

Универзитет у Крагујевцу
Машински факултет у Крагујевцу



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије II/Технологија заваривања

Број индекса: 92/2008

Душан М. Арсић

**ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ
ЈАЧИНЕ КЛАСЕ S690QL**

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:

Наведе и опише врсте челика повишене јачине као и њихов развој, примену и поступак производње.

Такође, да укаже на заварљивост челика повишене јачине, и да на одређеном примеру, челику из класе S690QL, одреди заварљивост челика као и да предложи поступак и оптималну технологију заваривања.

На крају рада, студент треба да укаже на методе контроле заварених спојева, предложи контролу за разматрани челик и да прикаже резултате спроведене контроле како би заварена конструкција била поуздана.

Препоручена литература:

- 1) **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања – приручник*, Крагујевац, 1996.
- 2) **Јовановић М., Лазих В.:** *Упутство за заваривање челика повишене јачине*, Крагујевац, 2008.
- 3) **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В., Ратковић Н.:** *Машински материјали*, Крагујевац, 2003.
- 4) **Ђорђевић Д.:** *Оцена технолошко – металуршке заварљивости челика повишене јачине – специјалистички рад*, Крагујевац, 2010.

Крагујевац, 05.09.2011.

ментор:

Др Вукић Лазих, ред. проф.

Резиме:

У овом раду се разматрају челици повишене јачине, посебно нисколегирани челици. У теоријском делу рада утврђена је методологија за оцену заварљивости ових челика, као и прорачун параметара заваривања. Детаљније се у раду анализира заварљивост челика WELDOX 700 (S690QL). На крају је предложена и оптимална технологија заваривања као и оптимални параметри заваривања РЕЛ и МАГ поступцима заваривања овог челика.

Кључне речи:

Челици повишене јачине, заварљивост, WELDOX 700 (S690QL), микролегирање, водоничне прлине, температура предгревања, врсте електрода, покривни завар, завари испуне, контрола.

Abstract:

In this work are considered high strength steel weldability, with special point on advanced low alloy steel. In theoretical part of this work is determined the methodology of evaluation of high strength steel weldability and calculation of welding parameters too. Detailed in this work is weldability analysis for steel from class WELDOX 700 (S690QL). At least, are recommended optimal welding technology and optimization parameters of MAG and REL proceeding for welding of this steel.

Key words:

High strength steel, weldability, WELDOX 700 (S690QL), hydrogen rent, microalloying, temperature of heating, electrode type, cover weld, fill,weld, control.

САДРЖАЈ:

Предговор

1. УВОД	1
2. ПРОДУКЦИЈА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	4
2.1 Производња WELDOX челика	5
2.2 Врсте челика повишене јачине	7
2.2.1 С - Mn (угљенично-мангански) челици.....	8
2.2.2 Умирени челици.....	9
2.2.3 Микролегирни челици.....	9
2.2.4 ТМСР челици.....	10
2.2.5 Нисколегирани челици повишене јачине.....	14
2.2.5.1 Бејнитни челици.....	14
2.2.5.2 Нисколегирани побољшани челици (Q+T – Quenching + Tempering).....	15
2.3 Могућности повећања напона течења	16
2.3.1 Технолошки поступци повећања напона течења.....	16
2.3.1.1 Обликовање на хладно.....	16
2.3.1.2 Обликовање на топло.....	17
2.3.2 Металуршки поступци повећања напона течења.....	17
2.3.3 Термомеханички поступци повећања напона течења.....	18
2.4 Утицај легирајућих елемената на структурне промене челицима	19
3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	23
3.1 Појам заварљивости	23
3.2 Методе за испитивање заварљивости	25
3.2.1 Рачунске методе.....	25
3.2.2 Практичне методе (лабораторијске и технолошке пробе).....	26
3.2.3 Процена заварљивости на основу КНЗ дијаграма.....	27
3.3 Оцена заварљивости челика повишене јачине	27
3.3.1 Проблеми заварљивости С – Mn челика.....	28
3.3.2 Проблеми заварљивости микролегираних челика.....	29
3.3.3 Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине.....	30
3.3.3.1 Бејнитни челици.....	30
3.3.3.2 Нисколегирани побољшани челици (Q + T).....	30
4. ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	32
4.1 Предгревање и међупролазна температура	32
4.1.1 Накнадно загревање.....	34
4.1.2 Завршна обрада завареног споја пре настајања прслина.....	35
4.1.3 Повећан (висок) унос топлоте.....	35
4.1.4 Примена аустенитних додатних материјала.....	35
4.2 Унос топлоте	35
4.3 Додатни материјал	36
4.3.1 Додатни материјал од нерђајућег челика.....	37

