

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Машинске конструкције и механизација

Предмет: Машински материјали

Број индекса: 210/2016

Матеја В. Марковић

Нерђајући челици

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Драган Адамовић -ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да да преглед развоја и употребе нерђајућих челика. На почетку дати историјски развој нерђајућих челика. У даљем делу рада описати њихову класификацију и својства, хемијски састав и микроструктурну грађу као и методе добијања. Затим описати различите врсте нерђајућих челика и њихову обрадивост. На крају дати примере примене нерђајућих челика.

Препоручена литература:

- [1]. Outokumpu: Handbook of Stainless Steel, Avesta, Sweden, 2013.
- [2]. Vera Rede: Nehrdjajući čelici, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [3]. Béla Leffler: Stainless steels and their properties, 2013.
- [4]. Atlas steels: The Atlas Steels Technical Handbook of Stainless steels, 2013.
- [5]. Marco Boniardi и Andrea Casaroli: Stainless steels, 2014.
- [6]. Милорад Јовановић, Драган Адамовић, Нада Ратковић, Вукић Лазић: Машински материјали, Крагујевац 2003.

Оквирни садржај рада:

- 1. УВОД
- 2. ПОДЕЛА, ОЗНАЧАВАЊЕ И ПРОИЗВОДЊА НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА
- 2. ХЕМИЈСКИ САСТАВ И МИКРОСТРУКТУРА НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА
- 3. ВРСТЕ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА
- 4. ОБРАДИВОСТ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА
- 5. ОСОБИНЕ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА
- 6. УПОТРЕБА НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА
- 7. ЗАКЉУЧАК
- ЛИТЕРАТУРА

Крагујевац,
29.06.2019. године

Ментор:

РЕЗИМЕ

У оквиру овог завршног рада, дата је историја нерђајућих челика и њихов развитак и описана је њихова производња. Објашњено је како њихов хемијски састав утиче на њихову структуру и како се они у зависности од микроструктуре деле. Описане су основне карактеристике већих група челика и поступци њихове обраде. На крају су дате примене већих група нерђајућих челика.

Кључне речи: нерђајућичелици, аустенит, мартензит, ферит, дуплекс, преципитационо ојачање, термичка обрада, отпорност на корозију, микроструктура, легирајући елементи, хром, никл, гвожђе, угљеник, производња, прерада, производи, полупроизводи

SUMMARY

This thesis shows history, development and production of stainless steel. It has been described how chemical composition affects stainless steel microstructure and how they are divided into groups based on their microstructural composition. The main characteristics of larger groups of stainless steel has been described as well as their treatments. At the very end it was described how different types of steel can be applied in different industries and sectors.

Key words: stainless steel, austenite, martensite, ferrite, duplex, precipitation hardening, thermal treatment, corrosion resistance, microstructure, alloy elements, chromium, nickel, iron, production, processing, products, semi-finished products.

Садржај

1. УВОД	- 2 -
1.1. Дефиниција нерђајућих челика	- 2 -
1.2. Историјски развој	- 3 -
2. ПОДЕЛА, ОЗНАЧАВАЊЕ И ПРОИЗВОДЊА НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА	- 5 -
2.1. Подела нерђајућих челика	- 5 -
2.2. Означавање нерђајућих челика	- 6 -
2.3. Производња и прерада нерђајућих челика	- 8 -
2.3.1. Добијање нерђајућих челика	- 8 -
2.3.2. Полупроизводи од нерђајућег челика	- 10 -
3. ХЕМИЈСКИ САСТАВ И МИКРОСТРУКТУРА НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА	- 13 -
3.1. Легирајући елементи у нерђајућим челицима	- 13 -
3.2. Формирање микроструктуре нерђајућих челика	- 18 -
3.2.1. Формирање микроструктуре феритних нерђајућих челика	- 18 -
3.2.2. Формирање микроструктуре мартензитних нерђајућих челика	- 19 -
3.2.3. Формирање микроструктуре аустенитних челика	- 19 -
3.2.4. Формирање микроструктуре дуплекс челика	- 20 -
3.2.5. Формирање микроструктуре преципитационо ојачаних нерђајућих челика	- 20 -
4. ВРСТЕ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА	- 22 -
4.1. Феритни нерђајући челици	- 22 -
4.2. Мартензитни нерђајући челици	- 23 -
4.3. Аустенитни нерђајући челици	- 24 -
4.4. Дуплекс нерђајући челици	- 26 -
4.5. Преципитационо ојачани челици	- 27 -
5. ОБРАДИВОСТ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА	- 29 -
5.1. Заваривање нерђајућих челика	- 29 -
5.1.1. Заварљивост феритних нерђајућих челика	- 29 -
5.1.2. Заварљивост мартензитних нерђајућих челика	- 29 -
5.1.3. Заварљивост аустенитних нерђајућих челика	- 29 -
5.1.4. Заварљивост дуплекс нерђајућих челика	- 29 -
5.1.5. Заварљивост преципитационо ојачаних нерђајућих челика	- 30 -
5.2. Обрада деформисањем и механичка обрада	- 30 -
5.3. Термичка обрада нерђајућих челика	- 31 -
5.3.1. Термичка обрада феритних нерђајућих челика	- 31 -
5.3.2. Термичка обрада мартензитних нерђајућих челика	- 31 -
5.3.3. Термичка обрада аустенитних нерђајућих челика	- 32 -

5.3.4.	<i>Термичка обрада дуплекс нерђајућих челика</i>	32 -
5.3.5.	<i>Термичка обрада преципитационо ојачаних нерђајућих челика</i>	32 -
6.	ОСОБИНЕ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА	33 -
6.1.	Отпорност на корозију нерђајућих челика	33 -
6.1.1.	<i>Отпорност на корозију феритних нерђајућих челика</i>	35 -
6.1.2.	<i>Отпорност на корозију аустенитних нерђајућих челика</i>	36 -
6.1.3.	<i>Отпорност на корозију дуплекс нерђајућих челика</i>	36 -
6.1.4.	<i>Отпорност на корозију преципитационо ојачаних нерђајућих челика</i>	36 -
6.2.	Механичке карактеристике нерђајућих челика	36 -
6.2.1.	<i>Механичке карактеристике мартензитних нерђајућих челика</i>	37 -
6.2.2.	<i>Механичке карактеристике феритних нерђајућих челика</i>	38 -
6.2.3.	<i>Механичке карактеристике аустенитних нерђајућих челика</i>	39 -
6.2.4.	<i>Механичке карактеристике дуплекс нерђајућих челика</i>	40 -
6.2.5.	<i>Механичке карактеристике преципитационо ојачаних нерђајућих челика</i>	40 -
6.3.	Микроструктура нерђајућих челика	40 -
6.3.1.	<i>Микроструктура феритних нерђајућих челика</i>	40 -
6.3.2.	<i>Микроструктура мартензитних нерђајућих челика</i>	41 -
6.3.3.	<i>Микроструктура аустенитних нерђајућих челика</i>	41 -
6.3.4.	<i>Микроструктура дуплекс нерђајућих челика</i>	42 -
6.3.5.	<i>Микроструктура преципитационо ојачаних нерђајућих челика</i>	43 -
7.	УПОТРЕБА НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА	44 -
7.1.	Употреба феритних нерђајућих челика	44 -
7.2.	Употреба мартензитних нерђајућих челика	44 -
7.3.	Употреба аустенитних нерђајућих челика	45 -
7.4.	Употреба дуплекс нерђајућих челика	46 -
7.5.	Употреба преципитационо ојачаних нерђајућих челика	46 -
8.	ЗАКЉУЧАК	47 -
	ЛИТЕРАТУРА	48 -

1. УВОД

Гвожђе и његова најпознатија легура, челик, су по отпорности на корозију релативно лоши материјали са обзиром да кородирају на ваздуху и лоше се понашају у киселим условима. Ипак, постоје легуре гвожђа са хромом и никлом познатије као нерђајући челици, који не кородирају у морској води и отпорне су на концентроване киселине. То су челици који имају комбинацију добрих механичких својстава и карактеристика погодних за производњу која их чини јако повољним и занимљивим за пуно различитих индустрија и сфера производње. Употреба нерђајућих челика је релативно мала у односу на угљеничне челике. Да би се њихове карактеристике у правом смислу искористиле потребно је имати одговарајуће знање о томе шта они могу да понуде.

1.1. Дефиниција нерђајућих челика

Нерђајући челици су легуре гвожђа и угљеника са великим процентуалним уделом хрома. Често се поред хрома могу додавати и други хемијски елементи као што су никл и молибден. Главна карактеристика ових челика су отпорност на различите видове корозије како у нормалним тако и у агресивнијим условима као што су:

- обична вода,
- морска вода,
- загађена вода,
- киселе средине,
- базне средине,
- индустријска окружења и слично.

Типична примена нерђајућих челика је у:

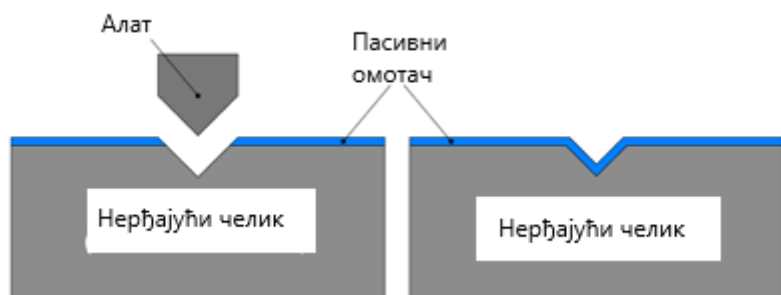
- хемијској индустрији,
- нафтној индустрији,
- прехранбеној индустрији,
- медицинском и фармацеутском сектору,
- транспортном сектору,
- кућним апаратима и
- конструкцији и модерном дизајну.

По европском стандарду EN 10088, челик се карактерише као нерђајући уколико процентуално садржи изнад 10,5% хрома, али се у већини случајева на тржишту проценат хрома креће од 13% до 18% из разлога што је у пракси потребно да легура има најмање 12% хрома да би имала потребну отпорност на корозију. Присуство хрома у легури омогућава стварање веома танког слоја (пасивног омотача) на површини која се већински састоји од оксида и хидроксида хрома Cr_2O_3 и $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Слој је нерастворљив, компактан и штити метал на коме се формира. Пасивни омотач не садржи само оксиде и хидроксиде хрома. Испитивањима је утврђено и присуство гвожђа и молибдена (такође у облику оксида и хидроксида) као и никла који се акумулира у међупростору између супстрата и пасивног омотача. Омотач је веома танак, пар нанометара, и провидан је што челику даје сиву сјајну боју која се може приметити међу кухињским посуђем (тигањи, разне врсте ножева). Све ове особине су последица брзе реакције хрома у челику са кисеоником у атмосфери. Оксидација нерђајућих челика тече природно и спонтано. Пасивни омотач има још једну добру особину, у случају оштећења челика или механичке промене, спонтано се формира поново на површини аутоматски спречавајући било какву могућност корозије. На слици бр. 1.1 приказано је формирање пасивног омотача.



Слика 1.1 Формирање пасивног омотача нерђајућег челика са атмосфером.

На слици 1.2 приказано је формирање пасивног омотача после механичког оштећења.



Слика 1.2 Формирање омотача после механичког оштећења.

Узимајући у обзир да су оксиди хрома који се формирају на површини челика веома стабилни на вишим температурама, ови челици су врло отпорни на корозију и када су изложени топлоти. Може се закључити да већа концентрација хрома у легури условљава бољи отпор нерђајућег челика на корозију. Ово важи како у влажним условима тако и под утицајем топлоте.

1.2. Историјски развој

Почетком прошлог века, око 1910. године, потребе за новим материјалима су расле и проблеми су се решавали на више места широм света што је довело до открића и развића нерђајућег челика. У граду Шефилду у Енглеској, Х. Брејрли (Harry Brearly) је развијао нови материјал за бурад у којима су се чувала тешка оружја која је требало да буду отпорна на одговарајуће услове. Између осталих легирајућих елемената истражен је и хром и примећено је да материјали који имају висок садржај хрома не кородирају тако лако. Ово откриће је довело до патента за челик са 9-16% хрома и мање од 0,7% угљеника. То је био први нерђајући челик. Прва употреба овог челика била је везана за кухињски прибор где се угљенични челик заменио нерђајућим. У истом периоду, Б. Штраус из Есена у Немачкој је радио на одговарајућем материјалу за заштиту цеви термпарова и пирометара. Међу истраживаним легурама гвожђа била је и легура гвожђе-хром-никл са високим садржајем хрома. Утврђено је да легуре које садрже преко 20% хрома не кородирају чак ни после дужег времена проведених у лабораторији. Ово откриће је довело до развитка челика са 0,25% угљеника, 20% хрома и 7% никла. Ово је био први нерђајући челик.

Паралелно са радовима у Енглеској и Немачкој, Ф.М. Бекет је радио у Америци на открићу јефтиног материјала отпорног на ширење и скупљање за пећи које раде при температурама од 1200°C. Открио је да је потребно најмање 20% хрома да се постигне отпорност на оксидацију и ширење. Ово је означило почетак открића челика отпорних на корозију при високим температурама. Крајем другог светског рата, производња и употреба нерђајућих челика значајно расте.



Слика 1.3. Хари Брејрли, проналазач нерђајућег челика.

2. ПОДЕЛА, ОЗНАЧАВАЊЕ И ПРОИЗВОДЊА НЕРЋАЈУЋИХ ЧЕЛИКА

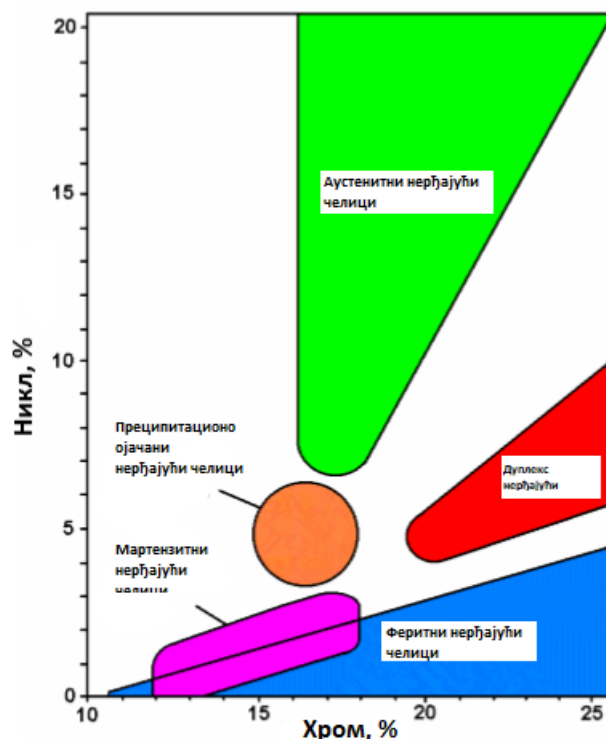
2.1. Подела нерђајућих челика

За разлику од других техничких материјала, који се углавном деле по хемијском саставу, нерђајући челици се најчешће деле у зависности од њихове микроструктуре. Микроструктура нерђајућих челика може бити феритна, мартензитна и аустенитна одакле следи да се нерђајући челици деле на феритне, мартензитне и аустенитне. Постоји и група нерђајућих челика која има такозвану дуплекс структуру која је састављена од приближно 50% аустенитне фазе и 50% феритне фазе. То су дуплекс нерђајући челици који поседују боља својства од аустенитних и феритних челика.

