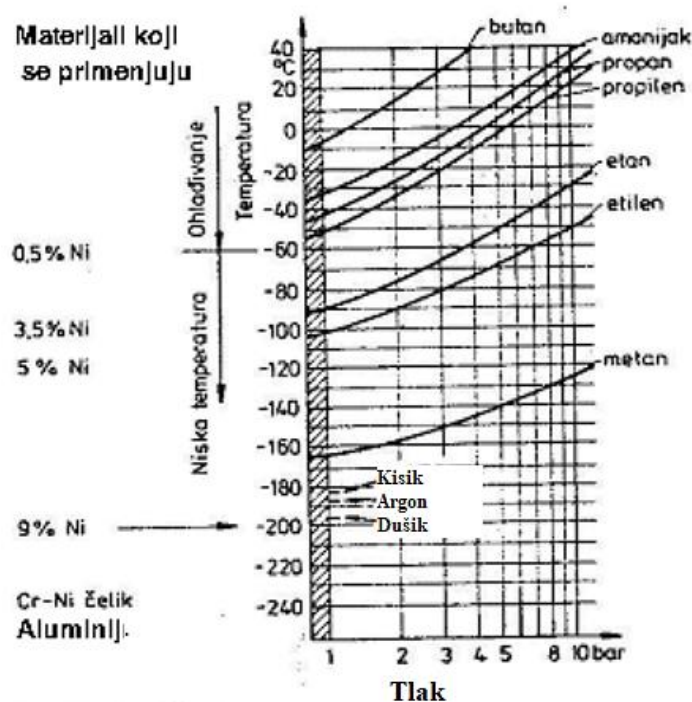
Slika 27. Shematski prikaz ponašanja čelika pri kratkotrajnom statičkom razvlačenju pri $\vartheta > 450^{\circ}\text{C}$ [23]

5.3.2 Ispitivanje udarnog rada loma

Svim proizvodima debljine ≥ 6 mm ispituje se žilavost Charpyjevim batom koristeći uzorke s V zarezom na ispitnoj temperaturi 0 °C. Ispitni uzorci se uzimaju iz proizvoda poprečno na smjer valjanja. Broj setova ispitivanja (svaki set sadrži 3 uzorka) određuje se na isti način kao broj uzoraka kod statičkog vlačnog ispitivanja.

6. ČELICI ŽILAVI PRI SNIŽENIM TEMPERATURAMA

Razvoj kvalitetnih čelika za rad na niskim temperaturama iniciran je potrebama sve veće proizvodnje ukapljenih plinova. Prelaskom plinova u kapljevito stanje znatno se olakšava njihov transport i skladištenje. Tako su zavarene konstrukcije za rad pri niskim temperaturama u najvećem broju cijevni sistemi i spremnici. Veoma niske temperature ukapljivanja najčešće primjenjivanih plinova kao što su npr. metan, kisik, dušik ili vodik diktiraju uvjete za primjenu na niskim temperaturama. U novije vrijeme upotreba čelika za niske temperature je proširena i na opremu za supervodiče kao i na medicinsku opremu. Čelici koji se koriste za rad na niskim temperaturama moraju ispunjavati veoma stroge zahtjeve u pogledu mehaničkih (čvrstoća, žilavost, plastičnost), fizikalnih (koeficijent toplinskog širenja, korozijska postojanost) i tehnoloških svojstava (zavarljivost)



Slika 28. Materijali koji se koriste za rad na niskim temperaturama u ovisnosti o tlaku skladištenja i temperaturama ukapljivanja korištenih plinova [25]

Prema Registru primjenjuju se limovi napravljeni od:

- sitnozrnatih konstrukcijskih čelika,
- visokočvrstih poboljšanih sitnozrnatih čelika,
- čelika legiranih niklom s visokom žilavošću,
- austenitnih čelika.

Namijenjeni su proizvodnji spremnika za teret i tlačnih posuda za ukapljene plinove, slika 29.



Slika 29. Spremnik za UNP (ukapljeni naftni plin) [26]

6.1 Prikladni čelici

- Zavarljivi sitnozrnati konstrukcijski čelici prema normi HRN EN 10028-3:2017.
- Sitnozrnati konstrukcijski čelici s granicom razvlačenja većom od 355 N/mm^2 prema normi HRN EN 10028-3:2017, HRN EN 10028-5:2017 “Plosnati proizvodi od čelika za tlačne namjene -- 5. dio: Zavarljivi sitnozrnati čelici, termomehanički valjani“, HRN EN 10028-5:2017 “Plosnati proizvodi od čelika za tlačne namjene -- 6. dio: Zavarljivi sitnozrnati čelici, poboljšani“.
- Nehrđajući austenitni čelici prema normi HRN EN 10028-7:2016 “Plosnati proizvodi od čelika za tlačne namjene -- 7. dio: Nehrđajući čelici“, uz uvjet da su primjenjivi na traženoj temperaturi (tablica 24).
- Ostali zavarljivi čelici sukladni drugim normama ili specifikacijama proizvođača uz pregled i dopuštenje Registra. Specifikacije moraju sadržavati sljedeće podatke: oznaku/normu materijala, proizvođača, kemijski sastav, mehanička svojstva, namijenjenu najnižu proračunsku temperaturu, interval debljina proizvoda, stanje isporuke, norme ili specifikacije za tolerancije, hrapavost površine, toplinsku obradu nesavršenosti itd.

Stanje isporuke mora biti u skladu s normama ili specifikacijama proizvođača (uz dopuštenje Registra). U tablici 24 su prikazane najniže proračunske temperature za neke čelike.

Tablica 24. Najniže proračunske temperature za čelike žilave pri niskim temperaturama [6]

KATEGORIJA	Norma/oznaka robe	Najniža proračunska temperatura (°C)
Normalizirani, TM valjani i sitnozrnati čelici s nazivnom granicom razvlačenja iznad 355 N/mm ²	Npr. prema HRN EN 10028-3, -5 ili -6	0
Sitnozrnati konstrukcijski čelici s nazivnom granicom razvlačenja do 355 N/mm ²	Npr. prema HRN EN 10028-3, -5 ili -6	-45 ⁽¹⁾
Niklom legirani čelici koji sadrže: 0,5 % Ni 1,5 % Ni 3,5 % Ni 5 % Ni 9 % Ni	Čelici prema HRN EN 10028-4 11MnNi5-3, 13MnNi6-3 15NiMn6 12Ni14 X12Ni5 X7Ni9, X8Ni9	-55 -60 ⁽²⁾ -90 ⁽²⁾ -105 ⁽²⁾ -165
Austenitni čelici	Npr. čelici prema HRN EN 10028-7 1.4306 (AISI 304 L) 1.4404 (AISI 316 L) 1.4541 (AISI 321) 1.4550 (AISI 347)	-165
Napomene: ⁽¹⁾ Registar pridržava pravo odobriti i niže proračunske temperature (najviše -55 °C) ako su odgovarajuća svojstva iskazana tijekom ispitivanja za odobrenje ⁽²⁾ Za čelike koji sadrže 1,5 %, 3,5 % i 5 % Ni može se odobriti i niža proračunska temperatura ako su čelici poboljšani. U tim slučajevima temperature ispitivanja posebno određuje Registar.		

