

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије I/Технологија заваривања

Број индекса: 172/2013

Милорад Н. Ракичевић

**ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ
ВИСОКОЛЕГИРАНИХ ЧЕЛИКА
ПОМОЋУ ШЕФЛЕРОВОГ ДИЈАГРАМА**

завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. Др Вукић Лазић - ментор

2. _____

3. _____

Датум

одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- Укаже на основне врсте нерђајућих челика и на њихову заварљивост.
- Прикаже основне методе одређивања заварљивости челика.
- Да на основу бар 3 изабрана различита нерђајућа челика покаже процедуру за избор додатног материјала тако да се у завареном споју не појаве прслине.

Препоручена литература:

[1] **Јовановић М., Лазић В.:** *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу 2016.

[2] **Јовановић М., Адамовић Д., Лазић В.:** *Технологија заваривања – приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, 1996.

[3] **Јовановић М., Адамовић Д., Лазић В., Ратковић Н.:** *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, 2003.

[4] **Јовановић М., Лазић В., Арсић Д.:** *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, 2016 (рукопис)

Крагујевац, Септембар 2016. год.

Ментор:

Др Вукић Лазић, ред. проф.

Резиме:

У овом раду се разматрају високолегирани нерђајући челици. У теоријском делу рада утврђена је методологија за оцену заварљивости ових челика, указано је на опште проблеме заварљивости различитих техничких метала и легура, а такође је дат и преглед високолегираних нерђајућих челика са упоредним ознакама. Детаљније се у раду анализира заварљивост високолегираних нерђајућих челика помоћу Шефлеровог дијаграма. На крају је предложена и оптимална технологија заваривања као и оптимални параметри заваривања ових челика РЕЛ поступком.

Кључне речи:

Високолегирани нерђајући челици, заварљивост, Шефлеров дијаграм.

Abstract:

In this work the weldability of high alloyed stainless steel is considered. In theoretical part of this work the methodology for weldability determination is shown and also it is pointed to basic problems of weldability of different technical metals and alloys, and also it is shown the review of high alloyed stainless steels. In this work it is shown the detail analysis of stainless steels weldability using Schaeffler's diagrams. In the end, the the proposed optimal technology of welding as well as optimal welding parameters for MMA welding method of these steels are given.

Key words:

High alloyed stainless steels, weldability, Schaeffler's diagram.

САДРЖАЈ:

1. УВОД	1
2. ПОЈАМ И ДЕФИНИЦИЈА ЗАВАРЉИВОСТИ	4
3. МЕТОДЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ ЗАВАРЉИВОСТИ	7
3.1 Рачунске методе	7
3.2 Прорачун температуре предгревања	9
3.3 Практичне пробе заварљивости (лабораторијске и технолошке пробе)	11
3.3.1 Пробе склоности ка лому (топлом и хладном)	11
3.3.2 Процена заварљивости на основу KHZ дијаграма	13
4. ОПШТЕ НАПОМЕНЕ О ЗАВАРЉИВОСТИ РАЗЛИЧИТИХ ТЕХНИЧКИХ МЕТАЛА И ЛЕГУРА	14
4.1 Легуре Fe-Fe ₃ C (челици)	14
4.2 Међусобно заваривање различитих легура из група Fe-C	17
4.3 Заваривање ливеног гвожђа	18
4.3.1 Сиво ливено гвожђе	18
4.3.2 Бело ливено гвожђе	18
4.3.3 Темперовано ливено гвожђе	18
4.4 Обојени метали и њихове легуре	19
4.4.1 Алуминијум	19
4.4.1.1 Припрема алуминијумских предмета за заваривање	20
4.4.1.2 Електролучно заваривање ковног алуминијума	21
4.4.2 Магнезијум	21
4.4.3 Бакар и његове легуре	22
4.4.3.1 ТИГ-заваривање бакра	22
4.4.3.2 МИГ-заваривање бакра	22
4.4.3.3 РЕЛ-заваривање бакра	23
4.4.3.4 Гасно заваривање бакра	24
4.4.3.5 Заваривање месинга (Cu-Zn)	24
4.4.3.6 Заваривање бронзе	25
4.4.3.7 Калајне бронзе (ливачке фосфорне бронзе) са садржајем фосфора до 1.2%	25
4.4.3.8 Бакар-алуминијумске легуре (алуминијумске бронзе)	25
4.4.3.9 Легуре бакар-силицијум (силицијумска бронза)	26
4.4.3.10 Легуре бакар-никл	26
4.4.4 Титан и његове легуре	26
4.4.4.1 Заваривање титана	27
4.4.5 Међусобно заваривање различитих нежелезних метала	28
5. ПРЕГЛЕД ВИСОКОЛЕГИРАНИХ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА	29
5.1 Феритни челици	29
5.1.1 Физичке и механичке особине феритних челика (подужно и у жареном стању)	30
5.1.2 Хемијска постојаност феритних челика	30

5.1.3 Стандардизовани феритни челици отпорни према корозији (SRPS EN 10088-2:2002).....	31
5.2 Мартензитни челици.....	32
5.2.1 Подела и подручја примене мартензитних челика.....	32
5.2.2 Физичке и механичке особине мартензитних челика (стање QT/отврднуто таложењем).....	33
5.2.3 Хемијска постојаност мартензитних челика.....	33
5.2.4 Стандаризовани мартензитни челици отпорни према корозији (SRPS EN 10 088-2:2002).....	34
5.3 Аустенитни челици.....	34
5.3.1 Врсте аустенитних челика.....	35
5.3.2 Механичке особине аустенитних челика.....	36
5.3.3 Хемијска постојаност аустенитних челика.....	37
5.3.4 Стандардизовани аустенитни челици отпорни према корозији (SRPS EN 10 088-2:2002).....	38
5.4 Аустенитно-феритни (дулекс) челици.....	39
5.4.1 Физичке особине аустенитно-феритних челика.....	39
5.4.2 Механичке особине аустенитно-феритних челика.....	39
5.4.3 Хемијска постојаност аустенитно-феритних челика.....	40
5.4.4 Утицај садржаја ферита у аустенитно-феритним челицима.....	40
5.4.5 Стандардизовани аустенитно-феритни челици отпорни према корозији (SRPS EN 10 088-2:2002).....	41
5.5 Упоредне ознаке нерђајућих челика.....	41
6. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ВИСОКОЛЕГИРАНИХ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА.....	59
7. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ НЕКИХ ВИСОКОЛЕГИРАНИХ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА ПОМОЋУ ШЕФЛЕРОВОГ ДИЈАГРАМА.....	63
7.1 Пример оцене заварљивости аустенитног челика помоћу Шефлеровог дијаграма.....	64
7.2 Пример оцене заварљивости мартензитног челика помоћу Шефлеровог дијаграма.....	66
7.3 Пример оцене заварљивости феритног челика помоћу Шефлеровог дијаграма.....	68
8. ЗАКЉУЧАК.....	70
9. ЛИТЕРАТУРА.....	71

1. УВОД

Заваривање је поступак израде нераздвојивог споја успостављањем међуатомских веза између делова који се заварују, при коме се појединачно или комбиновано користи топлотна и механичка енергија, а неретко и додатни материјал. Заваривањем је могуће спајање метала са металом, неметала са неметалом као и метала са неметалом, али је у пракси знатно заступљено спајање метала са металом.

У савременој индустрији заваривање представља битан технолошки поступак, посебно у машиноградњи, грађевинарству, бродоградњи и процесној индустрији. Најчешћа примена поступка заваривања је за израду носећих металних конструкција спајањем појединих делова, за израду процесне опреме и за репаратуру поломљених или истрошених металних делова. Израда одговорних конструкција и делова је могућа закивањем и ливењем, али се применом поступка заваривања остварују знатне уштеде у материјалу; у односу на заковане конструкције око 20%, а у односу на одливке 20-50%, при чему се скраћује и време израде што је и један од главних разлога који доводи овај поступак на веома важно место у производњи.

За заваривање се зна од открића метала, као што је ковачко заваривање гвожђа, али развој савремених поступака заваривања почиње тек крајем XIX века, а њихова примена почиње средином XX века. Специјални поступци заваривања појављују се у пракси углавном после Другог светског рата, у складу са технолошким развојем и потребама њихове примене. Данас се сматра да је око 100 метода заваривања освојено и примењено у пракси, укључујући и лемљење, према класификацији Америчког друштва за заваривање (AWS-American Welding Society).

У техници се највише, као конструкциони материјал користе челици и ливена гвожђа, односно легуре гвожђа и угљеника, легуре обојених метала, а у новије време и легуре титана. Иако челици у основи представљају легуре гвожђа и угљеника у њима се увек налази и одређени проценат других елемената, било да су намерно додати или су у облику нежељених примеса. Намерно додати легирајући елементи представљају елементе који се додају челику у циљу побољшања његових особина, јер угљенични челици не могу испунити све конструкционе захтеве, којима се често тражи не само високи напон течења већ и добра жилавост, одређена динамичка издржљивост, граница пузања или одређене особине на високим или ниским температурама. Поред ових основних механичких особина морају понекад одређени делови имати и посебне особине као корозиону отпорност, термостойаност и тсл., које се могу добити само легирањем, односно додавањем других елемената. Углавном се за различите намене и конструкције траже и различита својства која се добијају додавањем различитих легирајућих елемената у зависности од тражених захтева. Још један битан фактор при пројектовању заварене контрукције је и цена јер је тежња да се остваре што веће уштеде, тако да материјал мора бити захтеваног састава и жељених својстава, али да при томе има и повољну цену.

Посебно место у производњи заузимају нерђајући челици и на топлоту отпорни челици (отпорност на пузање и ватроотпорност) који представљају групу челика под називом **специјални челици**.

У ову класу челика сврставају се:

- Нерђајући челици (отпорни на киселине и ватропостојани),
- Челици за повишене температуре (термостойани Cr-Mo-V челици) и
- Челици отпорни на хабање.

За разлику од обичних конструкционих челика, високолегирани специјални челици имају значајно лошију термичку проводност, већу електричну отпорност, веће топлотно издужење, нижи напон течења, делимично значајније повећано издужење при затезању и значајно нижу прелазну температуру.

На особине и понашање високолегираних челика знатан утицај има угљеник и легирајући елементи. Од посебног значаја за особине за примену и на понашање при заваривању је:

- утицај легирајућих елемената на фазну трансформацију;
- хемијски афинитет легирајућих елемената ка угљенику, тј. на образовање карбида и
- склоност легирајућих елемената ка стварању интеркристалних једињења (интерметалних фаза).

У овом раду акценат је стављен на групу челика под називом **нерђајући челици**. У ову групу спадају челици отпорни на киселине који су отпорни углавном на електрохемијску корозију (органске и неорганске киселине, једињења азота, растворе соли, база и киселина-електролите, агресивне животне намирнице) и ватроотпорни челици који се не оксидишу на ваздуху и сагорелим гасовима на температури преко 600°C. Челици отпорни на киселине морају имати удео Cr већи од 12%, а ватроотпорни више од 6% Cr и додатке Si и Al ради спречавања дубинске корозије. Према хемијском саставу нерђајући челици се могу поделити на: хромне, хром-никлове, и хром-манганске, а према стању испоруке могу бити ваљани и ливени.

Хром је основни елемент који карактерише нерђајуће и ватроотпорне челике, он побољшава његову отпорност према корозији. Већ при садржају 5% хрома челик показује повишену постојаност према хемијској корозији, али да би он заиста био нерђајући, треба повећати концентрацију хрома у износу преко 12%. Хром скоковито мења електропотенцијал из негативног у позитивни који челик чини нерђајућим. То је 1913. године енглески металург *Harry Bearly* случајно открио радећи на пројекту побољшања учинка цеви пушака да додавањем хрома нискоугљеничном челику долази до отпорности на корозију. Поред хрома код нерђајућих и хемијски постојаних челика сусрећу се и никл, молибден, као и додаток титана и ниобијума којима се постиже отпорност према деловању киселина.

Ваљани нерђајући челици се према металуршкој структури деле на *аустенитне, феритне, мартензитне и таложно ојачане*, а ливени на *термопостојане и корозионо-отпорне*.

Ако се челици отпорни на киселине дуготрајно одржавају на температури изнад 500°C долази до издвајања Cr по границама зрна и тиме осиромашења чврстог раствора у Cr. Ако проценат Cr у чврстом раствору падне на вредност мању од 12% настаје селективна међукристална корозија. Појава ове врсте корозије умањује се стабилизацијом челика (помоћу Ti, Nb или Ta који имају већи афинитет према угљенику него хром) или смањењем садржаја угљеника испод 0.03%, али уз снижавање термопостојаности.

Када високолегирани челик не показује отпорност према одређеном медијуму онда он у присуству тог медијума кородира више или мање равномерно, као и обични конструкциони челици. Уобичајени облик корозије је тачкаста корозија. Када челик показује корозиону отпорност према неком медијуму, овај облик корозије се појављује углавном на малом подручју корозионе агресивности, која настаје услед местимичног пробијања површинског заштитног слоја или због локалног смањења постојаности, као нпр. уклањањем заштитног слоја или његовим загађењем. Уколико корозија заузима већи део површине, на свим оштећеним местима површински слој је пробијен, а узрок

је агресивни медијум у односу на који је тај челик на граници хемијске постојаности. Код челика са сегрегацијама неметалних укључака почетак образовања тачкасте корозије се налази у зонама сегрегације. Сегрегација сумпора посебно доводи до почетка тачкасте корозије.

Интеркристална корозија (ИК) представља корозију која се јавља по границама зрна, а настаје као последица излучивања Cr карбида у зони утицаја топлоте (ЗУТ-у) завареног споја и осиромашењем удела Cr у металној основи. При нормалним условима заваривања челика са ниским процентом C и стабилизованих челика, код којих је C везан са Ti или Nb, неће доћи до издвајања Cr карбида, па због тога ни до појаве интеркристалне корозије.

Напонска корозија настаје, ако је челик на граници хемијске постојаности у односу на агресивни медијум, и довољно високо напрегнут затежућим напонима као што су унутрашњи напони при заваривању. При томе настају прслине које у случају без агресивног медијума не би настале. Површина може да буде светла и чиста, без знатних трагова нападнутости корозијом. Присуство хлора у агресивном медијуму и у малим количинама посебно доводи до напонске корозије нерђајућих челика. У случају када је материјал легиран са Mo, могућност да се појави напонска корозија је мања. Грубо брушење и зарези су иницијална места на које треба обратити пажњу у циљу спречавања напонске корозије.

При заваривању постоји разлика у понашању између високолегираних и нелегираних челика која произлази из разлике између оних особина које су од великог значаја за понашање при заваривању и настанак одређених грешака. Високолегирани челици имају знатно лошију термичку проводност и знатно веће термичко издужење, због чега долази до појаве напона и деформација. У циљу њиховог смањења до одговарајућих вредности већина ових челика (осим аустенитних) захтева предгревање.

У овом раду дати су основни појмови заварљивости, методе за њихово испитивање, као и преглед високолегираних нерђајућих челика са упоредним ознакама. Такође је указано и на опште проблеме заварљивости различитих техничких метала и легура. Пажња је посвећена и на оцену заварљивости високолегираних нерђајућих челика са објашњеним примерима поступка оцене заварљивости неких нерђајућих челика помоћу Шефлеровог дијаграма, а уз то је и прописана оптимална технологија РЕЛ-заваривања за дате примере.

2. ПОЈАМ И ДЕФИНИЦИЈА ЗАВАРЉИВОСТИ

Појам **заварљивост** представља комплексну технолошку карактеристику материјала којом се пре свега изражава утицај процеса заваривања на заварени спој и његово понашање у топлотном и деформационом смислу у току и после заваривања. Према томе може се рећи да заварљивост одређује релативну способност материјала да ствара заварене спојеве одабраном технологијом заваривања, а да при томе изведени спојеви одговарају свим захтевима који се од њих траже у различитим радним условима. То значи да, нпр. при РЕЛ-заваривању, материјал заварљив овим поступком може образовати спој чија су тражена својства приближно једнака својствима завариваног материјала. Тражена својства се односе на то да испуњавају техничке услове који се односе на механичке, структурне и хемијске особине метала шавова и зоне око шавова и споја у целини.

С обзиром на то да је заварљивост комплексан појам подела на уже појмове је од посебног значаја јер олакшава проучавање и оцену погодности материјала за одређене заварене конструкције. Према тој подели се посебно разматрају: *металуршка, конструкциона и технолошка заварљивост*.

Металуршка заварљивост материјала зависи од следећих фактора: хемијског састава, почетне структуре, начина производње материјала, садржаја гасова, неметалних укључака итд. Утицај на ову заварљивост имају све металуршке промене у материјалу које се јављају под дејством топлоте унете при заваривању. У току процеса заваривања може доћи до погоршања, тј. снижења механичких и технолошких својстава споја, нарочито у зони око шавова, што указује на то да код материјала лошије заварљивости могу настати знатне промене хемијског састава, као нпр. тврде и крте структурне компоненте, прслине и тсл., а све у зависности од датог случаја.

Утврђено је да метали и легуре немају способност заваривања са металуршке стране, ако се њихови саставни хемијски елементи не растварају у чврстом агрегатном стању него образују тврда и крта хемијска једињења (нпр. карбиде). За разлику од тога са металуршког становишта, способност заваривања имају сви хомогени метални материјали који образују чврсте растворе и нееутектичке или еутектичке смеше, ако се одабере одговарајући метод, поступак и технологија заваривања.

Конструкциона заварљивост показује утицај више параметара на пројектовање заварене конструкције, нпр. дебљине, врсте, броја и распореда спојева, величине шавова и њихове расподеле, које конструктор поставља пројектним захтевом за дату конструкцију зависно од начина оптерећења и радних услова.

Технолошка заварљивост обухвата утицај технолошких параметара на својства завареног споја, нпр. додатног материјала, технологије и поступка заваривања, погонске енергије (унос топлоте), брзине хлађења, итд. Притом се цени да ли се технолошки поступак изводи без проблема или се морају применити посебне мере (предгревање, жарење, рад у специјалним атмосферама), а оцена се даје према предузетим мерама и добијеним резултатима.

Са оперативног становишта које се односи према понашању неких материјала у току процеса заваривања или наваривања, који се оцењују као “добро заварљиви” само у случају када је добијени шав чист и хомоген, тј. када се основни и додатни материјал стапају у хомогену легуру, а притом се топе без тешкоћа, без претераног прскања и појаве прслина, гасних мехурова и других грешака. На оперативну заварљивост утичу такође и нечистоће на страницама жлеба и у околини: прљавштине, масти и уља,

коварина и тсл., па је неопходно да се све наведено одстрани из зоне топљења у току припреме за заваривање.

Општа заварљивост представља глобалну оцену појединачно објашњених компонената заварљивости при чему се за коначну оцену процењује већи број фактора, а они су: основни и додатни материјал, вештина заваривача, врста напрезања у шавовима и у близини концентратора напона. Све претходно наведено се разликује од датог случаја. При процени склоности завареног споја ка кртом лому, веома је битно да ли је спој способан да све сопствене велике напоне поништи или смањи пластичним деформисањем, односно претварањем еластичних деформација у пластичне.

Оцена заварљивости метала и легура се односи на то да се унапред уоче особине заварених спојева после заваривања. Коначне особине за дати материјал и технологију зависе од процеса и појава које се дешавају и настају у основним зонама завареног споја:

- у шаву, где се материјал потпуно топи и меша са додатним материјалом, а затим очвршћава,
- у прелазној зони-зони стапања полуистопљеног материјала и
- у ЗУТ-у, где се основни материјал у чврстом агрегатном стању различито понаша због неједнаких максималних температура и брзина хлађења у неким тачкама ЗУТ-а.

Само неке промене настале у овим зонама могу се непосредно запазити, док се о већини закључује на основу резултата испитивања већ изведених пробних спојева, односно оцењује се склоност материјала ка образовању прслина, склоност према кртом лому, старењу и тсл.

Према наведеном може се закључити да је при заваривању неког материјала потребно утврдити:

1. Како се материјал понаша за време заваривања усвојеним технолошким поступком,
2. Како се материјал понаша у најтежим условима заваривања.

То значи да се од завариваног материјала захтева добра заварљивост и поузданост споја, односно да су завари компактни и спојеви непрекидни, а шав и његова околина довољно јаки и пластични да издрже и сва напрезања приликом заваривања, тј. да поседују одговарајућу технолошку чврстоћу да издрже сва непредвиђена напрезања у току експлоатације.

Образовање нових структура у завареним спојевима зависи од кинетике кристализације и преображаја унутрашње грађе у чврстом стању све зависно од услова заваривања, хемијског састава основног и додатног материјала и стања растопа. Према томе, за неке материјале (ливено гвожђе, бакар), добра металуршка заварљивост не представља истовремено и довољну глобалну заварљивост, јер се метал шава и ЗУТ, и поред добре металуршке заварљивости могу знатно разликовати од основног материјала поготову по механичким особинама и херметичности споја. Због тога ће и при доброј металуршкој заварљивости, тек, технолошка заварљивост указати на способност основног материјала да се одабраном технологијом остваре тражена својства и компактан спој. То доказује да се, пре свега полазећи од добре металуршке заварљивости, може изабрати одговарајући метод и поступак заваривања који даје заварени спој одговарајућег квалитета.

Према познатим сазнањима за оцену и дефиницију заварљивости запажа се да нема једнозначних и бројно одређених величина, ове за праксу важне карактеристике.

Као пример може се навести најраспрострањенија дефиниција заварљивости Међународног института за заваривање (IIW) која гласи:

„Метални материјал се сматра, на одређени начин заварљив, ако помоћу заваривања, при коришћењу одговарајуће технике спајања, настану јединствени метални спојеви, који испуњавају захтеве, који се постављају за својства локалних шавова и њихов утицај на чврстоћу конструкције“.

Општи смисао ове дефиниције и других дефиниција заварљивости је то да су непотпуне и неподобне за праксу што упућује на даља истраживања заварљивости посебно из аспекта поузданости. То је разумљиво, јер је заварљивост комплексан појам и својство зависно од материјала и његовог понашања у току и после заваривања, а такође и од технолошког поступка заваривања, као и од врсте заварене конструкције. Из наведеног се запажа да за оцену заварљивости треба увек узимати у обзир узајамну везу (1) *конструкције* (крутост, дебљина, врста споја), (2) *материјала* (способност заваривања) и (3) *технологије* (могућност заваривања). Због повезаности ових чинилаца производног система није увек могуће заварљивост оценити само једном врстом практичних проба заварљивости, па се за челике уводе допунски показатељи који се односе на:

- структуру,
- компактност,
- механичка својства и др.

У пракси су уобичајена два приступа за оцену заварљивости:

- процена задовољавајућих вредности показатеља заварљивости за испитивани облик споја, материјал и начин заваривања (тестирање материјала) и
- избор услова и других мера при заваривању да би се постигли задовољавајући резултати (потврда технологије).

Практичним пробама одређују се поједини видови заварљивости којима се оцењује подобност испитиваног материјала и одабране технологије. Најважнији критеријум за оцену заварљивости је одржавање металног континуитета, тј. целовитости завареног споја, што може бити нарушено кад год се појаве прслине одређене величине и распореда. Према механизму настајања прслине могу бити:

- вруће (топле),
- хладне,
- ламеларне и
- прслине жарења.

Поред наведеног критеријума целовитости, битне су и граничне механичке особине:

- Тврдоћа завареног споја (укључујући метал шава, ЗУТ и ОМ),
- Својства отпорности и
- Ударна жилавост (укључујући метал шава, ЗУТ и ОМ).