Поред ових челика, постоје још и преципитационо ојачани нерђајући челици који су добили име по механизму ојачавања којим се повећава њихова тврдоћа и чврстоћа. Преципитационо ојачани челици се деле према типу микроструктуре у којој су преципитати растворени на мартензитне, семи-аустенитне или аустенитне. Према хемијском саставу, извршена је подела на следеће врсте нерђајућих челика:

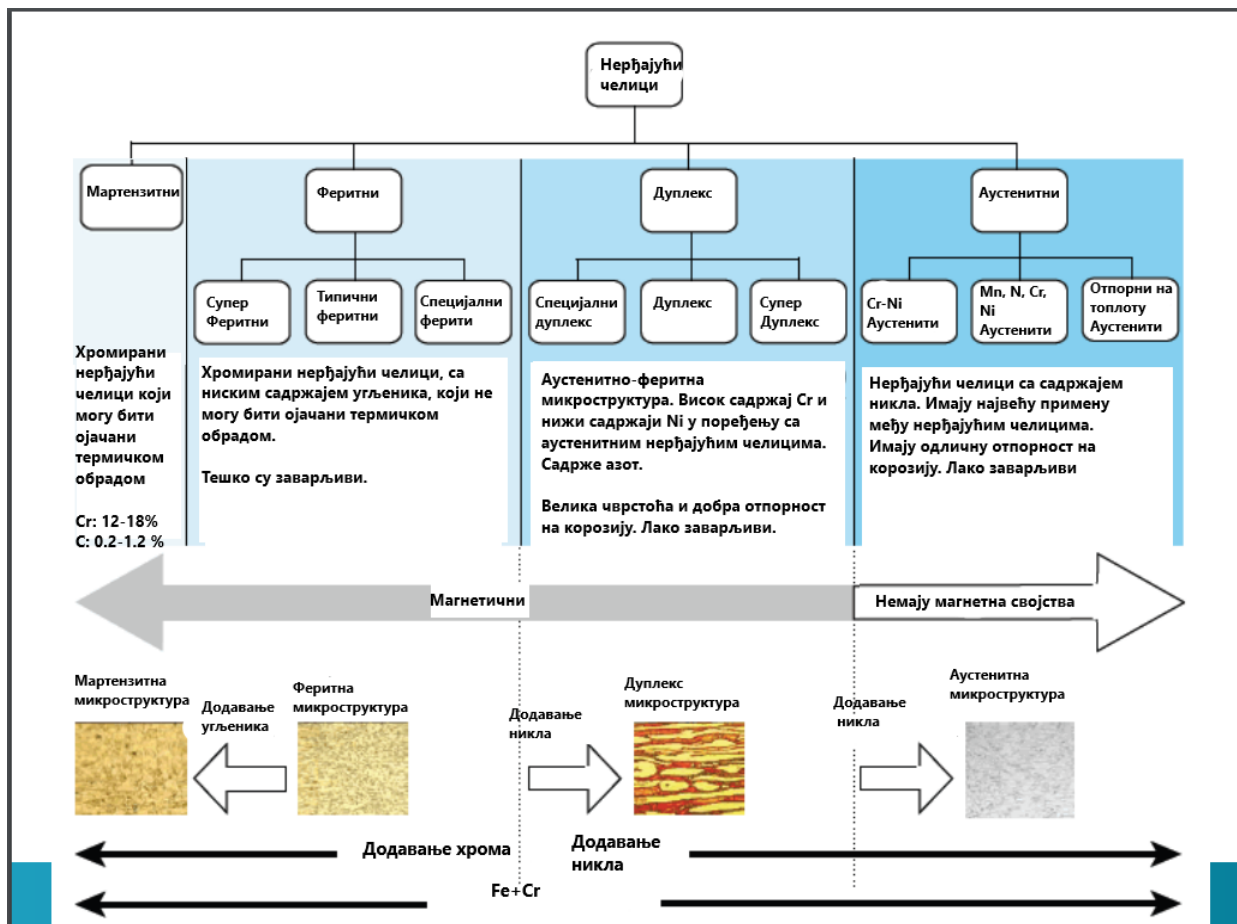
- Cr-челици
- Cr-Ni-челици
- Cr-Ni-Mo-челици
- Cr-Mn-челици.

Однос различитих група челика у зависности од садржаја хрома и никла приказан је на слици 2.1.



Слика 2.1 Групе нерђајућих челика

На слици 2.2 приказано је како хемијски састав утиче на особине нерђајућих челика и које су основне карактеристика главних типова нерђајућих челика.



Слика 2.2 Подела нерђајућих челика и њихове главне особине.

2.2. Означавање нерђајућих челика

Ради лакшег сортирања и распознавања челика како и што лакшег споразумевања између произвођача и купца нерђајући челици такође имају своје место у различитим стандардима. У табели 2.1 дате су упоредне ознаке челика у неким различитим стандардима. Различити стандарди имају различите ознаке за исте челике и различите начине формирања истих. Амерички систем означавања (AISI) формира ознаке на следећи начин:

- 100 серије- Општи аустенитни челици,
- 200 серије- Аустенитни челици (Cr-Ni-Mn),
- 300 серије- Аустенитни челици (Cr-Ni),
- 400 серија- Феритни и Мартензитни (Cr) Челици,
- 500 серије -Челици легирани хромом отпорни на топлоту и
- 900 серије- Аустенитни челици (Cr-Mo).

Означавање по европском стандарду се може објаснити следећем примеру:

Нерђајући челик **304L** има и ознаку **1.4307** где:

1. – Означава челик,

43-Означава групу припадности нерђајућих челика,

07- Индивидуална идентификациона ознака челика.

Име челика говори о саставу челика, челик **1.4307** има име **X2CrNi18-9** где:

X-Означава високолегирани челик,

2-Садржај угљеника у процентима (100 * %),

CrNi-Хемијски симболи главних легирајућих елемената и

18-9- Процентуални садржај главних легирајућих елемената.

Табела 2.1 Упоредне ознаке нерђајућих челика.

W.Nr	DIN/ EN 10088-2	AISI	UNS	SS	JUS (SRPS)
Феритни нерђајући челици					
1.4000	X6 Cr 13	403/410	S 41008	2301	Č4170
1.4005	X12 CrS 13	403/410	S 41600	2380	Č4170
1.4006	6 X12 Cr 13	416	S 41000	2302	Č4174
1.4016	X6 Cr 17	410	S 43000	2320	Č4172
1.4021	X20 Cr 13	430	S 42000	2303	Č4171
1.4024	X15 Cr 13	420	(S 41000)		Č4173
1.4028	X30 Cr 13	(410)	S 42020	2304	Č4175
1.4034	X46 Cr 13	420 F	(S 42000)	(2304)	Č4570
Аустенитни нерђајући челици					
1.4301	X5 CrNi 18-10	304	S 30400	2332	Č4580
1.4305	X8 CrNiS 18-9	303	S 30300	2346	Č4590
1.4306	X2 CrNi 19-11	304 L	S 30403	2352	Č45701
1.4307	X2 CrNi 18-9	304 L		2352	Č4580
1.4310	X10 CrNi 18-8	301	S 30100	2331	Č4571
1.4313	X3 CrNiMo 13-4	CA6-NM		2384	Č4573
1.4401	X5 CrNiMo 17-12-2	316	S 31600	2347	Č4574
1.4404	X2 CrNiMo 17-12-2	316 L	S 31603	2348	
1.4418	X4 CrNiMo 16-5-1			2387	
Мартензити, Дуплекс, Преципитационо ојачани					
1.4713	X10 CrAlSi 7				
1.4724	X10 CrAlSi 13				
1.4742	X10 CrAlSi 18				
1.4749	X18 CrN 28	446-1			
1.4762	X10 CrAlSi 25	(446)			
1.4821	X15 CrNiSi 25-4				
1.4828	X15 CrNiSi 20-12	309	(S 30900)		Č4577
1.4841	X15 CrNiSi 25-21	310/314	S 31400		Č4578
1.4876	X10 NiCrAlTi 32-21	B 163			

DIN = Означавање по Немачком Стандарду

AISI = Означавање по Америчком Стандарду

UNS = Означавање по унифицираном стандарду

SS = Означавање по Шведском стандарду

Сваки нерђајући челик има своје име и одговарајући јединствену ознаку. Треба узети у обзир да немачки *DIN Werkstoff* користи сличне ознаке али нису све исте. Најчешће употребљивани нерђајући челици су 1.4301 (304), који је аустенитни хром-никл челик. Нерђајући челик 1.4401 (316) се такође широко примењује (осим хрома и никла садржи и молибден који повећава отпорност на рупичасту корозију. Нискоугљеничне варијанте ових челика су 1.4307 (304L) и 1.4404 (316L). Челици са ниским садржајем угљеника садрже ознаку “L” и употребљавају се најчешће у случају када се заварују или ако долази до излагања високој температури. Челици са ознаком “Н” су варијанте са већим

процентуалним садржајем хрома. Већи садржај хрома повећава чврстоћу челика, посебно при високим температурама. Најчешће се од њих производе цеви и лимови али могу се користити и у другим продуктима. Челици 304Н и 316Н се највише употребљавају али се поред њих користе и високоугљеничне варијанте челика 309, 310, 321 и 347. Табела 2.1 приказује различите ознаке челика у различитим стандардима и њихову корелацију.

2.3. Производња и прерада нерђајућих челика

Према подацима Светске асоцијације за челик (World Steel Association) у 2011. години укупно је произведено око 1 500 милиона тона челика. Удео нерђајућих челика у укупној производњи челика износио је око 2,5% (32,1 милиона тона). Челици отпорни на корозију производе се и комерцијално су доступни у готово неограниченом броју облика, стања, величина. Нека ограничења постоје код феритних и дуплекс челика због нешто тежих могућности обликовања, али уопштено важи да се било који облик може произвести различитим поступцима ливења, топлог или хладног обликовања. Прекретницу у производњи нерђајућих челика представља увођење нових техника декарбонизације растопљеног метала 70-их година 20. века. Њиховом применом производња челика са масеним уделом угљеника мањим од 0,04% постала је рутина. Осим што смањују садржај угљеника, ови поступци значајно смањују и удео сумпора на мање од 0,001%. Након ливења, било у калупе било у облику континуираног лива, следе поступци топлог обликовања (ваљање, пресовање) а по потреби и поступци хладног обликовања у жељени облик.

2.3.1. Добијање нерђајућих челика

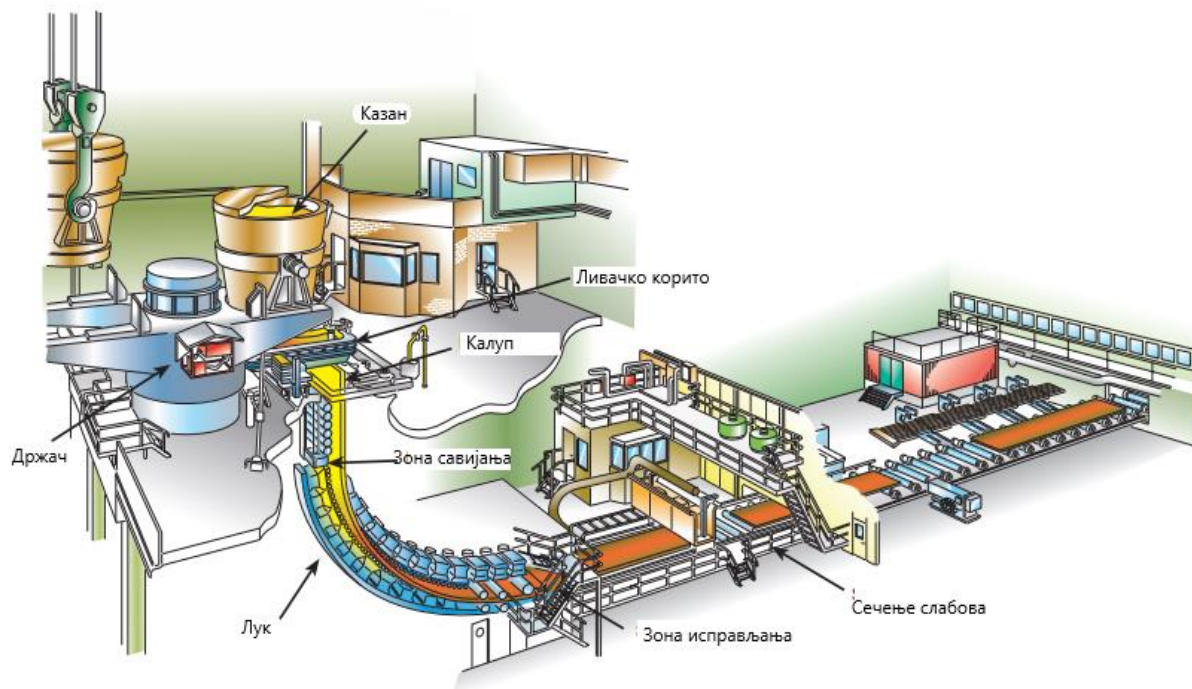
Полазна сировина за добијање нерђајућих челика је легура гвожђа и хрома (FeCr) који садржи приближно 52% хрома, 4% силицијума и око 7% угљеника. Највећи део ферохрома је у течном стању и као такав прерађује се у конвертер који за циљ има смањивање садржаја хрома, угљеника и силицијума. Обрада рециклираног нерђајућег челика и легура у топионици је први корак у производњи нерђајућих челика. Постоје четири главна корака:

1. Топљење сировина у електролучној пећи,
2. Уклањање угљеника, сумпора и азота,
3. Дотеривање састава нерђајућег челика,
4. Ливење у слабове или инготе.

Током процеса топљења, челик достигне температуру до 1800 °C и након тога пролази кроз процес аргонског-кисеоничног-разугљенисавања (AOD, Argon-Oxygen-Decarburization). Главни задатак AOD конвертера је да смањи садржај угљеника што се постиже довођењем кисеоника и аргона али поред тога током овог процеса доводе се и остали легирајући елементи. Након овог третмана отопљени челик се сипа у казане. У случају када се користи течни ферохром, старо гвожђе са ниским садржајем легирајућих елемената се топи у електролучној пећи а затим се никл, молибден и течни ферохром додају у AOD конвертер (слика 2.3). Након овога, казан са отопљеним челиком се транспортује на машину за континуирано ливење челика или у посебним случајевима на машину за ливење ингота. Континуирано ливење је поступак у коме се отопљени челик лије у калупе. Казан са отопљеним челиком се поставља на држач одакле истиче кроз млазницу у ливачко корито одакле се кроз отвор на кориту излива у бакарни калуп хлађен водом. Челик се даље константно хлади на путу до места резања. На месту резања челик је довољно чврст да се може исећи на комаде који су такве величине да су погодни за руковање (блумови, билети, слабови). Поступак континуираног ливења је приказан на слици 2.4.

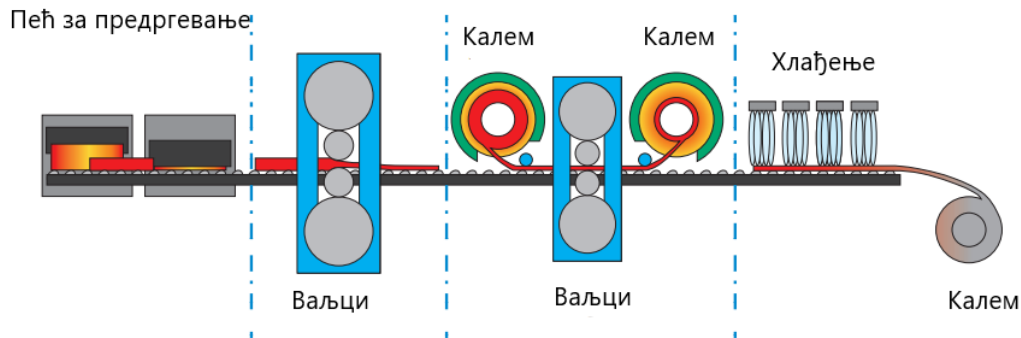


Слика 2.3 AOD конвертер.



Слика 2.4 Шематска илустрација континуираног ливења.

Топло ваљање је поступак који се одвија на температури изнад рекристализационе температуре материјала. Почетна сировина су углавном полупроизводи као што су слабови, блумови или билети. Топло ваљање се обавља између низа ваљака распоређених на дугачкој стази. Размак између групе ваљака смањује се у правцу ваљања тако да лим постаје све тањи и тањи на свом путу дуж ваљаоничке линије. При напуштању задње групе ваљака, лим се намотава на калем. Већином се лимови после топлог ваљања декапирају ради отклањања оксидисаног слоја и потом хладно ваљају. Тако се производе тањи лимови (испод 1mm) глаткијих и чистијих површина, погодних за дупоко извлачење и наношење заштитних превлака. Поступак топлог ваљања приказан је на слици 2.5.



Слика 2.5 Шематски приказ топлог ваљања.

За хладно ваљање трака узима се као полазни материјал топло ваљана трака, која се за то посебно припрема. Циљ припреме је да се одстране тврде оксидне покорице створене на површини лима или траке при топлем ваљању. Траке намотане у котуре одмотавају се и најпре провлаче кроз каду са раствором сумпорне киселине, а затим кроз суд са водом у којем се спира преостала киселина. Трака се затим провлачи кроз топле ваљке, суши се, премазује уљем и поново увија у ролну. Ова операције се назива декапирање. Овако припремљена трака иде у ваљаонички стан за хладно ваљање. Крајња дебљина лима се углавном добија вишеструким провлачењем између ваљака са све мањим и мањим размацама. При томе лим постаје све тврђи па се после неког броја ваљања лим мора жарити на високој температури па тек онда вратити на ваљаонички стан. Исто тако се и после завршног ваљања трака жари а затим намотава у ролну. Жарење се изводи у посебним пећима са заштитном атмосфером азота. Хладним ваљањем се поправља унутрашња грађа челика, а тиме и његове технолошке особине које су битне за прераду лима дубоким извлачењем. Сем тога, ваљањем на хладно добија се чистија и глаткија површина него при топлем ваљању.

2.3.2. Полупроизводи од нерђајућег челика

Инготи, билети, блумови и слабови спадају у категорију полупроизвода од нерђајућег челика. Они се могу производити директно континуираним ливењем или ливењем течног челика у инготе који се после топло ваљају у полупроизводе

Инготи су ливени челични трупци квадратног, правоугаоног или кружног пресека масе од 100 kg до 40 t. Добијају се изливањем течног челика у металне калупе од ливеног гвожђа или челика.

Слабови су полупроизводи добијени ваљњем или ковањем ингота или сечењем на жељене димензије у процесу континуираног ливења (слика 2.6). Слабови имају правоугани попречни пресек и користе се као полазни материјал за добијање равних продуката (топло ваљаних котура и плоча).