Čelik koji sadrži 5% nikla može se odobriti za najnižu proračunsku temperaturu od -165 °C ako je on legiran s npr. Cr i/ili Mo i ako je podvrgnut trostrukoj toplinskoj obradi (npr. X7 NiMo6 prema HRN EN 10028-4:2017 “Plosnati proizvodi od čelika za tlačne namjene -- 4. dio: Čelici legirani niklom s utvrđenim svojstvima pri niskim temperaturama“ [7].

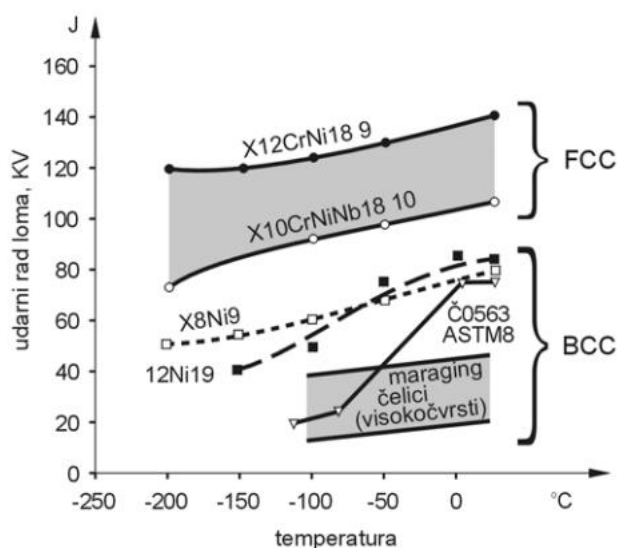
6.2 Kemijski sastav i zavarljivost

Kemijski sastav sukladan je onom navedenom u normi ili specifikaciji materijala odobrenoj od strane Registra. Zavarljivost visokočvrstih poboljšanih sitnozrnatih čelika određuje se osjetljivošću na hladno pucanje, uzorak se uzima iz taline te koristi formula (7).

Granična vrijednost određuje se nakon odobrenja materijala od strane Registra.

6.3 Mehanička svojstva

Pri temperaturama ispod sobne, pa sve do apsolutne nule, fizikalna i mehanička svojstva materijala se mijenjaju različito kod pojedinih skupina materijala. S padom temperature se općenito povećavaju tvrdoća, vlačna čvrstoća, granica razvlačenja, dinamička izdržljivost. Istovremeno se snižava toplinska rastezljivost, toplinska provodnost (vodljivost), specifični toplinski kapacitet, električki otpor. Pri niskim temperaturama se pojačava negativni utjecaj ureza, zareza i promjena presjeka. Ključno svojstvo za usporedbu materijala je žilavost, odnosno sklonost krhkom lomu. Poznato je da žilavost kod nekih materijala bitno opada sa sniženjem temperature, tj. oni su skloniji pojavi krhkog loma, slika 30 [27].



Slika 30. Ovisnost udarnog rada loma o temperaturi za odabrane čelike [27]

Ponašanje metalnih materijala ponajprije ovisi o njihovoj kristalnoj rešetki. Granica razvlačenja, čvrstoća i naročito svojstva duktilnosti - istezljivost, kontrakcija, hladna oblikovljivost i žilavost metala s prostorno centriranom kubičnom (BCC) rešetkom bitno su temperaturno ovisna. Kod metala s plošno centriranom kubičnom (FCC) rešetkom (npr. austenitni nehrđajući čelici) ova svojstva su manje ovisna o sniženju temperature [27]. Za sve primjenjive čelike propisani su minimalni iznosi udarnog rada loma na propisanim temperaturama ispitivanja. Ovi zahtjevi odnose se na usporedive čelike sukladne normama ili specifikacijama, neovisno o vrijednostima unutar njih. Iznosi su prikazani u tablici 25.

Tablica 25. Zahtjevi za udarni rad loma za čelike žilave pri sniženim temperaturama [6]

Vrsta čelika	Debljina proizvoda (mm)	Udarni rad loma, KV		
		Ispitna temperatura (°C)	(J) ⁽¹⁾ L min.	(J) ⁽¹⁾ T min.
Sitnozrnati konstrukcijski čelici s granicom razvlačenja ≥ 355 N/mm ²	≤ 40	-20	41 (29)	27 (19)
Sitnozrnati konstrukcijski čelici, niklom legirani čelici s 0,5% Ni	$\leq 25^{(2)}$	5 K ispod najniže proračunske temperature, ne više od -20°C	41 (29)	27 (19)
Niklom legirani čelici s: 1,5% Ni 3,5% Ni 5% Ni 9% Ni	$\leq 25^{(3)}$	-65 -95 -110 (-196) ⁽⁴⁾ -196	41 (29)	27 (19)
Austenitni čelici	≤ 50	-196	41 (29)	27 (19)

Napomene:

⁽¹⁾ Prosječna vrijednost od 3 ispitna uzorka (iznosi u zagradama su minimalna pojedinačna vrijednost)⁽²⁾ Sljedeće ispitne temperature primjenjive su na proizvode debljine veće od 25 mm:

Debljina proizvoda (mm)	Ispitna temperatura
> 25 ≤ 30	10 K }
> 30 ≤ 35	15 K }
> 35 ≤ 49	20 K }

Za čelike namijenjene za spremnike i konstrukcijske dijelove spremnika debljine proizvoda veće od 25 mm koji su žareni za redukciju zaostalih naprezanja nakon zavarivanja dovoljno je primijeniti ispitnu temperaturu 5 K ispod proračunske temperature, ali ne više od -20 °C

Za ojačanja spremnika koja su žarena za redukciju zaostalih naprezanja i slične zavarane dijelove ispitna temperatura ne smije biti viša od navedene za debljinu spajanog lima

⁽³⁾ U slučaju niklom legiranih čelika s udjelima od 1,5 % Ni, 3,5 % Ni i 5 % Ni debljina većih od 25 mm ispitna temperatura se određuje kako je opisano u napomeni ⁽²⁾.

Međutim, ne smije biti viša od one navedene u tablici.

⁽⁴⁾ U slučaju kad je čelik s 5 % Ni ispitan i odobren za najnižu proračunsku temperaturu od -165 °C, ispitivanje udarnog rada loma vrši se na -196 °C

L: uzdužno, T: poprečno

6.4 Razorna i nerazorna ispitivanja

Za određivanje mehaničkih svojstava provode se statičko vlačno ispitivanje, ispitivanje Charpyjevim batom te ispitivanje padajućim utegom. Od ostalih razornih ispitivanja vrši se ispitivanje otpornosti na interkristalnu koroziju. Provodi se po potrebi ili kada je napomenuto u narudžbi kod austenitnih čelika. Od nerazornih ispitivanja vrši se ultrazvučno ispitivanje.