4.4	Заштитни гас.....	38
4.5	Редослед заваривања, величина зазора и позиционирање шава	39
4.6	Накнадна термичка обрада.....	40
4.7	Технолошки поступак МАГ заваривања.....	40
4.7.1	Прорачун технолошких параметара МАГ заваривања	42
4.7.2	Рачунски параметри МАГ заваривања	43
4.8	Технолошки поступак РЕЛ заваривања.....	46
4.8.1	Технолошки параметри РЕЛ заваривања	46
5.	ПРИМЕНА И ПРИМЕРИ ЗАВАРЕНИХ КОНСТРУКЦИЈА.....	50
5.1	Врсте заварених спојева.....	50
5.1.1	Сучеони спојеви.....	50
5.1.2	Угаони спојеви.....	51
5.2	Параметри заваривања.....	52
5.2.1	Сучеони спојеви.....	52
5.2.2	Угаони спојеви.....	53
5.3	Примери заварених спојева.....	54
	Пример 1	55
	Пример 2	56
	Пример 3	57
	Пример 4	58
6.	МЕТОДИ КОНТРОЛЕ.....	60
6.1	Врсте грешака у завареним спојевима.....	60
6.2	Врсте контроле.....	61
6.2.1	Испитивања са разарањем.....	61
6.2.2.1	Испитивање затезањем.....	61
6.2.1.2	Испитивање савијањем.....	63
6.2.1.3	Испитивање ударне жилавости.....	63
6.2.1.4	Металографска испитивања	64
6.2.1.5	Расподела тврдоће у завареном споју	64
6.2.2	Испитивања без разарања.....	66
6.2.2.1	Визуелна контрола.....	66
6.2.2.2	Пробе херметичности (капиларна дефектоскопија).....	66
6.2.2.3	Радиографска испитивања	67
6.2.2.4	Ултразвучна испитивања.....	67
6.2.2.5	Магнетна испитивања	68
6.3	Примери контроле заварених узорака.....	69
6.3.1	Испитивање затезањем.....	69
6.3.2	Испитивање ударне жилавости.....	71
6.3.3	Ултразвучна контрола и контрола пенетрантним течностима.....	72
7.	ЗАКЉУЧАК.....	74
8.	ЛИТЕРАТУРА.....	75

ПРЕДГОВОР

У технички развијеном свету одувек је била присутна тежња за изградњом што лакших носећих конструкција којима се остварују различите погодности, као што су: уштеде у производњи, смањење утрошка енергије у експлоатацији код тежких покретних конструкција као што сукомпоненте железничких и путничких возила, дизалица, бродова итд., боља антикорозиона својства, мање загађивање околине, бољи квалитет, сигурност и поузданост производа и др.

Развој и производња челика повишене јачине и високочврстих челика, достигнућа у погледу њихових својстава, отворили су путеве њиховој примени у изградњи мостова, дизалица, возила, разних конструкција у грађевинарству, цевовода и паровода, цистерни и тсл. Међутим, и поред свих техно-економских предности ових челика они нису нашли ширу примену код нас. Посебно је уочљив недостатак препорука и стандарда који се односе на прописивање технологије заваривања ових челика.

Овај рад истражује поменути проблематику у циљу дефинисања правилне оцене заварљивости ових челика и прорачун параметара заваривања како би се добијени резултати могли применити и у управљању интегритетом и квалитетом конструкција израђених од челика повишене јачине са посебним акцентом на челику S690QL класе WELDOX 700.

1. УВОД

У савременој индустријској производњи заварене конструкције заузимају веома важно место. До овако масовне примене заварених конструкција дошло се развојем поступака заваривања, с једне стране, и развојем све већег броја класа челика погодних својстава, с друге стране.

При пројектовању ових конструкција функционалност и сигурност у условима експлоатације су два најважнија захтева за успешну конструкцију. Зато се данас уз захтев чврстоће мора размотрити и опасност од кртог лома која у великој мери зависи од заварених спојева. Међутим, стандардизована правила прикривају потребу за тим захтевима јер се материјали углавном бирају само на основу њихове чврстоће са основном претпоставком да ће у систему доћи само до еластичних деформација. У ствари, у завареним спојевима долази до концентрације напона услед присуства грешака условљених процесом заваривања. На тај начин стварна опасност од лома конструкције зависи од материјала у околини подручја концентрације напона, било да је у питању прекомерна деформација, лом од замора, крти лом или оштећење изазвано пузањем.