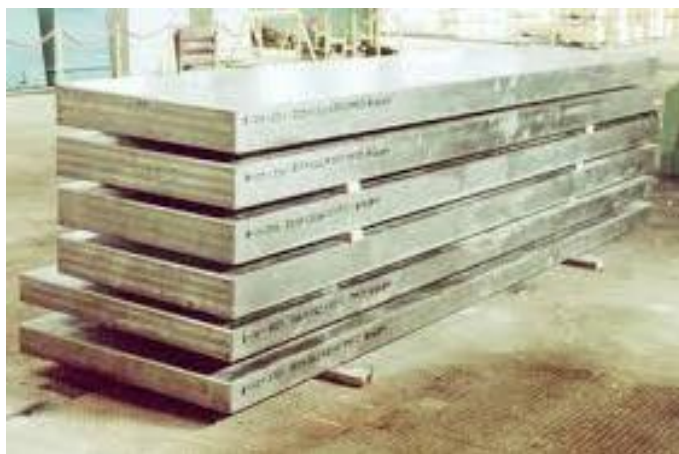
Блумови су полупроизводи са мањим попречним пресеком од слабова, најчешће правоугаони и углавном већи од 200x200 mm (слика 2.7)

Билети су полупроизводи са квадратним попречним пресеком до 200x200mm (слика 2.8). Билети, посебно ваљани билети се даље користе као полазни материјал за ковање.

Лимови и траке (слика 2.9) су најмасовнији производи челичана. Дебљина им се креће од 0,25-5 mm, а добијају се топлим и хладним ваљањем билета или слабова. Траке се разликују од лимова по мањој ширини која не прелази 250 mm.

Шипке (слика 2.10) су по обиму производње одмах иза лимова и трака. Израђују се топлим ваљањем са пресецима који могу бити округли, квадратни, овални и шестоугаони.

Железничке шине и профилни носачи ваљају се из блокова применом калибрисаних ваљака.



Слика 2.6 Слабови.

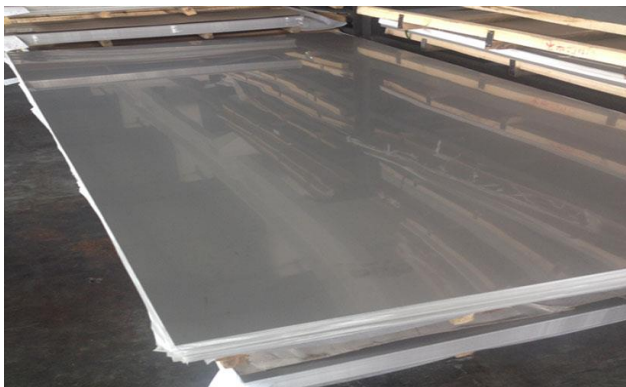


Слика 2.7 Блумови.



Слика 2.8 Билети.

Плоче су по облику равне као и лимови али су дебљине веће од 5 mm. Производе се топлим ваљањем слабова или ингота такозваним реверзибилним ваљањем где се инготи крећу напред-назад између само једног пара ваљака. У временском интервалу појединих ходова смањује се потпуно размак између ваљака све док се плоча не стањи на потребну дебљину. Тање плоче могу се производити и непрекидним ваљањем слично као лимови и траке. Плоче се углавном користе у бродоградњи, мостоградњи, за транспортна средства, разне врсте претоварних платформи и сл.



Слика 2.9 Лимови од нерђајућег челика



Слика 2.10 Шипке од нерђајућег челика

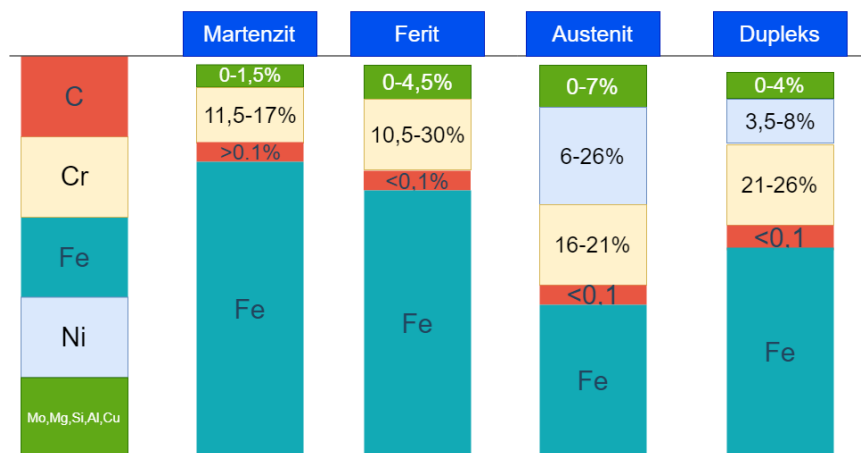
3. ХЕМИЈСКИ САСТАВ И МИКРОСТРУКТУРА НЕРЋАЈУЋИХ ЧЕЛИКА

3.1. Легирајући елементи у нерђајућим челицима

Нерђајући челици, осим хрома и никла, садрже и многе друге додатке који преко микроструктуре утичу на побољшање механичких и хемијских својстава. Ови челици су Fe-C легуре са масеним уделом гвожђа између 50 и 80%. Остатак до 100% чине легирајући елементи и нечистоће. Најбитнији легирајући елемент је хром, а за аустенитне и дуплекс челике једнако је важан и никл. Сви нерђајући челици такође садрже манган и силицијум. Остали легирајући елементи који се по потреби додају су:

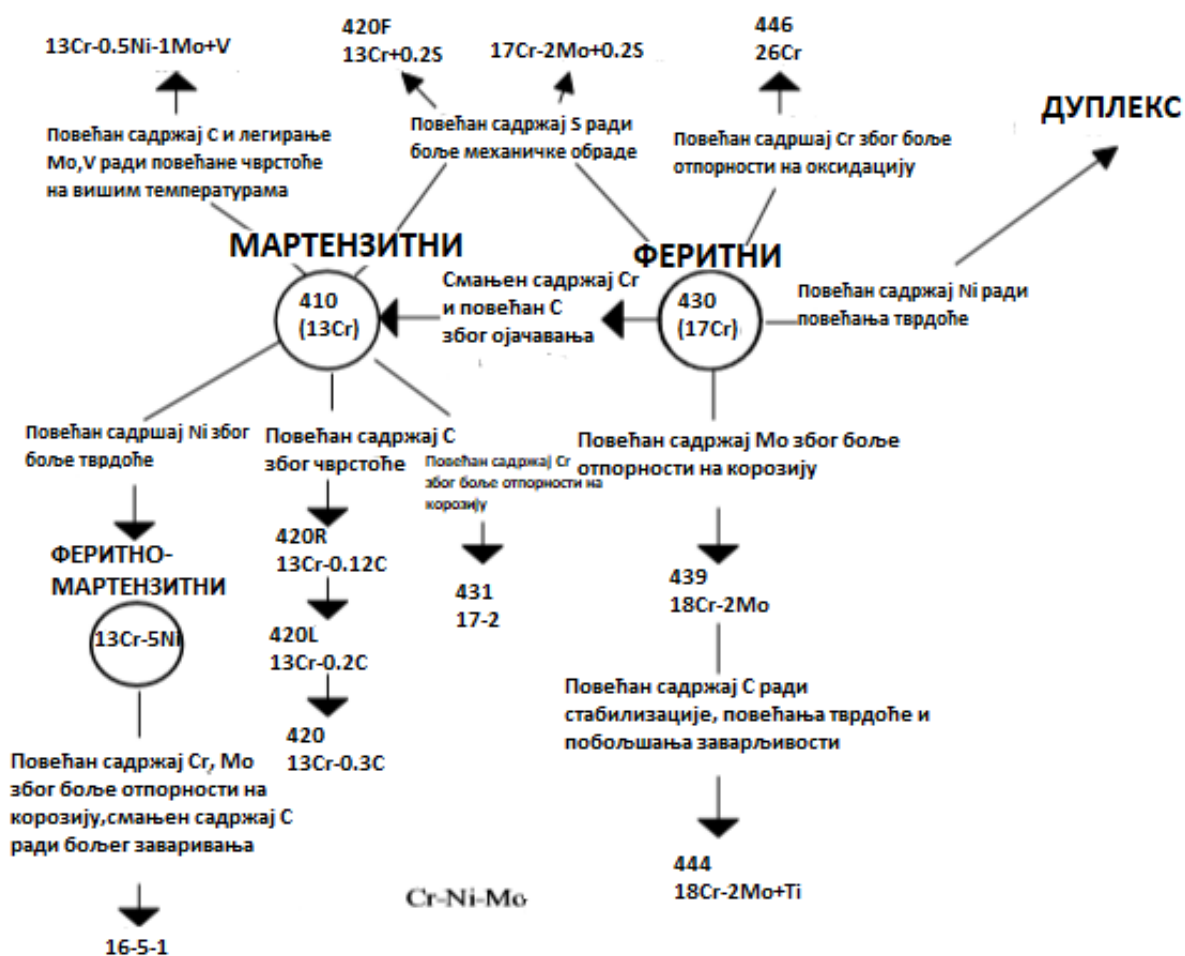
- молибден,
- ниобијум,
- титанијум,
- алуминијум,
- бакар,
- волфрам,
- азот и други.

Ови елементи побољшавају могућност обраде, корозијску постојаност или неко механичко својство у одређеним условима примене и утичу на микроструктурну равнотежу. Нечистоће које могу негативно утицати на својства челика су азот, кисеоник, сумпор и фосфор. На слици 3.1 приказан је хемијски састав и садржај легирајућих елемената у различитим врстама нерђајућих челика.

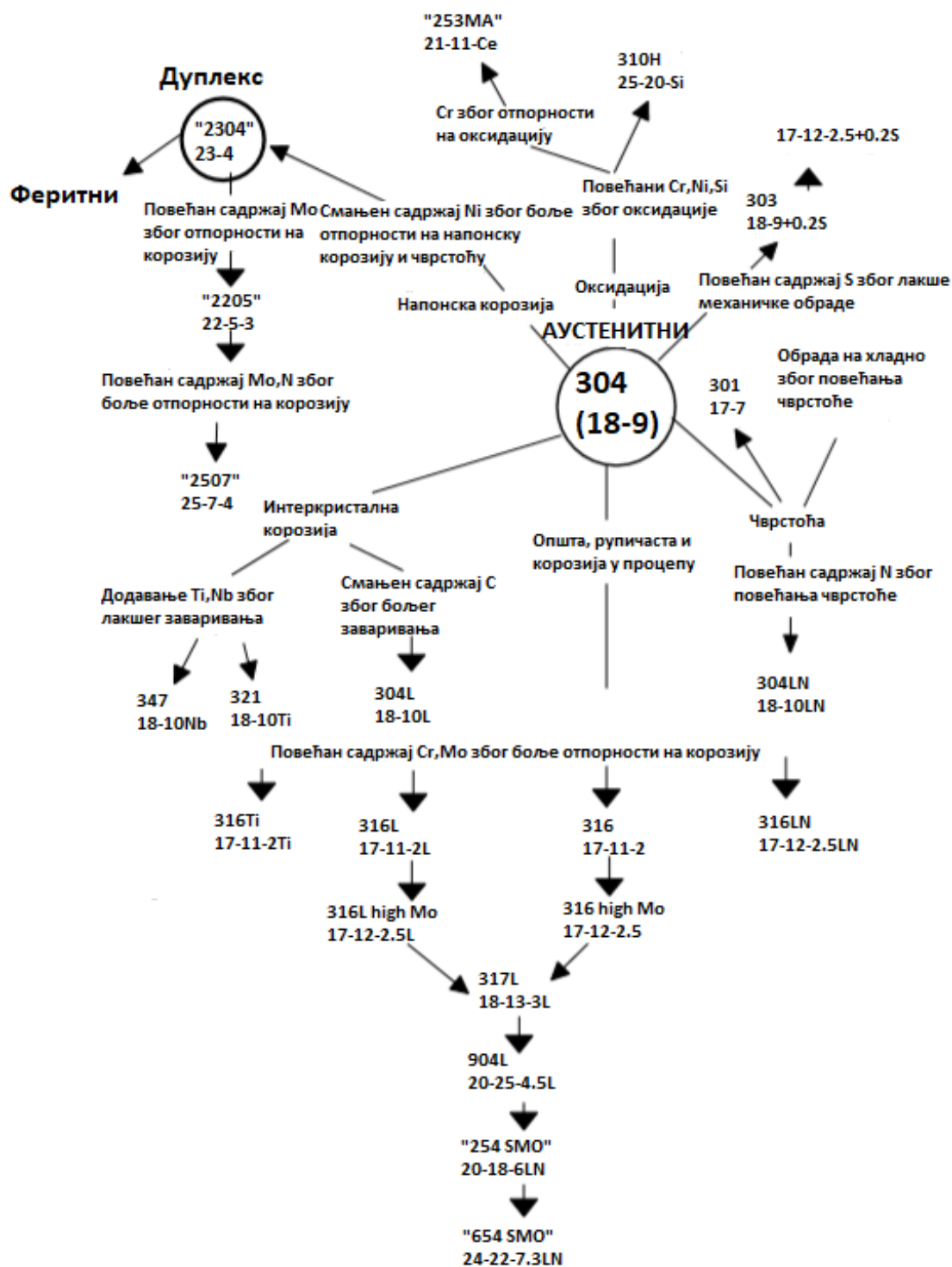


Слика 3.1 Хемијски састав нерђајућих челика.

Легирајући елементи се комбинују на различите начине и тако се добијају жељена својства нерђајућих челика. Додатком неких а одузимањем других постижу се одређена механичка својства, утиче се на микроструктуру и хемијска својства. Слика 3.2 приказује управо како комбинације легирајућих елемената доводе до различитих врста нерђајућих челика.



Слика 3.2 Композиција и повезивање утицаја легирајућих елемената на својства челика



Слика 3.2 Композиција и повезивање утицаја легирајућих елемената на својства челика (nastavak)

Алфагени и гамагени елементи

Масени удео легирајућих елемената у нерђајућим челицима креће се у широком распону од 12 до 50%. Легирајући елементи могу да обезбеђују настајање аустенитне, феритне или мартензитне фазе. Могу се поделити у две групе. Једни обезбеђују и стабилизују аустенит (гамагени елементи) а други ферит (алфагени елементи). Мартензитна микроструктура настаје трансформацијом аустенита наглим хлађењем са

одговарајуће температуре. Ако нема аустенита на високој температури нема ни мартензита на ниској температури. Тако проценат гамагених и алфагених легирајућих елемената утиче на стабилизацију мартензитне микроструктуре.

Алфагени легирајући елементи су:

- хром,
- молибден,
- сицилијум,
- ниобијум,
- алуминијум,
- ванадијум и
- волфрам.

Гамагени легирајући елементи су:

- никл,
- манган,
- угљеник,
- азот,
- бакар и
- кобалт.

Хром (Cr)

Хром је основни легирајући елемент у свим нерђајућим челицима. Хром има већи афинитет према кисеонику од гвожђа и на површини челика ствара заштитни слој који штити челик од корозије. Довољно је да масени удео хрома буде око 10,5% па да челик постане нерђајући при нормалним условима. За посебне услове садржај хрома треба бити већи. Хром је елемент који обезбеђује и стабилизује феритну микроструктуру. Fe-Cr легуре које садрже више од 12% хрома имају монофазну феритну структуру. Повећање удела хрома код Fe-Cr-C и Fe-Cr-Ni-C легура, обезбеђује стварање ферита и његово задржавање у мартензитним, аустенитним и дуплекс челицима. У феритним нерђајућим челицима хром је основни легирајући елемент који стабилизује феритну микроструктуру. Такође утиче на формирање карбида. Најчешће ствара карбида типа $Cr_{23}C_6$. Овај тип карбида може се у одређеним условима формирати у готово свим нерђајућим челицима. Још може стварати карбиде типа Cr_7C_3 . Са азотом може стварати нитриде Cr_2N који се могу формирати и у феритним и дуплекс челицима.

Никл (Ni)

Основна улога никла као легирајућег елемента је да обезбеђује и осигурава аустенитну микроструктуру у аустенитним и аустенитно-феритним нерђајућим челицима. Масени удео никла треба бити довољан да се осигура стабилна аустенитна структура на собној температури али и на температури нижој од собне. Никл не ствара карбиде и не обезбеђује стварање интерметалних фаза иако утиче на брзину њиховог настанка. Повећава отпорност на корозију феритних челика у условима који садрже сумпорну киселину али смањује отпорност на напонску корозију. Легирање никлом повећава чврстоћу челика.

Манган (Mn)

Готово сви челици садрже манган. Аустенитни нерђајући челици садрже од 1 до 2% Mn а мартензитни и феритни мање од 1%. Додавањем мангана спречава се стварање сулфида гвожђа који лоше утиче на својства. Манган, који има већи афинитет према сумпору од гвожђа, везује за себе сумпор стварајући манганов сулфид који не утиче негативно на својства челика. Манган је гамагени елемент и стабилизује аустенитну фазу,

посебно на нижим температурама, спречавајући трансформацију аустенита у мартензит. На високим температурама његово деловање зависи од садржаја других легирајућих елемената. Утицај мангана на механичка својства је занемарљив.