6.4.1. Statičko vlačno ispitivanje

Svi proizvodi podliježu statičkom vlačnom ispitivanju. Uzorci se uzimaju poprečno na smjer valjanja ako se radi o limovima, širokim trakama i toplo valjanim trakama širine ≥ 600 mm. Za ostale proizvode uzorci se uzimaju ili uzdužno ili poprečno na smjer valjanja. Broj ispitnih uzoraka se određuje na sljedeći način:

- a) normalizirani i termomehanički valjani limovi: jedan uzorak s jednog kraja toplinski obrađene duljine; Ako je duljina veća od 15 m, jedan uzorak se uzima sa svakog kraja.
- b) poboljšani limovi: jedan uzorak s jednog kraja svake toplinski obrađene duljine; Ako je duljina veća od 7 m, jedan uzorak se uzima sa svakog kraja.
- c) limovi uzeti iz toplo valjanih širokih traka koje se zasebno ne obrađuju toplinski: jedan uzorak sa svakog kraja namotaja,
- d) limovi od austenitnog nehrđajućeg čelika: jedan uzorak s jednog kraja svake toplinski obrađene duljine. Ako je duljina veća od 15 m, uzima se po jedan uzorak sa svakog kraja.

Uzorci uzeti s vrha i s dna valjanog lima ne smiju se razlikovati u vlačnoj čvrstoći za više od sljedećih iznosa:

- valjane duljine ≤ 10 m: 60 N/mm^2
- valjane duljine > 10 m: 70 N/mm^2

6.4.2 Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom

Svi proizvodi debljina ≥ 6 mm podvrgavaju se ispitivanju udarnog rada loma Charpyjevim batom na uzorcima s V zarezom. Temperature ispitivanja navedene su u tablici 25. Uzorci limova i širokih traka širine ≥ 600 mm uzimaju se poprečno na smjer valjanja. Uzorci ostalih proizvoda uzimaju se ili poprečno ili uzdužno na smjer valjanja. Broj setova ispitivanja (svaki set sastoji se od 3 uzorka) određuje se na isti način kao i broj ispitnih uzoraka kod statičko

vlačnog ispitivanja opisanog u prethodnom poglavlju. Ukoliko debljina proizvoda isključuje upotrebu uzoraka standardnih dimenzija (10 mm x 10 mm) koriste se uzorci dimenzija presjeka 7,5 mm x 10 mm ili 5 mm x 10 mm.

6.4.3 Ispitivanje padajućim utegom

Proizvodi od visokočvrstog, poboljšanog, sitnozrnatog konstrukcijskog čelika i čelika s najnižom proračunskom temperaturom nižom od -50°C (osim austenitnih čelika) ispituju se metodom padajućeg utega. Najmanje dva uzorka uzimaju se s najdebljeg proizvoda svake serije te ispituju na temperaturi 5 K ispod najniže proračunske temperature. Ispitivanje se provodi samo na proizvodima debljine > 16 mm. Ispitivanje mora biti sukladno normi, npr. HRN EN 10274:2008 "Metalni materijali -- Ispitivanje s padajućim utegom" ili ASTM E-208 "Standard Test Method for Conducting Drop-Weight Test to Determine Nil-Ductility Transition Temperature of Ferritic Steels".

6.4.4 Ultrazvučno ispitivanje

Ultrazvučno ispitivanje provodi se prema prihvaćenom standardu uz odobrenje Registra na sljedećim proizvodima:

- a) limovima od visokočvrstog poboljšanog sitnozrnatog konstrukcijskog čelika,
- b) limovima koji su opterećeni u smjeru debljine.

Poseban dogovor postiže se oko testiranja valjanih dijelova za obruče kuglastih spremnika.

Provodi se prema normi HRN EN 10160:2001 "Ultrazvučno ispitivanje plosnatih čeličnih proizvoda s debljinom jednakom ili većom od 6 mm (tehnika odjeka)" ili kako je opisano u specifikacijama Njemačkog društva za željezo i čelik SEL 072:1977 „Ultrasonic tested heavy plate; Technical delivery specifications. Supplement: Ultrasonic testing in cases of arbitration“.

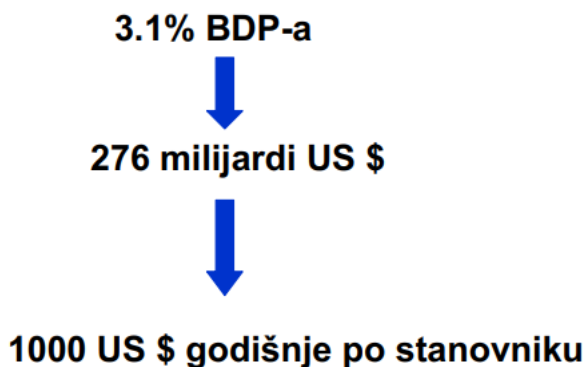
6.5. Tolerancije debljine i hrapavost

Za limove koji se koriste za dijelove plašta spremnika ili posuda uključujući vanjske limove i kupole posuda, najmanja debljina je nazivna debljina propisana u specifikacijama. Za limove i široke trake koji se ne koriste za dijelove plašta primjenjuje se negativna tolerancija kako je opisana u tablici 12. Hrapavost površine se ispituje od strane proizvođača. U slučaju limova potrebno je ispitati i donju površinu ukoliko je to moguće.

7. KOROZIJSKI POSTOJANI ČELICI

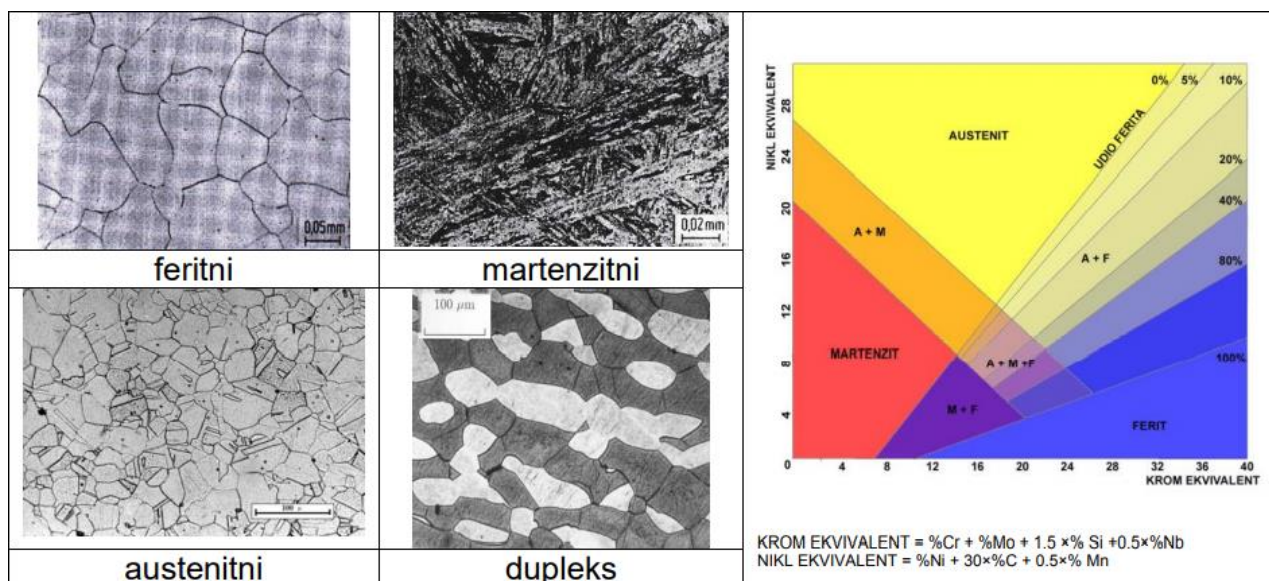
Korozija je nenamjerno razaranje konstrukcijskih materijala uzrokovano fizikalnim, fizikalno-kemijskim i biološkim agensima. Korozija je danas jedan od važnih čimbenika svjetske krize materijala i energije i uzrok je znatnih gubitaka u gospodarstvu svake zemlje. (slika 31.) [28]