С обзиром на такву ситуацију јасно је да локалне особине завара и количина присутних грешака представљају два основна фактора за поузданост конструкције. Из тих разлога веома је битно да буде остварена добра заварљивост изабраног основног материјала како би се добили спојеви повољних особина. Све то упућује на потребу да се познају својства раличитих врста челика који су намењени за израду одговорних заварених конструкција и особености њиховог заваривања, као и својства самих заварених спојева. Треба упознати различите околности у којима могу настати грешке металуршког, технолошког или конструкционог порекла и начине да се такве грешке избегну контролом састава примарно произведеног челика и поступка заваривања. Притом, треба размотрити и могуће проблеме у експлоатацији као што су прекомерна деформација, крти лом, замор, пузање и корозија. Из тих разлога, треба посебно обратити пажњу на неке важне утицаје који при избору челика морају бити анализирани и указати на различите проблеме који се притом могу срести, а како би били сагледани још у фази конструисања.

Развој нових материјала и технологија иде у смеру оптимизације конструкцино-технолошких решења у погледу побољшања функционалних особина машина, уређаја и конструкција, уз смањење њихове тежине, побољшања технологичности, повећања продуктивности, продужења радног века конструкције, снижења трошкова производње и експлоатације.

Данас постоји широк асортиман конструкционих (инжењерских) материјала који се могу употребити за израду разних делова машина. У техничкој пракси, уместо чистих метала, углавном се користе легуре које су вишекомпонентног састава што значи да поред основног метала садрже и друге састојке (метале и неметале). Чак ни тзв. чисти метали уобичајеног квалитета не могу се сматрати за системе са једном компонентом јер садрже већу или мању количину непожељних примеса (нечистоћа).

У техници се највише, као конструкциони материјала, користе челици и ливена гвожђа тј. легуре гвожђа и угљеника, затим легуре обојених метала (алуминијум, бакар и тсл.) а у новије време и легуре титана. Али легуре на бази гвожђа су и данас најпримењиваније у техничкој пракси. Од целокупне светске производње метала њихов удео је око 95%. Иако су челици у основи легуре гвожђа и угљеника они увек садрже и одређени проценат других елемената, било да су они намерно додати или да су

присутни као нежељене примесе. Притом се за различите намене и конструкције траже и различита својства. Та различитост у својствима се постиже легирањем са различитим елементима. Поред свега тога као један од битних фактора јавља се цена јер је тежња да се остваре максималне уштеде на свим пољима. Зато материјал мора бити захтеваног састава и жељених својстава али да притом има и повољну цену.

Пре само неколико деценија процене су биле да ће око 95% данашњих инжењерских материјала бити замењено алтернативним материјалима¹. То се није обистинило. Главни разлог за то је супериорност челика у односу на друге материјале у погледу односа квалитет/цена. На развој челика у последњих 100 година паралелно су утицала два фактора: освајање знања из физичке металургије и развој опреме и технологије за примарну производњу челика. Као резултат та два фактора јављају се и челици који се развијају последњих тридесетак година, а који уствари настоје да значајно побољшају особине угљеничних челика у погледу јачине и заварљивости и да притом не угрозе цену. Ти челици настају посебним поступцима микролегирања као и посебним поступцима термомеханичке обраде материјала. Називају се челици повишене јачине и до данас су потиснули многе конструкционе угљеничне челике захваљујући оптималној комбинацији механичких карактеристика, заварљивости и цене.

Циљ развоја ове врсте челика је подизање напона течења и повећање затезне чврстоће а тиме и више допуштеног оптерећења у раду. Ови челици су омогућили примену знатно мањих носећих пресека код истих оптерећења конструкција чиме се смањује маса и запремина. Надаље је задржан повољан однос $R_{p0.2}/R_m$ тако да у случају преоптерећења пре долази до пластичне деформације него до лома. Све то се постиже додавањем малих количина легирајућих елемената као што су Ti, Nb, V, B, Al и др. који у материјалу стварају фино распоређене карбиде, нитриде и карбонитриде који коче раст аустенитног зрна што директно утиче на јачину самог челика.

Такође, технологија заваривања или наука о вештини заваривања је најмлађа грана машинске технологије. Њен нагли развој настао је крајем XIX. и почетком XX. века када је почела примена горивих гасова и електричног лука као топлотних извора. Од тада се ова технологија непрекидно развија захваљујући примени нових достигнућа како у фундаменталним наукама и рачунској техници, роботизици и другим дисциплинама. Иако на први поглед изгледа да успех заваривачких радова зависи само од вештине и искуства заваривача, тачније да је то само рутински посао, у стварности се технологија заваривања не заснива само на томе већ и на одређеним научним концептима које морају познавати првенствено инжењери и технолози, а у извесној мери и заваривачи.