Силицијум (Si)

Силицијум је такође присутан у свим нерђајућим челицима. Додаје се у распону од 0,3 до 0,6%. Код челика за рад на високим температурама додаток силицијума од 1 до 3 % повећава отпорност на оксидацију при већим температурама. Нема потпуно јасан одређен утицај на стабилизацију ферита или аустенита. При већим садржајима код аустенитних челика обезбеђује настајање ферита. Утиче добро на ливење.

Молибден (Mo)

Молибден је чест легирајући елемент у многим врстама челика. Код феритних, аустенитних и дуплекс челика додаје се у проценту од 6% да повећа отпорност на рупичасту корозију и корозију у процепу. Код аустенитних челика молибден повећава чврстоћу на повишеној температури што може бити отежавајућа околност код термичке обраде. Неки мартензитни нерђајући челици садрже молибден због формирања карбида. Молибден обезбеђује и стабилизује феритну фазу што може представљати проблем код мартензитних челика где присутност ферита смањује жилавост и дуктилност. Осим хрома и молибдена низ других елемената у нерђајућим челицима може правити карбиде. То су ниобијум, титанијум, волфрам и ванадијум. Ниобијум и титан додају се аустенитним нерђајућим челицима због стабилизације угљеника и спречавања осетљивости. Оба елемента имају већи афинитет према угљенику од хрома и формирају карбиде МС типа. Тако неће настати карбиди хрома $M_{23}C_6$ који узрокују интеркристалну корозију.

Легирајући елементи у преципитатима

Алуминијум, титан, бакар и молибден додају се преципитационо ојачаним нерђајућим челицима. Контролисано термичком обрадом у микроструктури ових челика долази до излучивања преципитата којима се повећава чврстоћа и тврдоћа. Преципитационо ојачани мартензитни нерђајући челици садрже бакар, алуминијум и молибден и термичком обрадом могу повећати границу течења до 1375 МПа. Аустенитни преципитационо ојачани челици садрже алуминијум и титан који формирају Ni_3Ti и Ni_3Al преципитате. Алуминијум обезбеђује настајање феритне фазе а бакар у малој мери обезбеђује настајање аустенитне микроструктуре.

Азот (N) и Угљеник (C)

Угљеник је основни елемент свих Fe-C легура па тако и нерђајућих челика у којима је његов масени удео ограничен на највише 0,1 %. Изузетак су мартензитни челици где га мора бити више због повишене чврстоће и тврдоће мартензитних челика. Код већине челика угљеник се везује са другим елементима и ствара карбиде. Ако се повеже са хромом у карбиде типа $M_{23}C_6$ долази до пада корозијске отпорности. Да се то не би догодило у неким нерђајућим челицима смањен је удео угљеника испод 0,04%.

Азот је по правилу нечистоћа у свим челицима осим у дуплекс и неким аустенитним нерђајућим челицима где се контролисано додаје као легирајући елемент. Слично делује на чврстоћу као угљеник. Мали додаток азота може значајно повећати чврстоћу али што је још важније повећава отпорност на рупичасту корозију. Угљеник и азот обезбеђују аустенитну фазу и њихов удео се мора држати под контролом ако се тежи постизању одређене микроструктуре.

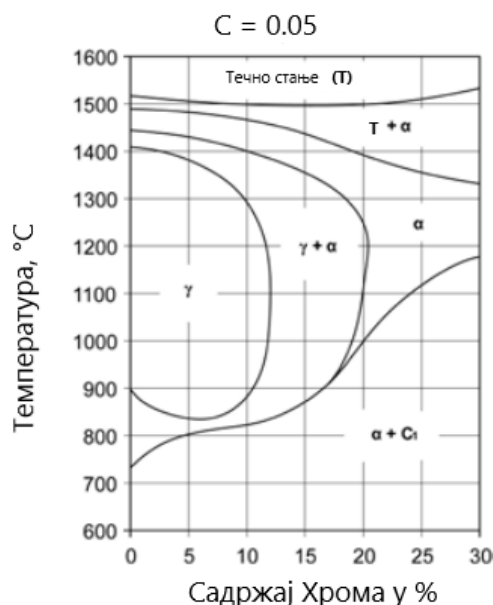
Остали елементи

Неки елементи се додају нерђајућим челицима због врло специфичних захтева. Тако се сумпор, селенијум и олово додају челицима за обраду на аутоматима да се повећа њихова обрадивост, повећа брзина резања и продужи век трајања алата. Нажалост додатком ових елемената пада корозијска постојаност и отежава се заваривање. Волфрам у дуплекс челицима повећава отпорност на рупичасту корозију. Алуминијум се додаје неким феритним челицима са ниским уделом хрома да им повећа отпорност на општу корозију. Кобалт, који обезбеђује настајање аустенита, додаје се мартензитним челицима да повећа температуру почетка трансформације аустенита у мартензит.

3.2. Формирање микроструктуре нерђајућих челика

3.2.1. Формирање микроструктуре феритних нерђајућих челика

Физикална металургија феритних нерђајућих челика се проучава интензивно од раних 40-тих година прошлог века. Циљ је да се што више разумеју механизми и појаве током очвршћавања и хлађења и њихов утицај на својства. Посматраћемо челик X6Cr17, који садржи хром од 15,5 до 18% и он припада породици са средњим садржајем хрома. Поред тога, постоје још две породице, једна коју карактерише садржај хрома од 11.5% до 14.5% (феритни челици са ниским садржајем хрома) и друга са садржајем хрома већим од 18% (суперферитни нерђајући челици). За све три групације важи да садрже и друге легирајуће елементе који за циљ имају стабилизацију феритне структуре, побољшање отпорности на оксидацију на већим температурама (алуминијум и сицилијум) и спречавање стварања штетних хромових карбида (титанијум и ниобијум). За боље разумевање структуре феритних челика као и феритних челика са ниским и високим садржајем хрома потребно је посматрати фазни дијаграм. У ову сврху, приказан је Fe-Cr дијаграм који узима у обзир присуство угљеника од приближно 0.05% (слика 3.3).

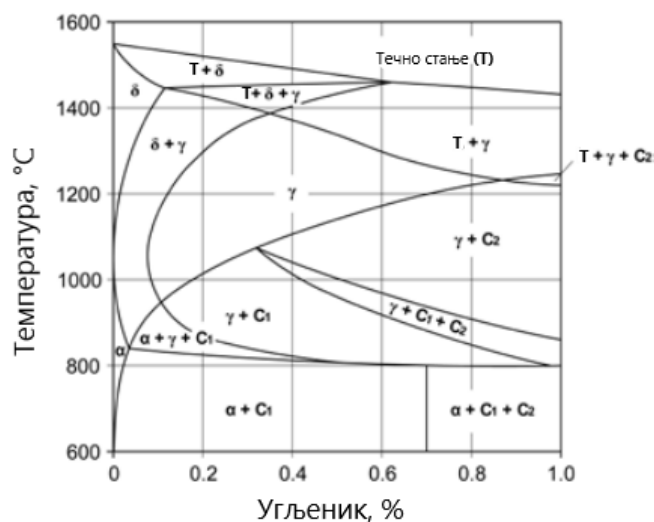


Слика 3.3 Fe-Cr бинарна секција Fe-Cr-C тројног дијаграма за челик са садржајем 0.05% угљеника.

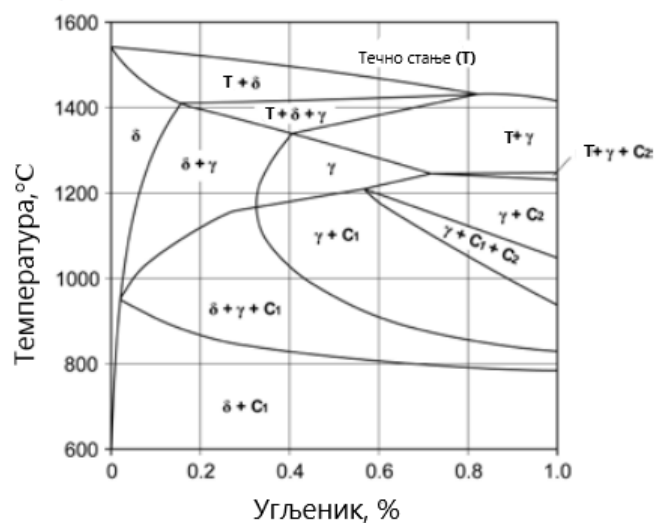
У случају феритних нерђајућих челика типа X6Cr17 првобитно очвршћавање примећује се у фази α праћено двофазном трансформацијом типа γ+α, након тога, од температура 900-950 °C до собне температуре челик се враћа у првобитну једнофазно стање α са феритном микроструктуром.

3.2.2. Формирање микроструктуре мартензитних нерђајућих челика

Фазни дијаграми који помажу боље разумевање металургије мартензитних нерђајућих челика су приказани на сликама 3.4 и 3.5. Могућност трансформације $\gamma \rightarrow \alpha$ је слична као и код класичног Fe-C дијаграма. На дијаграмима је приказано шта се дешава када је садржај угљеника око 0.3 % у случају челика X30Cr13(AISI 420B) односно када је садржај угљеника око 1% у случају челика X105CrMo17(AISI 440C).



Слика 3.4 Бинарна секција Fe-C тројног дијаграма Fe-Cr-C са Cr = 13%.



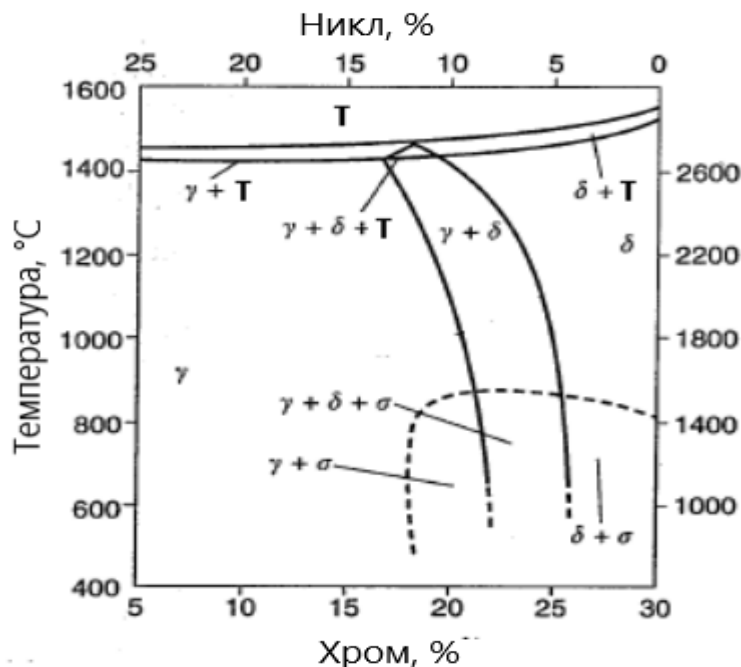
Слика 3.5 Бинарна секција Fe-C тројног дијаграма Fe-Cr-C са Cr = 17%.

Дакле када се челик загрева на температуре изнад критичних тачака, оригинална микроструктура се комплетно трансформише у аустенитну са карбидима, да би се хлађењем у течности или ваздуху трансформисала у мартензитну са карбидима.

3.2.3. Формирање микроструктуре аустенитних челика

Присуство гамагених елемената, као што су угљеник, азот, никл и манган, померају температуру аустенитне трансформације у мартензит на температуру која је нижа од собне. Ово објашњава немогућност термичке обраде, као што је каљење, која може да повећа механичке способности аустенитних нерђајућих челика. Формирање микроструктуре може се пратити у равнотежном псеудобинарном дијаграму Fe-Cr-Ni са 70% Fe (слика 3.6). У зависности од садржаја хрома и никла, у примарној кристализацији, формира се аустенитна или феритна микроструктура. Легуре које у саставу имају мање од

12% Ni и више од 18% γ примарно кристализују као 100% делта ферит. Легуре које имају више никла и мање хрома од горе наведених вредности, након примарне кристализације имају потпуно феритну микроструктуру. У троугластом подручју на 12% Ni, између ликвидус и солидус линије, присутни су аустенит, ферит и течно стање T(растоп), а непосредно након очвршћавања микроструктура је бифазна и састоји се од делта ферита и аустенита.



Слика 3.6 Псеудобинарни дијаграм састава Fe-Cr-Ni за 70 % Fe.

Даљим хлађењем до собне температуре, легурама које примарно кристализују у аустенит, микроструктура се не мења и остаје потпуно аустенитна. Легурама које након примарне кристализације имају потпуно феритну микроструктуру, равнотежним хлађењем до собне температуре, микроструктура прелази у потпуно аустенитну фазу или аустенитну са одређеном количином ферита. Садржај делта ферита зависи од удела алфагених и гамагених легирајућих елемената и брзине хлађења.

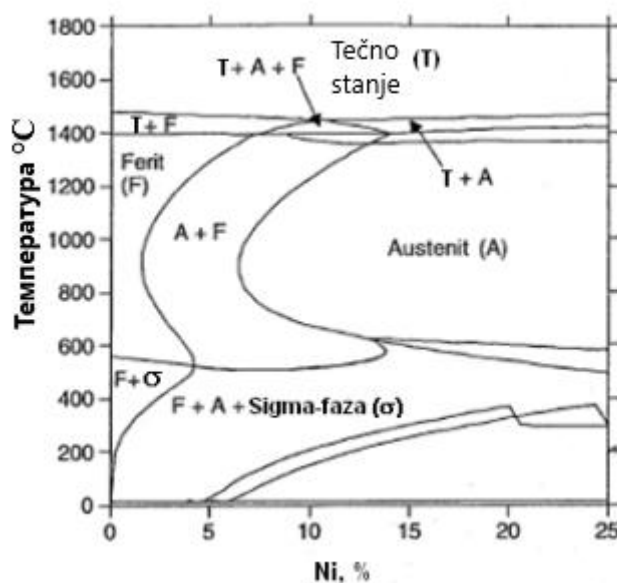
3.2.4. Формирање микроструктуре дуплекс челика

Дуплекс нерђајући челици су сложене Fe-Cr-Ni-N легуре чији је хемијски састав подешен тако да им се микроструктура на саобној температури састоји од 50% удела аустенита и исто толико ферита. Таква структура се зове дуплекс структура по којој су ови челици добили име. Осим хрома и никла, важни легирајући елементи су азот, молибден, волфрам и бакар. Азот је изразити гамагени елемент, промовише аустенитну фазу и повећава отпорност на рупичасту корозију. Молибден, волфрам и бакар се додају углавном због повећања корозијске постојаности. Високи масени удели легирајућих елемената, и пре свега врло захтеван термомеханички поступак након очвршћавања, чини дуплекс челика пуно скупљим од већине аустенитних нерђајућих челика.

3.2.5. Формирање микроструктуре преципитационо ојачаних нерђајућих челика

Микроструктурне промене кроз које пролазе преципитационо ојачани челици при хлађењу од растопљеног стања до собне температуре зависе пре свега од њиховог хемијског састава. Аустенитни преципитационо ојачани нерђајући челици који у саставу имају 25% и више никла, примарно кристализују у 100% аустенит и остају при тој

структури и хлађењем до собне температуре и ниже. На слици 3.7 је приказан псеудобинарни дијаграм за састав са 16% хрома, 1% титана и садржај никла који варира у коме се може пратити формирање микроструктуре за основне врсте преципитационо ојачаних челика.

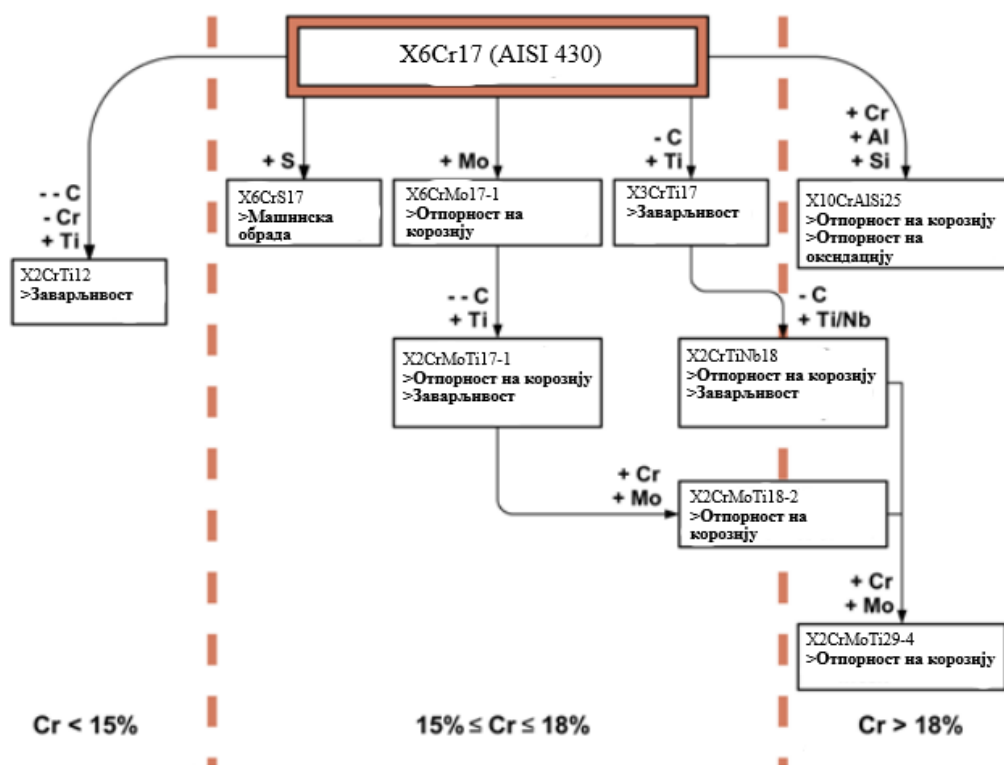


Слика 3.7 Псеудобинарни дијаграм за састав Fe-C-Cr-Ti-Mn-Si-Ni(C=0,05 %; Cr=16 %; Ti=1 %; Mn=0,3 %; Si=0,2 %).