Вредности тврдоће и затезне јачине, као међусобно линеарно зависне величине код челика, користе се као једноставан показатељ заварљивости јер њихово повећање у ЗУТ-у указује на смањење пластичности и ударне жилавости, односно погоршање заварљивости.

Ударна жилавост је индикатор који најбоље указује на промене технологије и/или режима заваривања, које се нарочито испољавају у ЗУТ-у, па се често оцена заварљивости доноси испитивањем жилавости у ЗУТ-у, зони стапања и основном материјалу.

3. МЕТОДЕ ЗА ИСПИТИВАЊЕ ЗАВАРЉИВОСТИ

Познато је да у пракси нема “идеалне заварљивости”, што значи да се ниједним поступком заваривања не може добити спој потпуно истих особина у шаву, ЗУТ-у и основном материјалу.

Због разлике између стварне и идеалне заварљивости, а такође и због неизбежних промена својстава материјала насталих при заваривању, неопходно је проценити граничне величине неких показатеља заварљивости.

Према литературним препорукама полазну основу за процену заварљивости непознатог материјала, представља одређивање хемијског састава и механичких особина па се у том смислу користе:

1. Рачунске и емпиријске методе,
2. Практичне пробе заварљивости (лабораторијске и технолошке) и
3. КНЗ дијаграми.

Подаци потребни за оцену заварљивости горе наведеним методама:

- Хемијски састав материјала (челика),
- Дебљина, тип и понекад крутост завареног споја и
- Начин заваривања.

3.1 Рачунске методе

Процена заварљивости на основу хемијског састава челика је оријентациона и заснива се на израчунавању тзв. хемијски еквивалентног угљеника – CE, којим се исказује позната чињеница да се повећањем садржаја угљеника у челику погоршава заварљивост. Притом се негативан утицај других хемијских елемената у челику, изражава коефицијентом еквивалентности у односу на угљеник.

Према томе се за закаљиве угљеничне челике хемијски еквивалентни угљеник израчунава према следећем изразу:

$$CE = C + \frac{Si}{4} + \frac{Mn}{4}, \%$$

из којег се запажа да повећање садржаја угљеника погоршава заварљивост четири пута више у односу на пратеће елементе-силицијум и манган. За угљеничне челике са повишеним садржајем мангана и хемијских елемената хрома и молибдена, који повећавају склоност ка закаљивању, и тиме негативно утичу на заварљивост, употребљава се следећи израз:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}, \%$$

У пракси је највише заступљена формула Међународног института за заваривање познатија као IPW-формула која служи за испитивање заварљивости угљеничних (нелегираних) челика и угљенично-манганских челика (C-Mn), али не и за нисколегиране челике повишене јачине или нисколегиране Cr-Mo челике:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \%$$

Испитивањем утицаја СЕ на тврдоћу у ЗУТ-у установљена је корелациона веза:

$$HV_{max} = 1200 \cdot CE - 200 \text{ и}$$

$$HV_{min} = 1200 \cdot CE - 260.$$

Ова веза важи у границама $0.2 < CE < 0.6$, јер изван њих зависност HV-CE није више линеарна. Уз велика упрошћења и занемаривањем низа утицајних фактора, челик се може сматрати заварљивим ако крајња тврдоћа у ЗУТ-у не надмаши 350 HV, јер се сматра да се до ове вредности не формира мартензитна структура у ЗУТ-у. Ова гранична тврдоћа одговара вредности $CE = 0.45\%$, тако да се усваја да су челици са $CE < 45\%$ заварљиви без примене посебних мера, док су челици са $CE > 0.45\%$ заварљиви уз примену посебних мера или незаварљиви.

Садржај водоника, тврдоћа, дебљина и крутост имају знатан утицај на појаву хладних прелина, па се због међусобног дејства не може одредити максимална дозвољена тврдоћа ЗУТ-а без узимања у обзир дифундованог водоника. Према томе се за челике повишене јачине, код којих се параметарским једначинама углавном оцењује заварљивост, вредност максималне тврдоће повезује са садржајем дифундованог водоника према следећем:

Садржај дифундованог водоника, Н у $\text{cm}^3/100\text{g}$	Допуштена тврдоћа ЗУТ-а, HV
20	350
10-20	375
5-10	400
1-5	450

Количина дифундованог водоника у металу шава одређује се стандардним методама (по SRPS С.НЗ.018:1983 глицеринским тестом, а савременија метода је хроматографски-метода која се заснива на различитој апсорпцији од стране апсорбента појединих делова полазне смеше; предност овог испитивања је што поступак траје неколико сати, а не неколико дана као код глицеринског теста). Грубо се може усвојити да се садржај дифундованог водоника за одређене поступке заваривања, налази у границама датим у табели 3.1.

Табела 3.1 Садржај дифундованог водоника у металу шава

Начин заваривања	Садржај дифундованог водоника у $\text{cm}^3/100\text{g}$
У смеси гасова CO_2 или Ar	
• Чиста жица	2-7
• Прљава жица	6-12
Ручно електролучно	
• Електроде сушене при $400-500^\circ\text{C}$	3-7
• Електроде базичне несушене	12-20
• Електроде сушене при $100-150^\circ\text{C}$	6-12
• Електроде рутилних облога	20-35
Под прахом (EPP)	
• Чиста жица и сушен прах	5-10
• Прљава жица и несушен прах	10-25

За угљеничне и нисколегиране челике очекивана максимална тврдоћа у ЗУТ-у се може израчунати према њиховом хемијском саставу:

$$HV_{max} = 90 + 1050 \cdot C + 47 \cdot Si + 75 \cdot Mn + 30 \cdot Ni + 31 \cdot Cr .$$

Савременим истраживањима је уведен посебан израз $A(C)$ за корекцију утицаја легирајућих елемената у зависности од садржаја угљеника у челику:

$$CEN = C + A(C) \cdot CE', \text{ где су вредности } A(C) \text{ дате у табели 3.2:}$$

Табела 3.2 Вредности $A(C)$ у зависности од % C

C, %	до 0.08	0.08	0.12	0.16	0.20	0.26
A(C)	0.500	0.584	0.750	0.916	0.980	0.988

а CE' изразом:

$$CE' = \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + V + Nb}{5} + 5B .$$

Статичком обрадом експерименталних резултата дошло се и до једначине облика:

$$CEK = \frac{2CE + CE'}{3} + 0.05 .$$

На основу практичних испитивања установљено је да је једначина CE примењива за челике који имају садржај $C \geq 0.17\%$, а комбинована једначина CEK за челике који имају $C < 0.17\%$.

Из ових и других формула за CE уочава се разлика у вредностима коефицијената утицаја појединих хемијских елемената, а разлог су различити индивидуални приступи и експерименталне провере.

3.2 Прорачун температуре предгревања

Велики број челика, а пре свега челици повишене јачине поседују склоност ка појави хладних прслина, због чега се предузимају мере у циљу њиховог спречавања што се углавном односи на примену технологија заваривања које искључују појаву трансформационе кртости. Хладне прслине се појављују ако у ЗУТ-у настане мартензитна или доња бејнитна структура и истовремено се појаве велике количине дифундованог водоника и сопствени напони. Два задња фактора су у зависности од конструкционо-технолошких решења, при чему се на њих не може знатније утицати. Према томе, остаје могућност да се избегну структуре каљења при трансформацији аустенита, што се углавном постиже повећањем количине унете топлоте (линијске енергије заваривања) или предгревањем; у оба случаја смањује се брзина хлађења при температури најмање стабилности аустенита.

За прорачун температуре предгревања највише се користи формула Сеферијана:

$$T = 350\sqrt{|CE|_u - 0.25}, ^\circ\text{C} .$$

Знатно сложеније одређивање температуре предгревања (T_p) је по методи BWRA (British Welding Research Association).

Температура предгревања неких челика одређује се помоћу параметарских једначина (P_1): $T_p = 1440 \cdot P_i - 392, ^\circ\text{C} .$

- Стварна брзина хлађења ЗУТ-а $v_h=300^\circ\text{C}$ и критична брзина v_{kr} , при којој у ЗУТ-у настаје чисто мартензитна структура одређује се по једначини:

$$\log v_{kr} = 3.0 - (4.62C + 1.05Mn + 0.54Ni + 0.50Cr + 0.66Mo), \frac{^\circ\text{C}}{s}.$$

У завареним спојевима са $\log (v_h/v_{kr}) < -0.6$ прслине се не јављају, док се за $\log (v_h/v_{kr}) < 0.3$ прслине готово увек јављају. Брзина хлађења v_h , израчуната из односа $\log (v_h/v_{kr}) < -0.6$, који одређује услове заваривања са предгревањем или без њега.

- За оцену склоности ка прслинама у примени је и израз којим се узима у обзир садржај дифундованог водоника и крутост споја (k):

$$P_s = \log \frac{v_h}{v_{kr}} + \frac{H}{10} + \frac{k}{500},$$

при $P_s = -0.5$ прслине се не појављују, за $P_s = 0.3$ вероватноћа појаве прслине је 50%, а при $P_s > 1$ прслине увек настају.

- Интензитет крутости (k) израчунава се у зависности од дебљине лима (s) у mm пема изразу $k = 66 \cdot s$; а H се усваја из таблице 3.1, или боље експериментима на пробним узорцима.

Стављајући у горњи израз $P_s = -0.5$ могуће је израчунати повољну брзину хлађења при 300°C и на основу тога, за познате параметре заваривања, и температуру предгревања.

Без обзира на начин прорачуна температуре предгревања, није оправдано да она буде изнад температуре M_s -почетка мартензитног преображаја. У супротном могу се појавити вруће прслине или да се код термомеханички обрађених челика (ТМО) пониште карактеристике добијене специјалном термичком обрадом. То је и разлог што се температура предгревања данас тако ретко одређује из дијаграма изотермичког или континуалног разлагања аустенита за дати челик, јер се при коришћењу тих дијаграма добија температура предгревања $30-50^\circ\text{C}$ изнад температуре M_s .

Из аспекта поспешивања издвајања водоника из области завареног споја, знатан утицај има и накнадно загревање (отпуштање) заваара или шава пре њиховог хлађења до собне температуре. Уношење завареног споја у пећ $T=100-200^\circ\text{C}$, чим се заврши заваривање, знатно се смањује брзина хлађења при температурама испод 300°C . Ако се отпуштање напона не може извести одмах после заваривања, комплетан заварени спој се може држати у пећи при температури која омогућава да се аустенит трансформише у повољнију микроструктуру од мартензита. Ова накнадна термичка обрада такође поспешује дифузију водоника из радног предмета. За већину угљеничних челика температура накнадне термичке обраде износи $590-675^\circ\text{C}$. За конструкционе челике повишене јачине често је довољно накнадно загревање у току 30-60 минута при температури $100-150^\circ\text{C}$, док је за дебљине изнад 40 mm понекад потребно накнадно загревање од неколико сати (3-5 часова). При заваривању предмета веома великих пресека (нпр. 300 mm) заваривање мора више пута да се прекида и предмети накнадно догревају у циљу добијања поузданих заварених спојева.

3.3 Практичне пробе заварљивости (лабораторијске и технолошке пробе)

Практично (лабораторијски) процена заварљивости представља проучавање појаве прслина у завареном споју: (1) у току процеса заваривања, (2) непосредно после тога или (3) после одређеног времена (~48 часова). Међутим, експериментална процена заварљивости је проширена и на испитивање појаве прслина при накнадном загревању, тј. термичкој обради, као и на настајање прслина при радним напрезањима која могу проузроковати појаву експлоатационих прслина.

Прслине у завареном споју су последица напонско-деформационог стања насталог због неравномерног ширења и скупљања при заваривању. Код материјала недовољне пластичности у завареном споју се могу појавити прслине.

Оцена способности материјала да се одупре овим прслинама заснива се на одређивању критичне деформације у функцији температуре, као и на одређивању критичног напона при коме се јављају прслине.

Битно је запазити код свих метода за испитивање заварљивости да све оне утврђују врсту и степен промене испитиваног узорка услед уноса топлоте и неслободних деформација.

Код већине практичних проба, узорци се излажу термичким циклусима: локално, по целом профилу или загревању и хлађењу исто као и при заваривању и тсл. Степен насталих промена утврђује се стандардним методама испитивања (затезањем, савијањем, мерењем тврдоће, жилавости и др.), пре и после термичког дејства, а по потреби се металографски испитују шав и околина.

У циљу суштинског приказа неких од ових испитивања биће приказане само карактеристичне пробе из појединих група.

3.3.1 Пробе склоности ка лому (топлом и хладном)

Ова испитивања су веома значајна, а посебно кад се код неких конструкција предвиђа употреба нових основних и додатних материјала. Нови материјали се могу употребити тек при провери њихових термофизичких и механичких особина, као и њихове погодности за одређене методе заваривања. Највећу примену имају пробе склоности ка појави хладних прслина, јер се при испитивању може разматрати утицај параметара заваривања, тј. уноса топлоте.

Пробе хладног лома, тј. пробе склоности ка хладним прслинама, деле се на две групе:

1. Пробе слободних (неукрућених) спојева и
2. Пробе укрућених спојева.

У групи 2 разликују се:

- **Пробе са самоукљештењем** које се изводе погодном монтажом елемената пробног споја тако да долази до самоукљештења шавова или споја и
- **Пробе са насилним укљештењем** помоћу посебних алата и направа којима се елементи споја фиксирају. При томе, код неких проба постоји могућност промене степена укрућења или брзине хлађења односно термичке строгости. Тако се може оценити појединачни утицај на хладни лом како укрућења тако и брзине хлађења.

Пробе са диригованим напрезањима примењују се за оцену склоности ка хладном лому после заваривања; чим се спој изведе, делује се спољним оптерећењем на заварене узорке. Предност ових проба је свакако могућност избора врсте и величине оптерећења, који највише утичу на хладни лом.

Пробе симулирањем термичких циклуса се изводе на посебно конструисаним уређајима-симулаторима и по методи BWRA. У симулаторима се пробни незаварени узорци излажу температурским циклусима који симулирају заваривачке циклусе у појединим тачкама ЗУТ-а различито удаљеним од осе шава. На тај се начин могу утврдити промене својстава отпорности и пластичности у ЗУТ-у, зависно од режима загревања или хлађења.

Постоји неколико врста симулатора заснованих на електроотпорском или индукционом загревању пробних узорака. У свету су данас најпознатији симулатори Umet (Русија), Weld Thermal Cycle Simulator, фирме Smit-Wels (USA) и Thermorestor-W (Јапан), фирме Fuji Electronic Industrials Co. Ltd. Најбољи су симулатори који имитирају не само термички већ и деформациони циклус заваривања као и утицај водоника на особине испитиваног челичног узорка.

За испитивање по методи BWRA користи се једноставна техника симулирања која се састоји у загревању узорака у пећима до 950°C и затим хлађењу различитим брзинама; потом се узорци испитују затезањем и/или ударним затезањем (одређује се ударна жилавост).

На основу резултата аналитичке процене заварљивости и њене провере практичним пробама (табела 3.2), могуће је дати оцену заварљивости и предложити мере да се она побољша. Напомена је да се критичне вредности усвојеног показатеља заварљивости (тврдоћа, жилавост, склоност ка песлинама, итд.) могу добити:

- без посебних мера, када се каже да је материјал заварљив,
- уз примену посебних мера, кад је материјал условно заварљив,
- уз примену таквих мера да су оне неоправдане и економски неисплативе; тада је материјал тешко заварљив.

За прецизнију оцену заварљивости, будући да је структура ЗУТ-а зависна од низа фактора: хемијског састава, дебљине, као и од параметара заваривања (нпр. уноса топлоте) који су повезани са температурским циклусом, треба узети у обзир и трансформационе температуре које се за конструкционе челике у условима континуалног хлађења могу усвојити из модификованих дијаграма континуалног хлађења (KNZ). Поређењем трансформационих структура из KNZ-дијаграма са реално добијеним структурама при заваривању-оцењује се могућност дириговане промене структуре односно својства завариваног челика.

Преглед неких практичних метода за испитивање заварљивости дат је у табели 3.2.

Табела 3.2 Преглед практичних проба за оцену заварљивости

Критеријум		Врста пробе	Назив пробе	Оцена
Склонет ка прелинама	Хладним	Самоукрућење	CTS, крстаста, Fisco, Tekken, кружна	Прелине се појављују или не појављују
		Са регулисаним напоном	TRC, RRC, IMPLANT, LTP	
		Симулирање термичких циклуса	BWRA и имитацијом загревања: -електричним отпором -индукцијом (струјом високе фреквенције)	
	Топлим	Укрућена	Teken, Fisco, кружна	
	Ламеларним	Са регулисаним напоном	Varestraint, Bauman	
	Жарења	Металографска-структурна механичка	Испитивање затезањем у правцу дебљине лима	
Механичке особине	Тврдоћа Својства отпорности Ударна жилавост	Мерење тврдоће	Метода	$HV < HV_{\max}$ $R_m^{OM} \approx R_m^{sava}$ Прелазна температура
		Испитивање затезањем Испитивање ударне жилавости	Затезање Метод Шарпи	

3.3.2 Процена заварљивости на основу КНЗ дијаграма

У савремене методе, за оцену заварљивости осим поменутих спадају и трансформациони КНЗ дијаграми. За неке конструкционе челике се могу наћи најчешће у страној литератури, дијаграми хлађења у условима заваривања, тј. дијаграми разлагања потхлађеног аустенита под утицајем различитих брзина хлађења које одговарају различитим температурским циклусима. Дијаграми ове врсте су дати у литератури у полуалгоритамском координатном систему температура – време или температура – време хлађења од 800 до 500°C. Ово време се означава са $t_{8/5}$ и такође у логаритамској подели се наноси на апцисну осу дијаграма.

4. ОПШТЕ НАПОМЕНЕ О ЗАВАРЉИВОСТИ РАЗЛИЧИТИХ ТЕХНИЧКИХ МЕТАЛА И ЛЕГУРА

4.1 Легуре Fe-Fe₃C (челици)

Већина заварених конструкција израђује се од ваљаних нискоугљеничних и нисколегираних челика.

Нискоугљенични челици су основне легуре гвожђа и угљеника до 0.25%, са примесима силицијума до 0.60% и мангана до 0.80%, као и нечистоћа: фосфора до 0.070% и сумпора до 0.060%. Челици са ниским садржајем угљеника (0.04-0.15% C) употребљавају се за каросеријске лимове (заварују се углавном тачкасто, GPZ, CO₂) а челици са 0.15-0.30% C-“меки” челици-користе се за армирани бетон, израду челичних мостова, цевовода, делова пољопривредних машина и сличних производа. “Меки” челици могу се лако спајати свим методима заваривања топљењем, а заварени спојеви су одличног квалитета. Ипак највише се заварују поступцима: ГПЗ (C₂H₂+O₂), РЕЛ и CO₂.

Средњеугљенични челици (0.26-0.60% C) спадају у групу условно заварљивих челика, а намењени су за израду машина, трактора, млинова; пошто су условно заварљиви, неопходно је предгревање или/и накнадна термичка обрада. За челике са C > 0.40% додатни материјал за РЕЛ су обложене електроде исте као и за меке челике. Средњеугљенични челици употребљавају се и за делове отпорне на хабање, као што су зупчаници, пужни транспортери, клинови и др. Ситни машински делови израђују се од средњеугљеничних челика који се испоручују у облику лимова, трака, плоча, жица и хладно вучених или ваљаних шипки (обработом челика на хладно повећавају се својства отпорности: напон течења – R_{p0.2} и јачина на кидање - R_m, а опадају својства пластичности). Оцена заварљивости ове врсте челика даје се на основу еквивалентног угљеника (CE).

Високоугљенични челици (C > 0.6%) се заварују или наварују у циљу репаратуре оштећених радних делова и склопова или за наношење слојева високе тврдоће на радне површине које су изложене знатном хабању.

Алатни угљенични челици (0.60-1.50% C), се теже заварују због високог садржаја угљеника. Гасно заваривање (ГПЗ) се може применити само за челике у доњем опсегу горенаведеног садржаја угљеника. Додатни материјал треба да буде прилагођен основном материјалу. Неопходно је предгревање неутралним пламеном и споро хлађење после заваривања (затрпавањем врућег радног предмета у суви песак или пепео). Уколико се заварује РЕЛ-ом потребно је најпре одабрати најпогоднију электроду и оджарити радне предмете, а после заваривања извести термичку обраду с циљем да се успоставе првобитне карактеристике материјала. Још један начин је да се употребе две врсте електрода: првом, релативно меком електродом, полаже се слој којим се облажу зидови већ предгрејаног жлеба, односно целог предмета. После облагања жлеба, он се даље попуњава електродом која је подобна основном материјалу. На овај начин се разблажује концентрација угљеника у шаву, па се тако спољне површине лакше уварују у шав, а спој има довољну истегљивост, пластичност и живавост.

Високомангаски челици садрже 12% Mn или више, познатији под називом Хадфилдови челици. Данас се ови челици углавном употребљавају за скретнице железничких и трамвајских шина, за вођице покретних степеница, за чекиће млинова за разбијање руда, као и друге делове изложене знатном ударном оптерећењу (кашике багера, ударне греде дробилица за камен и тсл.). Од манганског челика израђују се и

делови транспортних уређаја који су изложени абразивном хабању расутим материјалима, као и млинови за руде и транспорт шљаке, песка, цемента, пепела, житарица у силосима и тсл. Почетна структура високоманганских челика је аустенитна, а при ударном радном оптерећењу образује се веома тврд (мартензитни) површински слој повећане отпорности на хабање. На тај начин се постиже да подлога остане пластична и жилава, а хабајући слој постаје изразито тврд. Ипак се при дуготрајној експлоатацији и тај слој хаба, те се мора репарирати. То је погодно извести РЕЛ-наваривањем помоћу високоманганске електроде која је слична основном металу. При самом наваривању треба применити посебне мере заштите на раду, с обзиром на то да се манган у ваздуху оксидише у отрован оксид Mn_3O_4 . Пошто је наварени покривни слој високоманганског челика веома тврд и крт, повремено се мора проверавати на прсLINE које се могу појавити не само у навареном слоју, већ и проширити у аустенитну подлогу. У случају да се то деси, неопходно је тај део демонтирати, а прсLINE пребрусити и наварити нови слој.

Челици повишене јачине се све више употребљавају за израду заварених конструкција повећане отпорности ($R_{p0.2}$ и R_m) што омогућава да се маса смањи за 10-30% за разлику од нискоугљеничних челика. Зависно од класе, челици повишене јачине могу бити добро или условно заварљиви. Највише се примењују за каросеријске лимове и грађевинске конструкције. Разликују се следеће врсте челика повишене јачине:

- **С-Мп челици** ($C < 0.20\%$, $Mn \approx 1.20\%$, $Si \approx 0.50\%$); испоручују се као шипке, профили, плоче, лимови;
- **Микролегирани финозрни челици** (термомеханички ваљани челици), незнатно легирани са Nb, Ti, V, Al, Ta, Zr; збир легирајућих елемената $< 0.20\%$;
- **Нисколегирани челици повишене јачине:** а) бејнитни – 0.50% Мо, 0.003% В, 0.18% С, са нешто повећаним % Мп и Si, б) побољшани (каљени + високо отпуштени) нпр. амерички T1 и шведски Weldox, Hardox, ...

Горенаведени челици се могу заваривати углавном свим електролучним методама, али је потребно предгревање да не би дошло до закаљивања. У случају да се заварују делови различитих дебљина, температура предгревања одређује се на основу дебљег предмета. Мора се спречити већа апсорпција водоника тако што се употребљавају нисководоничне електроде (базичне сушене код РЕЛ-а) или суви прах који даје нулти водоник код ЕПП поступка. Накнадна термичка обрада се ретко примењује.