Основа за ширу примену заваривања створена је проналаском извора велике концентрације топлоте, што је неопходан услов за локално топљење метала. Тако је давне 1802. године у САД конструисан први горионик са водоником и кисеоником а готово век касније (1901.) у Француској је израђен први горионик са окси-ацетиленским пламеном. Седамдесетих година XIX. века се експериментисало и са заваривањем помоћу електричног лука. Прво, 1862. са угљеном електродом па 1891. са голом електродном жицом да би у првој декади XX. века, 1908. Швеђанин Кјелберг пронашао обложену электроду. Тадашња истраживања су показала да су заварени спојеве изведени голим електродама лоших особина, због тога што растопљени метал апсорбује гасове из ваздуха. Даљим развојем дошло се до закључка да се заштита растопа од околне атмосфере у принципу може остварити на 2 начина:

¹ У алтернативне материјале спадају пластике (полимери), керамике, композити (vlakна), стакло, и др.

применом топитеља (преко електродне облоге или у виду праха) или потискивањем ваздуха из зоне заваривања (довођењем аргона, хелијума, угљен-диоксида или њихове мешавине)². На основу тих сазнања уведени су следећи поступци заваривања: ручно-електролучно (РЕЛ, 1908.), заваривање под прахом (ЕПП, 1928.), под троском (ЕПТ, 1953.), и поступци заваривања у заштити гаса (МИГ/ТИГ и МАГ, у раздобљу од 1940. до 1950. године). Поред ових поступака велику примену имају и поступци термомеханичког заваривања у које спадају тачкасто, шавно, сучеоно итд.

Најзад се у последњих тридесетак година (када почиње и период развоја челика повишене јачине) развијају и примењују физички методи заваривања као што су заваривање електронским снопом, ласером, ултразвучним осцилацијама, дифузијом, трењем, експлозијом итд.

Из овог кратког прегледа главних поступака заваривања јасно је да данас постоје многобројни начини за спајање два метала. Међутим, из тога произлази и проблем како се одредити за оптималан поступак с обзиром на то да процес заваривања може довести до одређених структурних трансформација, пада пластичности, заосталих напона и тсл. Све се то, погодним избором заваривања, технолошких параметара и термичке обраде у неким случајевима, елиминише или своди на најмању могућу меру која може бити прихватљива.

Данас, се највише спајају легуре гвожђа, пре свих челик. На основу релевантних података, од укупне светске потрошње метала на легуре гвожђа отпада око 95.45%, Al – 1.75%, Cu – 1.2%, Zn – 0.8%, Pb – 0.6%, Ni – 0.1% и на Sn, Mg и Ti – 0.1%. Није занемарива ни примена неких савремених материјала као што су полимери, композити, керамике, али метали, упркос неким предвиђањима, јесу и остаће још дуго времена главни конструкциони материјали, а заваривање основни начин спајања у машиноградњи, бродоградњи, мостоградњи, котлоградњи, грађевинарству у др.

Треба с поменути да се, с обзиром на тенденцију развоја ове области, технологије заваривања усавршавају применом рачунара, аутоматизације и робота. Тежи се разради система пројектовања конструкција помоћу рачунара по тзв. CAD/CAM систему.

У овом раду дат је преглед врста и поступака добијања разних врста челика повишене јачине. Указано је и на могућности повећања напона течења као и на утицај легирајућих елемената на структурне преображаје. Објашњени су и проблеми заварљивости челика повишене јачине са посебним освртом на класу S690QL. Пажња је посвећена и утврђивању склоности овог челика ка образовању прслина у процесу заваривања као и методама за њихово спречавање.

² Поменути гасови делују као заштитни, а Ag и He су инертни јер не образују једињења са кисеоником и другим гасовима при заваривању.

2. ПРОДУКЦИЈА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Ови челици се интензивно развијају у последњих тридесет година и користе се за израду веома одговорних конструкција које раде у посебним условима оптерећења, попут делова транспортних и дизаличних конструкција, мостова, цевовода, војних возила итд, а све у циљу смањења тежине конструкције, побољшања њених експлоатационих карактеристика, продужења радног века, побољшања технолошких особина материјала и снижавања трошкова израде.

У почетку су се претежно користили угљенични челици међутим, ти угљенични челици нису могли да задовоље све захтеве који су пред њих постављани а који су се углавном односили на смањење тежине конструкције а да при томе јачина, као најважнији фактор, не опадне. Поред тога додавање угљеника у количинама већим од 0.22% знатно погоршава заварљивост. Због тога се последњих година истражују и производе челици повишене јачине који у себи поред угљеника садрже и микролегирајуће елементе који омогућавају добијање финозрне структуре материјала. Уз то, у процесу ливења и специфичном процесу добијања у ваљаницама, уз термичку обраду и висок степен деформације у току прераде добијају се повишене механичке особине и отпорност на деформације и хабање уз обезбеђење добрих технолошких особина. На овај начин добијени су материјали повишене јачине који висока механичка својства задржавају и на ниским температурама, као и повишену јачину на притисак, деформације и хабање.