4. ВРСТЕ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА

4.1. Феритни нерђајући челици

Фаза која преовладава у микроструктури ових челика је ферит и по томе су добили име. Основна особина им је добра отпорност на напетосну, рупичасту и корозију у процепу. Феритни челици су магнетни услед феритне микроструктуре. Постоје и феритни челици са високом отпорношћу на високе температуре (800-1150°C) који се углавном легирају са више угљеника у поређењу са стандардним феритним челицима са циљем да се повећа чврстоћа и силицијумом и алуминијумом да се повећа отпорност на оксидацију. Врсте са нижим уделом хрома од (11.2 до 14%) примењују се за израду ауспуха и имају добру отпорност на општу корозију у односу на друге челике. Врсте са већим уделом хрома се примењују у агресивним условима, за декоративне елементе у архитектури и аутомобилску опрему. Феритни челици са највећим уделом хрома се користе у хемијској индустрији, индустрији целулозе и папира. Поседују бољу корозијску постојаност од аустенитних и мартензитних челика. Скупи су и тешко се обрађују. Слика 4.1 илуструје логику која је довела до развијања главних типова феритних нерђајућих челика који су присутни на тржишту.



Слика 4.1 Шематски приказ главних типова феритних нерђајућих челика, почевши од X6Cr17, пратила ове групе челика.

Феритни нерђајући челици одликују се следећим особинама:

- имају магнетна својства,
- ниже ширеће на топлоти слично угљеничним челицима,
- добри проводници топлоте,
- подложни напонској корозији,
- добра дуктилност,
- нису погодни за употребу при веома ниским температурама,
- чврстоћа се може повећати обрадом на хладно,

- добро обликовање на хладно и
- теже заварљиви од аустенита.

Табела 4.1 Хемијски састав неких од главних представника феритних нерђајућих челика

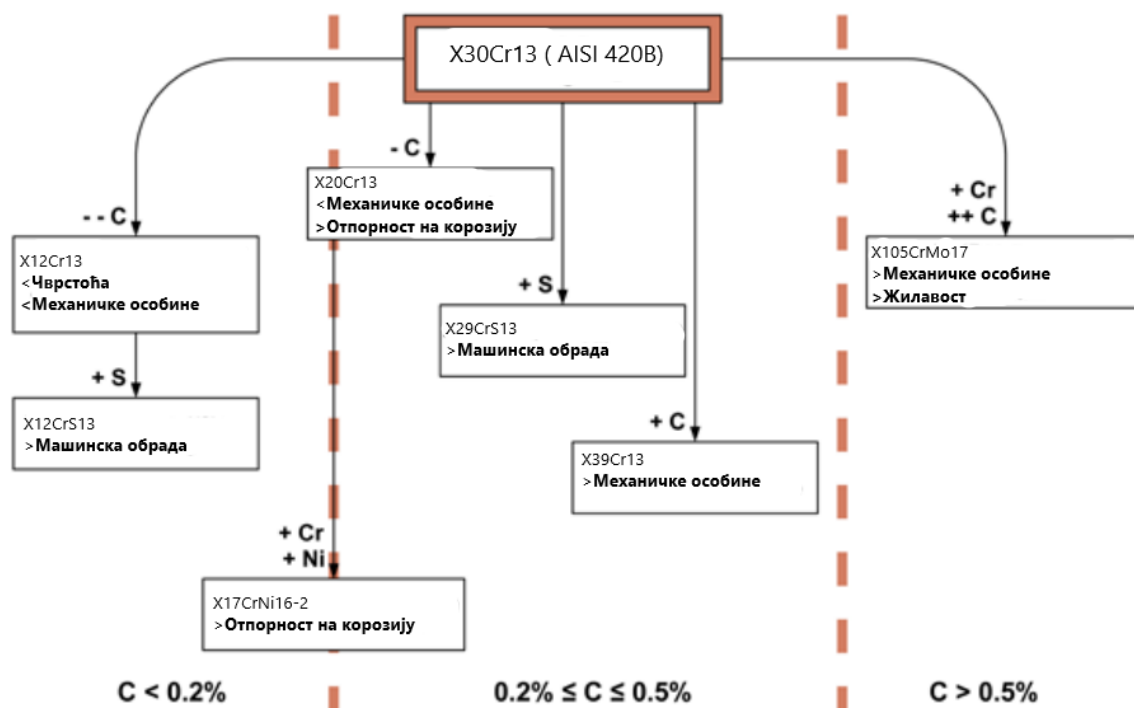
EN ознака	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	AISI ознака
X2CrTi12 (1.4512)	≤0,03	≤1,00	≤1,00	≤0,040	≤0,015	10,5-12,5	AISI 409
X6Cr17 (1.4016)	≤0,08	≤1,00	≤1,00	≤0,040	≤0,015	16,0-18,0	AISI 430
X6CrMoS17 (1.4105)	≤0,08	≤1,00	≤1,50	≤0,040	0,15-0,35	16,0-18,0	AISI 430F
X3CrTi17 (1.4510)	≤0,05	≤1,00	≤1,00	≤0,040	≤0,015	16,0-18,0	AISI 439 (430Ti*)
X6CrMo17-1 (1.4113)	≤0,08	≤1,00	≤1,00	≤0,040	≤0,015	16,0-18,0	AISI 434
X2CrMoTi17-1 (1.44513)	≤0,025	≤1,00	≤1,00	≤0,040	0,15-0,25	16,0-18,0	AISI 436

4.2. Мартензитни нерђајући челици

Мартензитни нерђајући челици су легуре базиране на саставу Fe-Cr-C. Масени удео хрома је обично између 12 и 18% а угљеника од 0,15 до 1,2%. Мартензитна микроструктура ових челика постиже се алотропском трансформацијом аустенита. Довољно брзим хлађењем аустенита на температури M_s почиње а на температури M_f завршава се трансформација аустенита у мартензит. Обично није потребно да брзина хлађења буде велика. Уз мартензит, могу у микроструктури садржати и карбиде у зависности од количине угљеника. То су обично алатни челици који имају добру отпорност на абразијско трошење. Конструкциони мартензитни челици садрже мање угљеника и код њих је примарна отпорност на корозију. Имају велики распон вредности за чврстоћу и границу течења. Једна од главних особина ових челика је тврдоћа. Мартензитни нерђајући челици су феромагнетични. Слика 4.2 приказује металуршку логику која је довела до развијања главних типова мартензитних нерђајућих челика.

Мартензитни нерђајући челици се карактеришу следећим особинама:

- имају магнетна својства,
- висока тврдоћа,
- велики распон вредности за чврстоћу и границу течења,
- у односу на друге нерђајуће челике најтеже се заварују,
- ојачавају се топлотним обрадама.



Слика 4.2 Шематски приказ главних типова мартензитних нерђајућих челика, почевши од X30Cr13, пратила ове фамилије челика

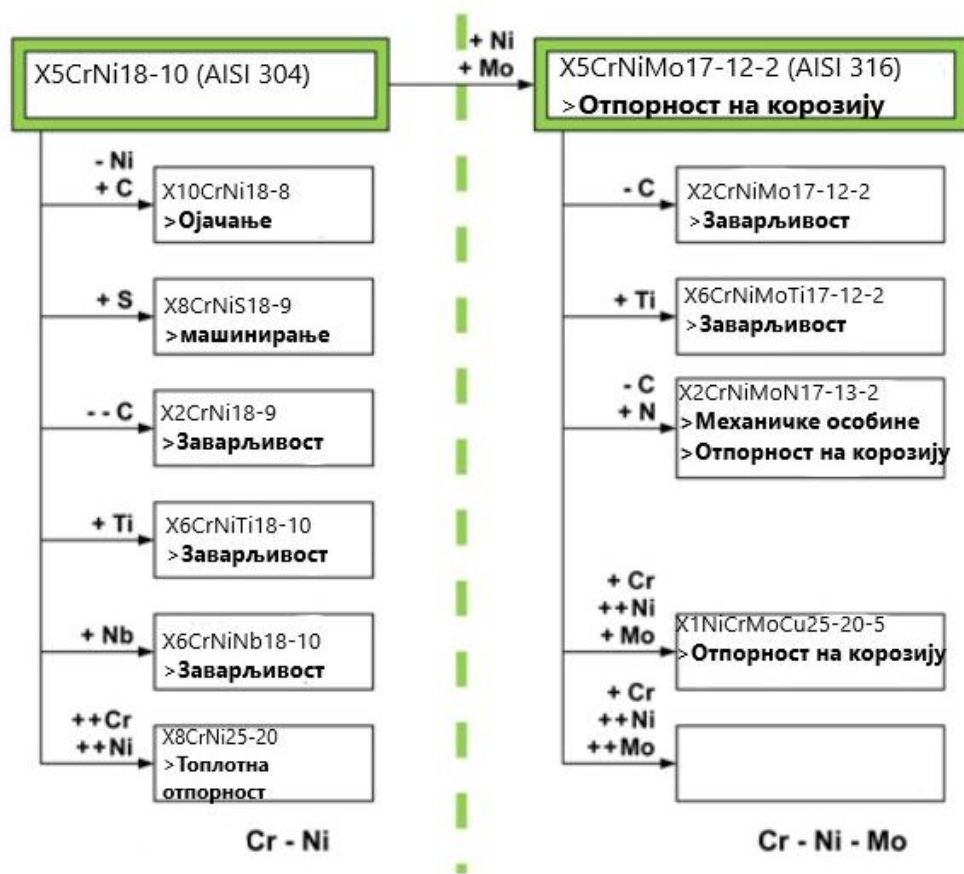
Табела 4.2 Приказује хемијски састав неких од главних представника мартензитних нерђајућих челика

EN ознака	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	AISI ознака
X12Cr13 (1.4006)	0,08-0,15	≤1,00	≤1,50	≤0,040	≤0,015	11,5-13,5	AISI 410
X12CrS13 (1.4005)	0,08-0,15	≤1,00	≤1,50	≤0,040	0,15-0,35	12,0-14,0	AISI 416
X20Cr13 (1.4021)	0,16-0,25	≤1,00	≤1,50	≤0,040	≤0,015	12,0-14,0	AISI 420 (420A*)
X30Cr13 (1.4028)	0,26-0,35	≤1,00	≤1,50	≤0,040	≤0,015	12,0-14,0	AISI 420 (420B*)
X39Cr13 (1.4031)	0,36-0,42	≤1,00	≤1,00	≤0,040	≤0,015	12,5-14,5	AISI 420 (420C*)
X29CrS13 (1.4029)	0,25-0,32	≤1,00	≤1,50	≤0,040	0,15-0,25	12,0-13,5	AISI 420F

4.3. Аустенитни нерђајући челици

Фамилија челика која је највише у употреби и прва по броју различитих врсти. Имају добру отпорност на корозију у различитим условима. Минимална граница развлачења износи око 210 МПа. Задржавају добра својства на врло ниским температурама.

Максимална температура примене је на око 760 °C и на њој не долази до смањивања чврстоће и отпорности на оксидацију. Могу се очврснути хладном деформацијом. Примењују се у условима када се тражи добра отпорност на атмосферску корозију и корозију на високој температури. Ове врсте челика имају добру заварљивост. Легирају се елементима који обезбеђују настајање аустенитне микроструктуре (никлом, азотом, бакром и др.). Садржај угљеника се креће од 0.02% до 0.06% да би се што више смањило формирање хромових карбида. Слика 4.3 приказује металуршку логику која је довела до развијања два главна типа аустенитних нерђајућих челика доступних на тржишту. Први су Cr-Ni нерђајући челици као X5CrNi18-10 а други су Cr-Ni-Mo као X5CrNi17-12-2.



Слика 4.3 Шематски приказ главних типова аустенитних нерђајућих челика.

Развили су се различити поступци за решавање проблема формирања хромових карбида који су базирани на модификацији хемијског састава челика и термичким обрадама. Прва метода решавања ових проблема је додавање титанијума или ниобијума који потпомажу формирању стабилних карбида. Ово је помогло стварању стабилованих аустенитних нерђајућих челика.

Cr-Ni (Mo) Аустенити (Хром-Никл-Молибден)

Одликују се следећим особинама:

- немају магнетна својства,
- висок коефицијент ширења (у поређењу са угљеничним челицима),
- слабо проводе топлоту,
- веома добра отпорност на корозију, повећава се са количином легирајућих елемената, али могу бити подложни напонској корозији поготову у хлоридним срединама,
- висока дуктилност,

- јачина може бити повећана хладном обрадом,
- веома добра отпорност на ватру и
- добро заварљиви.

Cr-Mn Аустенити (Хром-Манган)

Главне разлике у односу на Cr-Ni (Мо) аустените:

- добра оторност на корозију али подложнији напонској корозији и рупичастој корозији, поготову при ниским садржајима хрома и никла,
- висока чврстоћа,
- лоше хладно обликовање,
- мање су погодни машинској обради,
- тежи за заваривање и
- нижа цена.

Табела 4.3 Приказује хемијски састав неких од главних представника мартензитних нерђајућих челика.

EN ознака	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	AISI ознака
X10CrNi18-8 (1.4310)	0,05- 0,15	≤2,00	≤2,00	≤0,045	≤0,015	16,0- 19,0	6,0-9,5	AISI 301
X8CrNiS18-9 (1.4305)	≤0,07	≤1,00	≤2,00	≤0,045	0,15-0,35	17,0- 19,0	8,0- 10,0	AISI 303
X5CrNi18-10 (1.4301)	≤0,07	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,015	17,5- 19,5	8,0- 10,5	AISI 304
X2CrNi18-9 (1.4307)	≤0,03	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,015	17,5- 19,5	8,0- 10,5	AISI 304L
X6CrNiTi18- 10 (1.4541)	≤0,08	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,015	17,0- 19,0	9,0- 12,0	AISI 321
X6CrNiNb18- 10 (1.4550)	≤0,08	≤1,00	≤2,00	≤0,045	≤0,015	17,0- 19,0	9,0- 12,0	AISI 347

4.4. Дуплекс нерђајући челици

Ови челици имају феритно аустенитну структуру приближно 50-50%. Дуплекс нерђајући челици имају комбинацију добрих особина феритних и аустенитних челика. Врло су отпорни на напонску корозију и велике су чврстоће. Садржај хрома се креће од 20.1 до 25.4% али се одликују ниским садржајем никла (1.4 до 7%) у поређењу са аустенитним челицима. Низак садржај никла омогућава повољну цену ових челика. Молибден (0.3-4%) и азот се додају ради повећања отпорности на корозију ради баланса микроструктуре. Манган се додаје понекад као замена никлу и ради повећања растворљивости азота у материјалу.

Дуплекс нерђајући челици се одликују следећим особинама:

- магнетични,
- коефицијент ширења између феритних и аустенитних нерђајућих челика,

- лоше проводе топлоту,
- одлична отпорност на корозију, повећава се са додатком легирајућих елемената,
- осетљиви на напонску корозију,
- висока чврстоћа,
- добра дуктилност,
- чврстоћа се може повећати обрадом на хладно,
- добро обликовање на топло и хладно и
- добра заварљивост.

Табела 4.4 Хемијски састав неких главних типова дуплекс нерђајућих челика.

EN ознака	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%N	AISI ознака
X2CrNiN23-4 (1.4362)	≤0,03	≤1,00	≤2,00	≤0,035	≤0,015	22,0- 24,0	3,50- 5,50	0,10- 0,60	0,05- 0,20	2304
X2CrNiMoN22- 5-3 (1.4462)	≤0,03	≤1,00	≤2,00	≤0,035	≤0,015	22,0- 24,0	4,50- 6,50	2,50- 3,50	0,10- 0,22	2205
X2CrNiMoN25- 7-4 (1.4410)	≤0,03	≤1,00	≤2,00	≤0,035	≤0,015	22,0- 24,0	6,00- 8,00	3,00- 4,50	0,24- 0,35	2507

4.5. Преципитационо ојачани челици

Преципитационо ојачани челици су посебна врста челика код којих је основна карактеристика повећана чврстоћа која се постиже преципитационим ојачањем мартензитне или аустенитне матрице.

Табела 4.5 Хемијски састав неких главних типова преципитационо ојачаних нерђајућих челика.