DIREKTNI TROŠKOVI KOROZIJE IZNOSE:



Slika 31. Direktni troškovi korozije u SAD-u [28]

Korozijski postojani ili nehrđajući čelik (eng. stainless steel) naziv je koji se koristi još od najranijih faza razvoja ovih čelika (početak XX. stoljeća). S početka prihvaćen kao generičko ime, danas označava široki raspon različitih vrsta i kvaliteta čelika otpornih na koroziju. Obilježava ih minimalni udio kroma od 12 % otopljenog u čvrstoj otopini kao i dodatak ostalih legirajućih elemenata poput nikla, molibdena, titana, dušika, kojima se bilo modificira njihova struktura ili postižu svojstva veće korozijske postojanosti, poboljšava obradivost, čvrstoća ili pak žilavost na sniženim (kriogenim) temperaturama. U osnovi, danas, poznajemo četiri osnovne grupe – vrste nehrđajućih čelika, pri čemu je podjela izvršena na osnovi njihovih mikrostrukturnih obilježja. Tako postoje martenzitni, feritni, austenitni i dupleks (austenitno – feritni) nehrđajući čelici, slika 32. Dodatno, navedena podjela može se proširiti ako se uzme u obzir i mogućnost očvršćivanja, pa tako postoji i peta skupina nehrđajućih čelika - tzv. precipitacijski očvrstljivi čelici [29]. Stanje isporuke određuje se ovisno o mikrostrukтури. Feritni čelici isporučuju se u žarenom ili poboljšanom stanju, austenitni i dupleks čelici rastvorno se žare.



Slika 32. Karakteristične mikrostrukture pojedinih grupa nehrđajućih čelika i strukturni Schaefflerov dijagram [29]

Prema Registru se nehrđajući čelici primjenjuju u obliku limova i profila namijenjenih proizvodnji spremnika i cijevi u kojima se nalaze kemikalije, posuda i tlačnih spremnika za koje je potrebna kemijska postojanost, čahura kormila, osovina kormila, vratila propelera i sličnih dijelova koji moraju biti otporni na utjecaj morske vode, slika 33. Međutim, postoje i drugi dijelovi broda kod kojih se zahtijeva korozivna otpornost, a sam konstrukcijski materijal nije dovoljno korozivski postojan. U tom slučaju primjenjuju se metode zaštite od korozije, a to su: zaštita od korozije nanošenjem prevlaka, konstrukcijsko - tehnološke mjere, električne metode zaštite i zaštita promjenom okolinosti (npr. inhibitorima korozije), slike 34 i 35.



Slika 33. Cijevni sustav od nehrđajućeg čelika na palubi broda [30]



Slika 34. Metode zaštite od korozije [29]



Slika 35. Protektorska zaštita podvodnog dijela čeličnog trupa broda žrtvujućim anodama od cinka. [29]

7.1 Odabir čelika

Čelik se odabire na temelju liste tereta prijevoznika, koja daje informacije o prirodi supstanca koje se prijevoze. Nadalje, uzima se u obzir daljnja obrada čelika npr. zavarivanje, koja ne smije ugroziti jamčenu kemijsku postojanost. U skladu s navedenim prikladni čelici biraju se prema skupini norma kao što je HRN EN 10088 koja se odnosi na nehrđajuće čelike i tehničke

uvjete isporuke za različite poluproizvode. Osim normi, moguć je odabir čelika u skladu sa specifikacijama proizvođača uz ispitivanje od strane Registra.

7.2 Tolerancije debljine

Ukoliko u specifikacijama narudžbe nije navedeno drugačije, limovi se isporučuju s maksimalnom negativnom tolerancijom debljine od 0,3 mm. Za ostale proizvode primjenjuju se podaci sadržani u relevantnim normama.

7.3 Kemijski sastav

Granične vrijednosti udjela legiranih elemenata primjenjuju se prema normama ili specifikacijama proizvođača. Za zavarene konstrukcije koje se ne obrađuju toplinski nakon zavarivanja, koriste se samo čelici koji su otporni na interkristalnu koroziju npr. stabilizirani austenitni čelici legirani s Ti ili Nb ili čelici s udjelom ugljika $\leq 0,03$ %.

7.4 Razorna i nerazorna ispitivanja

Zahtjevi za mehanička svojstva postavljaju se prema normi ili specifikaciji proizvođača. Ova svojstva se ispituju statičkim vlačnim ispitivanjem i ispitivanjem udarnog rada loma. Osim ispitivanja za utvrđivanje mehaničkih svojstava svim proizvodima se ispituje otpornost na interkristalnu koroziju te po potrebi otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procjepu. Prije isporuke, proizvođač je dužan ispitati hrapavost površine. U slučaju limova mora se ispitati i donja strana.

7.4.1 Statičko vlačno ispitivanje

Najmanje jedan ispitni uzorak uzima se iz svake ispitne serije. Ispitna serija sastoji se od:

- a) limova debljine > 20 mm
- b) limova debljine ≤ 20 mm: najviše 40 valjanih limova podjednake debljine (maksimalna devijacija 20 %), uzetih iz iste šarže te isto toplinski obrađenih mase ne veće od 30 t,
- c) traka uzetih iz namotaja: po jedan uzorak s početka i kraja namotane trake,
- d) svih ostalih proizvoda i oblika: 5000 kg za proizvode istog oblika iz iste šarže te isto toplinski obrađenih.

U slučaju limova i traka širine ≥ 600 mm, uzorci se uzimaju poprečno na smjer valjanja. Uzorci ostalih proizvoda uzimaju se ili uzdužno ili poprečno na smjer valjanja.

7.4.2 Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom na uzorcima s V zarezom provodi se za sljedeće skupine:

- a) limovi debljine > 20 mm,
- b) šipke i puni profili promjera ili debljine > 50 mm,
- c) limovi od duplex čelika debljine ≥ 6 mm.

Ukoliko su proizvodi namijenjeni primjeni na temperaturama ispod -10 °C, temperatura ispitivanja određuje se u dogovoru s Registrom.

7.4.3 Ispitivanje otpornosti na interkristalnu koroziju

Za ovo ispitivanje uzimaju se najmanje 2 ispitna uzorka iz svake šarže. Ispitivanje se obavlja prema normi HRN EN ISO 3651-2:2008 “Određivanje otpornosti na interkristalnu koroziju nehrđajućih čelika -- 2. dio: Feritni, austenitni i feritno-austenitni (duplex) nehrđajući čelici -- Ispitivanje korozije u mediju koji sadrži sumpornu kiselinu“ ili sukladno DIN-u 50914 “Determination of the resistance of stainless steel to intergranular corrosion using the copper sulfate/sulfuric acid method (Moneypenny-Strauss Test)” na ispitnim uzorcima u sljedećem stanju:

- a) stabilizirani čelici i čelici s udjelom ugljika $\leq 0,03$ % žareni na 700 °C 30 minuta te potom gašeni u vodi),
- b) svi ostali čelici: u stanju u kojem su isporučeni.