Заварљиви хром-молибденски челици садрже до 0.35% С, 0.50-0.90% Cr и 0.50-1.00% Мо. Могу још имати мале количине V, Ti или Nb, углавном код челика за посебне намене. Због садржаја хрома (Cr), одликује их отпорност на корозију. Примењују се кад је неопходна и термостойаност, тј. одржавање својстава отпорности ($R_{p0.2}$ и R_m) на повишеним и високим температурама. Пре него што се приступи заваривању, потребно је извршити предгревање на 150°C и 260°C. Код челика који поседују еквивалентни угљеник већи од 0.45% (по формули МИЗ-а), после заваривања изводи се термичка обрада тако што се температура завршног заваара подиже за додатних 100°C, па се заварени спој прогреева довољно дуго да водоник дифундује из шавова. Најбоље је одржавати што краћи електрични лук, чиме се умањује апсорпција гасова из ваздуха и губитак хрома из шавова. За спојеве који у радним условима нису изложени високим температурама, спајање се може извести и заваривачким лемљењем. Хром-молибденски челици могу се заварити РЕЛ-ом, ТИГ-ом, МАГ/МИГ-ом и пуњеним жицама, као и заваривачким лемљењем окси-ацетиленским пламеном.

Нерђајући челици се деле на четири групе легура:

- Аустенитне,
- Феритне,
- Мартензитне и
- Преципитационо (таложно) ојачане.

Аустенитни нерђајући челици се највише примењују у савременој индустрији. Они садрже 16-30% Cr, 3-37% Ni и 2% Mn. Да би челик поседовао корозиону отпорност мора да садржи више од 12% Cr, а Ni даје челику жилаву аустенитну микроструктуру и на собној температури. Садржај угљеника у ковним аустенитним челицима се креће у опсегу од 0.03 до 0.25% C. Мале количине Si, P и S налазе се као укључци. Из ове групе челика најпознатији је 18Cr/8Ni (18% Cr, 8% Ni, и 0.08 до 0.20% C). Из аспекта заварљивости, пожељно би било да садржај угљеника буде што нижи, јер у супротном у ЗУТ-у може доћи до излучивања кртих карбида хрома и то у појасу око шави који је при заваривању био загрејан до температуре 625-815°C. Могу се заваривати било којом методом електролучног заваривања са додатним материјалом истог хемијског састава као и основни материјал. Пошто је производња ове врсте челика са ниским садржајем угљеника знатно скупља од оних са вишим садржајем угљеника, рентабилнија је израда челика са високим % угљеника, с тим што се проблем образовања карбида хрома решава додатком стабилизатора-титана или ниобијума. Ови елементи имају већи хемијски афинитет према угљенику него хром, те везују вишак угљеника, а хром остаје у чврстом раствору γ -кристалне решетке гвожђа у количини већој од 12% која је неопходна како би челик био корозионо отпоран. С обзиром на то да је процес излагања хрома из чврстог раствора дифузионе природе, потребно је и одређено време да из наведених појасева око шави дифундује угљеник. Због тога се препоручује што брже загревање и потоње хлађење, било прскањем воденим млазом (тзв. гашењем) или помоћу расхладних плоча, које се стављају на радне предмете (око шави). Применом ових мера неће бити времена за дифузију хрома из γ -Fe.

Феритни нерђајући челици садрже 10.50-30% Cr, с тим што ковне феритне легуре имају 0.08 и 0.20% C, а ливачке 0.50% C. Додају се и Al, Mo, Ti, Nb као стабилизатори ферита. Ове челике је могуће електролучно заваривати применом основних метода као и код других врста челика. Феритни челици са високим садржајем Cr и C склони су ка појави прслина. Осим тога, ЗУТ феритних челика је склон порасту металних зрна ако је при заваривању био дуго изложен високој температури. Крупнозрнаста структура око шави, доводи до пада жилавости, што се може умањити ако се заваривање изводи са мањим уносом топлоте (нижим напоном, струјом мање јачине и што већом брзином). Овако се смањују како време (t) излагања високој температури тако и максимална температура (T), што представља тзв. параметре аустенизације који пресудно утичу на величину аустенитних зрна. Температура предгревања треба да буде од 150 до 232°C, што доприноси смањењу унутрашњих напона и хладних прслина. Неопходно је извести међупролазно догревање како би се смањио пораст зрна у ЗУТ-у. Накнадна термичка обрада се састоји из жарења између 700 и 840°C, а потом следи брзо хлађење до између 540 и 370°C. Више врста електрода може се употребити за заваривање феритних челика. Усвојена аустенитна електрода, мора имати виши садржај Cr него основни материјал, чиме ће се надокнадити могући губици хрома из шави. Код ТИГ-а, треба користити додатни материјал сагласан основном материјалу. Заштитни гас може бити Ar, He или њихова мешавина. Код МИГ-а уочени су различити видови преноса додатног материјала са врха жице у купку. За пренос у облику спреја препоручује се Ar са 1% O₂. Кобинација He и Ar и 2.5% CO₂ даје краткоспојени пренос металних капљица.

Заваривање хромних мартензитних челика

Ове челике одликује велика тврдоћа, мала пластичност и жилавост. Садрже око 11-18% Cr и 0.15-1.20% C. Високи садржај C и Cr доводи до образовања мартензита кад год брзина хлађења завареног споја буде већа од критичне.

Хромни челици се могу заваривати свим електролучним методима. Предгревање до 260°C неопходно је да би се смањила брзина хлађења. Накнадна термичка обрада, тј. жарење може се применити за побољшање особина метала шава и ЗУТ-а. Овом термичком обрадом се смањује тврдоћа, а повећава жилавост и пластичност. Жарење се изводи тако што се површина шава загрева до око 700°C, а затим се заварени спој хлади у пећи загрејаној на 590°C. Најзад се радни предмет вади из пећи и споро хлади на мирном ваздуху.

Мартензитни челици се обично заварују аустенитном електродом, поготово у случајевима када је тешко извести накнадну термичку обраду. Кратак лук се препоручује за заваривање свих нерђајућих челика, јер се тиме умањује оксидација и губитак хрома. Мартензитни нерђајући челици који садрже више од 0.20% C се теже заварују, због склоности ка хладним прслинама, као уосталом и сви челици са повишеним садржајем угљеника.

4.2 Међусобно заваривање различитих легура из група Fe-C

У пракси је често потребно међусобно заварити одливке од ЛГ и челика, при чему треба имати у виду да се њихови хемијски састави, структуре, а тиме и механичке особине знатно разликују. Те разлике се не могу занемарити ни при заваривању нерђајућег челика за меки челик, нисколегираног челика за меки челик и легура никла за нерђајући челик и друге легуре. Веома је важно пре заваривања установити хемијски састав и особине метала чије се спајање планира. У току заваривања, у металној купки, топе се, мешају и растварају различити легирајући елементи из оба основна метала (ОМ) и додатног материјала (ДМ). Стога електроду треба изабрати пажљиво, како би се добиле потребне карактеристике новонастале легуре у шаву; по својствима отпорности шав може бити мање или веће јачине од основног метала. Легирање у шаву и промене у ЗУТ-у могу се предвидети коришћењем KHZ-дијаграма за одговарајући челик. При заваривању треба одржавати малу запремину заваривачке купке, да би растварање било минимално. Препоручује се попуна жлеба вишеструким праволинијским заварима, а не широким попречним слојевима.

Ако се температуре топљења спајаних метала разликују у границама до око 95°C, могуће их је заварити нормалном процедуром без икаквих тешкоћа. Међутим, ако је та разлика већа, неопходне су посебне мере као нпр., полагање првог слоја за облагање жлеба од додатног метала чија температура топљења одговара средњој вредности два разичита метала. Полагање завара је најбоље почети са стране метала више температуре топљења. Ово наношење посредног метала назива се облагање жлеба. Ако је само за један метал у хетерогеном споју потребно предгревање, он се мора предгрејати независно и изоловано од другог метала. Накнадна термичка обрада заварених спојева од различитих метала такође може бити спорна јер се после те обраде јачина споја може умањити испод јачине основног метала. Други начин спајања различитих метала је заваривачко лемљење. Тврдо лемљење је могуће извести при температури која неће довести до топљења ниједног метала у споју. Пошто се не топе основни метали нема ни разблаживања нити мешања метала. У том случају јачина споја је мања од јачине основног метала.

4.3 Заваривање ливеног гвожђа

Ливено гвожђе се теже заварује него челик због велике течљивости растопа, ниске пластичности и велике кртости ЗУТ-а. Све врсте техничких легура Fe-C које се сврставају у ливено гвожђе имају висок садржај угљеника (у границама од 2 до 4%). Део угљеника (0.8% C) може бити у везаном стању као карбид гвожђа (цементит-Fe₃C), а део у слободном стању као графит. Разликују се следеће врсте ливених гвожђа:

- Сиво ливено гвожђе;
- Темперовано или ковно ливено гвожђе;
- Нодуларно ливено гвожђе и
- Бело ливено гвожђе.

Висока температура при заваривању и неконтролисана брзина хлађења, могу довести до нежељене микроструктуре и појаве прслина у металу око шави. На границама шави може се образовати карбид гвожђа (цементит) као и високоугљенични мартензит. Ове структуре су веома крте и имају малу јачину на кидање. Неравномерна расподела температура у радном предмету доводи до појаве високих унутрашњих напона у овим кртим металима. Нодуларни и темпер лив су пластичнији па се због тога лакше заварују. Сиво ливено гвожђе се при добијању одливака спорије хлади и стога има структуру која се састоји из феритне, перлитне или феритно-перлитне металне основе и ламеларног графита.

4.3.1 Сиво ливено гвожђе

Може се заварити РЕЛ-ом применом електрода од никла или његових легура: Ni-Fe, Ni-Fe-Mn и Ni-Cu. Захваљујући никлу и додатном материјалу метал шави има довољну пластичност и добру машинску обрадивост, што је битно код репаратуре блокова мотора са унутрашњим сагоревањем са стране главе мотора која мора бити глатка и непропустљива. Такође се као додатни материјал може употребити чисто гвожђе са незнатним садржајем угљеника. Ипак, и у овом случају, угљеник дифундује из основног метала и раствара се у шаву што му повећава тврдоћу. Сиви лив се такође успешно може спајати заваривачким лемљењем помоћу окси-ацетиненског пламена и месинганих жица као додатног материјала.

4.3.2 Бело ливено гвожђе

Добија се од белог сировог гвожђа које се брзо хлади. Висок садржај угљеника задржава се потпуно у микроструктури у облику карбида гвожђа (Fe₃C) због чега је то гвожђе веома крто, те се сматра незаварљивим.

4.3.3 Темперовано ливено гвожђе

Добија се термичком обрадом одливака чија је првобитна структура била бело ливено гвожђе. Темперовањем се издваја графит у виду снежних пахуљица званих темпер-угљеник. Тако се добијају боља својства пластичности него код сивог лива и белог ливеног гвожђа, јер је код темпер-лива угљеник из цемента преображен у заобљени графит. Већа пластичност указује на бољу заварљивост, те се темпер-лив може заваривати употребом додатног материјала или електрода од легура никла. Потребно је водити рачуна о температури предгревања и међуслојној температури у циљу контролисаног уноса топлоте.

При РЕЛ-заваривању нодуларног и темпер лива препоручена температура предгревања и међуслојна температура је до 315°C. Темперовано ливено гвожђе, слично је сивом ливеном гвожђу, а разлика је у облику графита добијеног посебном термичком обрадом одливака. Код нодуларног лива графит је у облику лоптица, које се

формирају захваљујући првенствено магнезијуму убаченом у течно ливено гвожђе. Нодуларни лив се може заваривати никловом или чак челичном електродом. Поступак заваривања се мора изводити са најмањим уносом топлоте у метал, јер магнезијум може испарити и дифундовати ван шав. Ако се ово догоди, угљеник у металу шав кристалише у виду графитних ламела. То значи да ће структура споја бити нехомогена и да ће шав имати структуру сивог ливеног гвожђа, а основни материјал структуру нодуларног лива.

Припрема за заваривање радних предмета од ливеног гвожђа се изводи слично као код делова од челика. Обе стране жлеба и њихову околину потребно је очистити од свих нечистоћа. Странице жлеба закошавају се машинском обрадом, а за заваривачко лемљење потребно је одстранити графит са бокова жлеба да би спајање настало по целој површини бокова. Спојеви од ливеног гвожђа могу се ојачати увртањем голих завртњева у странице жлеба. Они су од “меког” челика, претапају се при заваривању и на крају улазе у састав метала шав. Препоручује се постављање подложне траке испод корена жлеба да би се спречило истицање (цурење) растопа. Ово, нарочито важи за одливке од сивог лива, јер он има највећу течљивост од свих техничких легура гвожђа.

4.4 Обојени метали и њихове легуре

У техничке метале ове врсте спадају: алуминијум, бакар, цинк, олово, калај, титан и њихове легуре. Када је реч о заварљивости ових метала и легура, треба истаћи да постоје велике разлике између физичких и металуршких особина легура Fe-C с једне стране и обојених метала с друге стране. При заваривању треба имати у виду да је термичка проводност лаких и обојених метала и легура знатно већа него легура гвожђа, а температура топљења нижа. Повећана термичка проводност условљава употребу снажнијих топлотних извора да би настало локално топљење метала по линији спајања. Дејство извора топлоте мора да буде што краће да не би дошло до прекомерног одвођења топлоте у основни материјал. Поред свега наведеног још треба истаћи да легуре обојених метала имају знатно мањи температурски интервал кристализације, тј. разлику температуре почетка и завршетка кристализације. Купка има повећану склоност ка оксидацији јер Mg, Al, Cu више апсорбују гасове из ваздуха него гвожђе. За успешно заваривање легура обојених метала неопходно је познавати особености појединих метала и легура из ове групе.

4.4.1 Алуминијум

Алуминијум је један од највише коришћених метала за израду заварених конструкција. Примењује се у многим стандардним облицима, а може се примарно прерађивати свим познатим методима механичке технологије. Полупроизводи од алуминијума могу се спајати углавном методама заваривања топљењем у заштити инертних гасова (Ar, He) и то топљивом електродном жицом (МИГ) и нетопљивом волфрамском електродом (ТИГ).

Алуминијум се одликује малом тежином, задовољавајућом јачином и добром корозионом отпорношћу. Веома је погодан за нискотемпературске примене; користи се у комерцијално чистом стању или легиран металима (Mn, Mg, Cu, Zn, Ni) и неметалом, силицијумом (Si). На тржишту су у понуди полупроизводи од легура алуминијума у различитим облицима: ваљаном и пресованом, вученом, екструдираним, ковном или ливеном. Сви поменути полупроизводи, изузев ливеног, припадају ковном алуминијуму. Најчешћи полупроизводи добијени пластичном прерадом су: плоче, ваљани профили, екструдирани профили и алуминијумске цеви.

4.4.1.1 Припрема алуминијумских предмета за заваривање

У пракси се алуминијум примењује било у кованом или ливеном стању. Методи заваривања за оба стања су слични, али у поступцима постоје извесне разлике. Неке карактеристике алуминијума чине га веома тешким за заваривање. То су пре свега:

- Лака оксидација на повишеним и високим температурама;
- Топљење алуминијума се одвија без промене боје;
- Температура топљења оксида алуминијума (Al_2O_3) ($\approx 2037^\circ\text{C}$) је много виша, него чистог алуминијума (660°C);
- Густина оксида алуминијума (Al_2O_3) је $3.8 \div 4.2 \text{ g/cm}^3$ и много је већа од густине чистог алуминијума - 2.7 g/cm^3 .

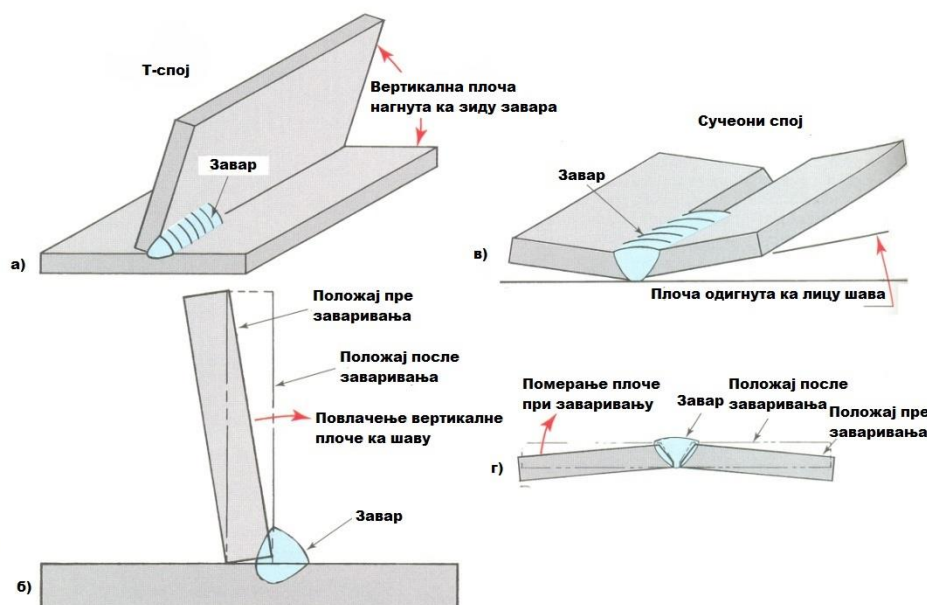
Без обзира на наведене тешкоће, могу се добити шавови чија својства отпорности не заостају за основним материјалом. Додатни материјал, се бира тако да по хемијском саставу одговара основном материјалу. Зато заваривач, пре избора додатног материјала, мора да буде упознат са хемијским саставом основног материјала. Радне стране треба механички очистити пре заваривања четком од нерђајућег челика или хемијски-урањањем радних предмета у средство за чишћење, а затим испирањем у води. Морају се поштовати све мере предострожности кад год се за чишћење користе хемијски раствори.

Један проблем који се јавља током заваривања алуминијума, а није уочен код других легура јесте такозвани *топли пролом*. Уколико се загревањем достигне температура топљења, алуминијум нагло губи чврстину. Заваривачка купка и околна површина могу се кроз проломити и пропасти кроз жлеб остављајући рупу у споју.

При заваривању алуминијума, заваривач се мора придржавати сличних технолошких услова као при заваривању челика; то се односи на захтеве да се оствари:

- Добро претапање;
- Добро уваривање;
- Правилан шав;
- Целовитост завареног споја.

При ГПЗ и РЕЛ-у често је потребно (неопходно) предгревање алуминијумских радних предмета да би се умањило велико одвођење топлоте. Довољно је предгревање од $150\text{--}200^\circ\text{C}$ које смањује кондукцију топлоте из купке и шава у основни материјал. За ТИГ и МИГ-заваривање алуминијума предгревање није потребно, али је потребно нанети припојне шавове, узимајући у обзир да се алуминијум при загревању и хлађењу више шири и скупља у односу на друге метале. Ове дилатације и контракције доводе до великих деформација танких радних предмета (слика 4.1а,в), јер алуминијум има малу крутост ($E^l = 71000 \text{ MPa}$, $E^c = 210000 \text{ MPa}$). Понекад и припојни шавови не могу да спрече претерано кривљење, па је потребно спојене елементе тако поставити да се после заваривања добије правилан облик. Пример погодног размештаја Al-плоча које се заварују дат је на слици 4.1б,г).



Слика 4.1 Примери погодног постављања Al-плоча при извођењу различитих спојева

4.4.1.2 Електролучно заваривање ковног алуминијума

Алуминијум и његове легуре најчешће се заварују методима ТИГ и МИГ, јер се у аргону постиже најбоља заштита од контаминације шаву и ЗУТ-а.

РЕЛ-заваривање обложеним електродама такође се користи за спајање алуминијума једносмерном струјом тако што се електрода везује на плус пол (E+). Алуминијум се заварује РЕЛ-ом само у случајевима када се не располаже ТИГ и МИГ уређајима којима се постижу много бољи заварени спојеви.

Окси-ацетиленско заваривање алуминијума може бити успешно, али и оно заостаје за ТИГ-ом и МИГ-ом. ГПЗ се не препоручује из следећих разлога:

- гасно заваривање даје велику запремину купке, која може да се проломи;
- нема ефекта катодног чишћења те се мора употребити топитељ. Ако се остаци топитеља на завареном споју потпуно не одстрани појавиће се корозија;
- гасним заваривањем одводи се из шаву у радни предмет више топлоте него код осталих метода, па се добија шири ЗУТ и веће деформације него код електролучних метода.

Алуминијум се може заваривати и тачкасто и електроотпорски, али због познате чињенице да је алуминијум врло добар проводник топлоте, јачина струје за отпорско заваривање мора да буде око 3 пута већа него за челични лим исте дебљине, а машине морају да буду знатно снажније. Оне би требало да имају могућност накнадног увођења силе истискивања, чиме се умањује опасност од појаве прелина при хлађењу.

4.4.2 Магнезијум

Већина заваривача није способна да разликује магнезијум и његове легуре од алуминијума, због чега често безуспешно покушавају да истом техником као и за алуминијум заваре магнезијум. Различити употребни предмети (машине за шишање, украсни поклопци точкова аутомобила и др.) израђују се ливењем у песку или кокилама, као и ковањем. За заваривање се углавном користе ТИГ/МИГ, а за репаратурне радове ГПЗ.

Тврдо и меко лемљење долазе у обзир само за предмете од чистог магнезијума.

Специфичности на које треба обратити пажњу при заваривању магнезијума су:

- при загревању до тачке топљења (650°C), магнезијум се интензивно оксидише;
- магнезијум се не сме заварити и топити на ваздуху, јер ће он сагоревати уз појаву белог pepела и
- остале тешкоће као при заваривању алуминијума.

Бели pepео може послужити за идентификовање магнезијума. Наиме, ако се сумња да ли је реч о магнезијуму или алуминијуму, може се турпијом са спорног предмета настругати нешто опипљака. Кад се опипљци изложе пламену, они ће, ако су од Mg, сагорети, а остаће бели pepео.

4.4.3 Бакар и његове легуре

Бакар у технички чистом стању поседује густину 8.96 g/cm^3 и температуру топљења 1083°C . Жарен, мек бакар има јачину на кидање око 200 MPa , а релативно издужење (истегљивост) око 50%. При ковању бакра на хладно јачина расте до 300 MPa , а опада жилавост и пластичност па је за даљу прераду на хладно, неопходно жарење, да би се добила пластичност. Ливкост му је рђава, јер у течном стању као и већина обојених метала лако раствара гасове те лив постаје шупљикав. При загревању изнад 400°C на површини бакарних делова формира се крти танак слој CuO , који отежава како ливење тако и заваривање. Може да се легира са више елемената, али су најважнији цинк и калај. Легуре бакар-цинк се зову месинзи, а легуре бакар-калај бронзе. Додатни легирајући елементи могу се користити да се образују различите врсте бронзи и месинга.

Заваривање бакра углавном се изводи ТИГ или МИГ-методом. РЕЛ долази у обзир само за репаратурне радове или за заваривање танких пресека. Кад се не располаже ТИГ-ом, окси-ацетиленско заваривање такође долази у обзир, али уз примену боракса или борне киселине као топитеља.

4.4.3.1 ТИГ – заваривање бакра

Изводи се једносмерном струјом са волфрамском електродом на минус полу (Е-). Препоручује се торирана (2% Th) волфрамска електрода. Предност се даје техници улево ("заваривање од себе") мада обе методе (улево и удесно) могу дати добре спојеве. Препорука је да се полажу уски и прави завари, јер би широки довели до оксидације купке. Додатни материјал мора да буде сличан основном металу. Као заштитни гас употребљава се аргон, хелијум или њихова мешавина. Аргон се препоручује за танке бакарне лимове дебљине до 1.6 mm . Хелијум се употребљава за дебље пресеке, јер се постиже дубље уваривање. Често се користе хелијумско-аргонске мешавине 2:1 или 3:1.