EN ознака	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	AISI ознака
X5CrNiCuNb16-4	≤0,07	≤0,70	≤1,50	≤0,040	≤0,015	15,0 17,0	3,50 5,00	≤0,60	AISI 630
X7CrNiAl17-7	≤0,09	≤0,70	≤1,00	≤0,040	≤0,015	16,0 18,0	6,50 7,80	---	AISI 631
X5NiCrTiMoVB25- 15-2	≤0,08	≤1,00	1,00 2,00	≤0,025	≤0,015	13,0 16,0	24,0 27,0	1,00 1,50	AISI 600

Осим легирајућих елемената уобичајених за нерђајуће челика, садрже и елементе који при контролисаној термичкој обради стварају различита једињења (карбиде, нитриде, интерметалне спојеве) који су у облику ситних честица, преципитата излучују у мартензиту или аустениту. Најчешће се додају бакар, алуминијум, титанијум и молибден. Ситне и тврде честице преципитата повећавају границу развлачења, тврдоћу и чврстоћу. Могу се поделити у три групе:

- мартензитни,
- семиаустенитни и

- аустенитни.

Добра корозијска постојаност у комбинацији са високом чврстоћом, у специфичним подручјима примене, ставља ове челике испред других челика са високом чврстоћом.

Преципитационо ојачани челици одликују се следећим особинама:

- висока чврстоћа,
- добре особине на замор,
- добро обликовање на топло и хладно и
- осредња заварљивост.

5. ОБРАДИВОСТ НЕРЋАЈУЋИХ ЧЕЛИКА

5.1. Заваривање нерђајућих челика

Заварљивост различитих нерђајућих челика варира у зависности од врсте челика. Скоро сви се могу заваривати али су аустенитни најбољи што се тиче могућности заваривања.

5.1.1. Заварљивост феритних нерђајућих челика

Заварљивост феритних нерђајућих челика зависи од њиховог хемијског састава. Модерније врсте са контролисаном мартензитом структуром и лимитираним преципитатима карбида су поприлично заварљиви. Код свих феритних нерђајућих челика јавља увећање зрна током заваривања што доводи до опадања чврстоће. Температура се мора одржавати и ограничити из истог разлога. Загревање је понекад потребно да спречи пуцање током хлађења за дебљине преко 3 mm. Додатни материјал за заваривање феритних нерђајућих челика може бити феритни сличног хемијског састава сапратипом аустенитом. Феритни челици су отпорни на корозију у срединама које садрже сумпор. У таквим условима се не препоручује да додатни материјал буде аустенитног типа.

5.1.2. Заварљивост мартензитних нерђајућих челика

Мартензитни нерђајући челици са повећаним садржајем никла имају добру жилавост и заварљивост. Супермартензитне врсте са веома малим садржајем угљеника имају добру отпорност на корозију и добру заварљивост. Са повећањем садржаја угљеника заварљивост се смањује. Загревање, и заваривање са добро контролисаном прелазном температуром праћено хлађењем, каљењем и на крају спорим хлађењем су поступци који се подразумевају. Ако се избегавају, постоји велики ризик за пуцање. Као додатни материјал користе се и мартензитни нерђајући челици али се преферирају аустенитни нерђајући челици да би се смањио ризик од пуцања.

5.1.3. Заварљивост аустенитних нерђајућих челика

Ови челици имају у скоро свим случајевима одличну заварљивост може се примењивати било који вид заваривања. Претерана количина доведене топлоте и загревање требају се избегавати да би се смањио ризик са врућим пуцањем, изобличењем а за врсте које имају преко 0,03% угљеника због осетљивости на интергрануларну корозију. Аустенитни нерђајући челици се заварују са потрошним материјалом који је сличног хемијског састава као и сам нерђајући челик. Прелегирање је потребно за врсте са високим садржајем легирајућих елемената да би се оптимизовала отпорност на корозију јер надомештава ефекат сегрегације у завареном металу. Легуре са високим садржајем никла се користе као потрошни материјал за супераустенитне нерђајуће челике .

5.1.4. Заварљивост дуплекс нерђајућих челика

Генерално, имају добру заварљивост и могу се заваривати употребом скоро свих техника. Додатни материјал је обично такође од дуплекс нерђајућег челика типа али углавном различитог хемијског састава у односу на материјал који се заварује. Углавном је потребно да имају већи садржај елемената који обезбеђују настајање аустенитне структуре, најчешће никл, да би се што више смањио лош утицај ферита на заваривање. Предгревање није потребно али количина топлоте треба бити у одређеним границама зависно од типа челика.

5.1.5. Заварљивост преципитационо ојачаних нерђајућих челика

Преципитационо ојачани нерђајући челици су лако заварљиви и имају добре механичке особине на завареним површинама. Врсте које садрже само додаток бакра или молибдена имају сличну заварљивост као аустенитни нерђајући челици док се врсте које садрже алуминијум или висок садржај титанијума могу понашати другачије и за њих је потребно обезбедити атмосферску заштиту током заваривања.

5.2. Обрада деформисањем и механичка обрада

Механичка обрада обухвата глодање, стругање, бушење и прављење навоја. Нерђајући челици се теже обрађују механички него угљенични челици и важи да се са повећањем садржаја легирајућих елемената отежава механичка обрада. Феритни нерђајући челици се лакше обрађују од осталих типова нерђајућих челика. Додатком сумпора се поспешује могућност механичке обраде.

Нерђајуће челике је теже извлачити од угљеничних челика због њиховог хемијског састава. Дуплекс челике је теже извлачити од аустенитних и феритних. Дубоко извлачење лима од нерђајућег челика, на примеру судопере, је приказано на слици 5.1.

Савијање профила ваљцима је поступак у коме лим од нерђајућег челика пролази кроз серију ваљака који постепено формирају жељени облик профила. Овом методом обрађују се сви нерђајући челици али су за дуплекс челике потребне веће силе у односу на остале типове челика. Слика 5.2 показује профиле добијене обрадом савијањем помоћу ваљака.

Обликовање под притиском подразумева поступке дубоког извлачења, обликовање истезањем, пеглање, обликовање под притиском воде итд. Код дубоког извлачења потребно је водити рачуна о подмазивању да би се добио жељени квалитет израђених делова.



Слика 5.1 Судопера добијена дубоким извлачењем нерђајућег челика



Слика 5.2 Савијање помоћу ваљака

5.3. Термичка обрада нерђајућих челика

5.3.1. Термичка обрада феритних нерђајућих челика

Једина термичка обрада која ја могућа за фамилију феритних нерђајућих челика је жарење. Његова улога је да оптимизује отпорност на корозију. Жарење феритних нерђајућих челика изводи се на различитим температурама у зависности од хемијског састава челика који се третира. Потребно је водити рачуна о температури и времену јер су ови челици осетљиви на повећање зрна. Хлађење после жарења се одвија у ваздуху за танке и дуге делове малог пречника, док се за веће делове одвија у води. Жарење феритних нерђајућих челика у ојачаном стању помаже рекристализацији микроструктуре. Пре жарења делови се морају детаљно очистити да би се уклонила сва уља, нечистоће и остаци угљеника

5.3.2. Термичка обрада мартензитних нерђајућих челика

Пре употребе полупроизвода од мартензитних челика они морају проћи кроз термичку обраду да би одржали структуру адекватну за алате машина. У ту сврху, може се као и код конструкционих челика користити жарење, међутим у пракси, за нерђајуће мартензитне челике користи се субкритично жарење односно жарење на температурама од 730-830°C у периоду од неколико сати, праћено постепеним хлађењем у пећима или на ваздуху. Услед свог хемијског састава, мартензитни нерђајући челици су самозакаљиви челици, и ојачавају се једноставним хлађењем на ваздуху, али свакако се саветује хлађење уљем, посебно у случајевима великих или делова средње величине да би се униформисала микроструктура. Процес каљења, увек потребан након ојачавања, такође има специјалне карактеристике. Каљење, слично као и код специјалних конструкционих челика, врши се да би се у потпуности смањила кртост и смањио заостали напон који се ствара у делу. У случају мартензитних нерђајућих челика, каљење се врши на ниским температурама (испод 400°C) или на високим температурама (преко 640°C). Велика пажња придаје се томе да се каљење не изводи на температури од 450-600°C јер се овај интервал сматра критичним зато што смањује отпор на лом и значајно смањује отпорност на корозију.

5.3.3. Термичка обрада аустенитних нерђајућих челика

Аустенитни нерђајући челици не морају бити ојачавани термичком обрадом јер у пракси њихова микроструктура остаје непромењена од температуре топљења до собне температуре. Једина изводљива термичка обрада је растворно жарење. Овај третман се обично изводи на полупроизводима и готовим производима од аустенитног нерђајућег челика. Изводи се на високим температурама (у опсегу од 1000-1100°C) у временском периоду током кога је довољно да се обезбеди хомогенизација хемијског састава челика. Током третмана елиминишу се неправилности микроструктуре и растварање хромових карбида је осигурано. Пре термичке обраде, делови се морају очистити како би се отклонили сви остаци из претходних процеса (уља, нечистоће). У већини случајева растворно жарење се врши у контролисаној атмосфери (азот или азот+водоник) тако да челик може задржати свој типичан метално сиви сјај, избегавајући оксидацију на ваздуху или нежељено угљенисавање. Да би се осигурало успешно растворно жарење, аустенитни челици се морају брзо охладити у води пре свега ако су у питању дебљи делови. Хлађење мора бити брзо да би се одржао уједначени састав аустенита у фази између 450°C и 900°C као и да се спречи одвајање карбида на границама зрна. У случајевима дебљих делова, хлађење азотом под притиском се може користити иако је хлађење у води ипак боља опција. Третман за стабилизацију састоји се у одржавању челика на температурама између 850°C и 900°C у распоону од 1 до 4 сата, зависно од димензија полупроизвода. Током третирања, долази до таложења карбида титанијума и ниобијума који фиксирањем угљеника спречавају настанак штетних хромових карбида. После тога следи хлађење на ваздуху.

5.3.4. Термичка обрада дуплекс нерђајућих челика

Полупроизводи направљени од дуплекс нерђајућих челика морају обавезно бити изложени жарењу. Термичка обрада се обично изводи на температури од 1050°C до 1150°C затим се челик брзо хлади у води да би се оптимизовао однос феритне и аустенитне фазе и да се избегну нежељене фазе које се евентуално формирају током процеса производње и обраде. За ове материјале жарење изводи у контролисаној атмосфери да би се избегла површинска оксидација полупроизвода.

5.3.5. Термичка обрада преципитационо ојачаних нерђајућих челика

Након третмана жарења, полупроизводи преципитационо ојачаних нерђајућих челика имају микроструктуру коју карактеришу добра пластична деформација на хладно и добра могућност машинске обраде. Мартензитни типови преципитационо ојачаних нерђајућих челика се обично жаре на 1030-1060°C након чега се хладе на ваздуху при чему се добија мартензитна структура са малим уделом угљеника са малом чврстоћом и добром деформабилношћу. Семиаустенитни преципитационо ојачани нерђајући челици имају доминантно аустенитну структуру након жарења. Због специјалног хемијског састава, након жарења, аустенитна структура је нестабилна и термичком обрадом претвара се у мартензит. Аустенитни преципитационо ојачани челици, због свог високог садржаја никла имају стабилну структуру чак и после пластичне деформације на хладно. Жарење се изводи на температурама између 970°C и 1050°C са хлађењем у води или уљу.

6. ОСОБИНЕ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА

6.1. Отпорност на корозију нерђајућих челика

Иако је главни разлог употребе нерђајућих челика баш тај јер су нерђајући, ови челици пате од неких врста корозије у зависности од окружења у коме се налазе и због тога одржавање ових челика треба бити на високом нивоу као и пажња која се придаје избору врсте челике који се користи у одређеним условима. Заштитни слој на површини их чини имуним на општу корозију која иначе разара нискоугљеничне и нисколегиране челике. У неким случајевима примене заштитни омотач није довољно добра заштита па локално долази до пробијања заштитног слоја и до корозије у одређеним облицима.

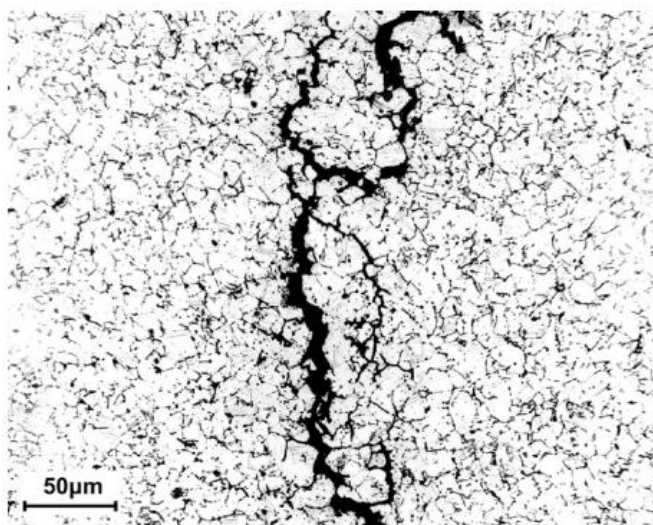
Рупичаста корозија и корозија у процепу су два типа локалне корозије која се у одређеним условима могу појавити код нерђајућих челика. Механизам настанка им је врло сличан а последице су оштећења на ограниченој површини. Као што и само име говори, рупичаста корозија започиње разарањем заштитног оксидног слоја и настанком мале рупице на површини основног материјала. Иницијална рупица настаје најчешће на границама кристалних зрна, често на местима структурних неправилности. Временом ова корозија постаје све агресивнија што доводи до све бржег трошења материјала. Рупице постају све веће, међусобно се спајају што на крају може довести до лома. Ситуација је отежана тиме да се на површини може уочити једва видљива рупица, која је несразмерна у односу на оштећење материјала испод површине. Корозија у процепу има сличан механизам настанка, само што је окидач за разлику од неправилности у микроструктури код рупичасте корозије, конструкциона решења која дозвољавају појаву ове врсте корозије. То су често спојеви закивцима, вијцима и наврткама и слично. На таквим местима састав материјала се мења и временом постаје агресивнији и изазива све јаче трошење материјала.



Слика 6.1 Рупичаста корозија на спољашњости цеви.

Рупичаста корозија и корозија у процепу настају најчешће у условима који садрже хлоридне јоне. Један од значајнијих видова корозије је такође интеркристална или интергрануларна корозија односно корозија која напредује по границама кристалних зрна. Предуслов за настанак овог вида корозије је смањивање садржаја хрома испод граница од 12% у подручјима уз границе кристалних зрна где долази до формирања карбида хрома. Карбиди настају задржавањем нерђајућих челика на повишеним температурама. Ова појава се назива сензибилизација. Сензибилизација се најчешће догађа при заваривању аустенитних нерђајућих челика у зони утицаја топлоте, а слична појава се догађа и при

заваривању феритних нерђајућих челика. Пукотине које настају као последица интергрануларне корозије шире се и напредују по границама зрна. Ове пукотине могу се ширити не само интеркристално већ и транскристално, по одређеним кристалографским равнинама. На сликама 6.1, 6.2, 6.3 и 6.4 приказани су различити типови корозије који се јављају код нерђајућих челика.



Слика 6.2 Интеркристална корозија.

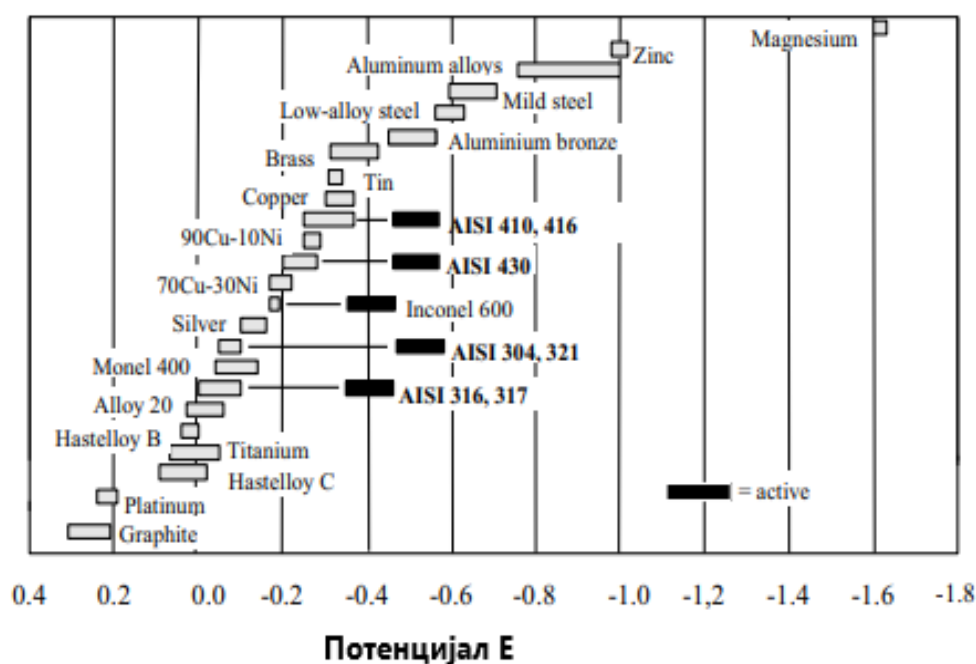


Слика 6.3 Корозија у процепу.