8. PREVUČENI LIMOVİ

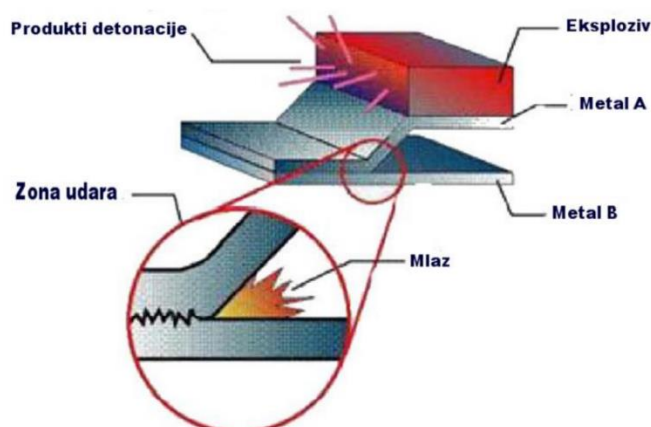
Prevučeni limovi su čelični limovi prevučeni nehrđajućim čelikom namijenjeni proizvodnji spremnika i kontejnera. Čelici primjenjivi kao materijal osnove su čelici normalne i povišene čvrstoće opisani u poglavlju 2., nelegirani konstrukcijski čelici za zavarene konstrukcije opisani u poglavlju 3. i toplinski postojani čelici opisani u poglavlju 5. Materijali prevlake mogu biti korozijski postojani čelici opisani u poglavlju 7. ili drugi materijali odobreni od strane Registra.



Slika 36. Prevučeni materijal [31]

8.1 Metode prevlačenja i stanje isporuke

Prevlačenje se odvija valjanjem ili zavarivanjem eksplozijom (slika 37), ili kombinacijom te dvije metode. Limovi prevučeni austenitnim čelicima uobičajeno se isporučuju u valjanom stanju. U posebnim okolnostima kada je potrebna toplinska obrada ona je određena osnovnim materijalom. Međutim, obrada ne smije narušiti kemijsku stabilnost niti prionjivost materijala prevlake. Vrsta toplinske obrade mora biti odobrena od strane Registra



Slika 37. Zavarivanjem eksplozijom [32]

8.2 Dimenzije, tolerancije i kvaliteta površine

Nazivna debljina materijala prevlake mora biti najmanje 2 mm. Ukoliko u narudžbi nije specificirano drugačije, primjenjuju se tolerancije debljine prikazane u tablici 26.

Tablica 26. Negativne tolerancije ovisno o debljini materijala prevlake [6]

Nazivna debljina prevlake (mm)	Negativna tolerancija (mm)
$\geq 2,0 < 2,5$	-0,20
$\geq 2,5 < 3,0$	-0,25
$\geq 3,0 < 3,5$	-0,35
$\geq 3,5 < 4,0$	-0,45
$\geq 4,0$	-0,50

Tolerancije za materijal osnove određuju se prema zahtjevima za vrstu proizvoda i kategoriju čelika kojoj materijal pripada. Materijal prevlake mora imati glatku površinu, bez nečistoća, kamenca i ostalih defekata koji potencijalno mogu pogoršati proizvodne postupke primjenjivane na materijalu, njegovu primjenu i kemijsku stabilnost. Ukupna površina svih nesavršenosti, osim plitkih nesavršenosti kao što su ogrebotine i žlijebci koji se uklanjaju brušenjem unutar tolerancijskog polja opisanog u tablici 26 ne smije iznositi više od 20% ukupne površine materijala prevlake. Za kvalitetu površine osnovnog materijala nema posebnih dodatnih zahtjeva.

8.3 Zahtjevi na prevučene materijale

8.3.1 Istezljivost

U slučaju prevučenih čelika kada je istezljivost materijala prevlake manja od istezljivosti osnovnog materijala, vrijednost istezljivosti (A) za materijal prevlake mora iznositi najmanje 12 %. Ova se istezljivost određuje statičkim vlačnim ispitivanjem nakon uklanjanja osnovnog metala strojnom obradom.

8.3.2 Smična čvrstoća

Veza između osnovnog materijala i prevlake mora biti dovoljno čvrsta kako se prevlaka ne bi odvojila od osnovnog materijala tijekom proizvodnih postupaka ili pri narinutom radnom opterećenju. U slučaju materijala prevlake vlačne čvrstoće $< 280 \text{ N/mm}^2$, smična čvrstoća mora iznositi najmanje 50% minimalne vlačne čvrstoće materijala prevlake, a za sve ostale materijale prevlake smična čvrstoća ne smije biti manja od 140 N/mm^2 , neovisno o smjeru ispitivanja.

8.3.3 Prionjivost

Prionjena površina mora činiti najmanje 95% ukupne površine. Površina izoliranih mjesta gdje vezanje nije uspjelo ne smije premašiti 50 cm^2 . Za prevučene čelike pod izrazitim opterećenjem tijekom obrade npr. u proizvodnji kupola, ili tijekom korištenja npr. cijevne stijene, naručitelj može tražiti i strože zahtjeve.

8.3.4 Mehanička svojstva

Mehanička svojstva prevučenih čeličnih limova ispituju se statičkim vlačnim ispitivanjem. Ako se ovim ispitivanjem utvrdi manja vrijednost od one koja proizlazi iz jednažbe (8), zahtjevi primjenjivi na osnovni materijal trebaju se provjeriti ispitivanjem uzoraka na kojima je materijal prevlake uklonjen strojnom obradom

$$\sigma_{pl} = \frac{\sigma_G x S_G + \sigma_A x S_A}{S_{pl}} \quad (8)$$

gdje su:

$\sigma [\text{N/mm}^2]$ – minimalna vrijednost vlačne čvrstoće ili granice razvlačenja ili konvencionalne granice razvlačenja (0,2%), $S [\text{mm}]$ – nazivna debljina, a oznake “G“, “A“ i “pl.“ odnose se na osnovni materijal, materijal prevlake odnosno prevučeni čelik.

Naznačena istezljivost za osnovni materijal treba biti provjerena ispitivanjima provedenim na prevučenim uzorcima. Zahtjevi za udarni rad loma osnovnog materijala moraju biti zadovoljeni i nakon prevlačenja.

8.3.5 Tehnološka svojstva

Kada je prevučeni lim podvrgnut ispitivanju bočnim savijanjem on se mora savinuti za 180° preko oslonca promjera četiri puta većeg od debljine uzorka bez odvajanja materijala prevlake ili formiranja početnih pukotina. Oslonci većih promjera mogu se primjenjivati na druge materijale prevlake npr. aluminij.

8.3.6 Otpornost na interkristalnu koroziju

Za austenitne i austenitno-feritne materijale prevlake, zahtjevi na otpornost na interkristalnu koroziju primjenjivi za odgovarajuću kategoriju čelika trebaju biti ispunjeni.

8.4 Razorna i nerazorna ispitivanja

Opseg ispitivanja, lokacija i broj ispitnih uzoraka određuju se na temelju osnovnog materijala.

8.4.1 Ispitivanje otpornosti na interkristalnu koroziju

U slučaju primjene austenitnih i austenitno-feritnih materijala prevlake, otpornost na interkristalnu koroziju ispituje se za svaku ispitnu seriju. U svrhu ovog ispitivanja, limovi koji su prevučeni u istom proizvodnom ciklusu s materijalima prevlake iz iste proizvodne serije mogu se grupirati u istu ispitnu seriju. Tijekom ispitivanja, prevučena strana mora biti podvrgnuta vlačnom naprezanju.