4.4.3.2 МИГ – заваривање бакра

Као додатни материјал употребљавају се бакарне електродне жице. Да би се унело довољно топлоте за топљење бакра и постигло добро уваривање препоручује се спрејни или пулсирајући спрејни пренос капљица додатног метала и заваривање удесно које је погодно за радове у положеном или хоризонталном положају (слика 4.2). Кад се заварује у вертикалном положају препоручује се смер одоздо-навише. Надглавно заваривање МИГ-ом се не препоручује. Потребно је полагати праве заваре, а не широке који се постижу њихањем између страница жлеба. Чисто аргонска заштита погодна је за делове дебљине до 6.4 mm . За веће дебљине боље је користити смешу 75% He и 25% Ar. Хелијум омогућава мањи унос топлоте у основни метал, мање предгревање и

дубље уваривање, а такође доприноси бржем преласку истопљеног додатног материјала у купку.

ПЗ	Сучеони спој	Угаони спој	Т-спој	Преклопни спој	Ивични спој
Положени					
Хоризонтални					
Вертикални					
Надглавни					

Слика 4.2 Варијанте основних положаја заваривања бакра за разне врсте спојева

Предгревање бакарних радних предмета се не препоручује уколико се спајају танки бакарни лимови. ТИГ-ом се без предгревања могу заваривати лимови дебљине до 3.2 mm, а МИГ-ом до 6.4 mm. Преко ових дебљина, потребно је извести предгревање. Наиме, дебљи бакарни предмети релативно брзо одводе топлоту из зоне заваривања па може изостати уваривање страница, или настати плитко уваривање. Осим тога, предгревање доприноси смањењу унутрашњих напона у завареном споју и такође повећању брзине заваривања. Тако се више топлоте из електричног лука може искористити за топљење основног метала, уместо за непотребно загревање бакарних плоча. Температуру предгревања треба бирати на основу дебљине радних предмета. Предгревање је обично од 95 до 540°C, с тим што је виша температура за ТИГ него за МИГ. Употребом хелијума као заштитног гаса такође се може смањити температура предгревања. На пример, ако се заварује ТИГ-ом дезоксидисани бакар дебљине 9.5 mm у аргонској заштити, усваја се предгревање око 370°C, док је за МИГ довољно предгревање 290 до 315°C. Заваривање било ТИГ-ом или МИГ-ом у заштити хелијума изводи се после предгревања од 230 до 260°C.

4.4.3.3 РЕЛ – заваривање бакра

Изводи се бакарним обложеним електродама што већег пречника који омогућава примену јаче струје, односно већи унос топлоте у основни материјал. Заваривање се мора изводити у положеном положају. Кад се заварују бакарни предмети дебљи од 3.2 mm, предлаже се температура предгревања 260°C или више.

4.4.3.4 Гасно заваривање бакра

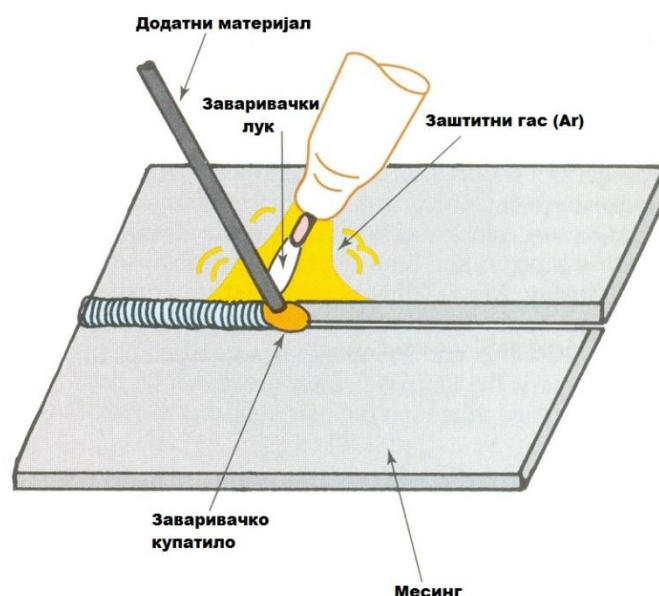
Бакар и његове легуре могуће је заварити окси-ацетиленским пламеном или другим горивим гасовима. Међутим, окси-ацетиленски пламен има предност у односу на друге угљоводоничне гасове, јер ослобађа највећу количину топлоте. Општа процедура је слична оној која се спроводи и при заваривању челика. Због бржег одвођења топлоте кроз бакар препоручује се избор пламеника за један до два броја већег него за челик исте дебљине. Бакарни предмети дебљи од 3.2 mm предгревају се пре заваривања до температуре нешто више него за ТИГ. Високо предгревање је потребно да би се задржала довољно висока температура основног материјала за све време док се спајање не заврши. При гасном заваривању бакра и његових легура неопходно је користити топитеље (боракс, борну киселину или њихову мешавину) да би се спречила њихова оксидација. Они се наносе на странице жлеба и на врх шипке додатног материјала. Препоручена је техника улево чиме се спречава преливање растопљеног метала испред горионика, умањује оксидација и појава укључака у металу шаву.

4.4.3.5 Заваривање месинга (Cu-Zn)

Поступак електролучног заваривања месинга је сличан поступку заваривања чистог бакра. Главна разлика проистиче због високог садржаја цинка, који при загревању месинга електричним луком, прелази у гасовито стање. Због тога се око шаву образују цинкане паре које излазе из купке и остављају порозна места у шаву. Неопходно је предузети мере како би се спречило излажење ових пара из купке. То се углавном постиже применом додатног материјала без цинка. То су електроде ECuSn-C (бакар-калај) и ECu-Si-A (бакар-силицијум). Препоручује се предгревање месинганих делова на 95 до 315°C при ТИГ и МИГ-заваривању, односно на 200 до 370°C код РЕЛ-а.

Код ТИГ-поступка испаравање цинка може се смањити усмеравањем лука ка врху шипке додатног материјала (слика 4.3). Шипка се загрева и постепено топи, али треба пазити да она не додирује радни предмет.

При МИГ и РЕЛ- заваривању, испаравање цинка може се смањити усмеравањем лука ка предњој ивици купке.



Слика 4.3 ТИГ-заваривање месинга

Поступак коришћен при окси-ацетиленском заваривању месинга је сличан ономе описаном за заваривање дезоксидисаног бабра. Међутим, у овом случају додатни материјал није истог хемијског састава као основни. Препоручује се додатна шипка бакар-силицијум (RCuSi-A) (AWS). Месинг се такође спаја заваривачким лемљењем помоћу додатних шипки RCuSi-A и RCuSi-C (AWS), уз примену топитеља. Лемљени шав има мању корозиону отпорност него шав изведен заваривањем топлењем.

4.4.3.6 Заваривање бронзе

Иако се назив бронза углавном односи на легуру C-Sn, бакар је могуће легирати не само калајем већ и другим елементима (Pb, Al, Si, Be, Mn) који дају разне врсте бронзи. Свака бронза се друкчије заварује; зато је најпре потребно пре свега утврдити врсту бронзе, јер се само тако могу правилно изабрати додатни материјали. Такође су и предгревање и накнадна термичка обрада различити за поједине врсте бронзи. Даље ће се детаљније размотрити технологија заваривања калајних бронзи, алуминијумских бронзи и силицијумских бронзи.

4.4.3.7 Калајне бронзе (ливачке фосфорне бронзе) са садржајем фосфора до 1.2%

Највише примењиване електролучне методе за заваривање фосфорне бронзе су РЕЛ и МИГ. Аргонско (ТИГ) заваривање се углавном користи за репаратуру одливака и за спајање танкозидних предмета. Одговарајуће обложене електроде су ECuSn-A и ECuSn-C (AWS). Користе се извори напајања једносмерне струје, а електроде се везују за плус пол (E+). За заваривање МИГ-ом препоручена је електродна жица ECuSn-C (AWS) везана за плус пол једносмерне струје. Овај додатни материјал садржи нешто фосфора који доприноси смањењу могућности за појаву прслина. За РЕЛ и МИГ препоручује се полагање праволинијских завара, а као заштитни гас Ag или Ag + He. Основни метал мора бити предгрејан на 200°C, а загревање између појединих завара треба да омогући да се температура основног материјала одржава на 200°C. Након полагања сваког завара, потребно је чекићем искивати завар и ЗУТ. Искивање дужих спојева се може извести не само чекићем, већ и пескарењем (пиновањем тврдим ситним куглицама захваћених ваздушним млазом). Накнадну термичку обраду је потребно применити да се постигне боља пластичност и корозиона отпорност при чему се заварени спој загрева до 480°C, а затим брзо хлади ("кали") до собне температуре.

Окси-ацетиленским (ГПЗ) заваривањем није препоручљиво заваривати бронзу. Велики унос топлоте може изазвати прскање и порозност, те се електролучним методама даје предност. Ипак, квалитетне заварене спојеве могу да остваре само вични и искусни заваривачи. Додатне шипке могу бити RCuSn-A и RCuSn-C. Ако се не тражи добро слагање боја, може се узети месингани додатни материјал RCuZn-C. У сваком случају се при окси-ацетиленском заваривању бронзе мора користити топитељ.

4.4.3.8 Бакар-алуминијумске легуре (алуминијумске бронзе)

Алуминијумске бронзе са мање од 7% Al одликује лоша заварљивост, јер су склоне ка појави прслина у ЗУТ-у. Ове бронзе са 7% Al или више (или које имају више легирајућих елемената), могу се заварити, али применом технике која опасности од појаве прслина своди на најмању могућу меру. Тако нпр. предмете дебље од 4.8 mm треба предгревати и догревати. Температуре предгревања и међупролазног догревања зависе од типа легуре, тако за легуре мање од 10% Al, она износи 95 до 150°C. После заваривања, ова се легура брзо хлади до собне температуре.

Додатни материјал за ТИГ и МИГ-заваривање Al-бронзи имају ознаке ERCuAl-A2 или ERCuAl-A3 (AWS). Заштитни гас може да буде мешавина Ag-He.

Хелијум доприноси нешто већи унос топлоте у основни материјал, а тиме омогућава већу брзину заваривања. За РЕЛ, се препоручују електроде ЕСuAl-A2 или ЕСuAl-B. Окси-ацетиленски метод не препоручује се за заваривање ових легура.

4.4.3.9 Легуре бакар-силицијум (силицијумска бронза)

Све силицијумске бронзе су заварљиве, будући да је силицијум добар дезоксидатор, те формира скраму на површини растопа и штити купку и метал шава од оксидације при хлађењу до собне температуре. Силицијумску бронзу одликује мања термичка проводност него друге бронзе, па предгревање није потребно изузев за дебље радне предмете (испод 95°C).

ТИГ, МИГ и РЕЛ-методе су погодне за заваривање силицијумске бронзе. Електрода за РЕЛ је силицијумска бронза ERCuAl-A2 (AWS). Електроде за РЕЛ-заваривање ових легура означавају се са ЕСuSi. Такође се може употребити и електрода ЕСuAl-A2.

Иако се ове легуре могу заваривати гасно оксидишућим пламеном и применом топитеља ипак се даје предност електролучним методама.

4.4.3.10 Легуре бакар-никл

Ове легуре одликује добра корозиона отпорност и термостойаност (задовољавајућа чврстина на повишеним температурама), због чега имају вишеструку примену, углавном за контејнере и судове изложене морској води. Садржај никла варира од 5 до 30%, а најотпорније су легуре са 10 и 30% Ni. Могуће је заваривање како електролучним методама тако и окси-ацетиленски (ГПЗ). Међутим, ГПЗ долази у обзир, само уколико се не располаже опремом за ТИГ, МИГ и РЕЛ-заваривање. Предгревање није неопходно, а међуслојна (interpass) температура се ограничава на 65°C. Додатне жице за заваривање Cu-Ni легура означавају се са ERCuNi, а електроде са ЕСuNi. Заваривачко купатило легура Cu-Ni се јако пени па је потребно њихање додатног материјала између зидова жлеба, чиме се купка боље меша. Ако се примене ТИГ или МИГ-метод, олакшава се праћење лука у току процеса, нарочито у заштити Ag, док не даје дубље уваривање. Мешавина Ag-He може се користити како за ТИГ тако и за МИГ. Као и при заваривању неких других техничких метала, предност аргона је што олакшава контролу лука, док хелијум ослобађа више топлоте и даје дубљи увар. Аргон или мешавина (Ag+He) користе се како за ТИГ тако и за МИГ-заваривање.

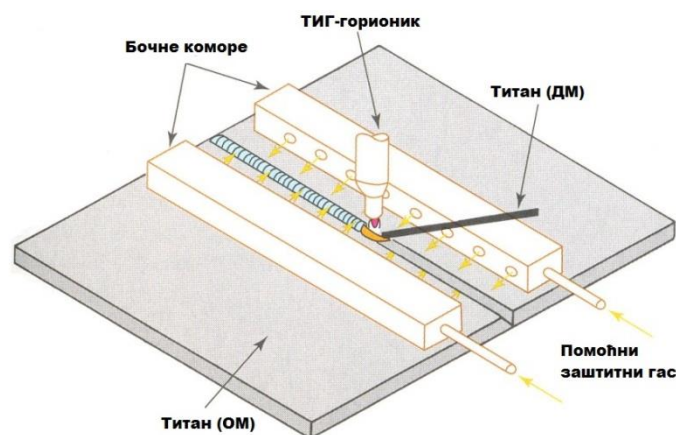
4.4.4 Титан и његове легуре

Титан и његове легуре поседују веома добра својства отпорности и деформације као и одличну отпорност на корозију. Титан је тежи од алуминијума, али је 1.7 пута лакши од челика. Употребљава се у облику полупроизвода, као што су отковци, шипке, лимови или плоче. Кад се титан оджари постаје знатно мекши и пластичнији. Максималну јачину легуре титана добијају после растворене термичке обраде и старења. Јачина на кидање може надмашити 1380 MPa. Према ASTM-у, чист титан се сврстава у четири класе: то су класа 1, класа 2, класа 3, класа 4. Кад се титан легира са другим елементима, они се укључују као део ознаке. Примери: Ti-5Al-2.5Sn, Ti-2Al-11Sn-5Zr-1Mo, Ti-6Al-4V, Ti-8Mn i Ti-8Mo-8V-3Al-2Fe (AWS). Цифре испред хемијских симбола представљају процентуални садржај тих елемената. Титански додатни материјал и заваривачке електроде означавају се на исти начин. Пошто је титан биокompatibilан метал, употребљава се за медицинска помагала, као што су: вештачки ливени кукови, зубни имплантанти и др.

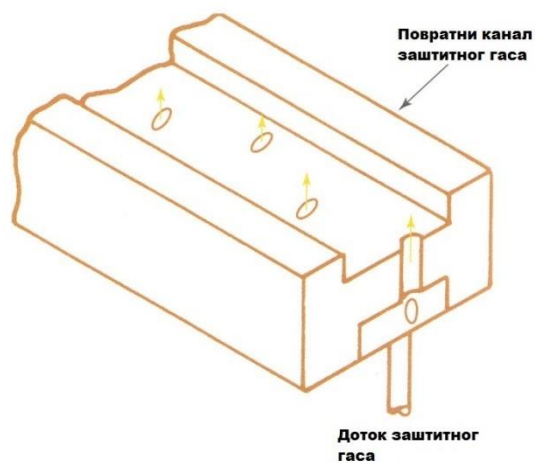
4.4.4.1 Заваривање титана

Највеће тешкоће при заваривању титана и његових легура проистичу из чињенице да је титан реактиван метал који при повишеним температурама, раствара кисеоник, азот и водоник. Међутим мале количине растворених кисеоника и азота, делују позитивно јер повећавају тврдоћу и јачину метала. Веће растварање ових елемената или нечистоћа као што су масти, уља или влага утичу на то да титан постане веома крт. Стога је пре заваривања неопходно чишћење радног предмета. У циљу спречавања контаминације при заваривању користи се инертни заштитни гас, који мора да буде веома чист, без примеса и влаге. Заштитни инертни гас доводи се са обе стране жлеба. Растопљени метал купке и зона под утицајем топлоте морају да буду прекривени инертним гасом све док се не охладе до 260°C.

Један од начина обостране заштите приказан је на слици 4.4. Поред лица шава заштићеног аргонским кисеоником, корен шава се штити помоћним гасом. Канал за довођење гаса са коренске стране шава приказан је на слици 4.5. Заваривачки горионик нормално доводи примарни заштитни гас око заваривачке купке. Гас који се посебно доводи да изолује растоп и ЗУТ при заваривању зове се и секундарни (помоћни) заштитни гас.



Слика 4.4 Секундарни заштитни гас доводи се са доње стране титанског споја



Слика 4.5 Канал за довођење заштитног гаса са коренске стране шава при заваривању титана

Још један начин заштите метала од контаминације јесте заваривање титана у атмосфери чистог инертног гаса, тј. у комори потпуно напуњеној тим гасом. У примени су две врсте комора:

- мала комора, у којој су споља уграђене ручке за манипулацију држачем електроде и
- велика комора са гасом под кључем. Она је испуњена заштитним гасом, а заваривач у посебној одећи улази у комору. Он мора да носи апаратуру за дисање: ваздушни респиратор или сопствени апарат за дисање. У случају да радник уђе у комору без специјалне опреме за дисање, изгубиће свест, а за мање од 10 секунди наступа смрт.

Додатни метали или електроде које се препоручују за заваривање титана су по хемијском саставу сличне основном металу. Због тога класификација додатних материјала и електрода мора бити иста као и за основни материјал. Главни легирајући елемент и његов процентуални садржај дају се у другом делу ознаке. Примери су: ERTi-1, ERTi-2 (комерцијално чисте класе 1 и 2), ERTi-3Al-2.5V, ERTi-8Al-1Mo-1V i ERTi-6Al-4V (AWS). У овим примерима Е означава электроду, R-шипку. Најчешћи методи заваривања су МИГ и ТИГ. Други начини су плазмено лучно заваривање, електронски снап, ласерско заваривање, фриксионо, електроотпорско и тврдо лемљење.

Као што је већ напоменуто, предмети од титана припремљени за заваривање морају да буду потпуно чисти. Сви оксиди, масти, уља и чак отисци прстију треба да се уклоне. После чишћења, радним предметима се рукује у рукавицама. Сваки контаминент на радном предмету може на температури заваривања, да изазове хемијску реакцију са кисеоником, водоником и азотом и ослаби заварени спој. Код ТИГ методе користи се једносмерна струја, а бира се торирана електрода (EWTh-2) везана за минус пол извора напајања (Е-). Лук се увек успоставља на посебном помоћном предмету од титана који се поставља близу подужне осе заваривања.

Код МИГ-а, такође је битно да се зона заваривања потпуно очисти од кисеоника, водоника и азота. Заштитни гас мора да буде изузетно чист. Помоћни заштитни гас доводи се са стране слично као код ТИГ-а, као и са коренске стране шави, тј. одоздо. Шав и ЗУТ, морају да остану заштићени инертним гасом све док се спој не охлади испод 260°C. Такође је потребно да електродна жица буде потпуно чиста без уља, масти и прашине на њој. Поклопац на калему за жицу у току рада се затвара да се спречи продирање прашине. Кад се не користи, калем титанске жице треба склонити са машине и спаковати га у пластичну врећу и одложити у посебну комору.

4.4.5 Међусобно заваривање различитих нежелезних метала

Могуће је међусобно заварити Al за Cu, Al за Pb, Cu за Pb и многе друге комбинације. Угљенични, нисколегирани и неки нерђајући челици не могу се методима заваривања топљењем спојити са алуминијумом, бакром и другим металима. Углавном електролучни методи и окси-ацетиленско заваривање нису погодни за спајање различитих метала, а јесу отпорско заваривање, фриксионо заваривање и други начини спајања метала у чврстом стању.

5. ПРЕГЛЕД ВИСОКОЛЕГИРАНИХ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА

Према главном легирајућем елементу и структури нерђајућих челика и систему груписања челика за заваривање (SRPS CEN ISO/TR 15808) разликују се:

- Феритни Cr челици, подгрупе 7.1
- Мартензитни и феритно мартензитни Cr челици подгрупе 7.2 и таложењем ојачани челици подгрупе 7.3
- Аустенитни CrNi (стабилизовани и нестабилизовани) челици подгрупе 8.1 и 8.2
- Аустенитно-феритни CrNi (дуплекс) челици групе 10, подгрупе 10.1 и 10.2

У табели 5.1 дате су групе карактеристичних структурних особина заварљивих високолегираних челика.

Табела 5.1 Групе заварљивих нерђајућих челика према ближим структурним карактеристикама

Врста	Група	Структура	Пример
Феритни	Потпуно феритни челици	F	X10CrAl24
	Полуферитни челици	F+M	X10Cr17; X6Cr17
Мартензитни	Меки мартензитни челици	M+F M+A+F	X10Cr13; X6Cr13; X5CrNi13-4
Аустенитно-феритни	Дуплекс челици	A+F	C ≤ 0.1%, Cr=20-30% Ni=4-10%
		F+A	X2CrNiMoN22-5-3
Аустенитни	Аустенитни са учешћем ферита	A+F	X2CrNiMo17-13-2 X5CrNi18-10
	Потпуно аустенитни (супераустенитни)	A	X2CrNiMo18-16-4 X2CrNi24-20

5.1 Феритни челици

Производња феритних челика је јефтинија, а корозиона отпорност је иста као код челика легираних никлом што је главни разлог за њихов развој. Код феритних челика, у циљу постизања очувања жилавости и деформабилности потребно је спречити образовање аустенита, који се при нижим температурама трансформише у мартензит. Поступци топлјења челика у данашње време омогућавају производњу FeCr легура које не садрже C и N, који у односу на Ni утичу на образовање аустенита. Оштро хлађење из подручја температура $\geq 900^{\circ}\text{C}$ (нпр. код заваривања), за спречавање аустенитно-мартензитне трансформације, захтева даље сужење толеранције присуства C и N.

Према особинама значајним за примену разликују се:

- Корозионо и кисело отпорни челици (Cr челици + Ni, Mo, Ti и/или Nb), као нпр. X7Cr13; X7CrMo17-1;
- Ватроотпорни и отпорни на коварину челици (Cr челици + Al или Si), као нпр. X10CrAl24; X10CrSi18;

Према структури феритни челици се деле на:

- полуферитне (δ +М);
- потпуно феритне и
- суперферитне челике, у границама хемијског састава датим у табели 5.2.

Табела 5.2 Оквирни хемијски састав феритних челика

Врсте	С, %	Cr, %	Остали легирајући елементи	Структура	Примери
Семи или полуферитни	0.08-0.12	12-17	Евентуално стабилизатори Ti, Nb	δ -F+M	X2CrNi12; X6Cr17
Феритни	0.08-0.02	16-26	Код високог С и нижег Cr, +Mo, Nb, Ti	δ -F	X3CrTi17; X2CrMoTi18-2
Суперферитни	0.03-0.002	24-30	До 4% Mo, 1% Nb или Ti, 0.4% Si, C+N<0.035	δ -F	X2CrMoTi29-4

Код челика са садржајем 0.06% С и 16-18% Cr, упркос присуству легирајућих елемената који су стабилизатори ферита, у зависности од шарже могу се образовати структуре заосталог аустенита и мартензита.

5.1.1 Физичке и механичке особине феритних челика (подужно и у жареном стању)

Сви феритни челици се одликују магнетичношћу. Термичка проводност и електрична отпорност су између нелегираних и нисколегираних челика и аустенитних челика. Термичко издужење и густина је нешто испод нелегираних конструкционих челика.