Карактеристика ових челика је да се у односу на угљеничне одликују повећаним својствима јачине и поред ниског садржаја угљеника ($C < 0.22\%$). То повећање јачине је резултат позитивног дејства малих количина легирајућих елемената који не погоршавају заварљивост, за разлику од угљеничних челика код којих повећање садржаја угљеника доводи до побољшања карактеристика али и до погоршања заварљивости. Технологија микролегирања омогућила је производњу нове категорије челика који су уствари конвенционални угљенични челици али са малим додацима легирајућих елемената ($\approx 0.50\%$), при чему долази до повећања напона течења, затезне јачине и тврдоће материјала, уз задржавање добре ударне жилавости.

Челици повишене јачине поседују: повишену затезну јачину и напон течења, издужење, жилавост, а све ове особине задржавају и на сниженим температурама уз одличан однос тежине и цене. Ови челици су опште прихваћени као конструкциони материјал, посебно када је реч о завареним конструкцијама. Разлози за то су релативно ниска цена, повољна механичка и металуршка својства, смањење тежине конструкција, побољшање заварљивости и тсл.

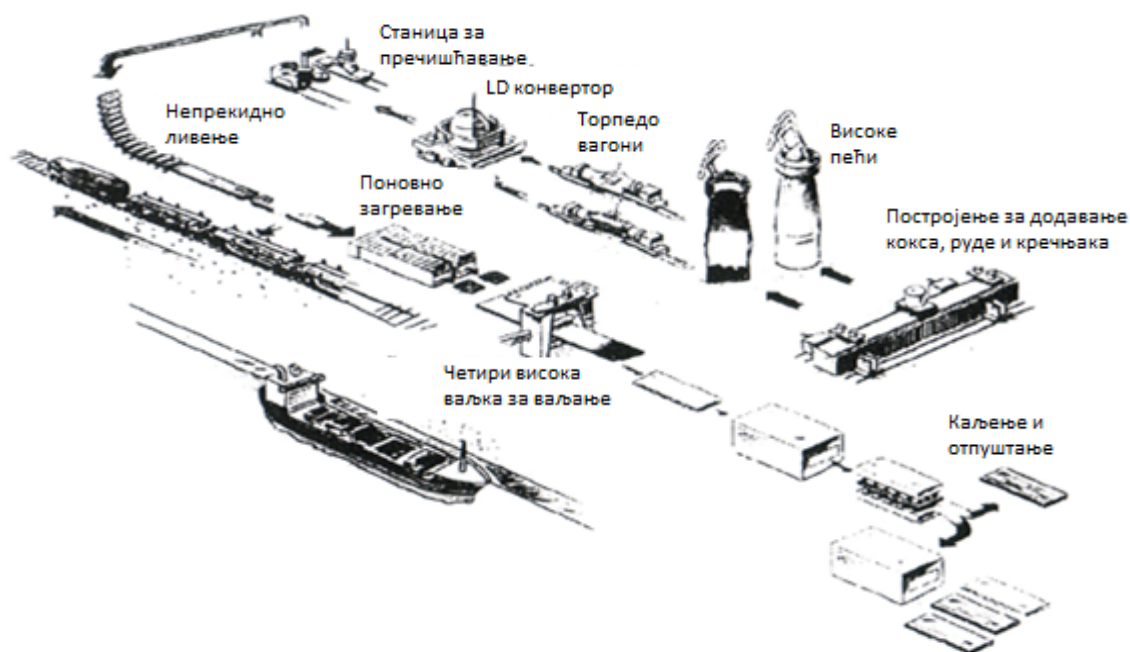
Челици повишене јачине се сматрају нисколегираним. Сврстани су у посебну групу челика која је слична ваљаним средњеугљеничним челицима са побољшаним механичким својствима додавањем малих количина легирајућих елемената. Разликовање ових челика је оправдано и због тога што је њихова цена ближа цени угљеничних него легираних челика. Повећање својстава отпорности ових челика остварује се као резултат разних механизма ојачања, металуршки повољном комбинацијом и садржајем легирајућих елемената, термомеханичком обрадом или комбиновано.