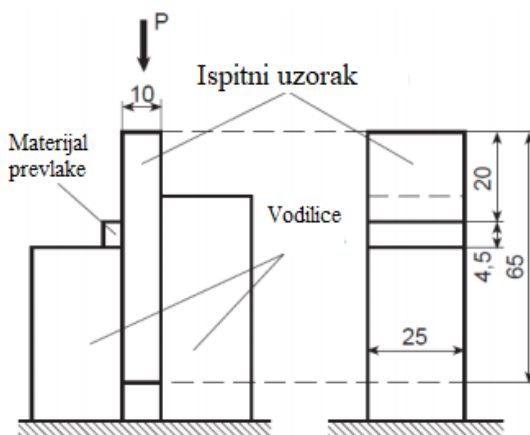
8.4.2 Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje vrši se na poprečnim uzorcima svake ispitne serije. Ukoliko se ne dogovori drugačije, materijal prevlake ostaje na ispitnom uzorku. Mjerne oznake ostaju na strani osnovnog materijala.

8.4.3 Ispitivanje smicanjem

Uzorak iz svake ispitne serije uzima se poprečno na smjer valjanja i podvrgava ispitivanju smicanjem. Ispitivanje se obavlja u skladu s normom (npr. DIN 50162 "Testing of clad steels;

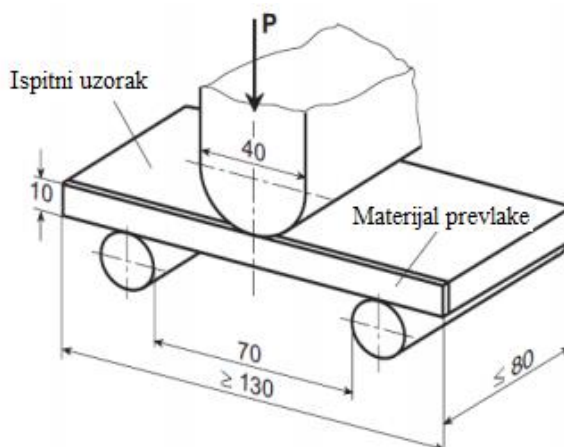
determination of shear strength between cladding metal and parent metal in shear test“). Dimenzije ispitnog uzorka i postava ispitivanja prikazani su na slici 38.



Slika 38. Ispitivanje smicanjem [6]

8.4.4 Ispitivanje bočnim savijanjem

Uzorak iz svake ispitne serije uzima se poprečno na smjer valjanja i podvrgava ispitivanju bočnim savijanjem. Dimenzije ispitnog uzorka i postava ispitivanja prikazani su na slici 39. Kada debljina proizvoda prelazi 80 mm, debljina uzorka može se smanjiti na 80 mm strojnom obradom osnovnog materijala.



Slika 39. Ispitivanje bočnim savijanjem [6]

8.4.5 Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje udarnog rada loma provodi se u slučajevima kada je tako određeno za osnovni materijal. Broj ispitnih uzoraka, njihova orijentacija i ispitna temperatura odgovaraju onim uvjetima koji vrijede i za osnovni materijal.

8.4.6 Ispitivanje kvalitete površine i dimenzija

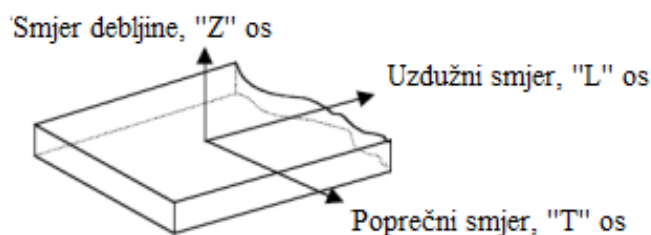
Kvaliteta površine i dimenzije svih limova pregledavaju se od strane proizvođača. Debljina prevlake mjeri se na rubovima i na sredini lima. Svi limovi moraju proći završno ispitivanje i potvrdu dimenzija.

8.4.7 Nerazorna ispitivanja

Zbog utvrđivanja kvalitete veze između osnovnog materijala i prevlake, proizvođač provodi 100% ultrazvučno ispitivanje površine i rubova svih limova.

9. ČELIČNI LIMOV I ŠIROKE TRAKE S ODREĐENIM MINIMALNIM SVOJSTVIMA U SMJERU DEBLJINE (ČELICI "Z" KVALITETE)

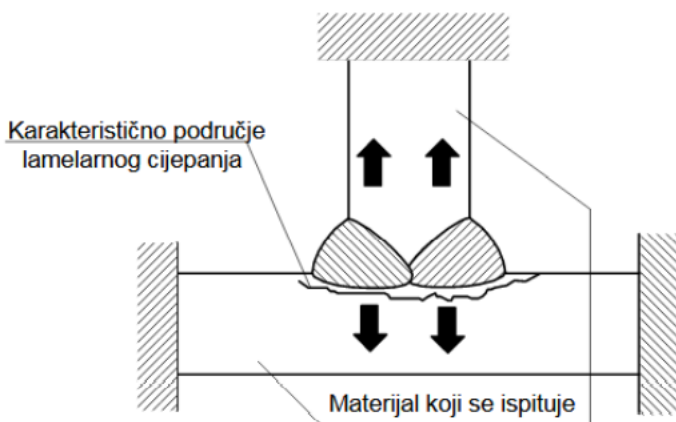
Zahtjevi izneseni u ovom poglavlju su dodatak na zahtjeve iznesene u poglavlju 2. i 4. za materijale debljina ≥ 15 mm s određenom minimalnom duktilnošću u smjeru debljine, "Z" smjeru, slika 40. Proizvodi debljina manjih od 15 mm mogu biti uključeni uz odobrenje Registra.



Slika 40. Prikaz ispitnih osi [6]

Korištenje čelika "Z" kvalitete preporuča se za konstrukcijske dijelove podvrgnute opterećenju u smjeru debljine sa svrhom minimiziranja mogućnosti lamelnog odvajanja tijekom proizvodnje.

Lamelarno odvajanje (slika 41) je tip greške koji nastaje u zoni utjecaja topline i obično se dalje širi na osnovni materijal, a posljedica je postojanja nemetalnih uključaka u osnovnom materijalu i djelovanja toplinskih naprezanja unesenih zavarivanjem. Ove nečistoće valjanjem se ugrađuju u sredinu lima, a kod djelovanja naprezanja (zbog unešene topline kod zavarivanja), dolazi do odvajanja slojeva. [33]