Због склоности ових челика да при спором хлађењу настају излучивања, немају добру деформабилност. Само код танких попречних пресека (до 10 mm) може се очекивати задовољавајућа дуктилност. Суперферитни челици су нешто боље деформабилности од полуферитних челика.

Полуферитни челици могу побољшањем достићи напон течења до 600 MPa (знатно већи него код аустенитних челика). Код температура до 550°C долази до знатно веће вредности чврстоће него код аустенитних челика. Феритни челици су и термопостојани. Временска чврстоћа при температурама већим од 550°C се знатно умањује. Феритни челици нису закаљиви. Са порастом садржаја Cr, С и N долази до смањења жилавости код феритних челика.

Суперферитни челици имају прелазну температуру код температуре -50°C.

Табела 5.3 Оквирне механичке особине феритних челика

Механичке особине	Полуферитни	Феритни (без трансформације)	Суперферитни
R _{p0.2} , MPa	210-480	180-300	400-450
R _m , MPa	400-750	380-640	550-700
A (%)	25-12	25-20	28-20

5.1.2 Хемијска постојаност феритних челика

Излучивања интерметалних фаза и карбида, тј. нитрида веома јако утичу на хемијску постојаност феритних челика. Пошто се само код феритних челика

излучивања не могу избећи каљењем у води, постојаност према интеркристалној корозији (ИК) је само онда када је постигнуто изједначење хрома изван и унутар граница зрна. Препоручена је појачана стабилизација (Ti, Nb, Zr) јер код ферита и веома мали садржај С односно N, доводи до зачетка ИК. Такође код феритних челика отпорности на ИК одговара ограничење садржаја угљеника на 0.005% и веома низак садржај азота.

Само суперферитни челици са садржајем Cr 30% и $C \leq 0.03\%$ су потпуно отпорни на корозију па су због тога примењиви у морској, обичној и индустријској води. Против тачкасте корозије и корозије у зазору феритни челици су у зависности од садржаја Cr и Mo, мало отпорни до отпорни. Температура, концентрација и врста медијума има велики утицај на отпорност. Тако да феритни Cr, односно CrMo челици са ниским садржајем C (0.03%) и $Cr \geq 18\%$ су постојани према корозији и у зазору. Феритни челици нису допустиви за делове рударских машина, нарочито у средини која садржи хлориде.

Од свих нерђајућих челика полуферитни и феритни челици са садржајем Cr до 17% показују најмању постојаност у условима блиске градској, индустријској и морској атмосфери. Челици са садржајем Cr између 10 и 15% примењују се у изради контејнера, авиона и индустријских постројења.

5.1.3 Стандардизовани феритни челици отпорни према корозији (SRPS EN 10088-2:2002)

У табели 5.4 дат је преглед стандардизованих феритних челика отпорних према корозији.

Табела 5.4 Врсте и особине стандардизованих феритних челика

Ознака	Број	Структура	R_m , МПа	$R_{p0.2}$, МПа	A, %
X2CrNi12	1.4003	$M + \delta$	250-320	450-650	18-20
X2CrTi12	1.4512	$M + \delta$	210-220	380-560	25
X6CrNiTi12	1.4516	$M + \delta$	250-320	450-650	20-23
X6Cr13	1.4000	$M + \delta$	220-250	400-600	19
X6CrAl13	1.4002	$M + \delta$	210-250	400-600	17
X6Cr17	1.4016	$M + \delta$	240-280	450-600	18-20
X3CrTi17	1.4510	δ	230-240	420-600	23
X3CrNb17	1.4511	δ	230-240	420-600	23
X3CrMo17-1	1.4113	$\delta^{1)}$	260-280	450-630	18
X2CrMoTi18-2	1.4521	δ	280-320	400-640	20
X2CrTi17	1.4520	δ	180-200	380-530	24
X2CrMoTi17-1	1.4513	δ	200-220	400-550	23
X6CrNi17-1	1.4017	$\delta^{2)}$	480-500	650-750	12
X6CrMoNb17-1	1.4526	$\delta^{2)}$	280-300	480-560	25
X2CrNbZr17	1.4590	δ	230-250	400-550	23
X2CrTiNb18	1.4509	δ	230-250	430-630	18
X2CrMoTi29-4	1.4592	δ	430-450	550-700	20

Могућа стања испоруке: С = хладно ваљано; Н = топло ваљано; ¹⁾ Могуће структурно стање је $A + \delta + M$; ²⁾ Могуће структурно стање је $\delta + M$ и $\delta + A (10-20\%) + M$

У табели 5.5 дат је оквирни садржај легирајућих елемената у феритним челицима

Табела 5.5 Садржај легирајућих елемената феритних челика у границама:

C%	Cr%	Ni%	Mo%	Si и Mn %	P%	S%	Ti%
0.025-0.08	10.5-30	0.3-1.6	0.9-4.5	1.0-1.5	< 0.04	< 0.015 ¹	0.25-0.8 ²
Напомене: ¹ Изузев челика за аутомате; ² Садржај Ti варира у зависности од садржаја C+N: $Ti=4x(C+N)$							

5.2 Мартензитни челици

5.2.1 Подела и подручја примене мартензитних челика

Према ближим структурним карактеристикама и особинама значајним за примену, мартензитни челици се деле на:

1. Чисто мартензитне;
2. Мартензитне са уделом ферита;
3. Меке мартензитне и
4. Мартензитне који отврдњавају термичким таложењем.

Чисто мартензитни челици

Ови челици имају садржај $C \geq 0.2\%$ и повишен садржај легирајућих елемената. Због високог садржаја C и легирајућих елемената условно имају способност заваривања. Њихова структура је искључиво чист мартензит и Шефлеров дијаграм код ове врсте челика нема примену.

Код захтева топлотне постојаности до 500°C примењују се за хируршке инструменте, ножеве и ваљаоничке лежаче, алатне челике за рад на топло, сечива за бријање и тсл.

Примери: X39Cr13; X50CrMoV15; X105CrMo17

Мартензитни челици са уделом ферита

Ови челици имају садржај $0.1\% \leq C \leq 0.2/0.25$, $13\% \leq Cr \leq 18\%$, са учешћем Ni/Mo. Разлика ове врсте челика у односу на феритне је углавном у повишеном садржају C. У екстремним граничним вредностима анализе шарже код ових челика може да настане мартензитна или феритна структура. Челици са високим садржајем C, Cr, Ni или Mo су најчешће мартензитни. Условно су заварљиви.

Примену налазе за конструкционе делове повишене чврстоће (јачине), термостојане (арматуре за проток гаса, воде, паре и тсл.), осовине вратила, лопатице турбина и др.

Меки мартензитни челици

Ови челици имају садржај $C \leq 0.06\%$ и повишен удео Ni (4-6%) и Mo (0.3-1.5%). Код ових челика садржај C је оштро снижен, а његову улогу преузима Ni. Због тога ће независно од брзине хлађења настати потпуно мартензитна структура, која је због сниженог садржаја C релативно мека и жилава, због чега ови челици имају добру способност заваривања.

Примену налазе за конструкционе делове од којих се захтева добра особина жилавости и корозионе отпорности.

Карактеристични примери ове врсте челика: X3CrNiMo13-4; X4CrNiMo16-5-1; X5CrNi13-1; X5CrNi13-4

Мартензитни челици који отврдњавају термичким таложењем

Ови челици имају садржај $C \leq 0.08\%$, $13\% \leq Cr \leq 18\%$, $Mo \leq 1.3\%$ и $Cu/Al/Nb$. Преко механизма излучивања $Cu/Al/Nb$ образују интерметалне фазе и отврдњавају мартензитну решетку, без могућности повратка жилавости или издужења. Структуре леже у мешовитом подручју $A+M+\delta-F$. Термичка обрада процеса таложења (старења мартензита) даје овим челицима високу чврстоћу, а при томе имају добру корозиону постојаност. Висока чврстоћа се добија излучивањем интерметалних једињења из мартензитне структуре за време обраде таложења.

Примену налазе за конструкционе делове у градњи апарата и постројења за висока механичка, термичка и корозиона оптерећења. Поседују добре особине заваривања.

Карактеристични примери ове врсте челика: X5CrNiMoCuNb16-4-1; X8CrNiMoAl15-172

5.2.2 Физичке и механичке особине мартензитних челика (стање QT/ Отврднуто таложењем)

У зависности од садржаја C и легирајућих елемената особине ових типова челика су ближе δ -феритним или нелегираним и нисколегираним челицима датим у табели 5.6.

Табела 5.6 Оквирне механичке особине мартензитних челика

Особине	Мартензитни	Мартензитно-феритни	Меки мартензит	Мартензитни ојачани таложењем
$R_{p0.2}, MPa$	600	450-650	500-800	500-1000
R_m, MPa	750-900	700-1050	600-1100	800-1000
$A, \%$	< 10	10-14	12-15	10-18
KV, J	< 20	< 25	< 90	< 75

У односу на мартензитне, меки мартензитни челици и мартензитни челици који ојачавају таложењем су релативно добре деформабилности и задовољавајућих особина жилавости.

5.2.3 Хемијска постојаност мартензитних челика

Мартензитни челици се употребљавају углавном због отпорности на хабање, топлотне постојаности и резних особина. Њихова постојаност на опште носиоце корозије, напонске прслине и тачкасту корозију одговара феритним челицима са садржајем Cr у износу 13-17%.

5.2.4 Стандардизовани мартензитни челици отпорни према корозији (SRPS EN 10 088-2:2002)

У табели 5.7 дат је преглед стандардизованих мартензитних челика отпорних према корозији и њихових особина.

Табела 5.7 Врсте и особине стандардизованих мартензитних челика

Ознака	Број	Структура	$R_{p0.2}$, МПа	R_m , МПа	A, %	KV, °C
X12Cr13	1.4006	$M + \delta$	400-450	550-850	20-12	25-
X20Cr13	1.4021	$M + \delta$	450-600	650-950	15-10	25-20
X30Cr13	1.4028	M	600-650	800-1000	15-10	-
X39Cr13	1.4031	M	-	760-800	12-	-
X46Cr13	1.4034	M	-	780-800	12-	-
X50CrMoV15	1.4116	M	-	850-900	12-	-
X39CrMo17-1	1.4122	M	550	750-950	12	20-
X3CrNiMo13-4	1.4313	меки $M + \delta$	520-800	650-1100	15-11	70-50
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	$I J M + \delta + A$	550-700	760-1100	16-14	90-55
Специјални челици за отврдњавање термичким таложењем						
X5CrNiCuNb16-4	1.4542	$I J M + \delta + A$	1150-520	800-1300	18-3	75-40
X7CrNiAl17-7	1.4568	$I J M + \delta + A$	1310-	850-1450	19-2	-
За све врсте у жареном/излучивањем отврднутом стању гарантоване су само тврдоће (жарено: 220-320 HB; отврднуто таложењем: 360 HB); Све вредности су у зависности од облика производа и стања термичке обраде; I J-интерметална једињења						

5.3 Аустенитни челици

Ова врста челика налази примену у хемијским постројењима, процесној опреми, машиноградњи, прехранбеној опреми, код ниских и повишених температура као и у условима повишених корозионих и термичких оптерећења (табела 5.8). Прецизнији подаци о намени одређених врста челика дају се у спецификацијама произвођача.

Табела 5.8 Подручја примене аустенитних челика

Подручја примене аустенитних челика	Примери
Термопостојани, ватроотпорни и отпорни на коварину челици	CrNi 13/3; 16/13 или 25/20 са Мо до 7% и делимично са садржајем Si, и до 0.15% C
Корозионо отпорни челици	CrNi 18/10; CrNiMo 17/12/2 са 0.02 до 0.1% C
Челици жилави на ниским температурама	CrNi 18/10 са 0.02 до 0.1% C

Поред легирајућих елемената Cr и Ni, легирани су и са Мо (корозиона отпорност), Si-Al (ватроотпотност и отпорност на коварину), N (пораст чврстоће), Nb и Ti (стабилизација против интеркристалне корозије).

Карактеристични изглед структуре ваљаних аустенитних челика су микроструктуре двојниковања. Аустенит добијен ливењем углавном има глобуларну структуру.

5.3.1 Врсте аустенитних челика

Аустенитни челици се деле на:

- Потпуно аустенитне челике, који код сваке температуре имају аустенитну структуру и
- Аустенитне челике са уделом ферита (5-10% δ -ферита).

У табели 5.9 дат је оквирни хемијски састав аустенитних нерђајућих челика.

Табела 5.9 Оквирни хемијски састав аустенитних челикав

Врсте	Структура	Хемијски састав, %				
		C	Cr	Ni	Mo	Остали
Аустенитни (потпуно и супер аустенитни)	A (100%)	0.01-0.04	20-31	18-32	1-7	-
		0.12-0.15	25-36	16-32	-	Si = 1-7
Аустенитни са уделом δ -ферита	A+ δ -F (0-20%)	0.02-0.06	17-19	7-15	2-5	-
		0.02-0.12	17-19	5	-	Mn = 7-9

Најпознатији аустенитни челик са уделом δ -ферита је CrNi18-10, односно CrNiMo17-12-2. Код ових виших легирајућих система, да би се добио чист аустенит, при повећању садржаја Cr и Mo или снижењу садржаја C, мора се повећати удео Ni.

Челици који имају нижи садржај Cr и Ni су на граници ка A+M мешовитим структурама. У овом граничном подручју аустенит се може потпуно или делимично трансформисати у мартензит. Стабилност аустенита се повећава са додавањем C и Ni, Mn, N и Cu. У зависности од садржаја C и легирајућих елемената, аустенитни челици се деле на:

- Аустенитне челике без Mo,
- Аустенитне челике са Mo,
- Аустенитне челике са посебно ниским садржајем C,
- Стабилизоване аустенитне челике и
- Супераустенитне челике.

Аустенитни челици без Mo

Ово је највише коришћена врста аустенитних челика, јер је однос између производне цене и корозионе отпорности веома повољан. За разлику од феритних и мартензитних челика теже се обрађују скидањем струготине.

Аустенитни челици са Mo

Додатак Mo значајно повећава корозиону отпорност, пре свега против хлорида који проузрокују тачкасту и напонску корозију. У соним киселинама додатак Mo нема неки знатан утицај.

Аустенитни челици са посебно ниским садржајем C

Челик са садржајем $C \leq 0.030\%$ има смањену осетљивост за настанак интеркристалне корозије. При овако ниском % угљеник у челику остаје у чврстом раствору и не везује се за Cr, тј. не образује Cr карбиде.

Стабилизовани аустенитни челици

Додатком Ti или Nb, који имају висок афинитет према C, везивањем угљеника за Ti и Nb спречава се излучивање Cr карбида при термичкој обради и/или заваривању. Поред тога ова група аустенитних челика има добре особине термостойкости на температурама до 600°C.

Супераустенитни челици

Ови челици имају повећан садржај Cr и Mo како би се добила аустенитна структура, и према томе висок садржај Ni и N. Одликује их веома добра отпорност према корозији у агресивним срединама.

Физичке особине аустенитних челика

Аустенитни челици су немагнетични, осим делова структура насталих из α -ферита и делова δ -ферита. За разлику од других врста челика, аустенитни челици имају знатно веће термичко издужење, при истовремено нижој термичкој проводности. Ови челици немају фазну трансформацију и зато нису закаљиви, али знатно ојачавају при хладном деформисању.

5.3.2 Механичке особине аустенитних челика

Финозрна структура аустенитних челика се образује рекристализацијом при топлотном деформисању или накнадном рекристализацијом. Завршна термичка обрада је растварајуће жарење између 1000 и 1150°C, са завршним брзим хлађењем у води или на ваздуху. Погодна температура растварајућег жарења зависи од тога да ли се тражи растварање фаза или интерметалних једињења или карбида, а када су присутне високолегирани фазе може да буде и преко 1150°C.

Вредности чврстоће чисто аустенитних структура су знатно ниже од оних код δ , α или Ni мартензитних челика. Методе које се примењују у циљу повећања чврстоће су:

- ојачавање мешовитим кристалима (челици повишеног садржаја N, C, Cu и др.),
- хладно ојачавање и
- отврдњавање преко стварања карбида или нитрида (повишен садржај N и C).

У табели 5.10 су дати степени ојачавања хладним деформисањем:

Табела 5.10 Степени ојачавања хладним деформисањем: R_m , МПа

Ознака степена ојачавања	C700	C850	C1000	C1150	C1300
Чврстоћа на затезање	700-850	850-1000	1000-1150	1150-1300	1300-1500

Код тањих пресека стање испоруке је хладно деформисано у циљу повећања обрадивости резањем. Због побољшања обрадивости скидањем струготине могу се додатно легирати сумпором. Тиме се ипак редукује корозиона отпорност.

Легирање у циљу повећања чврстоће је углавном додавањем Ni, јер је у том случају виша температура рекристализације. Аустенитни челици задржавају добру жилавост и сигурност од кртог лома чак и на температурама нижим од -200°C. Снижење вредности чврстоће на повишеним температурама (до 600°C) је веома мало. Велики број аустенитних челика на повишеним температурама поседује боље механичке особине од нисколегираних и високолегираних челика. У табели 5.11 дате су оквирне механичке особине аустенитних челика.

Табела 5.11 Оквирне механичке особине аустенитних челика

Механичке особине	Аустенитни растварајуће жарени	Аустенитни легирани са N	Аустенитни, хладно ојачани
$R_{p0.2}$, МПа	175-230	250-400	до 1100
R_m , МПа	450-750	550-850	до 1200
A, %	40-45	35-40	30
KV, °C	>100	100	<90

5.3.3 Хемијска постојаност аустенитних челика

Потпуно аустенитни и аустенитни челици са ниским садржајем δ -ферита показују добру корозиону отпорност, а пре свега постојаност против оксидирајућих и неоксидирајућих киселина и база, као и против органских киселина. Против слабих киселина постојаност је лоша. Воде сиромашне кисеоником такође могу имати корозионо дејство.

Потпуно аустенитни челици су хомогене структуре па су зато нормално веће корозионе постојаности. За разлику од аустенитних челика са уделом δ -ферита, ова врста челика није посебно постојана у гасовима који садрже сумпор.

Ако су присутни јони хлора аустенитни челици су склони тачкастој корозији, јер они могу да се локално оштро активирају преко запрљаности, и посебно присуством рђе. Аустенитни челици са садржајем Мо су нешто отпорнији на тачкасту корозију.

5.3.4 Стандардизовани аустенитни челици отпорни према корозији (SRPS EN 10 088-2:2002)

У табели 5.12 дат је преглед стандардизованих аустенитних челика отпорних према корозији са њиховим особинама.

Табела 5.12 Врсте и особине стандардизованих аустенитних челика

Ознака	Број	Структура	R _{p0.2} , МПа	R _m , МПа	A, %
X10CrNi18-8	1.4310	A+M+20% F	250	600-950	40
X2CrNi18-7	1.4318	A+10% F	330-350	630-850	40-45
X2CrNi18-9	1.4307	A+20% F	200-220	500-670	45
X2CrNi19-11	1.4306	A+10%F	200-220	500-670	45
X2CrNi18-10	1.4311	A+5% F+M	270-290	550-750	40
X5CrNi18-10	1.4301	A+20% F	210-230	520-750	45
X8CrNiS18-9	1.4305	A+20%F	190	500-700	35
X6CrNiTi18-10	1.4541	A+20% F	200-220	500-720	40
X4CrNi18-12	1.4303	A+20% F	220	600-650	45
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	A+10% F	220-240	520-680	40-45
X2CrNiMoN17-11-2	1.4406	A	280-300	580-780	40
X5CrNiMo17-12-2	1.4401	A+10% F	220-240	520-680	40-45
X5CrNiMoTi17-12-2	1.4571	A+10% F	220-240	520-690	40
X2CrNiMo17-12-3	1.4432	A+20% F	220-240	520-700	40-45
X2CrNiMo18-14-3	1.4435	A	220-240	520-700	40-45
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439	A	270-290	580-780	35-40
X1NiCrNiMoCu25-20-2	1.4539	A	220-240	520-730	35
X1CrNi25-21	1.4335	A	200	470-670	40
X6CrNiNb18-10	1.4550	A+20% F	200-220	500-720	40
X1CrNiMoN25-22-2	1.4466	A	250	540-740	40
X6CrNiMoNb17-12-2	1.4580	A+20% F	220	520-720	40
X2CrNiMoN17-13-3	1.4429	A	280-300	580-780	35-40
X3CrNiMo17-13-3	1.4436	A+20% F	220-240	530-700	40
X2CrNiMoN18-12-4	1.4434	A+5% F	270-290	540-770	35-40
X2CrNiMo18-15-4	1.4438	A	220-240	520-720	35-40
X1CrNiSi18-15-4	1.4361	A	220	530-730	40
X12CrMnNiN17-7-5	1.4372	A+20% F+M	330-350	750-950	40-45
X2CrMnNiN17-7-5	1.4371	A+5% F+M	280-300	630-850	35-40
X12CrMnNiN18-9-5	1.4373	A+20% F	320-340	600-880	35-45
X1NiCrMoCu31-27-4	1.4563	A	220	500-700	40
X1CrNiMoCuN25-25-2	1.4537	A	290	600-800	40
X1CrNiMoCuN20-18-7	1.4547	A	300-320	650-850	35-40

5.4 Аустенитно-феритни (дуплекс) челици

Ова врста челика налази примену код машинских делова високих хемијских и механичких оптерећења, у петрохемијској индустрији прераде и транспорта нафте и сировог природног нафтног гаса, преради целулозе и хемијској индустрији (пумпе, центрифуге, резервоари и тсл.).

Састав ових челика је из две структурно различите фазе ($\gamma + \delta$), понекад са знатним разликама хемијског састава. Дуплекс челици се помињу када је образована хетерогена структура стабилна и при ниским температурама. Ову двофазну структуру, са садржајем ферита око 50% као примарне фазе и око 50% аустенита као секундарне фазе, одликују висок напон течења и затезна чврстоћа, добра жилавост, као и одлична корозиона отпорност на напонску и тачкасту корозију изазвану хлоридима, што су особине чисто аустенитних и чисто феритних челика.

Карактеристични примери ове врсте челика: X2CrNiN23-4; X2CrNiMoN22-5-3; X3CrNiMoN27-5-2; X2CrNiMoCuWN25-7-4.

Структура дуплекс челика у великој мери зависи од хемијског састава, термичког процеса у изради челика (брзине хлађења у одређеним температурским подручјима) и од термичке обраде (хомогенизационо жарење и аустенитно каљење-гашење). Оквирни хемијски састав аустенитно-феритних челика дат је у табели 5.13.

Табела 5.13 Оквирни хемијски састав аустенитно-феритних челика

C, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	+ додаци, %
0.03-0.05	21-28	3.5-7	2.5-4	N, Cu, W, Nb или Ti

Разлика у односу на чисто аустенитне или феритне челике је што термичка обрада не служи само за растварање излучевина, већ много више за подешавање одређене количине структурних делов. Дуплекс челици садрже легирајуће елементе који се не узимају у обзир при одређивању еквивалента Cr или Ni, тако да за ове челике не важи Шефлеров дијаграм.

5.4.1 Физичке особине аустенитно-феритних челика

У зависности од удела δ -ферита ови челици су мање или више магнетични. Термичко издужење је ниже, а термичка проводност је већа него код аустенитних челика. Могуће је њихово јако ојачање хладним деформисањем.