2.1 Производња челика повишене јачине класе WELDOX

Класе челика WELDOX¹ производе се у Шведској од 1992. године у железари SSAB Oxelösund. Израђују се по строго контролисаном хемијском саставу и тачно дефинисаним производним фазама. То је омогућило да остваре повољне механичке особине са уским границама толеранција. Разликују се две врсте ових челика: конструкциони и челици за судове под притиском. Њихова структура је феритно – перлитна па спадају у групу добро заварљивих челика али само за плоче релативно мале дебљине. Добијају се поступцима термомеханичке обраде челичних полупроизвода на високим температурама (ваљање и контролисано хлађење).

Напомена: S690QL је класа WELDOX челика. Постоје три модификације (класе) овог челика (WELDOX 700D = S690Q, WELDOX 700E = S690QL i WELDOX 700F = S690QL1) у зависности од гарантоване ударне жилавости челика. S690QL је WELDOX E класе и има гарантовану ударну жилавост на - 40°C.

WELDOX челици се производе ливењем у инготе. Пре ваљања инготи се загревају на приближно 1200°C а затим прогресивно ваљају до захтеваног коначног облика – плоча или профила. Први део ваљања се изводи у зони рекристализованог аустенита (изнад 950°C), где се рекристализација одвија већ при ваљању, док се аустенитно зрно смањује редукијом дебљине улошка. Ваљање се онда наставља у подручју метастабилног аустенита где долази до хладне деформације а аустенитна зрна остају деформисана. За време трансформације свако аустенитно зрно даје много феритних зачетака по кристалним границама аустенитних зрна. После завршене трансформације настао је велики број феритних зрна која побољшавају својства јачине и жилавости челика.



Слика 2.1 Схематски приказ процеса производње WELDOX челика

Постројење за додавање кокса, руде и топитеља. Ово постројење је састављено од око 100 пећи које испоручују угаљ. Пећи могу примити око 14 тона угља и загрејане су на 1000°C. После приближно 20 h од суве дестилације угаљ постаје кокс.

¹WELDOX – комерцијална ознака Шведског произвођача SSAB

Кокс је уствари камени угаљ који садржи више од 90% угљеника и има изузетну калоричност. Даље се кокс пуни у вагоне и хлади водом у торњевима за гашење.

Високе пећи. Кроз горњи отвор пећи, у одређеним количинама и по одређеном редоследу, убацују се комади руде гвожђа (магнетит, сидерит,...), кокса и топитеља². Кокс углавном служи као гориво али такође омогућава да гасови несметано пролазе кроз материјал у пећи. Сирово гвожђе се испушта кроз отвор на дну саме пећи, приближно на сваких 4 - 5 h по 400 - 500 тона тако да дневна продукција достигне и 2000 тона. Поред отвора за испуштање сировог гвожђа нешто изнад постоји и отвор за испуштање шљаке или згуре (састава SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и др.). У зависности од хлађења растопа угљеник садржан у њему (око 4-5%) се може излучити у слободном облику у виду графита или у везаном као карбид гвожђа (цементит Fe_3C). При спором хлађењу и додавању силицијума угљеник се излучује у виду фино распоређеног графита у металу који се зове сиво ливено гвожђе (због боје прелома). Супротно, ако се растоп брже хлади, уз смањење Si и додаток Mn угљеник се излучује као цементит а настаје бело ливено гвожђе намењено за прераду у челик. Висока пећ ради непрекидно а за време рада се само допуњује неопходним сировинама.

Торпедо вагони. Осам торпедо вагона који се крећу по шинама користе се за транспортовање и складиштење полуга белог сировог гвожђа између високих пећи и челичана. Торпедо вагони су капацитета 325 тона ливених полуга.

LD конвертор (пећ). У LD конвертору (добили назив по Аустријским железарама L'inz Donawitz), се истопљено ливено гвожђе продувава чистим кисеоником. У конвертору капацитета приближно 200 тона сировог гвожђа из пећи меша се са око 45 тона ситних комада челика. Непосредно пре почетка реакције са кисеоником додаје се топитељ који потпомаже издвајање троске на површину растопа. У конвертор се спушта цев кроз коју се удубава кисеоник. Удубани кисеоник реагује са гвожђем док гвожђе оксид (FeO) реагује са угљеником и примесима. Ливено гвожђе постаје челик тек када се садржај угљеника смањи на мање од 2.11%. Из LD конвертора растопљени челик се најпре претаче у казан а затим преноси до станица за пречишћавање.

Станице за пречишћавање. Овде постоје две станице за пречишћавање. У њима се гвожђе анализира и температура се завршно регулише и отклањају се преостале нечистоће као што су водоник, кисеоник, сумпор, фосфор итд. Овде се изводи и додавање легирајућих елемената у циљу добијања различитих типова челика.