Слика 6.4 Напонска корозија.

Слика 6.5 Приказује отпорност на корозију различитих материјала у морској води и где се на њему налазе нерђајући челициу односу на њих.



Слика 6.5 Отпорност на корозију различитих материјала у морској води.

6.1.1. Отпорност на корозију феритних нерђајућих челика

Феритни челици могу бити подложни интеркристалној, рупичастој и корозији у процепу. Како у саставу немају никла, отпорни су на напонску корозију и бољи су избор од аустенитних челика у срединама које садрже хлориде. Микроструктурне промене које настају током заваривања могу смањити отпорност на корозију. Рупичаста корозија и корозија у процепу могу се спречити избором челика са оптималним хемијским саставом и структуром. На појаву интеркристалне корозије тешко је утицати посебно ако се примењује заваривање. Механизам настанка је сличан као код аустенитних челика. Ако се по границама кристалних зрна излуче карбиди и/или нитриди и смањи се садржај хрома уз границу зрна испод граничне вредности, стварају се услови за настанак интеркристалне корозије. Отпорност на интер кристалну корозију директно зависи од садржаја хрома, угљеника и азота. Током заваривања, на температури већој од 1000 °C, угљеник и азот се потпуно отапају у металу завара и зони утицаја топлоте. Хлађењем настају карбиди хрома Cr_2C_6 и нитриди Cr_2N . Ови преципитати настају по границама и унутар кристалних зрна, зависно од брзине хлађења и садржајем угљеника и азота. Код већих брзина хлађења ови преципитати углавном настају унутар зрна а при споријем хлађењу углавном се излучују по границама зрна. У микроструктури феритних челика са средњим и високим садржајем хрома након заваривања присутни су преципитати наведених фаза како унутар тако и по границама зрна. Код челика са високим садржајем азота и угљеника не може се брзим каљењем избећи настанак преципитата при заваривању и зато су ови челици осетљиви на интеркристалну корозију. Код челика са ниским и средњим садржајем угљеника и азота могуће је наглим хлађењем избећи настанак преципитата по границама зрна. Ако су се преципитати већ излучили и ако је дошло до смањења садржаја хрома уз границу зрна, жарењем на температури од 700 до 950 °C може се вратити на почетно стање пре формирања преципитата.

6.1.2. Отпорност на корозију аустенитних нерђајућих челика

Аустенитни нерђајући челици су потпуно отпорни на општу атмосферску корозију при собној температури. На повишеним температурама отпорност није потпуна и временом долази до разарања материјала. Упркос томе што имају јако добру отпорност на корозију, аустенитни челици у одређеним условима прераде и примене могу постати осетљиви на интеркристалну, рупичасту, напонску, галванску, корозију у процепу и микробиолошки изазвану корозију.

6.1.3. Отпорност на корозију дуплекс нерђајућих челика

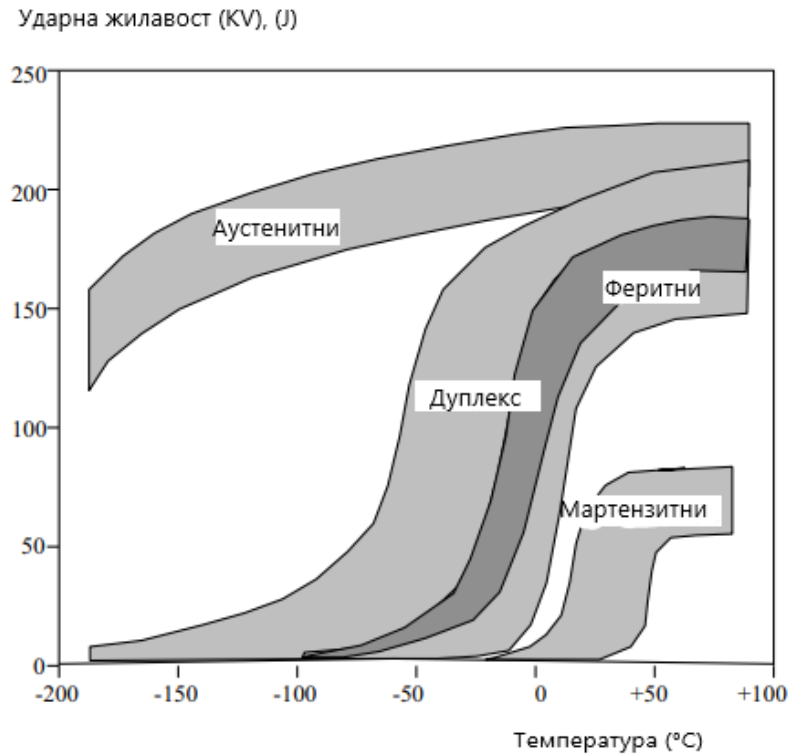
Дуплекс челици поседују изванредну отпорност на корозију што у комбинацији са добрим механичким својствима представља њихову главну предност у односу на друге нерђајуће челике. Ови челици имају бољу отпорност на напонску корозију од аустенитних нерђајућих челика. Због високог садржаја хрома и нижег садржаја никла отпорни су на напонску корозију и у хлоридним окружењима. Отпорност дуплекс челика на рупичасту корозију је јако добра захваљујући првенствено високом садржају хрома, волфрама, молибдена и азота. Микроструктура такође има одређени утицај на отпорност на рупичасту корозију. Повећање феритне фазе и преципитати нитрида у крупним феритним зрнима, који у одређеним условима могу настати при заваривању дуплекс челика, неповољно утичу на отпорност према рупичастој корозији.

6.1.4. Отпорност на корозију преципитационо ојачаних нерђајућих челика

Отпорност на корозију ових челика зависи од термичке обраде и постигнуте микроструктуре након очвршћавања. Излучивање преципитата друге фазе резултира благим смањењем корозијске постојаности. Заваривање лоше утиче на корозијску постојаност. Због великог уноса топлоте нарушава се основна микроструктура челика а то погоршава корозијска и друга својства.

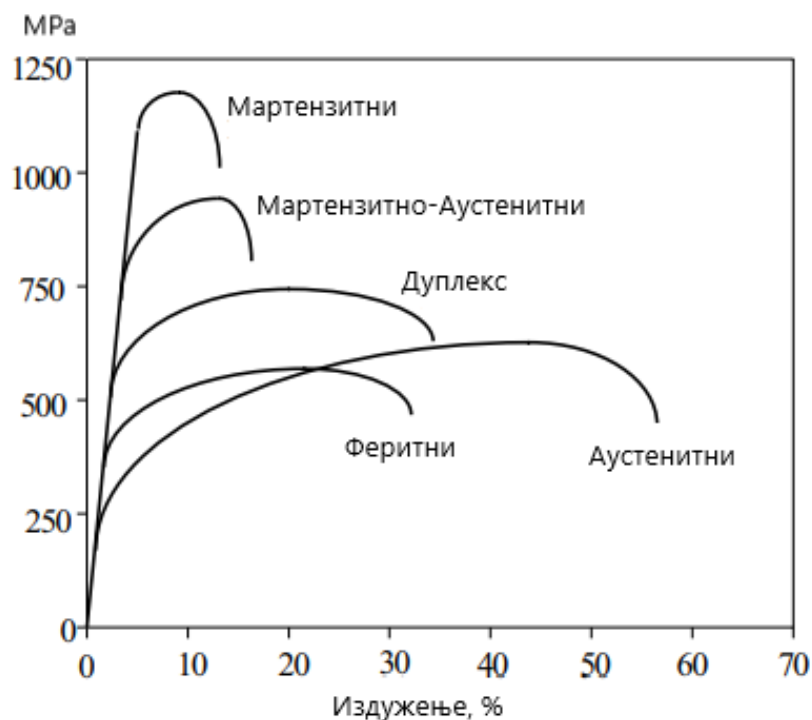
6.2. Механичке карактеристике нерђајућих челика

Нерђајући челици се углавном бирају због своје отпорности на корозију, али у исто време они су и конструктивни материјал због чега су механичке особине попут чврстоће, дуктилности и тврдоће јако битан фактор. Тврдоћа различитих нерђајућих челика варира од високих вредности аустенитних нерђајућих челика на високим температурама до релативно кртог понашања мартензитних челика. Тврдоћа зависи од температуре и генерално се повећава са повећањем температуре. Слика 6.6 приказује ударну жилавост различитих група челика на температурама од -200 до +100 °C.



Слика 6.6 Ударна жилавост различитих типова нерђајућих челика.

На слици 6.7 приказане су криве затезања основних типова нерђајућих челика и њихове упоредне вредности.



Слика 6.7 Криве затезања нерђајућих челика.

6.2.1. Механичке карактеристике мартензитних нерђајућих челика

Термичка обрада пуно утиче на механичке карактеристике мартензитних нерђајућих челика. Они се углавном користе у ојачаном и жареном стању. У таквом стању садржај угљеника утиче на чврстоћу. Са повећањем садржаја угљеника повећава се и чврстоћа.

Челици са садржајем хрома већим од 13% и садржајем угљеника већим од 0.15% имају у потпуности мартензитну микроструктуру после ојачавања. Имају релативно малу дуктилност. Табела 6.1 приказује механичке особине мартензитних нерђајућих челика у зависности од примењене термичке обраде.

Табела 6.1 Механичке особине представника мартензитних нерђајућих челика

EN ознака	Металуршко стање	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Тврдоћа	AISI ознака
X12Cr13 (1.4006)	A	300-400	500-600	18-28	160-200 HB	AISI 410
	A + CD**	450-900	650-1000	12-18	---	
	Q T 200°C	1000-1250	1350-1500	11-16	---	
	Q T 350°C	1250-1400	1250-1400	11-17	42-46 HRC	
	Q T 650°C	950-1150	650-850	18-24	40-44 HRC	
		550-700			16-24 HRC	
X20Cr13 (1.4021)	A	350-450	550-700	16-26	220-250	AISI 420 (420A*)
	A + CD**	500-900	700-1100	12-18	---	
	Q T 200°C	1050-1300	1350-1550	11-16	42-46 HRC	
	Q T 350°C	1000-1200	1250-1450	11-17	40-44 HRC	
	Q T 650°C	600-800	750-950	16-20	21-25 HRC	

A: Каљено

A+CD: Каљено и Хладно ваљано

Q T: Каљено и Жарено на означеним температурама

6.2.2. Механичке карактеристике феритних нерђајућих челика

Једна од битних физичких карактеристика феритних нерђајућих челика са обзиром на њихову микроструктуру, је што су магнетични. Ова особина се повећава после каљења. Чврстоћа феритних челика није велика. Ови челици се састоје из једноличних феритних зрна и користе се у каљеном стању. Вредност затезне чврстоће се креће од 450 МПа до 600 МПа а тврдоћа од 150 до 220 НВ.

Феритни нерђајући челици не могу бити ојачани жарењем. Једини начин за повећање механичке отпорности је хладном пластичном деформацијом као што су хладно ваљање и извлачење.

Табела 6.2 Механичка својства неких главних представника феритних челика.

ЕН ознака	Металуршко стање	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Тврдоћа	AISI ознака
X2CrTi12 (1.4512)	A	250-350	400-500	27-32	140-180 HB	AISI 409
X6Cr17 (1.4016)	A A + CD**	300-400 550-850	450-550 650-950	25-30 5-18	150-200 HB	AISI 430
X6CrMoS17 (1.4105)	A A + CD**	250-350 400-700	450-550 600-850	20-25 5-15	150-200 HB	AISI 430F
X3CrTi17 (1.4510)	A A + CD**	250-350 500-800	450-550 600-900	25-30 5-20	150-200 HB	AISI 439 (430Ti*)

A: Каљено

A+CD: Каљено и хладно ваљано

6.2.3. Механичке карактеристике аустенитних нерђајућих челика

Када говоримо о физичким карактеристикама представника аустенитних нерђајућих челика треба напоменути да оне доста зависе од структуре решетке аустенитних нерђајућих челика која се разликује од феритних и мартензитних челика. Ширење на топлоти аустенитних нерђајућих челика је за око 50-60% веће него што је случај код феритних и мартензитних нерђајућих челика, док је провођење топлоте за око 40-50% ниже. Током термичке обраде температуре могу да варирају али количина унете топлоте мора бити лимитирана. Нису магнетични.

Табела 6.3 Механичка својства главних представника аустенитних нерђајућих челика.

ЕН ознака	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]	Тврдоћа	AISI ознака
X10CrNi18-8 (1.4310)	250-300	600-750	40-50	170-220	AISI 301
X5CrNi18-10 (1.4301)	220-270	550-650	45-55	160-210	AISI 304
X8CrNiS18-9 (1.4305)	200-250	520-630	35-45	170-220	AISI 303
X2CrNi18-9 (1.4307)	200-250	520-630	45-55	160-210	AISI 304L

На механичке особине аустенитних нерђајућих челика такође утиче аустенитна основа. У жареном стању ови челици имају затезну чврстоћу R_m која се креће од 550 до 650 МПа, док се тврдоћа креће од 160-200 НВ. Табела 5.3 приказује механичке карактеристике неких представника аустенитних нерђајућих челика. Једини начин да се повећа затезна чврстоћа ових челика јесте хладном пластичном деформацијом (ваљање, извлачење). Могуће је достићи затезну чврстоћу од 1500-1800 МПа.

6.2.4. Механичке карактеристике дуплекс нерђајућих челика

Могуће је уочити да су физичке карактеристике сличне аустенитним челицима. Једина разлика је ширење на топлоти. Дуплекс челици показују магнетна својства.

Табела 6.4 Механичка својства главних представника дуплекс нерђајућих челика.

ЕН ознака	$R_{p0,2}$ [МПа]	R_m [МПа]	A [%]	Тврдоћа	AISI ознака
X2CrNiN23-4 (1.4362)	420-480	650-750	25-35	200-250	2304
X2CrNiMoN22-5-3 (1.4462)	460-520	700-800	25-35	200-250	2205
X2CrNiMoN25-7-4 (1.4410)	520-580	750-850	25-35	230-280	2507

Структура дуплекс нерђајућих челика омогућава велике вредности затезне чврстоће. Имају одлично понашање када говоримо о отпорности. Њихова прелазна температура је на око -80°C .

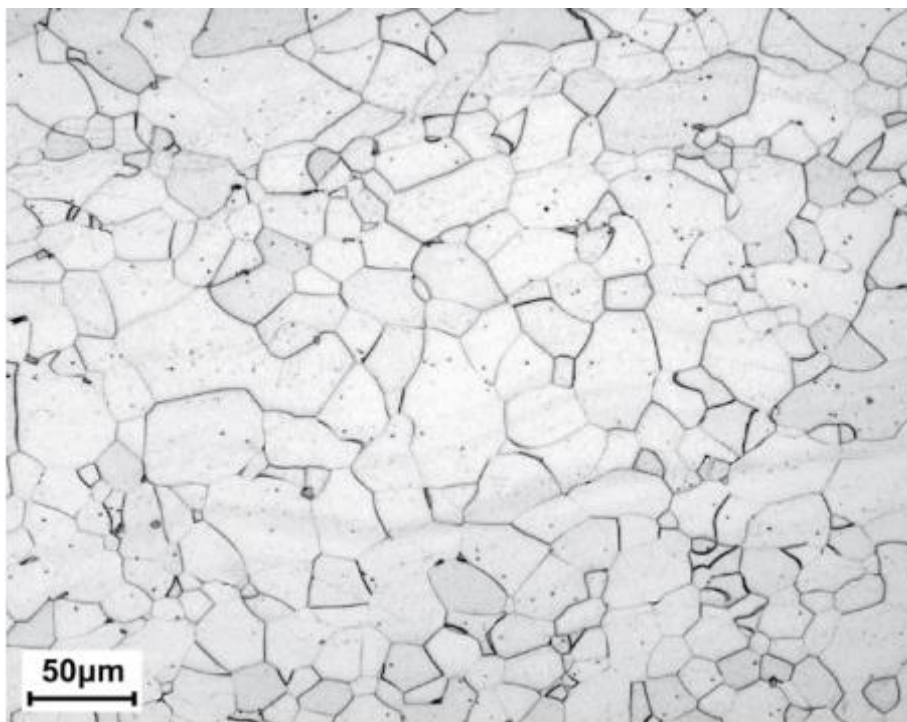
6.2.5. Механичке карактеристике преципитационо ојачаних нерђајућих челика

После каљења, полупроизводи од преципитационо ојачаних нерђајућих челика имају микроструктуру која омогућује добру пластичну деформацију и добру машинску обраду. Када се говори о преципитационо ојачаним нерђајућим челицима, они могу имати затезну чврстоћу вишу од 1520 МПа и чак при њој задржавају добру дуктилност и жилавост. Максимална температура примене зависи од микроструктуре.