5.4.2 Механичке особине аустенитно-феритних челика

Аустенитно-феритни челици имају веће вредности напона течења и затезне чврстоће за разлику од феритних и аустенитних челика. Њихова чврстоћа је постојана и при повишеним температурама. Температурско подручје примене ових челика је ограничено на $< 250^{\circ}\text{C}$ због појаве кртости у феритном структурном делу на 450°C . Највеће вредности чврстоће показују челици легирани са N, док је ниво жилавости изнад феритних челика. За разлику од аустенитних челика, јако изражене високе вредности жилавости се показују и на високим и ниским температурама, слично као код феритних челика. Оквирне механичке особине аустенитно-феритних челика дате су у табели 5.14.

Табела 5.14 Оквирне механичке особине аустенитно-феритних челика

R _{p0.2} , MPa	R _m , MPa	A, %	KV, °C
400-750	500-900	> 18	> 50

5.4.3 Хемијска постојаност аустенитно-феритних челика

Ови челици имају високу постојаност према свим општим узрочницима корозије, напонској и тачкастој корозији. Отпорни су на агресивне гасове па чак и оне који садрже S, хладну воду, медијуме са високим садржајем хлорида, органске киселине, фосфорну и сумпорну киселину, а такође и према језерској и морској води.

Избор додатног материјала као и спровођење термичке обраде и заваривања захтевају у великој мери искуство. Корозиону постојаност знатно нарушава сегрегација феритне структуре, тзв. феритизација.

5.4.4 Утицај садржаја ферита у аустенитно-феритним челицима

У табели 5.15 је приказан утицај садржаја ферита у аустенитно-феритним челицима на основу примера примене.

Табела 5.15 Утицај садржаја ферита у аустенитно-феритним челицима

Пример примене:	Феритни број		Шта се догађа кад је:	
	min.	max.	изнад	испод
Без удела ферита немагнетични челици са пермеабилитетом до max. 0.1	-	0.1	Магнетизација је могућа	
Веома низак удео ферита: -нерђајући и корозионо отпорни челици -ватро и на коварину отпорни челици -челици за ниске температуре испод -105°C	-	0.5 0.5 0.5	-пораст осетљивости на вруће прслине -пораст осетљивости на вруће прслине -пораст осетљивости на вруће прслине	-селективна корозија -излучивање интерметалних фаза -губитак жилавости
Мањи удео ферита: -нестабелизован метал шава до 350°C -стабилизован метал шава до 400°C -високотемпературна примена	4 6 3	12 15 8	-пораст осетљивости на вруће прслине -пораст осетљивости на вруће прслине -пораст осетљивости на вруће прслине	-смањење жилавости и дуктилности -смањење жилавости и дуктилности -кртост, повећање интерметалних фаза
Већи удео ферита: Феритно-аустенитни (дулекс) челици	30	70	Смањење отпорности на напоснке прслине и корозиону постојаност; смањење чврстоће	Смањење жилавости и дуктилности; побољшање корозионе отпорности

5.4.5 Стандардизовани аустенитно-феритни челици отпорни према корозији (SRPS EN 10088-2:2002)

У табели 5.16 дат је преглед стандардизованих аустенитно-феритних челика отпорних према корозији са њиховим особинама.

Табела 5.16 Врсте и особине стандардизованих аустенитно-феритних челика

Ознака	Број	$R_{p0,2}$ МПа	R_m МПа	A, %
X2CrNiN23-4	1.4362	400-420	600-850	20-25
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	460-480	640-950	25
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	490-510	690-940	17-25
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	530-550	730-1000	15-20
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	530	730-930	25

Могућа стања испоруке: С = хладно ваљано; Н = топловаљано

Вредности су дате у зависности од дебљине производа и нарочито од стања испоруке. Код неких челика, у циљу побољшања обрадивости резањем, толерише се повећан садржај S ($0,015 < S < 0,035$). Овај повећан садржај S за одређене случајеве ипак делимично редукује корозиону отпорност.

5.5 Упоредне ознаке нерђајућих челика

У табели 5.17 дат је преглед најзначајнијих феритних челика, њихове упоредне ознаке и хемијски састав.

Табела 5.17 Упоредне ознаке и састав феритних нерђајућих челика

Број	Ознака, EN	Упоредне ознаке	Хемијски састав, %
1.4003	X2CrNi12	DIN X 2 Cr 11 (5512-3, SEW400)	$C \leq 0,03$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,50$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $N \leq 0,03$ $Cr=10,5-12,5$ $Ni=0,3-1,0$
1.4512	X2CrTi12	DIN X 6 Cr Ti 12 (17441, -455, -456, 5512-3) ISO 1Ti (683-13) BS 409519 (1449-2) NF Z3CT12 (A35-573) UNS S40900 SAE 51409 AISI 409 EU X6CrTi12 (88-95)	$C \leq 0,030$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=10,5-12,5$ $Ti 6(C+N)-0,65$

1.4516	X6CrNiTi12	NF 78CNT12	$C \leq 0,08$ $Si \leq 0,70$ $Mn \leq 1,5$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=10,5-12,5$ $Ni=0,5-1,50$ $Ti=0,05-0,35$
1.4000	X6Cr13	DIN X 6 Cr 13 (17440, -441, -456) JUS Č4170 (C.B0.600) ISO1, TS39 (683-1, 2604-2) BS 403S17 (970-1) NF Z8C12, Z8C13 (A35-573) UNI X6Cr13 (6901) SS 2301-2 (MNC900) UNE X6Cr13 (36-016) GOST 08Ch13 (5632) UNS S40500 SAE 51405 AISI 405, 303, 410S, 429 ASTM Type 405 (A276) JIS SUS403 (G4303)	$C \leq 0,08$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=12,0-14,0$
1.4002	X6CrAl13	DIN X 6 CrAl 13 (17440, -441, -456) JUS Č49702 (C.B0.600) ISO 2 (683-B) BS 405S17 NF Z8CA12, Z6CA13 (A35-574) UNI X6CrAl13 (6901) UNE X6CrAl13 (36-016) UNS S51405 SAE 51405 AISI 405 ASTM Type 405 (A276) JIS SUS405 (G4303)	$C \leq 0,08$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=12,0-14,0$ $Al=0,1-0,3$
1.4016	X6Cr17	DIN X 6 Cr 17 (17440, -441, -455, -456, 1654) JUS Č4174 (C.B0.600) ISO 8 (683-13) BS 430S17 (970-1) NF Z8C17 (A35-574) UNI X8Cr17 (6901) SS 2320-02 (MNC900) UNE X6Cr17 (36-016) GOST 12Ch17 (5632) UNS S43000 SAE 51430 AISI 430 ASTM (A276)	$C=0,08$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=16,0-18,0$

1.4510	X3CrTi17	DIN X 6 CrTi 17 (17440, -441, -455, -456) JUS Č49701 (C.B0.600) ISO 8B (683-13) NF Z4CT17 (A35-573) UNI X6CrTi17 UNE X5CrTi17 (36-016) GOST 08Ch17T (5632) UNS S43000 SAE 51430 AISI 430,439 EU X8CrTi17 (88)	$C \leq 0,05$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=16,0-18,0$ $Ti\ 4(C+N)^+ \leq 0,8$
1.4511	X3CrNb17	DIN X 6 CrNb 17 (17441) NF Z4CNb17 (A35-573) UNI X6CrNb17	$C \leq 0,05$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=16,0-18,0$ $Nb=12xC-1,0$
1.4113	X3CrMo17-1	DIN X 6 CrMo 17 1 (17441) ISO 9C, D2 (683-13,4954) BS 434S17 (1449-2) NF Z8CD17-01 UNS S434000 SAE 51434 AISI 434 EU X6CrMo 17-1 (88)	$C \leq 0,08$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=16,00-18,00$ $Mo=0,9-1,4$
1.4521	X2CrMoTi18-2	DIN X2CrMoTi18-2 (SEW 400) NF Z3CDT 18-02 SS 2326-02	$C \leq 0,025$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $N \leq 0,030$ $Cr=17,0-20,0$ $Mo=1,8-2,5$ $Ni \leq 0,25$ $Ti\ 4(C+1)^+ \leq 0,8$
1.4520	X2CrTi17	DIN X1CrTi15 (SEW 400)	$C \leq 0,25$ $Si \leq 0,5$ $Mn \leq 0,5$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $N \leq 0,015$ $Cr=16,0-18,0$ $Ti=0,30-0,60$

1.4513	X2CrMoTi17-1	DIN X1CrMoTi16-1	$C \leq 0,025$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=16,0-18,0$ $Mo=1,0-1,5$ $Ti=0,3-0,6$
1.4017	X6CrNi17-1	NF Z8CN17	$C=0,08$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=16,0-18,0$ $Ni=1,2-1,6$
1.4526	X6CrMoNb17-1	NF Z8CDNb17-01	$C \leq 0,08$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $N \leq 0,040$ $Cr=16,0-18,0$ $Mo=0,8-1,4$
1.4590	X2CrNbZr17		$C \leq 0,03$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=16,0-17,5$ $Nb=0,35-0,55$
1.4509	X2CrTiNb18	DIN X 6 CrTiNb 18 NF Z3CTNb18	$C \leq 0,03$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=17,5-18,5$ $Nb=3xC+0,3-1$ $Ti=0,10-0,60$

1.4592	X2CrMoTi29-4	NF Z2CDT29-04	$C \leq 0,025$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,030$ $S \leq 0,010$ $N \leq 0,045$ $Cr=28,0-30,0$ $Mo=3,5-4,0$ $Ti=4(C+N)+ \leq 0,8$
--------	--------------	---------------	---

У табели 5.18 дат је преглед најзначајнијих мартензитних челика, њихове упоредне ознаке и хемијски састав.

Табела 5.18 Упоредне ознаке и састав мартензитних нерђајућих челика

Број	Ознака, EN	Упоредне ознаке	Хемијски састав, %
1.4006	X12Cr13	DIN X 12 Cr 13 (17440, -441, -456, 1654-5) JUS Č41701 (C.B0.600) ISO 3, D10 (683-13, 4954) BS 410S21 (970-1) NF Z10C13, Z12C13 (A35-574) UNI X10Cr13, X12Cr13 (6901) SS 2302-03 (MNC900) UNE X12Cr13 (36-016) GOST 12Ch13 (5632) UNS S41000 AISI 410, CA-15 ASTM (A276) JIS SUS410 (G4303)	$C=0,08-0,15$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,5$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=11,5-13,5$ $Ni \leq 0,75$
1.4021	X20Cr13	DIN X 20 Cr 13 (17440, -441, -442) JUS Č4172 (C.B0.600) ISO 4 (683-13) BS 420S29, 420S37 (970-1) NF Z20C13 (A35-573) UNI X20Cr13 (6901) SS 2303-05 (MNC900) UNE X20Cr13 (36-016) GOST 20Ch13 (5632) UNS S42000 SAE 51420 AISI 420 ASTM Type 420 (A276) JIS SUS420J1 (G4303)	$C=0,16-0,25$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,5$ $P \leq 0,040$ $S \leq 0,015$ $Cr=12,0-14,0$

1.4028	X30Cr13	DIN X30Cr13 (17440, -441) JUS Č4173 (C.B0.600) ISO 5 (683-13) BS 420S45 (1449-2) NF Z33C13 (A35-573) UNI X30Cr13 SS 2304-02 UNE X30Cr13 GOST 30Ch13 UNS S42000 SAE 51420 AISI 420	C=0,26-0,35 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 1,5 P ≤ 0,040 S ≤ 0,015 Cr=12,0-14,0
1.4031	X39Cr13	DIN X 38 Cr 13 (17440, -441) JUS Č41731 (C.B0.600) ISO 6, TYPE 6 (683-13) NF Z44C14, Z40C14 (A35-574) UNI X40Cr14 (6901) SS 2304-03 (MNC900) UNE X40Cr13 (36-016) GOST 40Ch13 (5632) UNS S42000 SAE 51420 AISI 420 ASTM (A276) JIS SUS420J2 (G4303)	C=0,36-0,42 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 1,0 P ≤ 0,040 S ≤ 0,015 Cr=12,5-14,5
1.4034	X46Cr13	DIN X 46 Cr 13 (17440, -441) JUS Č4175, Č4173 (C.B0.600) ISO 6, 6A (683-13) BS 420S45 NF Z44C14 (A35-573) UNI X45Cr13 SS 2304 UNE X40Cr13 GOST 40Ch13 (5632) UNS S42000 SAE 51420 AISI 420 ASTM (A276)	C=0,43-0,50 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 1,0 P ≤ 0,040 S ≤ 0,015 Cr=12,5-14,5
1.4116	X50CrMoV15	DIN X 45 CrMoV 15 (17440, 17441) JUS Č4770 (C.B0.600) NF Z50CD15 UNE X45CrMoV14 (36-016) UNS S44002 SAE 51440A AISI 440A	C=0,45-0,55 S ≤ 1,0 Mn ≤ 1,0 P ≤ 0,040 S ≤ 0,015 Cr=14,0-15,0 Mo=0,50-0,80 V ≤ 0,10-0,20

1.4122	X39CrMo17-1	DIN X 35 CrMo 17 (SEW 400) UNI X38CrMo161KW	C=0,33-0,45 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 1,5 P ≤ 0,040 S ≤ 0,015 Cr=15,5-17,5 Mo=0,8-1,3 Ni ≤ 1,0
1.4313	X3CrNiMo13-4	DIN X 4 CrNi 13 4 (SEW 400) ISO E13.4, C39Ni (3581, 4991) BS 425C11, 425C12 (1504) NF Z6CN13-04 (A35-573) SS 2385 UNS J91540 AISI CA6NM ASTM (A743)	C ≤ 0,05 Si ≤ 0,7 Mn ≤ 1,5 P ≤ 0,040 S ≤ 0,015 N ≤ 0,020 Cr=12,0-14,0 Mo=0,3-0,7 Ni=2,5-4,5
1.4418	X4CrNiMo16-5-1	DIN X 4 CrNiMo 16 5 (SEW 400) NF Z6CND16-05-01 SS 2387-02	C ≤ 0,06 Si ≤ 0,70 Mn ≤ 1,50 P ≤ 0,040 S ≤ 0,015 Cr=15,0-17,0 Mo=0,8-1,5 Ni=4,0-6,0
1.4542	X5CrNiCuNb16-4	DIN X 5 CrNiCuNb 17 4 ISO 1 (683-16) NF Z7CNU17-04	C ≤ 0,07 Si ≤ 0,70 Mn ≤ 1,50 P ≤ 0,040 S ≤ 0,015 Cr=15,0-17,0 Mo ≤ 0,60 Ni=3,0-5,0 Nb=5xC-0,45 Cu=3,0-5,0
1.4568	X7CrNiAl17-7	DIN X7CrNiAl-17-7 (17224) ISO 2 (683-16) NF Z9CNA 17-07 SS 2388-02 UNS S30100 SAE 30301 AISI 301	C ≤ 0,09 Si ≤ 0,70 Mn ≤ 1,0 P ≤ 0,040 S ≤ 0,015 Cr=16,0-18,0 Ni=6,50-7,8 Al ≤ 0,70-1,50

У табели 5.19 дат је преглед најзначајнијих аустенитних нерђајућих челика, њихове упоредне ознаке и хемијски састав.

Табела 5.19 Упоредне ознаке и састав аустенитних нерђајућих челика

Број	Ознака, EN	Упоредне ознаке	Хемијски састав, %
1.4310	X10CrNi18-8	DIN X 12 CrNi 17 7 (17224, 17225, SEW 400) JUS Č4571 ISO 14 (683-13) BS 301S21, 301S22 (1449-2) NF Z11CN17-08 (A35-573) SS 2331-02 UNE X12CrNi17-07 UNS S30100 SAE 30301 AISI 301	C=0,05-0,15 Si ≤ 2,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N ≤ 0,11 Cr=16,0-18,0 Mo=0,8 Ni=6,0-9,5
1.4318	X2CrNi18-7	DIN X 2 CrNiN 18 7 (5512-3, SEW 400) NF Z3CN18-07Az	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N=0,10-0,20 Cr=16,5-18,5 Ni=6,0-8,0
1.4307	X2CrNi18-9	NF Z3CN 18-10	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N ≤ 0,11 Cr=17,5-19,5 Ni=8,0-10,0
1.4306	X2CrNi19-11	DIN GX2CrNiN 18-9 (SEW 400)	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,5 Mn ≤ 1,5 P ≤ 0,035 S ≤ 0,020 N=0,10-0,20 Cr=17,0-20,0 Ni=8,0-12,0

1.4311	X2CrNiN18-10	DIN X 2 CrNiN 18 10 (17440, -441, -455 do 458, 1654-5) JUS Č45707(C.B0.600) ISO 10N, X2CrNiN18 10 (683-13, 2604-4) NF Z3CN18-10Az UNI X2CrNiN18-11 SS 2371-02 (MNC900) UNE X2CrNiN18-10 UNS S30452 AISI 304L, XM-21 ASTM (A276) EU X3CrNiN18 10 (88)	$C \leq 0,03$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 2,0$ $P \leq 0,045$ $S \leq 0,015$ $N=0,12-0,22$ $Cr=17,0-19,5$ $Ni=8,5-11,5$
1.4301	X5CrNi18-10	DIN X 5 CrNi 18 10 (17440, -441, -442, -455, -456) JUS Č4580 (C.B0.600) ISO X5CrNi 18 9, F47, F49 (2604-4, 683-13) BS 304S15 (970-1) NF Z7CN18-09 (A35-559) UNI X5CrNi 18-10 (6901) SS 2330-02 (MNC900) UNE X5CrNi18-10 (36-016) GOST 08Ch18N10 (5632) UNS S30400 SAE 30304 AISI 304, 304H ASTM Type 304 (A276)	$C \leq 0,03$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 2,0$ $P \leq 0,045$ $S \leq 0,015$ $N \leq 0,11$ $Cr=17,0-19,5$ $Ni=8,0-10,5$
1.4305	X8CrNiS18-9	DIN X 10 CrNiS 18 9 (17440) JUS Č4590 (C.B0.600) ISO 17 (683-13) BS303S21, 303S31 (970-1) NF Z8CN18-09 (A35-574) UNI X10CrNiS18-9 (6901) SS 2346-02 (MNC900) UNEX10CrNiS18 09 (36-016) GOST 12Ch18N10E (5632) UNS S30300 SAE 30303 AISI 303 ASTM (SAE J405) JIS SUS303 (G4303)	$C \leq 0,10$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 2,0$ $P \leq 0,045$ $S=0,015-0,35$ $N \leq 0,11$ $Cr=17,0-19,0$ $Ni=8,0-10,0$ $Cu \leq 1,0$

1.4541	X6CrNiTi18-10	DIN X6CrNiTi18-10 (17440, -441, -455 до -458) JUS Č4572 (C.B0.600) ISO 15, X6CrNiTi18 10 (683-13, 2604) BS 321S31 (970-1) NF Z6CNT18-10 (A35-574) UNI X6CrNiTi18-11 (6901) SS 2337-02 (MNC900) UNE X6CrNiTi18-10 (36-016) GOST 09Ch18N10T (5632) UNS S32100 SAE 30321 AISI 321 ASTM (A276) JIS SUS321 (G4303)	$C \leq 0,08$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 2,0$ $P \leq 0,045$ $S \leq 0,015$ Cr=17,0-19,0 Ni=9,0-12,0 Ti=5xC-0,70
1.4303	X4CrNi18-12	DIN X 5 CrNi 18 12 (17440, 17441, 17442, 1654-5) JUS Č45702 (C.B0.600) ISO 13, D23 (683-13, 4954) BS 305S19 NF Z5CN18-11FF UNI X8CrNi19 10 (6901) UNE X8CrNi18-12 (36-016) GOST 06Ch18N11 (5632) UNS S30500 SAE 30305 AISI 305 ASTM (A276)	$C \leq 0,06$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 2,0$ $P \leq 0,045$ $S \leq 0,015$ $N \leq 0,11$ Cr=17,0-19,0 Ni=11,0-13,0
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	DIN X 2 CrNiMo 17 13 2 (17440, -441, -455, -456, -457) JUS Č45703 (C.B0.600) ISO 19, X2CrNiMo 17 12 (683-13, 2604) BS 316S11 (970-1) NF Z3CND17-11-02 (A35-574) UNI X2CrNiMo 17-12 (6901) SS 2348-02 (MNC900) UNE X“CrNiMo17-13-2 (36-016) UNS S31603 SAE 30316L AISI 316L ASTM Type 316L (A276) JIS SUS316L (G4303) EU X3CrNiMo17 12 2 (88,119)	$C \leq 0,03$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 2,0$ $P \leq 0,045$ $S \leq 0,015$ $N \leq 0,11$ Cr=16,5-18,5 Ni=10,0-13,0 Mo=2,0-2,5

1.4406	X2CrNiMoN17-11-2	DIN X 2 CrNiMo 17 12 2 (17440, 17441) JUS Č45708 (C.Bo.600) ISO 19N, X2CrNiMoN17 12 (683-13, 2604-4) BS 316S11 (970-11) NF Z3CND17-11Az UNI X2CrNiMoN17-12 UNE X2CrNiMoN17-12-2 UNS S31651 AISI 316N ASTM Type 316N (A276) JIS SUS316L (G4303) EU X3CrNiMoN17122 (88)	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N=0,12-0,22 Cr=16,5-18,5 Ni=10,0-12,0 Mo=2,0-2,5
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	DIN X 5CrNiMo 17 2 2 (17224, -440, -441, -455, -456) JUS Č4573 (C.B0.600) ISO 20, X5CrNiMo17 12 (683-13, 2604) BS 316S31 (970-1) NF Z7CND17-11-02 (A35-574) UNI X5CrNiMo 17-2 (6901) SS 2347-02 (MNC900) UNE X5CrNiMo17-12-2 (36-016) GOST 04Ch18N11M3 UNS S31600 SAE 30316 AISI 316 ASTM (A276, QQ-S-766c) JIS SUS316 (G4303) EU X6CrNiMo17 12 2 (88, 119)	C ≤ 0,07 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N ≤ 0,11 Cr=16,5-18,5 Ni=10,0-13,0 Mo=2,0-2,5
1.4571	X5CrNiMoTi17-12-2	DIN X 6 CrNiMoTi 17 12 2 (17440, -441, -455, -456, -457) JUS Č4574 (C:B0.600) ISO 21, X6CrNiMoTi17 12 (683-13, 2604) BS 320S31, 320S18 (970-1) NF Z6 CNDT17-12 (A35-574) UNI X6CrNiMoTi 17-12 (6901) SS 2350-02 (MNC900) UNE X6CrNiMoTi 17122 (36-016) GOST 10Ch17N13M2T (5632) UNS S31635 AISI 316Ti ASTM (A276) EU X6CrNiMoTi 17122 (88)	C ≤ 0,08 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N ≤ 0,11 Cr=16,5-18,5 Ni=10,5-13,5 Mo=2,0-2,5 ОСТАЛО: Ti ≥ 5x%C ≤ 0,8