Непрекидно ливење. После пречишћавања изливени челик се одваја у велике табле. То раде две машине које непрекидно лију челик. Очврсли челик се сече у комаде зване слабови (правоугаони попречни пресек) чија је дужина око 11 метара.

Поновно загревање. При даљој преради ови полупроизводи се загревају до белог усијања (1200°C) и онда се ваљају у 4 висока ваљка.

Четири висока ваљка за ваљање. Четири велика ваљка су поређани један изнад другог при чему су и мало покретни у вертикалном правцу. Померањем ваљака и регулисањем температуре добијају се различите дебљине плоче. Железара SSAB Oxelösund је снабдевена са 4 моћна ваљка која су у стању да ваљањем смање дебљину плоча са 150 mm на чак 4 mm.

Сечење. После ваљања и директног гашења (каљења) потребно је табле исећи на стандардне димензије. Сечење може бити механичко на великим машинским маказама или термичким поступцима – гасним или плазма поступком.

² Топитељи потпомажу сагоревањем издвајање шљаке на површину растопа и смањују температуру топљења. Као топитељ се најчешће користи кречни камен CaCO_3 мада то може да буде и SiO_2 .

Каљење и отпуштање. То су процеси термичке обраде који се одвијају на високим температурама. Каљење се изводи загревањем материјала на око 900°C и наглим хлађењем најчешће млазевима воде. Резултат оваквог поступка јесте тврд површински слој материјала. После каљења најчешће се изводи отпуштање (ниско или средње). Циљ отпуштања је да се поправе својства пластичности и жилавости и да се смањи ниво заосталих напона насталих у процесу каљења.

Премазивање и обележавање. На крају процеса табле се обележавају и премазују антикорозионим бојама.

2.2 Врсте челика повишене јачине

Основни циљ при избору основног материјала за металне заварене конструкције је да материјал буде што јефтинији а да притом задовољи сва тражена механичка својства. Економичност примене ових челика у металним конструкцијама произлази управо из чињенице да они испуњавају све те услове. Челици повишене јачине се у великој мери данас користе за веома одговорне конструкције. Њихова предност је у релативно ниској цени, повољним механичко-металуршким својствима, мањој тежини, побољшаној заварљивости итд. У челике ове класе сврставају се сви челици са напоном течења већим од 360 МПа.

Према југословенском стандарду (JUS) ови челици се деле на:

- Опште конструкционе челике укључујући и С-Мп челике (JUSC.BO.500; DIN 17100)
- Финозрне микролегиране челике (JUSC.BO.502; DIN 17102)

Југословенски стандард JUS C.BO.500:1989 замењен је стандардом SRPS EN 10025: 2003³ а стандард JUSC.BO.502: 1979 замењен је са SRPS EN 10025.-056.-113⁴.

Као основа за производњу челика повишене јачине узет је угљенични⁵ челик. Код ових челика главну улогу има угљеник. Он у челику може бити садржан у процентима од 0.003 до 2.11%. Доминантно утиче на особине челика посебно на његову јачину и тврдоћу. Поред угљеника у угљеничним челицима се још налази и један број пратећих елемената као што су: Mn < 0.8%, S < 0.6% као и нечистоће P < 0.04%, S < 0.04% и гасови⁶ O₂, H₂ и N₂. Угљеник се гвожђем гради интерстицијске⁷ чврсте растворе. Због таквог свог положаја у кристалној решетки он је ојачава и такође представља препреку кретању дислокација нпр. при затезању. Стога је потребно повећати силу потребну за његово разарање. Али, са друге стране, додавање угљеника лоше утиче на заварљивост челика па се сматра да је челик заварљив при највећем садржају угљеника C ≤ 0.25%. При већем садржају угљеника од граничног, челик је склон закаљивању и појави хладних прслина у ЗУТ⁸-у. Такође, повећање садржаја

³ Стандард SRPS EN 10025: 2003 – топловаљани производи од нелегираних конструкционих челика. Технички захтеви за испоруку, настао је ревизијом стандарда JUS C.BO.500.1989 (општи конструкциони челици - Технички услови), и представља превод EN 10025:1990 и његове допуне A1:1993. Овај стандард се односи на топловаљане производе од нелегираних основних и квалитетних челика (дефиниције према SRPS EN 10020) намењених за елементе за израду конструкције које се спајају заваривањем, закивцима и завртњевима.

⁴ Стандард SRPS EN 10025,-56,-113 - финозрни конструкциони челици настао је ревизијом стандарда JUS C.BO.502 (финозрни конструкциони челици – Технички услови за израду и испоруку).

⁵ Данас се често користи термин нелегирани уместо угљенични.