6.3. Микроструктура нерђајућих челика

6.3.1. Микроструктура феритних нерђајућих челика

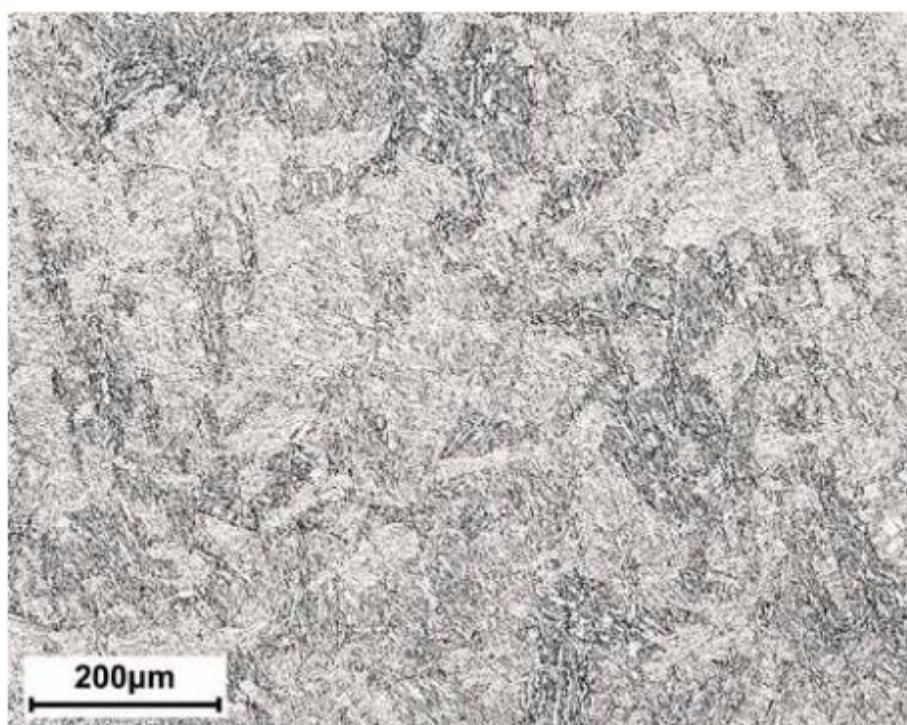
На слици 6.8 приказана је микроструктура каљеног феритног нерђајућег челика X2CrTiNb18 (AISI 441) која је састављена од хомогених феритних зрна.



Слика 6.8 Микроструктура феритног нерђајућег челика X2CrTiNb1.8

6.3.2. Микроструктура мартензитних нерђајућих челика

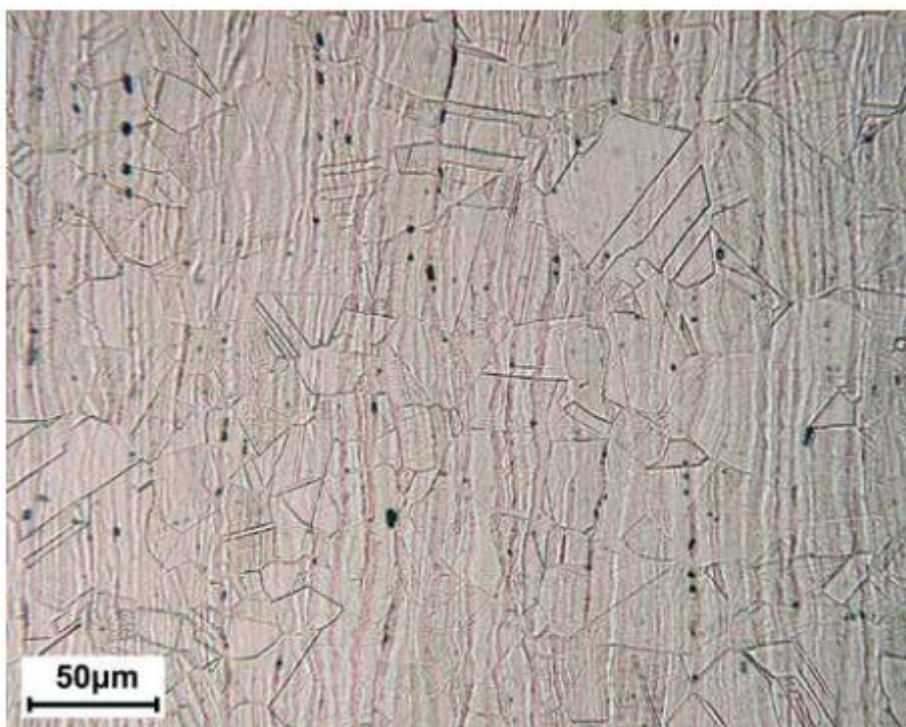
На слици 6.9 приказана је микроструктура мартензитног нерђајућег челика X20C13(AISI 420).



Слика 6.9 Микроструктура мартензитног нерђајућег челика X20C13(AISI 420).

6.3.3. Микроструктура аустенитних нерђајућих челика

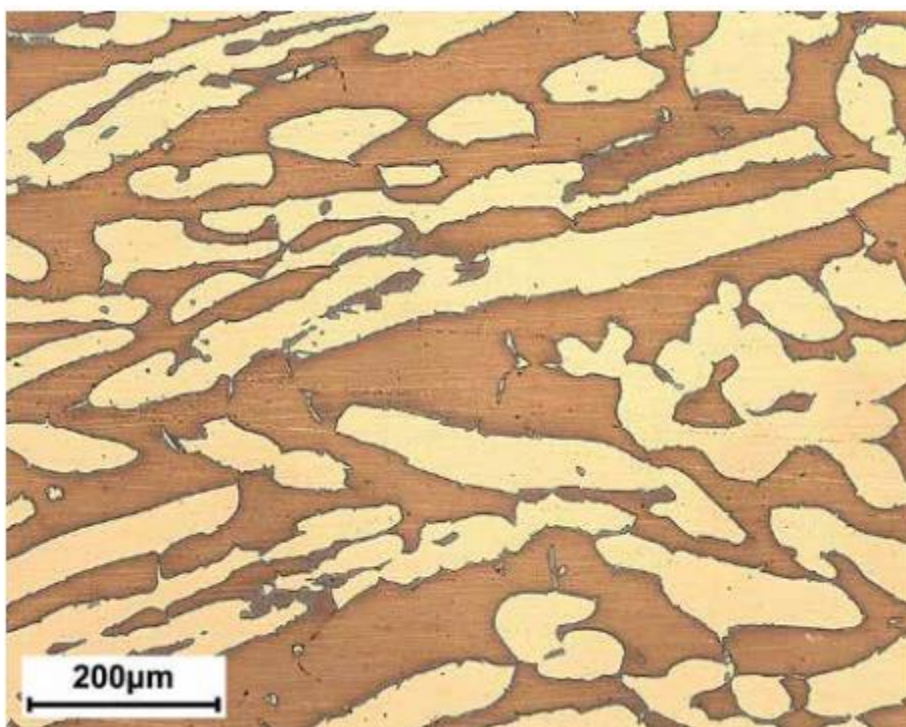
На слици 6.10 приказана је микроструктура аустенитног нерђајућег челика X5CrNi18-10 (AISI 304) која приказује аустенитна зрна са хомогеним тракама деформација распоређеним у правцу извлачења.



Слика 6.10 Микроструктура аустенитног нерђајућег челика X5CrNi18-10

6.3.4. Микроструктура дуплекс нерђајућих челика

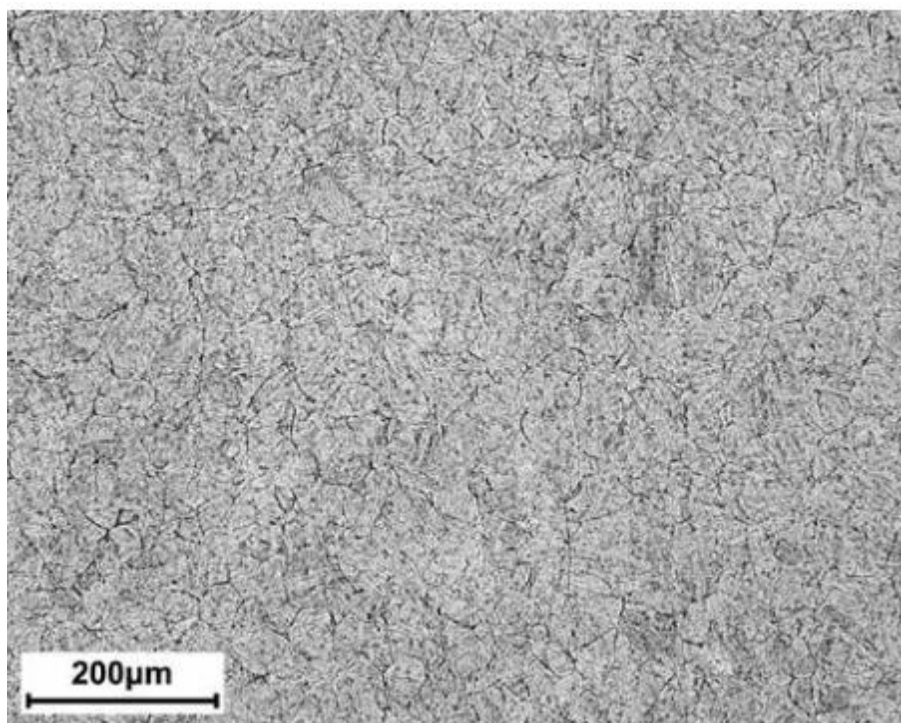
Дуплекс микроструктура се састоји из 50% ферита и 50% аустенита. Оваква микроструктура обезбеђује добре механичке карактеристике и добре особине челика. На слици 6.11 приказана је микроструктура дуплекс нерђајућег челика X2CrNiMoN22-5-3 (2205).



Слика 6.11 Микроструктура дуплекс нерђајућег челика X2CrNiMoN22-5-3.

6.3.5. Микроструктура преципитационо ојачаних нерђајућих челика

На слици 6.12 приказана је микроструктура мартензитног преципитационо ојачаног нерђајућег челика X5CrNiCuNb16-4 (17-4PH) на којој се види хомогена мартензитна микроструктура са карбидима по границама зрна.



Слика 6.12 Микроструктура мартензитног преципитационо ојачаног челика X5CrNiCuNb16-4.

7. УПОТРЕБА НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА

7.1. Употреба феритних нерђајућих челика

Феритни нерђајући челик X6Cr17 (AISI 430) се користи за машинске делове у индустрији производње и транспорта азотне киселине (кондензатори, цеви, резервоари). Користи се и у нафтном сектору, за производњу есцајга, кућне апарате и у индустрији као и за производњу делова вагона и аутобуса. Користи се за делове потребне на температурама 750°-800°C због добре отпорности на оксидацију при високим температурама.

Челик X6CrMoS17(AISI 430F) је исти као и X6Cr17 али се лакше машинира због додатка сумпора у легури. Овај челик се користи за производњу шипки и цеви (дуже полуприводе). У ситуацијама када је за компоненте потребно заваривање користи се X3CrTi17 (AISI 439). У агресивнијим условима, феритни нерђајући челик X6CrMo17-1 (AISI 434) користи се због присуства молибдена који повећава отпорност на корозију. У оваквим случајевима се такође користе X2CrTiNb18 (AISI 441) и X2CrMoTi17-1 (AISI 436).

На сликама 7.1 и 7.2 су приказани неки продукти од феритних нерђајућих челика.



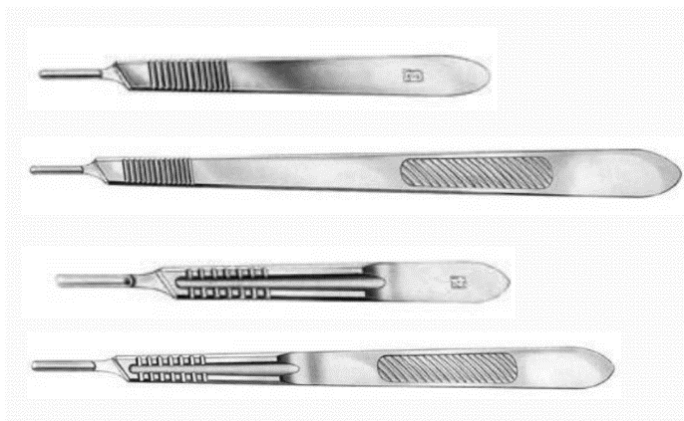
Слика 7.1 Резервоари за складиштење



Слика 7.2 Кухињски прибор

7.2. Употреба мартензитних нерђајућих челика

Мартензитни челици који се највише користе у индустријском сектору су X30Cr13(AISI420B) и X12Cr13 (AISI 410). Први гарантује чврстоћу са већим садржајем угљеника док други гарантује бољу тврдоћу.



Слика 7.3 Скалпели

Ова два челика се користе у условима где су потребне добра механичка отпорност и отпорност на хабање. Отпорност на корозију им је добра. Претежно се користе за израду кухињских ножева, индустријских ножева за сечење, хируршке инструменте, маказе и дискове за кочнице у моторним возилима. Слика 7.3 приказује употребу мартензитних нерђајућих челика у сектору медицине.

7.3. Употреба аустенитних нерђајућих челика

Челик X5CrNi18-10 (AISI 304) је први аустенитни челик са хромом и никлом. Највише се производи од свих нерђајућих челика. Од њега се могу израђивати:

- бојлери,
- вентили,
- цеви за транспорт флуида и
- лифтови.

Такође користи се:

- у архитектури и урбаном дизајну,
- у хемијској и петрохемијској индустрији,
- за израду елемената за производњу млека, пива, конзервисане хране, папира, боја, експлозива,
- за израду кућних апарата и
- складиштење и транспорт течног гаса.

Када се говори о хром-никл-молибден фамилији аустенитних нерђајућих челика, челик X5CrNiMo17-12-2 се користи за израду делова машина које раде при агресивнијим условима. Производи се у великим количинама и добро је заварљив.

Челик X5CrNiMo17-12-2 се користи за делове који су близу обале мора због своје добре отпорности на корозију у морској води.

Слике 7.4 и 7.5 приказују аустенитне челике у употреби.



Слика 7.4 Хемијски комплекс



Слика 7.5 Скулптура у Шкотској (аустенитни нерђајући челик 316L)

7.4. Употреба дуплекс нерђајућих челика

Челик X2CrNiN23-4 је прва легура са бифазном микроструктуром. Овај челик је развијен са разлогом да замени традиционалне челике X5CrNi18-10 и X5CrNiMo17-12-2 у условима када је потребна већа отпорност у хлоридним условима. Користи се у производњи азотне киселине.

Челик X2CrNiMoN22-5-3 је најраспрострањенији међу челицима. Користи се у хемијској и петрохемијској индустрији у срединама контаминираним хлоридима и у којима је присутан угљен диоксид. Користи се у постројењима десалинизације и у постројењима која су у контакту са сумпорном, фосфорном, сирћетном и мрављом киселином.

7.5. Употреба преципитационо ојачаних нерђајућих челика

Преципитационо ојачани нерђајући челици су генерално присутни на тржишту у облику шестоугаоних шипки. Плоче и лимови су мање заступљени. Користе се у ваздухопловној индустрији, морској индустрији, хемијској и петрохемијској индустрији као и у енергетском сектору за производњу делова које карактеришу потребе за великом механичком отпорношћу и добром отпорношћу на корозију као што су :

- вентили,
- вратила,
- лежајеви и
- турбине.

Такође се користе за израду :

- зупчаника,
- ватреног оружја,
- опруга и
- хируршких инструмената.

8. ЗАКЉУЧАК

Најбитнија особина која чини нерђајуће челике значајним је њихова отпорност на корозију, која се повећава са повећањем садржаја хрома. Постоје пет основних типова нерђајућих челика: феритни, мартензитни, аустенитни, дуплекс и преципитационо ојачани. Ови челици се разликују по свом хемијском саставу и микроструктури, односно својим механичким и физичким карактеристикама на шта утичу легирајући елементи. Легирајући елементи се деле на алфагене и гамагене. Алфагени стабилизују феритну фазу док гамагени стабилизују аустенитну фазу. Различите карактеристике их чине погодним за различите примене. Од нерђајућих челика се најпре добијају полупроизводи: инготи, блумови, билети и слабови. Касније се они прерађују и од њих производе сложенији облици и делови. Термичка обрада која се примењује на овим челицима се разликује за сваки од различитих типова челика. Различите особине основних типова челика омогућавају њихову широку примену у различитим индустријама и секторима. Њихова примена се креће од кухињског прибора преко медицинских инструмената и импланата до резервоара за складиштење различитих хемијских супстанци до употребе у архитектури и грађевини.

ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Outokumpu: Handbook of Stainless Steel, Avesta, Sweden, 2013.
- [2]. Vera Rede: Nehrdjajući čelici, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [3]. Béla Leffler: Stainless steels and their properties, 2013.
- [4]. Atlas steels: The Atlas Steels Technical Handbook of Stainless steels, 2013.
- [5]. Marco Boniardi и Andrea Casaroli: Stainless steels, 2014.
- [6]. Atlas Steels, Machining of stainless steels, 2011.
- [7]. Милорад Јовановић, Драган Адамовић, Нада Ратковић, Вукић Лазих: Машински материјали, Крагујевац 2003.
- [8]. AK Steel, Stainless Steel Comparator, 2016.
- [9]. MGM Engineering: Stainless steel Quality
- [10]. <https://www.stainlessband.co.uk/news/item/news/chemical-and-petrochemical> (приступљено 29.08.2019)
- [11]. https://en.wikipedia.org/wiki/Harry_Brearley (приступљено 25.08.2019)