1.4432	X2CrNiMo17-12-3	BS 316S13 NF Z3CND17-12-03 UNI X2CrNiMo17-12	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N ≤ 0,11 Cr=16,5-18,5 Ni=10,5-13,0 Mo=2,5-3,0
1.4435	X2CrNiMo18-14-3	DIN X2CrNiMo 18 14 13 (4133, 17440, -441, -455 до -458) JUS Č45704 (C.B0.600) ISO 19a, X2CrNiMo17 13 (683-13, 2604) BS 316S11 (979-1) NF Z3CND18-12-02 (A35-574) UNI X2CrNiMo17-13 (6901) SS 2353-02 (MNC900) UNE X2CrNiMo18-16-4 (36-016) UNS S31603 SAE 30316L AISI 316L ASTM Type 316L (A276) JIS SUS316L (G4303) EU X3CrNiMo 17 13 3 (88)	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 Cr=17,0-19,0 Ni=12,5-15,0 Mo=2,5-3,5
1.4439	X2CrNiMoN17-13-5	DIN X2CrNiMoN 17 13 5 (17440, -441, -455 до -458) JUS Č47702 (C.B0.600) ISO E19.13.4L (3581) NF Z3CND18-14-05Az UNE X2CrNiMo 17-13-5 UNS S31700 SAE 30317 AISI 317 ASTM (A276)	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N =0,12-0,22 Cr=16,5-18,5 Ni=12,5-14,5 Mo=4,5-5,0
1.4539	X1NiCrNiMoCu25-20-2	DIN X 1 NiCrMoCuN 25 20 5 (4133, SEW 400) ISO E20.25.5LCu (3581) BS 904S13 NF 72NCDU25-20 SS 2562-02	C ≤ 0,020 Si ≤ 0,70 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,030 S ≤ 0,010 N ≤ 0,15 Cr=19,0-21,0 Ni=24,0-26,0 Mo=4,0-5,0

1.4335	X1CrNi25-21	DIN X1CrNi25-21 (SEW 400) NF Z1CN25-20 SS 2361-02	C ≤ 0,020 Si ≤ 0,25 S ≤ 0,010 N ≤ 0,11 Cr=24,0-26,0 Ni=20,0-22,0 Mo ≤ 0,20
1.4550	X6CrNiNb18-10	DIN X 6 CrNiNb 8 10 (17440, -441, -455 до -458) JUS 4582 (C.B0.600) ISO 16, X6CrNiNb 18 10 (683-13) BS 347S31 (970-1) NF Z6CNNb18-10 (A35-574) UNI X6CrNiNb18-11 (6901) SS 2338-02 (6901) UNE X6CrNiNb18-10 (36-016) GOST 08Ch18N12B (5632) UNS S34700 SAE 30347 AISI 347, 348 ASTM Type 347 (A276) JIS SUS347 (G4303)	C ≤ 0,08 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 Cr=17,0-19,0 Ni=9,0-12,0 Nb=10xC-1,0
1.4466	X1CrNiMoN25-22-2	DIN X 2 CrNiMoN 25 22 2 NF Z2CND25-22Az	C ≤ 0,02 Si ≤ 0,7 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,040 S ≤ 0,025 N =0,10-0,16 Cr=24,0-26,0 Ni=21,0-23,0 Mo=2,0-2,5
1.4580	X6CrNiMoNb17-12-2	DIN X 6 CrNiMoNb 17 12 2 (17440, 17458) JUS Č4583 (C.B0.600) ISO 23, X6CrNiMoNb17 12 (683-13, 4954) BS 318S17 (1554) NF Z6CNDNb 17-12 (A35-574) UNI X6CrNiMoNb 17 12 (6901) UNE X6CrNiMoNb 17122 (36-016) GOST 08Ch16N13M2B (5632) UNS S316400 AISI 316Cb	C ≤ 0,08 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 Cr=16,5-18,5 Ni=10,5-13,5 Mo=2,0-2,5 Nb=10xC-1,0

1.4429	X2CrNiMoN17-13-3	DIN X2CrNiMo17-133 (17440,-441, -455 до -458) JUS Č45709 (C.B0.600) ISO 19aN, X2CrNiMoN17 13 (683-13, 2604) BS 316S63, 316S11 (970-1) NF Z3CND17-12Az UNI X2CrNiMoN17-13 SS 2375-02 (MNC900) UNE X2CrNiMoN17-13-3 UNS S31603 AISI 316L ASTM (A276) JIS SUS316L (G4303)	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 Cr=16,5-18,5 N=0,12-0,22 Mo=2,5-3,0 Ni=11,0-14,0
1.4436	X3CrNiMo17-13-3	DIN X 5 CrNiMo 17 13 3 (17440, -441, -455 до -458) JUS Č45706 (C.B0.600) ISO 20a, X5CrNiMo17 13 (683-13, 2604) BS 316S31 (970-1) NF Z7CND17-12-02 (A35-574) UNI X5CrNiMo17-13 (6901) SS 2343-02 (MNC900) UNE C5CrNiMo17-12-2 (36-016) UNS S31600 SAE 30316 AISI 316 ASTM Type 316 (A276) JIS SUS316 (G4303) EU X6CrNiMo17 13 3 (88)	C ≤ 0,05 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 Cr=16,5-18,5 Ni=10,5-13,5 Mo=2,5-3,0
1.4434	X2CrNiMoN18-12-4	DIN X2CrNiMoN17-12-3 UNI X2CrNiMo17-12	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N=0,10-0,20 Cr=16,5-19,5 Ni=10,5-14,0 Mo=3,0-4,0

1.4438	X2CrNiMo18-15-4	DIN X 2 Cr Ni Mo 18 16 4 (17440, 17441) JUS Č45705 (C.B0.600) ISO 24, X3CrNiMo18-16-4 (683-13, 2604) BS 316S33 (970-1) NF Z3CND18-14-03 (A35-574) UNI X2CrNiMo18-6 (6901) SS 2367-02 (MNC900) UNE X2CrNiMo18-16-4 (36-016) UNS S31700 SAE 30317 AISI 317 EU X3CrNiMo18 16 4 (88)	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N ≤ 0,015 Cr = 17,5-19,5 Mo = 3,0-4,0 Ni = 13,0-16,0
1.4361	X1CrNiSi18-15-4	DIN X 1 CrNiSi 18 15 NF Z1CNS17-15	C ≤ 0,015 Si = 3,7-4,5 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,025 S ≤ 0,010 N ≤ 0,11 Cr = 16,5-18,5 Mo ≤ 0,20 Ni = 14,0-16,0
1.4372	X12CrMnNiN17-7-5	DIN X12CrMnNiN17-7-5 NF Z12CMN17-07Az	C ≤ 0,15 Si ≤ 1,0 Mn = 5,5-7,5 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N = 0,05-0,25 Cr = 16,0-18,0 Ni = 3,5-5,5
1.4371	X2CrMnNiN17-7-5	DIN X2CrMnNiN17-7-5 NF Z3CMN17-07Az	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn = 6,0-8,0 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N = 0,15-0,20 Cr = 16,0-17,0 Mo = 3,0-4,0 Ni = 3,5-5,5
1.4373	X12CrMnNiN18-9-5	DIN X12CrMnNiN 18-9-5 BS 284S16	C ≤ 0,15 Si ≤ 1,0 Mn = 7,5-10,5 P ≤ 0,045 S ≤ 0,015 N = 0,05-0,25 Cr = 17,0-19,0 Ni = 4,0-6,0

1.4563	X1NiCrMoCu31-27-4	DIN X 1 NiCrMoCuN 31 27 4 (SEW 400) NF Z2NCUDU31-27 SS 2584-02	C ≤ 0,020 Si ≤ 0,7 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,030 S ≤ 0,010 N ≤ 0,11 Cr = 26,0-28,0 Mo = 3,0-4,0 Ni = 0,7-1,5
1.4537	X1CrNiMoCuN25-25-2	NF Z2NCUDU25-05Az	C ≤ 0,020 Si ≤ 0,7 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,030 S ≤ 0,010 N = 0,17-0,25 Cr = 24,0-26,0 Mo = 4,7-5,7 Ni = 24,0-27,0 Cu = 1,0-2,0
1.4547	X1CrNiMoCuN20-18-7	DIN X1CrNiCuN20-18-7 SS 2378-02	C ≤ 0,020 Si ≤ 0,7 Mn ≤ 1,0 P ≤ 0,030 S ≤ 0,010 N = 0,18-0,25 Cr = 19,5-20,5 Mo = 6,0-7,0 Ni = 17,5-18,5 Cu = 0,50-1,0
1.4529	X1NiCrMoCuN25-20-7	DIN X 1 NiCrMoCuN 25 20 6 (SEW 40)	C ≤ 0,020 Si ≤ 0,50 Mn ≤ 1,0 P ≤ 0,030 S ≤ 0,010 N = 0,15-0,25 Cr = 19,0-21,0 Mo = 6,0-7,0 Ni = 24,0-26,0 Cu = 0,50-1,5

У табели 5.20 дат је преглед најзначајнијих аустенитно-феритних челика, њихове упоредне ознаке и хемијски састав.

Табела 5.20 Упоредне ознаке и састав аустенитно-феритних челика

Број	Ознака, EN	Упоредне ознаке	Хемијски састав, %
1.4362	X2CrNiN23-4	DIN X2CrNiN23-4 (SEW 400) NF Z3CN23-04Az SS 2327-02	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,035 S ≤ 0,015 N=0,05-0,20 Cr =22,0-24,0 Mo=0,10-0,60 Ni=3,5-5,5 Cu=0,10-0,60
1.4462	X2CrNiMoN22-5-3	DIN X2CrNiMoN22-5-3 (SEW 400) BS 318S13 (1503) NF Z3CND22-05Az (A35-573) SS 2377-02	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,035 S ≤ 0,015 N=0,10-0,22 Cr =21,0-23,0 Mo=2,5-3,5 Ni=4,5-6,5
1.4507	X2CrNiMoCuN25-6-3	NF Z3CNDU25-07Az	C ≤ 0,03 Si ≤ 0,70 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,035 S ≤ 0,015 N=0,15-0,30 Cr =24,0-26,0 Mo=2,7-4,0 Ni=5,5-7,5 Cu=1,0-2,50
1.4410	X2CrNiMoN25-7-4	DIN X2CrNiMoN24-7-4 NF Z3CND25-06Az SS 2328-02	C ≤ 0,03 Si ≤ 1,0 Mn ≤ 2,0 P ≤ 0,035 S ≤ 0,015 N=0,20-0,35 Cr =24,0-26,0 Mo=3,0-4,5 Ni=6,0-8,0

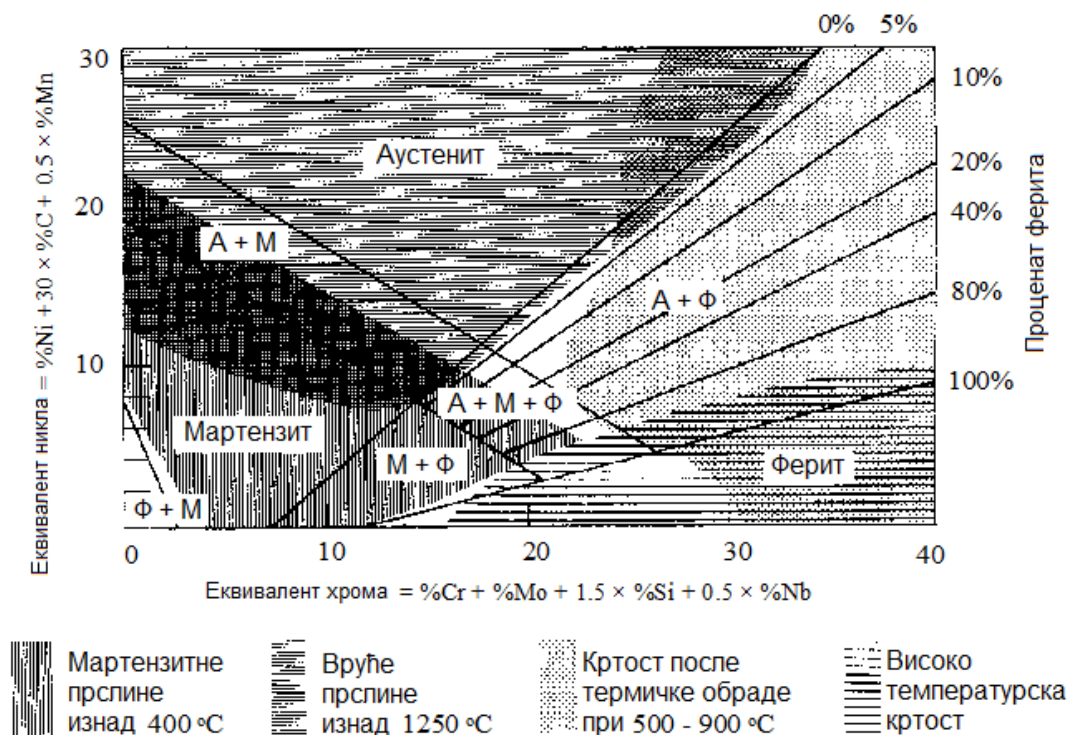
1.4501	X2CrNiMoCuWN25-7-4	DIN X2CrNiMoCuW25-7-4 NF Z3CDNU25-06Az	$C \leq 0,03$ $Si \leq 1,0$ $Mn \leq 1,0$ $P \leq 0,035$ $S \leq 0,015$ $N=0,20-0,30$ $Cr =24,0-26,0$ $Mo=3,0-4,0$ $Ni=6,0-8,0$ $W=0,5-1,0$ $Cu=0,5-1,0$
--------	--------------------	---	--

6. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ВИСОКОЛЕГИРАНИХ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА

Понашање високолегираних челика при заваривању се разликује од нелегираних због разлике између оних особина које су од пресудног значаја за понашање у току заваривања и настанак одређених грешака.

Високолегиране челике одликује знатно лошија термичка проводност и знатно веће термичко издужење, што утиче на настанак напона и деформација. Због тога сви челици овог типа, осим аустенитних захтевају предгревање.

Системи легирања челика и додатних материјала за заваривање условљени су настанком одређених структура, због чега се за општу оцену заварљивости нерђајућих челика разматрају способности заваривања легура одређених подручја у Шефлеровом дијаграму структура. Због предвиђања осетљивости на појаву карактеристичних грешака при заваривању ових челика Шефлеров дијаграм је подељен у четири подручја (слика 6.1).



Слика 6.1 Локација грешки у зависности од структуре у Шефлеровом дијаграму

Мере за повећање заварљивости, смањење или чак отклањање осетљивости за настанак оваквих грешака и структурних неповољности обухватају: правилан избор додатног материјала, поступка и параметара заваривања, температуре предгревања и термичке обраде после заваривања.

Феритни нерђајући челици имају веома низак садржај C, а $Cr > 12.5\%$ јер је услов за корозиону отпорност да садржај хрома износи најмање 12%. Ови челици не отврдњавају термичком обрадом због ниског садржаја угљеника, већ ојачавају прерадом на хладно као нпр. ваљањем, дубоким извлачењем и тсл.

За оцену заварљивости феритних челика треба узети у обзир следеће:

- Код потпуно феритне структуре не долази до закаљивања; закаљивање и настанак прслина при закаљивању настаје услед мартензитне трансформације код полуферитних челика (гранични садржај угљеника је 0.08%),
- Нема осетљивости ка настанку топлих прслина,
- Ниска деформабилност, али довољна дуктилност код тањих пресека (до 12 mm); суперферитни челици су нешто веће деформабилности него феритни и полуферитни челици,
- Због добрих могућности дифузионих процеса код температуре изнад 1000°C долази до појачаног раста зрна. Пошто се особине жилавости феритних челика заснивају на финозрној структури, услед пораста зрна долази до убрзаног опадања жилавости. Услед тог смањења жилавости настанак грубог зрна се не може поправити накнадном термичком обрадом; заварених спојева феритних Cr челика у прелазној зони шава имају повећану осетљивост на концентраторе напона,
- При порасту садржаја Cr ударна жилавост опада; екстремно ниски садржај C и N код суперферитних челика обезбеђују довољну жилавост,
- Излагањем ових челика дугом жарењу између 400-500°C долази до опадања жилавости због кртости на 475°C,
- Због релативно већег напона течења и снижене термичке проводности високи су унутрашњи напони,
- Феритне структуре α и δ -ферита су магнетичне.

Иако због ниске жилавости феритни челици имају склоност ка настанку хладних прслина, њихова заварљивост се може оценити као добра.

Аустенитни нерђајући челици имају површински центрирану кубну решетку за разлику од просторне код феритних челика. Као група ови челици се називају 18-8 јер садрже око 18% Cr, 8% Ni и веома мали % C, због чега не отврдњавају термичком обрадом, већ у великој мери ојачавају прерадом на хладно. Аустенитни челици могу бити јефтинији уколико садрже мање Ni уз додатак Mn. Из аспекта заваривања веома је битно да при хлађењу са веома високих температура уместо да се закале, аустенитни челици постају постају меки и веома пластични. Поседују изузетно велику способност обликовања деформисањем, па се често сложени облици израђују дубоким извлачењем.

За разлику од аустенитних челика са уделом δ -ферита, сви потпуно аустенитни челици поседују склоност ка топлим прслинама, које настају у металу шава или у ЗУТ-у, зависно од хемијског састава основног и додатног материјала и степена њиховог мешања, затим склоност ка међукристалној корозији због излучивања карбида хрома на границама металних зрна, као и кртости на високим температурама због образовања σ -фазе (кртог једињења FeCr) (види слику 6.1).

Удео δ -ферита у аустенитном металу шава, а такође и у основном материјалу утиче на смањење осетљивости ка настанку топлих прслина. Општи утицај δ -ферита важан је из три разлога:

- Слојеви δ -ферита ће растворити одређену количину елемената који утичу на стварање топлих прслина,
- Издвојени кристали δ -ферита из растопа образују клице за финозрну кристализацију метала шава у чијој структури је већа расподела нискотопљивих еутектикума, што је чини мање опасном за стварање топлих прслина,
- Удео δ -ферита у температурском интервалу кртости, својом еластичношћу умањује опасност од топлих прслина.

Као препоручена доња граница за удео δ -ферита обично се узима $2\div 6\%$. Већи удео δ -ферита утиче на смањење пре свега жилавости на ниским температурама и на стварање σ -фазе посебно код заварених спојева изложених високим температурама, на којима ова фаза настаје.

За одређивање удела δ -ферита у металу шава најчешће се користе методе:

- примена дијаграма структура,
- металографска структурна анализа и
- магнетне методе испитивања.

Још један проблем заварљивости аустенитних челика односи се на стварање карбида Cr_4C и међукристалну корозију кад у околним микрозапреминама садржај Cr падне испод 12% , што се спречава помоћу стабилизатора Ti и Nb . Титан и ниобијум поседују већи хемијски афинитет према угљенику него хром, па они везују угљеник и спречавају формирање карбида Cr_4C , па довољно хрома остаје у чврстом раствору кристалне решетке $\gamma\text{-Fe}$.

У додатни материјал се не уводи Ti , јер је овај елемент при заваривању склон оксидацији и преласку у троску стварајући истовремено реакцију дифузне дезоксидације. Због тога се у облогу аустенитних електрода додаје ниобијум будући да је мање склон оксидацији.

Мартензитни нерђајући челици садрже $12\div 17\%$ Cr и $0.15\div 1\%$ C што омогућава образовање мартензитне структуре чак и при спором хлађењу из аустенитног фазног подручја. Тешко је разликовати феритни и мартензитни челик само на основу садржаја Cr и C . Зато се користи израз $[\%\text{Cr}-17\cdot\%\text{C}]$ којим се добија вредност већа од 13 за феритне челике, а мања од 13 за мартензитне челике. При термичкој обради мартензитни челици се понашају слично угљеничним и нисколегираним челицима. После термичке обраде неки мартензитни нерђајући челици достижу напон течења и до 1380 MPa , а јачину на кидање 1930 MPa , али им корозиона отпорност, и способност пластичног обликовања далеко заостаје иза феритних и аустенитних челика.

Велика опасност код заваривања мартензитних челика су хладне прслине при закаљивању, прслине изазване водоником и настанак кртости образовањем карбида хрома. У широј зони ЗУТ-а могуће је високо отпуштање и пад чврстоће. Код непотпуне трансформације мартензита у ЗУТ-у, заостали аустенит се накнадно трансформише у неотпуштени мартензит, о чему се мора водити рачуна.

Због лоше термичке проводности, најчешће код већих дебелина (изнад $5\div 10\text{ mm}$) захтева се предгревање. Време отпуштања се регулише према лиму/плочи веће дебелине.

Дуплекс челици посебно они са садржајем $\text{C} < 0.03\%$ и садржајем N од 0.5 до 0.3% , у општем случају и код пажљиво одабраних параметара заваривања су добре заварљивости. Неопходно је узети у обзир да су због постојања две врсте структура истовремено присутне и предности и недостаци понашања у току заваривања (тежње су ка односу $\delta : \gamma = 1 : 1$).

Због ниже деформабилности удео δ -ферита чистог метала шава треба да износи 30% до максимално 50% , да би се у зони мешања спречио пораст удела δ -ферита. Због тога додатни материјали имају садржај око $3\div 4\%$ више Ni у односу на основни материјал. Са порастом удела δ -ферита преко 50% могућа је опасност од кртости услед огрубљења зрна и излучивања кртих фаза.

Због витоперења и настајања сопствених напона, термичка обрада је у већини случајева условно примењива, нарочито код делова веће дебљине. У циљу спречавања витоперења морају се предвидети већи зазори у корену жлеба.

Неопходно је брзину хлађења метала шава подесити у одређеним границама, да би при очвршћавању металне купке било довољно времена за добијање довољне количине аустенита. Брзина хлађења метала шава зависи од количине унете топлоте, међуслојне температуре и дебљине основног материјала, односно метала шава. У циљу смањења брзине хлађења и нивоа сопствених напона као и спречавања хладних прслина, код дебљина изнад 10 mm дебљине зида, при постављању припоја и заваривања треба применити предгревање на 100°C, а код дебљине зида изнад 20 mm на 150°C. Време хлађења од 1200 на 800°C не треба да буде дуже од 10 секунди, јер краће време хлађења доводи до повећања удела ферита и ниже жилавости. Оштро хлађење са ваздухом или водом не треба примењивати.

Заваривање ових врста челика треба поверити само посебно обученим и вичним заваривачима, увежбаним за заваривање ових челика.

7. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ НЕКИХ ВИСОКОЛЕГИРАНИХ НЕРЂАЈУЋИХ ЧЕЛИКА ПОМОЋУ ШЕФЛЕРОВОГ ДИЈАГРАМА

Могућност појаве топлих прелина при заваривању аустенитних и других челика може се умањити правилним избором додатног материјала, који после заваривања даје двофазну аустенитно-феритну структуру шавова. Истраживања су показала да шавови аустенитне структуре са $2\div 6\%$ δ -ферита, нису склони ка топлим и другим прелинама. Већи садржај δ -ферита није пожељан, јер утиче на смањење пластичности аустенитног шавова. У овим случајевима када је потребно изабрати одговарајући додатни материјал, који после топљења и мешања са основним материјалом даје шав горенаведеног састава користи се Шефлеров дијаграм.

Пре свега, неопходно је израчунати еквиваленте никла $(Ni)^e$ и хрома $(Cr)^e$ на основу познатог хемијског састава основног материјала:

$$(Ni)^e = Ni + 30 \cdot C + 0.5 \cdot Mn, \%,$$

$$(Cr)^e = Cr + Mo + 1.5 \cdot Si + 0.5 \cdot Nb, \%,$$

и добијене вредности унети у Шефлеров дијаграм.

Када се знају коефицијенти еквивалентности никла $(Ni)^e$ и хрома $(Cr)^e$ основног материјала, лако је, из одговарајућих каталога изабрати додатни материјал за заваривање. На основу познатог хемијског састава додатног материјала, потребно је, на исти начин као за основни материјал одредити $(Ni)^e$ и $(Cr)^e$, који се такође уносе у Шефлеров дијаграм.

После тога када на дијаграму постоји тачка структуре основног материјала (ОМ) и тачка структуре додатног материјала (ДМ), спојене правом израчунава се степен мешања, јер структура метала шавова не зависи само од састава основног и додатног материјала.

Степен мешања условљен је дебљином основног материјала, тј. геометријом жлеба и начином и параметрима заваривања, а израчунава се помоћу следеће формуле:

$$\gamma_o = \frac{A_t}{A_t + A}, \%,$$

где је: γ_o — удео основног материјала у металу шавова,

A_t — површина зоне топљења ($A_t = f(s, \delta)$),

A — површина жлеба.