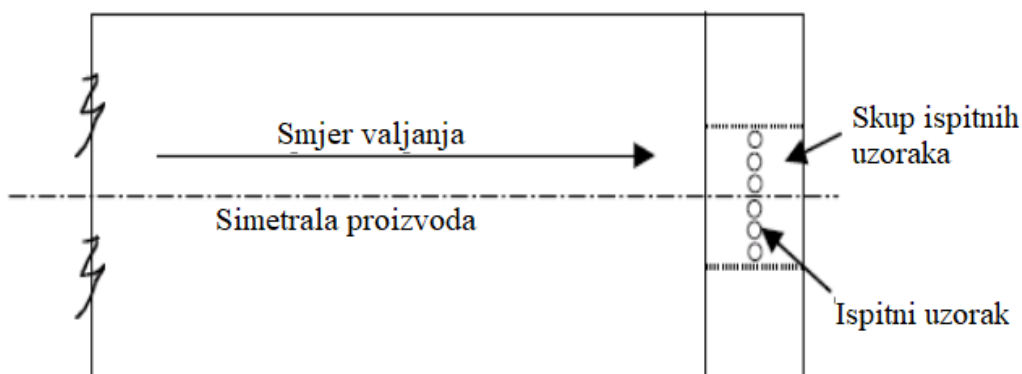


Slika 41. Lamelarne pukotine [33]

Definirane su dvije kategorije "Z" čelika, Z25 za uobičajene primjene u brodogradnji i Z35 za primjene pod većim opterećenjima. Svojstva u smjeru debljine karakterizirana su određenim vrijednostima za smanjenje površine u statičko vlačnom ispitivanju u smjeru debljine. Proizvodi ne smiju sadržavati nesavršenosti koje mogu pogoršati tražene karakteristike u smjeru debljine npr. značajne nemetalne uključke, segregacije, nakupine itd. Kemijski sastav "Z" čelika odgovara prikladnom čeliku opisanom u poglavljima 2. ili 4. uz dodatan zahtjev na maksimalni udio sumpora koji iznosi 0,008% i određuje se analizom taline.

9.1 Postupak ispitivanja

Postavljaju se dodatni zahtjevi na postupke ispitivanja opisane u poglavljima 2. i 4. ovisno o kategoriji čelika. Za limove i široke trake, ispitni uzorak uzima se blizu uzdužne simetrale s jednog kraja svakog valjanog komada koji čini seriju. Veličina ispitne serije s obzirom na udio sumpora i vrstu proizvoda prikazana je u tablici 27.



Slika 42. Pozicija ispitnog uzorka na limovima i širokim trakama [6]

Tablica 27. Veličina ispitne serije ovisno o vrsti proizvoda i udjelu sumpora [6]

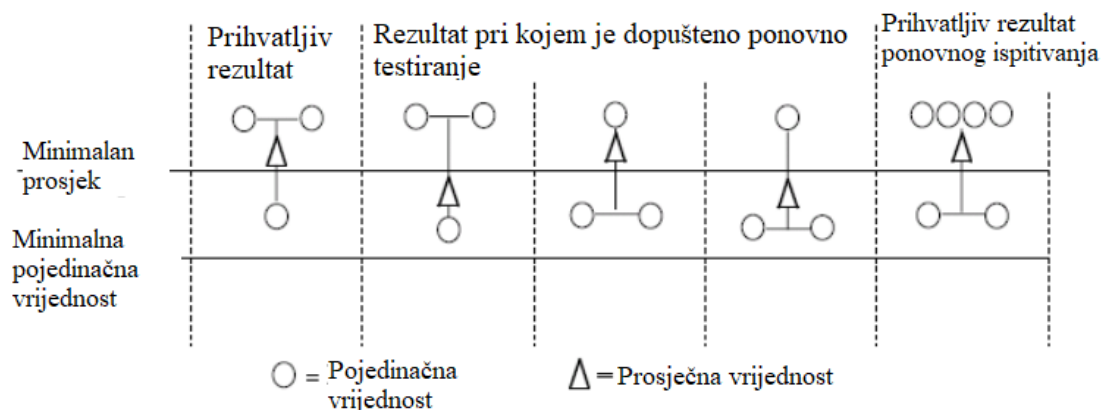
Proizvod	$0,005 \% < S$	$0,005 \% \geq S$
Limovi	Svaki komad (izvorni lim)	Maksimalno 50 t proizvoda iste šarže, debljine i toplinske obrade
Široke trake nazivne debljine ≤ 25 mm	Maksimalno 10 t proizvoda iste šarže, debljine i toplinske obrade	
Široke trake nazivne debljine > 25 mm	Maksimalno 20 t proizvoda iste šarže, debljine i toplinske obrade	

Dio na kojem se nalazi skup ispitnih uzoraka mora biti dovoljno velik da se može pripremiti 6 ispitnih uzoraka za statičko vlačno ispitivanje (slika 42). 3 ispitna uzorka podrgavaju se ispitivanju dok se ostala 3 čuvaju za moguće ponovljeno ispitivanje. Statičko vlačno ispitivanje smatra se nevažećim i ispitivanje se ponavlja ako dođe do loma u zavaru ili u ZUT-u. Minimalna prosječna vrijednost smanjenja površine najmanje 3 ispitna uzorka, uzeta u smjeru debljine, mora odgovarati iznosima za pojedinu kategoriju čelika prikazanima u tablici 28.

Tablica 28. Prihvatljive vrijednosti smanjenja površine [6]

Kategorija	Z25	Z35
Minimalni prosjek	25%	35%
Minimalna pojedinačna vrijednost	15%	25%

Pojedinačna vrijednost samo jednog ispitnog uzorka smije biti ispod minimalne prosječne vrijednosti, ali ne i ispod minimalne pojedinačne vrijednosti za odgovarajuću kategoriju. Na slici 43. prikazan je dijagram koji pokazuje prihvatljive rezultate ispitivanja, slučajeve u kojima je dopušteno ponovno ispitivanje te prihvatljive rezultate ponovljenog ispitivanja.



Slika 43. Dijagram kriterija prihvatljivosti ispitivanja i prihvatljivosti ponovnog ispitivanja [6]

U slučaju kada je dopušteno ponovno ispitivanje, tri nova testiranja se provode s preostalim uzorcima iz skupine ispitnih uzoraka. Prosjek svih 6 rezultat statičkog vlačnog ispitivanja mora biti veći od traženog minimalnog prosjeka, s najviše dva rezultata ispod minimalnog prosjeka. U slučaju ne ispunjavanja traženog kriterija nakon ponovnog ispitivanja, ili se odbija cijela ispitna serija koju je uzorak predstavljao ili se svaki proizvod unutar serije mora zasebno

ispitati.

Osim statičko vlačnog ispitivanja obavezno se provodi i ultrazvučno ispitivanje. Provodi se na svakom proizvodu u konačnom stanju isporuke sa sondom frekvencije 4 MHz.

10. ZAKLJUČAK

Čelik je izrazito zastupljen materijal zbog svojih dobrih kombinacija i mehaničkih i tehnoloških svojstava; čvrstoće, krutosti, zavrljivosti, rezljivosti, oblikovljivosti te relativno niske cijene. Također ima visoku mogućnost prilagodbe i promjene svojih svojstava legiranjem, toplinskom obradom i obradom deformiranjem. Brodogradnja kao kompleksna djelatnost iskorištava širok spektar mogućih svojstava čelika te se primjenjuju čelici različitih svojstava za različite uvjete uporabe. Čelici normalne i povišene čvrstoće koriste se za trup broda. Za sve kategorije čelika povišene čvrstoće propisana je obrada na sitno zрно što im daje povoljna mehanička svojstva. Nelegirani konstrukcijski čelici za zavarene konstrukcije su zavarljivi sitnozrnati konstrukcijski čelici koji se primjenjuju za zavarene brodske konstrukcije (npr. u proizvodnji motora). Visokočvrsti čelici za zavarene konstrukcije imaju izrazito dobra mehanička svojstva kao rezultat djelovanja različitih mehanizama očvrnuća. Primjenjuju se npr. za izradu brodskih dizalica i potporna offshore platformama. YP47 čelični limovi pripadaju visokočvrstim čelicima i razvijeni su u jeku razvoja kontejnerskog transporta. Primjenjuju se na uzdužne strukturne dijelove na gornjem dijelu palube broda za prijevoz kontejnera. Čelici otporni krhkom lomu imaju povoljno svojstvo lomne žilavosti i primjenjuju se za debele limove koji su izloženi mogućoj pojavi krhkog loma, najčešće na brodovima za prijevoz kontejnera. Toplinski postojani čelici primjenjuju se na dijelove strojeva i uređaja koji su tijekom uporabe izloženi povišenim i visokim radnim temperaturama, npr. parnih kotlova, tlačnih posuda, izmjenjivača topline i ostale procesne opreme. Čelici žilavi pri sniženim temperaturama primjenjuju se ponajviše u proizvodnji tlačnih posuda za spremanje ukapljenih plinova. Ispunjavaju oštre zahtjeve u pogledu mehaničkih (čvrstoća, žilavost, plastičnost), fizikalnih (koeficijent toplinskog istezanja, korozijska postojanost) i tehnoloških svojstava (zavarljivost). Korozijski postojani čelici primjenjuju se u proizvodnji spremnika i cijevi u kojima se nalaze kemikalije, posuda i tlačnih posuda kod kojih se zahtijeva kemijska postojanost materijala te za dijelove koji moraju biti otporni na djelovanje morske vode. Prevučeni limovi su čelični limovi prevučeni korozijski postojanim čelikom i primjenjuju se u proizvodnji spremnika i kontejnera. Čelični limovi i široke trake s određenim minimalnim svojstvima u smjeru debljine koriste se u uvjetima kad se očekuju velika naprezanja u smjeru debljine materijala.

Izazovi s kojima se brodogradnja danas susreće proizlaze iz sve veće zabrinutosti oko sigurnosnih i ekoloških aspekata, tako da se postavljaju sve stroži zahtjevi s obzirom na pojavu krhkog loma, korozijsku postojanost i naravno sve veću čvrstoću koja omogućuje izvedbu

tankostijenih konstrukcija manje mase. Može se pretpostaviti da će u budućnosti biti još rigorozniji zahtjevi u pogledu sigurnosti, produljenju životnog vijeka i smanjenju troškova održavanja broda te u pogledu uštede energije. Izazov će predstavljati i sve prisutnija svijest o potrebi očuvanja ljudskog okoliša koja će se nametnuti od procesa dobivanja čelika pa do proizvodnje broda kao gotovog proizvoda kompleksne strukture. [34]

11. LITERATURA

- [1] [Trireme - Ancient History Encyclopedia](#) (dostupno 27.1.2021)
- [2] [CARAVEL \(tamu.edu\)](#) (dostupno 27.1.2021)
- [3] [O gajeti - Gajeta Falkuša Komiža Vis \(gajetafalkusa.com\)](#) (dostupno 27.1.2021.)
- [4] [SS Great Britain - Isambard Kingdom Brunel \(ikbrunel.org.uk\)](#) (dostupno 27.1.2021)
- [5] [MS Carolinian - Wikipedia](#) (dostupno 27.1.2021)
- [6] Rules for the classification of ships, Part 25- Metallic materials, Croatian Register of Shipping, 2019.
- [7] D. Ćorić: Materijali u brodogradnji, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2020.
- [8] J. Šundrica, N. Jurjević, M. Prčan: Znanost i tehnologija materijala s osvrtom na primjenu, Naše more 51, 3-4, 2004.
- [9] Nisith R. Mandal: Ship Construction and Welding, Springer, Singapore, 2017.
- [10] M. Smiljanić: Zavarljivi finozrni čelici, Zavarivanje i zavarene konstrukcije 4, 2006.
- [11] M. Zgurić: Toplinska obrada zavarenih spojeva, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [12] S. Kožuh: Specijalni čelici, autorizirana predavanja, Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2010.
- [13] R. Uemori, M. Fujioka, T. Inoue, M. Minagawa, K. Ichikawa, H. Shirahata, T. Nose: Steels for Marine Transportation and Construction, Nippon Steel Technical Report No. 101, 2012.
- [14] E. Turan, K. Ünlügençoglu, T. Koçal: Welding Technologies in Shipbuilding Industry, The Online Journal of Science and Technology 1 (4), 2011.
- [15] V. Rede: Posebni metalni materijali predavanja, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2020.
- [16] D. Ćorić, Ž. Alar: Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2016.
- [17] B. Matijević: Toplinska obrada, predavanja, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [18] Y. Funatsu, J. Otani, K. Hirota, T. Matsumoto, H. Yajima: Development of Higher Toughness YP47 (460 N/mm²) Class Steel Plate for Large Container Ships, Proceedings of the Twentieth (2010) International Offshore and Polar Engineering Conference Beijing, China, June 20–25, 2010.

- [19] [Container Ship Bigger than Aircraft Carrier \(interestingengineering.com\)](http://interestingengineering.com) (dostupno 26.1.2021)
- [20] E. Tamura, T. Nakagawa, K. Tsutsumi, Naohiro Furukawa: Effect of Steel Toughness on Brittle Crack Arrest Behavior of T-weld Joint Structure Using Thick Plates, Kobelco Technology Review No. 30, 2011.
- [21] Rules for the classification of ships, Part 25- Metallic materials, Amendments No. 1, Croatian Register of Shipping, 2021.
- [22] D. Ćorić: Posebni metalni materijali - III. Dio, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2019.
- [23] J. Selanec: Karakterizacija materijala kućišta vrućih plinova, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2008.
- [24] S. Golubić: Tehnički materijali I. Dio metalni materijali, Bjelovar, 2019.
- [25] N. Radović, V. Grabulov, M. Smiljanić, M. Antić: Čelici legirani niklom za rad na niskim temperaturama, Zavarivanja i zavarene konstrukcije 1, 2003.
- [26] M. Rešetar: Spremnik za UNP, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [27] T. Filetin: Materijali za niske temperature, EGE : energetika, gospodarstvo, ekologija, etika, 14 (1996), 95-96.
- [28] I. Juraga, V. Alar, V. Šimunović, I. Stojanović: Korozija i metode zaštite od korozije, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- [29] I. Juraga, V. Šimunović, I. Stojanović, V. Alar: Mehanizmi zaštite od korozije, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2012.
- [30] D. Dražić, S. Stojan, Z. Kulenović: Corrosion Protection in Shippbuilding, 14th International Conference on Transport Science, ICTS 2011, Portorož, Slovenija, 2011.
- [31] [Clad plates | Industeel \(arcelormittal.com\)](http://arcelormittal.com) (dostupno 5.2.2021.)
- [32] P. Ćulić: Optimiranje parametara pri zavarivanju materijala eksplozivom, Diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2018.
- [33] T. Pavlović: Pogreške u zavarenom spoju i metode ispitivanja, Završni rad, Veleučilište u Karlovcu, Karlovac, 2019.
- [34] S. Imai: Recent progress and future trends for shipbuilding steel, Welding International 22, 11, 2008, 755–761