Удео додатног материјала у металу шавова зависи од удела основног материјала и израчунава се према изразу:

$$\gamma_d = 1 - \gamma_o; \%$$

При томе мора бити испуњен услов: $\gamma_d + \gamma_o = 1$.

Када је познат степен мешања основног и додатног материјала могуће је одредити и хемијски састав метала шавова, тако што се добијена вредност степена мешања нанесе на праву ОМ-ДМ. Притом је потребно да структура метала шавова буде аустенитне структуре са око $2\div 6\%$ δ -ферита, што потврђује да су параметри заваривања правилно регулисани и да је изабрана електрода одговарајућа за заваривање. У случају да се добије степен мешања који не даје шав аустенитне структуре са уделом δ -ферита

у износу од 2÷6% потребно је вршити корекцију основних параметара заваривања све док се не добије одговарајућа структура метал шави.

7.1 Пример оцене заварљивости аустенитног челика помоћу Шефлеровог дијаграма

Аустенитни челик X1CrNi25-21 хемијског састава (%): 0.02C, 0.25Si, 0.010S, 0.11N, 25Cr, 21Ni и 0.2Mo.

Када се израчунају еквиваленти никла (Ni)^e и хрома (Cr)^e:

$$(Ni)^e = Ni + 30 \cdot C + 0.5 \cdot Mn = 21.6\%$$

$$(Cr)^e = Cr + Mo + 1.5 \cdot Si + 0.5 \cdot Nb = 25.58\%$$

и унесу у Шефлеров дијаграм (слика 7.1) добија се тачка OM₁ којој одговара чисто аустенитна структура.

Сада је потребно из каталога одабрати одговарајућу электроду, тако нпр., железара Јесенице производи феритно аустенитну рутилну электроду ознаке INOX R 19/9 Nb, хемијског састава чистог метала шави (%): 0.04C, 1.0Si, 0.7Mn, 19Cr, 10Ni и 0.32Nb, којој одговара (Ni)^e = 11.55% и (Cr)^e = 20.66%, односно тачка DM₁ на дијаграму, двофазне аустенитно-феритне структуре.

После овога може се израчунати одговарајући степен мешања, који како је напоменуто не зависи само од основног и додатног материјала већ и од параметара одабраног метода заваривања.

У овом примеру биће приказан технолошки поступак РЕЛ-заваривања челичног лима, дебљине $s = 4 \text{ mm}$, сучеони I – спој.

Табела 7.1 Избор пречника електроде према дебљини основног материјала

s, mm	2	3-5	6-8	9-12	13-15	16-20	>20
d, mm	2	3.25	3.25-4	4-5	5-6	5-6	5-6

Јачина струје заваривања зависи од основног материјала и дебљине радног предмета, односно од пречника електроде, врсте споја и положаја заваривања. На основу величине електроде може се изабрати средња вредност јачине струје.

При РЕЛ-заваривању аустенитних хром-никл челика, препоруке за избор јачине струје се дају према изразу $I = k \cdot d$, с тим што се коефицијент k усваја из табеле 6.2.

Табела 7.2 Избор јачине струје заваривања аустенитних Cr-Ni ($I = k \cdot d$)

Пречник електроде d, mm	2	3.25	4	5
Корекциони коефицијент k, A/mm	16÷20	20÷25	25÷30	30÷35

Према табели 7.2 оптимална јачина струје треба да износи:

$$I = 80 \text{ A}$$

Радни напон заваривања се може израчунати помоћу израза:

$$U = 20 + 0.04 \cdot I, V$$

$$U = 23.2 \text{ V}$$

где је: I – јачина струје у A

У основне елементе шава спада и дубина уваривања (δ) од које такође зависи степен мешања основног и додатног материјала у металу шава:

$$\delta = (0.3 \div 0.5) \cdot r$$

где је: $r = 0.00537 \cdot \sqrt{q_l}$ – полупречник изотерме која одговара температури топљења основног материјала, а q_l представља погонску енергију заваривања у J/cm .

Код електролучних метода, погонска енергија се дефинише изразом:

$$q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta_i, \text{ J/cm}$$

$$q_l = 8280 \text{ J/cm}$$

где је: $\eta_i = 0.9$ - коефицијент искоришћења топлоте (за рутилне електроде),

$v_z = 0.4$ - усвојена брзина заваривања.

Према горњим резултатима полупречник изотерме износи:

$$r = 4.8 \text{ mm}$$

Дубина уваривања у овом случају има вредност: $\delta = 1.44 \text{ mm}$

Сада су познати сви потребни подаци за израчунавање степена мешања који се израчунава према следећем изразу:

$$\gamma_o = \frac{A_t}{A_t + A}, \%$$

$$\gamma_o = 0.65$$

где је: γ_o – удео основног материјала у металу шава,

$$A_t = 11.2 \text{ mm}^2$$

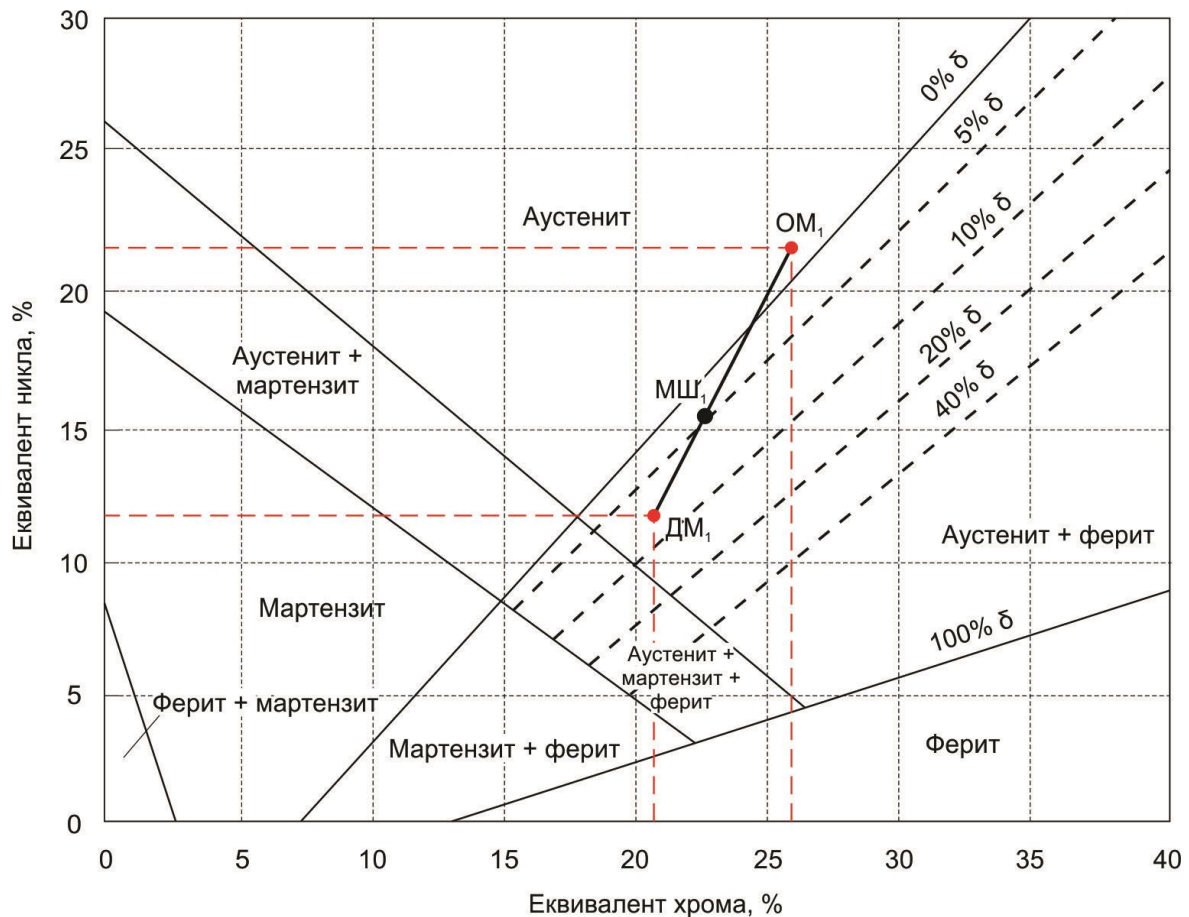
$$A = 6 \text{ mm}^2$$

Удео додатног материјала износи:

$$\gamma_d = 1 - \gamma_o, \%$$

$$\gamma_d = 0.45$$

Када се добијене вредности удела основног и додатног материјала нанесу на праву ОМ₁-ДМ₁ добија се степен мешања који даје шав аустенитне структуре са 5% δ -ферита, односно тачка МШ₁ (слика 7.1). Према томе параметри заваривања су одговарајући и електрода је правилно изабрана.



Слика 7.1 Шефлеров дијаграм челика X1CrNi25-21

7.2 Пример оцене заварљивости мартензитног челика помоћу Шефлеровог дијаграма

Мартензитни челик X30Cr13, хемијског састава (%): 0.03C, 0.8Si, 1.0Mn, 0.040P, 0.015S и 12Cr, коме одговара $(Ni)^e = 9.5\%$ и $(Cr)^e = 13.20\%$, односно тачка OM_2 на Шефлеровом дијаграму (слика 7.2).

Одабрана електрода из каталога железаре Јесенице је феритно-аустенитна рутилна електрода са ниским садржајем угљеника, ознаке INOX R 19/12/3 NC, хемијског састава чистог метала шави (%): 0.04C, 0.8Si, 0.7Mn, 18.5Cr, 11.5Ni и 2.7Mo, којој одговара $(Ni)^e = 13.05\%$ и $(Cr)^e = 22.40\%$, односно тачка DM_2 на Шефлеровом дијаграму, двофазне аустенитно-феритне структуре.

Пошто је у претходном примеру приказан детаљан технолошки поступак РЕЛ-а, у овом и наредном примеру биће приказане само усвојене вредности параметара заваривања. Дебљина основног материјала $s = 4 \text{ mm}$, сучеони I – спој.

ПРОЦЕСНИ ПАРАМЕТРИ РЕЛ-А:

• Погонска енергија	$q_l \approx 12078 \text{ J/cm}$
• Пречник електроде	$d = 3.25 \text{ mm}$
• Струја заваривања	$I_z = 110 \text{ A}$
• Радни напон	$U = 24.4 \text{ V}$
• Брзина заваривања	$v_z = 0.2 \text{ cm/s}$
• Дубина уваривања	$\delta = 1.77 \text{ mm}$
• Полупречник изотерме	$r = 5.9 \text{ mm}$
• Површина зоне топлјења	$A_t = 14.16 \text{ mm}$
• Површина жлеба	$A = 6 \text{ mm}$

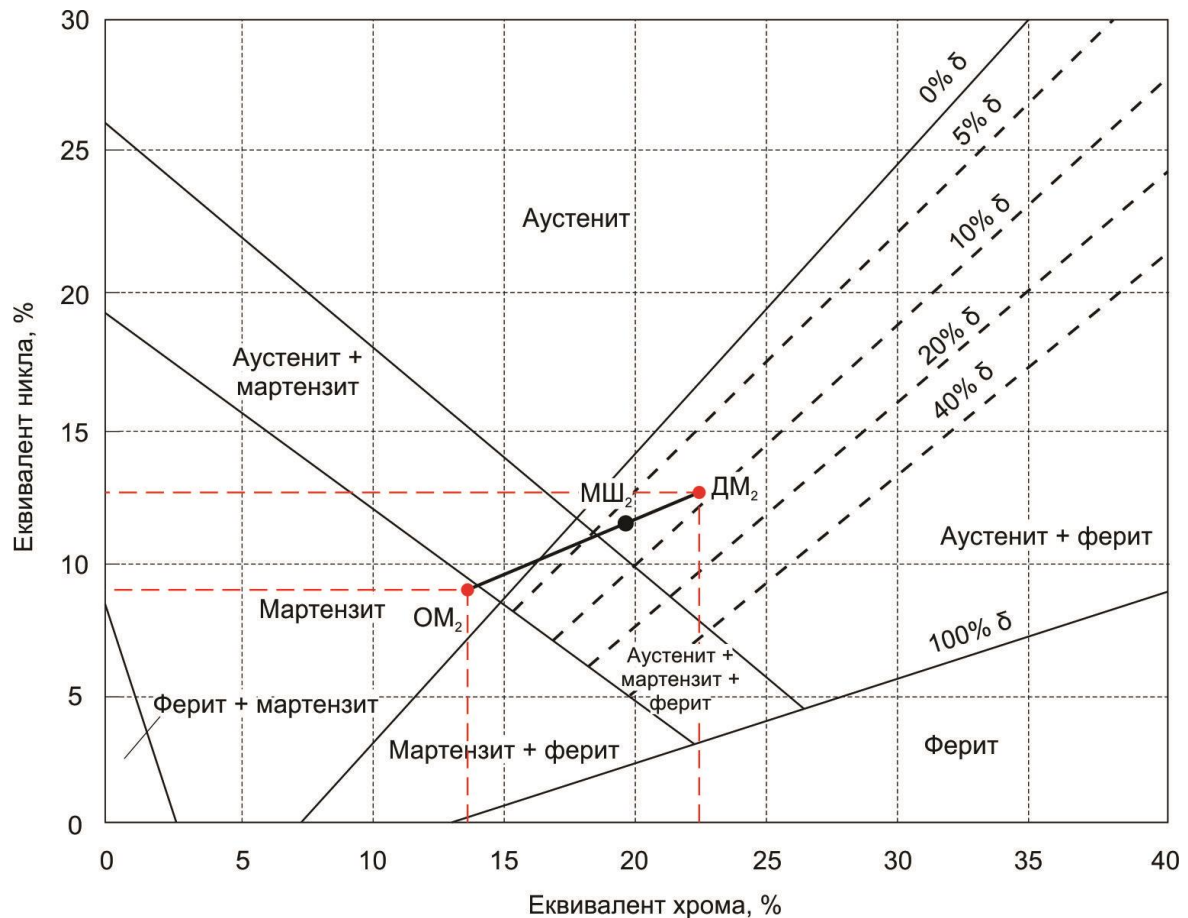
При заваривању са овим параметрима удео основног материјала у металу шав износи:

$$\gamma_o = 0.70$$

а удео додатног материјала је:

$$\gamma_d = 0.30$$

Наношењем ових вредности на праву OM_2 - DM_2 добија се степен мешања (тачка $MШ_2$) који даје шав аустенитне структуре са око 5% δ -ферита што значи да су параметри правилно регулисани и да је електрода правилно изабрана.



Слика 7.2 Шефлеров дијаграм челика X30Cr13

7.3 Пример оцене заварљивости феритног челика помоћу Шефлеровог дијаграма

Феритни челик X2CrTi17, хемијског састава (%): 0.025C, 0.5Si, 0.5Mn, 0.040P, 0.015S, 17Cr и 0.5Ti, коме одговара $(Ni)^e = 1\%$ и $(Cr)^e = 18.75\%$, односно тачка OM₃ на Шефлеровом дијаграму (слика 7.3) чисто феритне структуре.

Изабрана електрода означена је на дијаграму тачком ДМ₃, коју производи железара Јесенице под ознаком INOX R 25/20, хемијског састава чистог метала шава(%): 0.11C, 0.9Si, 2Mn, 25Cr и 20Ni, аустенитне структуре којој одговара $(Ni)^e = 24.30\%$ и $(Cr)^e = 26.35\%$.

И у овом примеру треба прорачунати параметре РЕЛ-заваривања за челични лим дебљине $\delta = 4 \text{ mm}$, сучеони I – спој.

ПРОЦЕСНИ ПАРАМЕТРИ РЕЛ-А:

- | | |
|-------------------------|---------------------------------|
| • Погонска енергија | $q_l \approx 4407 \text{ J/cm}$ |
| • Пречник електроде | $d = 3.25 \text{ mm}$ |
| • Струја заваривања | $I_z = 65 \text{ A}$ |
| • Радни напон | $U = 22.6 \text{ V}$ |
| • Брзина заваривања | $v_z = 0.3 \text{ cm/s}$ |
| • Дубина уваривања | $\delta = 1.08 \text{ mm}$ |
| • Полупречник изотерме | $r = 3.6 \text{ mm}$ |
| • Површина зоне топљења | $A_t = 8.64 \text{ mm}^2$ |
| • Површина жлеба | $A = 8 \text{ mm}^2$ |

При заваривању са овим параметрима удео основног материјала у металу шава износи:

$$\gamma_o = 0.52$$

а удео додатног материјала је:

$$\gamma_d = 0.48$$

Наношењем ових вредности на праву OM₃-ДМ₃, добија се степен мешања (тачка МШ₃) који даје шав аустенитне структуре са око 9% δ -ферита, тако да се мора извршити корекција основних параметара РЕЛ-заваривања.

Корекција параметара подразумева кориговање јачине струје заваривања и/или брзине заваривања.

ПРОЦЕСНИ ПАРАМЕТРИ РЕЛ-А ПОСЛЕ КОРЕКЦИЈЕ :

- | | |
|-------------------------|---------------------------------|
| • Погонска енергија | $q_l \approx 9558 \text{ J/cm}$ |
| • Пречник електроде | $d = 3.25 \text{ mm}$ |
| • Струја заваривања | $I_z = 90 \text{ A}$ |
| • Радни напон | $U = 23.6 \text{ V}$ |
| • Брзина заваривања | $v_z = 0.2 \text{ cm/s}$ |
| • Дубина уваривања | $\delta = 1.56 \text{ mm}$ |
| • Полупречник изотерме | $r = 5.2 \text{ mm}$ |
| • Површина зоне топљења | $A_t = 12.48 \text{ mm}^2$ |
| • Површина жлеба | $A = 6 \text{ mm}^2$ |

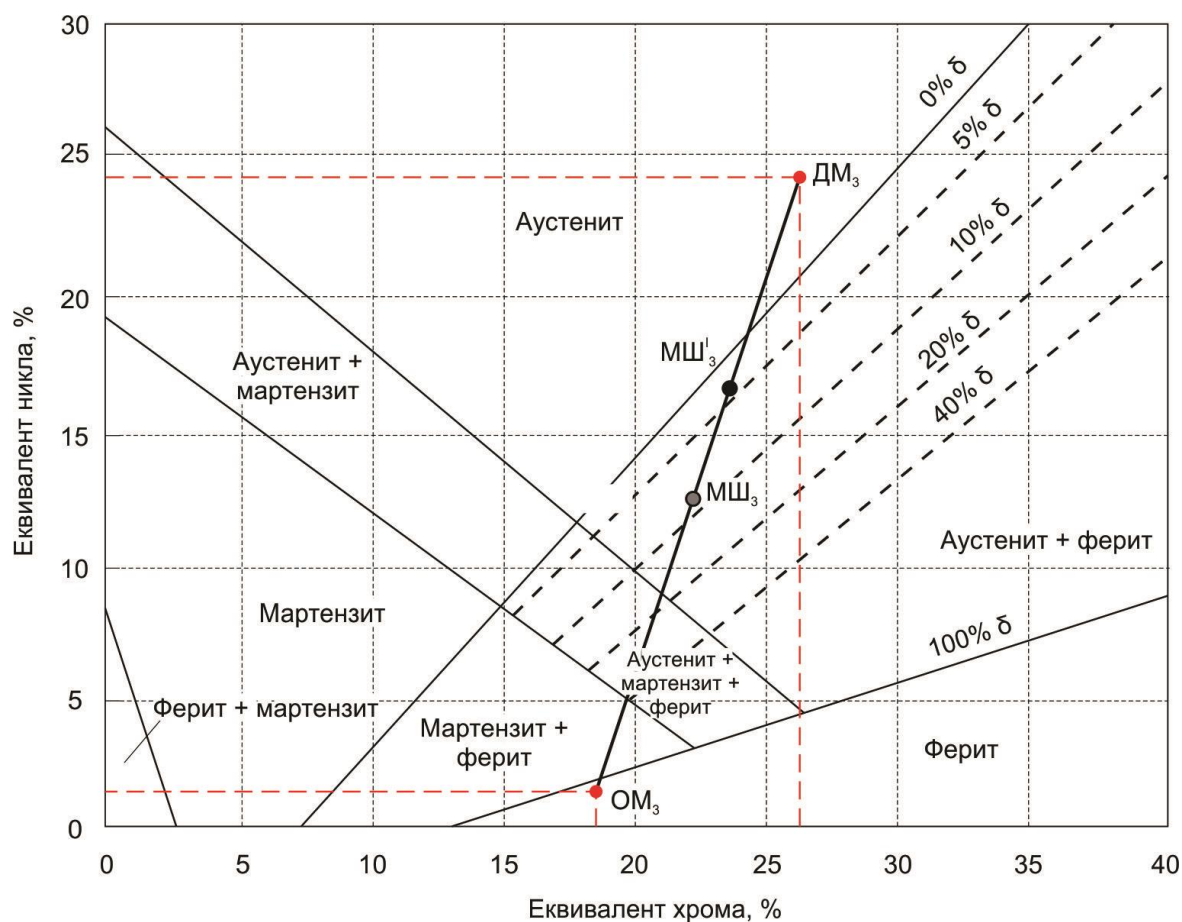
После корекције параметара удео основног материјала износи:

$$\gamma_o = 0.67$$

а удео додатног материјала је:

$$\gamma_d = 0.33$$

Сада, када се нанесу нове добијене вредности удела основног и додатног материјала на праву OM_3 - DM_3 добија се степен мешања означен тачком $MШ_3'$ који даје шав аустенитне структуре са око 5% δ -ферита.



Слика 7.3 Шефлеров дијаграм челика X30Cr13

8. ЗАКЉУЧАК

Високолегирани нерђајући челици налазе широку примену у савременој индустрији за израду одговорних конструкција. Разлози за њихову велику примену налазе се управо у њиховој главној особини, а то је отпорност према корозији. Како би били корозионо отпорни услов је да садрже најмање 12% хрома. Према хемијском саставу ови челици могу бити *хромни*, *хром-никлови* и *хром-мангански*, а према стању испоруке *ваљани* и *ливени*.

Заваривање нерђајућих челика може се изводити уобичајеним методама заваривања при чему се добијају заварени спојеви доста бољих својстава у односу на основни материјал уколико су испуњени одређени услови који се односе на правилан избор додатног материјала и параметре заваривања.

На примерима оцене заварљивости у овом раду додатни материјал је биран помоћу Шефлеровог дијаграма на коме је дат приказ потенцијалних грешака карактеристичних за поједине структурне фазе нерђајућих челика. Да би се те грешке спречиле одабрани додатни материјал је аустенитне структуре или двофазне аустенитно-феритне структуре, а степен мешања основног и додатног материјала биран тако да даје шав аустенитне структуре са уделом δ -ферита у износу од 2 до 6%.

Уколико добијени степен мешања није одговарајући, јер не даје шав тражених својстава вршена је корекција параметара заваривања (кориговање јачине струје и/или брзине заваривања).

9. ЛИТЕРАТУРА

- 1) **Јовановић М., Лазих В.:** *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, 2016.
- 2) **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања – приручник, друго издање*, Машински факултет у Крагујевцу, 2011.
- 3) **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В., Ратковић Н.:** *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, 2003.
- 4) **Јовановић М., Лазих В., Арсић Д.:** *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, 2016. (рукопис).
- 5) **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања – приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, 1996.
- 6) **Завод за заваривање:** *Материјали и њихово понашање при заваривању*, Број документа: 2.15., Београд, 2013.
- 7) Каталог додатних материјала и електрода, Железаре Јесенице, Словенија.