⁶ O₂ – кисеоник, H₂ – водоник, N₂ – азот.

⁷ Интерстиција – појава уласка атома са малим пречником атома у празнине (интерстиције) кристалне решетке атома гвожђа. Елементи са мањим поменути пречником су С, N и В и они систему Fe-C граде интерстицијске чврсте растворе.

⁸ ЗУТ – зона утицаја топлоте.

угљеника доводи и до немогућности обраде челика на топло што је резултат појаве лако топљивих и кртих еутектика које чине кртим и сам челик при температури од око 800°C и више односно у зонама црвеног усијања. Та појава се назива кртост при црвеном усијању. Сви ови недостаци, временом су довели до истраживања да се начин производње и сам састав челика промене како би се и његова својства побољшава а да се притом не повећа цена. У даљем тексту детаљније ће бити описани челици повишене јачине по врстама.

2.2.1 Угљенично-мангански (C - Mn) челици

За израду конструкција најчешће коришћени челици јесу угљенични. Међутим, сами угљенични челици су се показали као мање погодни за израду конструкција од велике одговорности, већих димензија, за рад у хемијски агресивним срединама, за рад на повишеним и сниженим температурама и тсл. Такође, када се тражи конструкција са израженим својствима жилавости, тада угљеника мора бити у што мањој мери. Да би конструкција у оваквим условима имала потребну носивост морали би да се користе већи попречни пресеци што директно узрокује и повећање тежине. Превазилажење ових проблема омогућено је развојем ове врсте C – Mn челика (ситнозрни феритно-перлитни челици са повећаним садржајем мангана).

Међу првим методама повећања својстава јачине применом микролегирања почело је повећањем садржаја мангана код нискоугљеничних челика. Улога мангана у челику је двојака: утиче на ојачање и регулише количину сумпорних укључака. Манган није био замена за угљеник јер он у челику гради супституцијски⁹ а не интерстицијски чврсти раствор. Уобичајени садржај мангана је од 1.4 до 1.7%. Манган има велики афинитет према сумпору због чега гради једињење MnS према реакцији:



MnS (сулфид мангана) се топи на температури од око 1620°C. Сумпор је присутан и у гвожђу али у виду сулфида гвожђа који на високим температурама са гвожђем гради еутектику ниске температуре топљења. Оне се, још у течном стању, распростиру по границама металних зрна и за време хлађења очвршћавају у крти филм. Тиме се објашњава чињеница да се челик са течним филмом не може прерађивати на топло јер постаје крт кад се охлади. Али услед великог афинитета мангана према сумпору најједноставнији начин за везивање нежељеног сумпора јесте додавање довољних количина мангана. Манган се лакше једини са сумпором стварајући једињење MnS високе температуре топљења које се не појављује у течном стању при топлој преради челика и због тога има незнатан утицај на жилавост коначног производа јер је равномерније распоређен у челику. Ова значајна улога мангана омогућила је да се видно повећа жилавост конструкционим челицима. У току даље прераде MnS се или ваљањем издужује или ковањем ломи и ситни. Присуство великих издужених укључака MnS није пожељно јер може довести до тзв. ламеларног цепања. У новије време овај проблем се елиминише додавањем малих количина калцијума (Ca) око 0.004%. Калцијум служи као модификатор облика манган сулфида претварајући га у укључак сферног облика који је недеформабилан односно не мења свој облик у току било које даље прераде. Само увођење калцијума, постојећим квалитетима челика, повећава жилавост и до 40%.

⁹ Супституцијски чврсти раствор настаје када растворени атоми (растворка) замене атоме основе (растварача).

2.2.2 Умирени челици

У циљу смањења садржаја кисеоника у челику, који у њему неминовно остаје у току прераде, у завршној фази топљења или у ливачком лонцу додају се дезоксидациона средства. У ту групу спадају елементи који имају већи афинитет према кисеонику од гвожђа. Најчешће коришћени су Al и Si, у количини која се одређује на основу последње хемијске анализе у току производње челика. На овај начин се добија нова врста челика тзв. умирени челици ($Si + Al \approx 0.2\%$). Назив су добили по понашању у току ливења јер, како више није било слободног кисеоника, није долазило до оксидације преосталог угљеника и издвајања гасовитих продуката CO, површина је била мирна више се нису запажали мехурови. Посебно је повољна дезоксидација помоћу Al јер је уочено да, у неким Al - умиреним челицима, долази до таложења укључака алуминијум нитрида по границама који блокирају раст металног зрна. Ово се посебно односи на челике који имају висок садржај азота. Лако стварање алуминијум нитрида је последица великог афинитета Al и N. Дакле, алуминијум у челику има двоструку улогу:

1. Умирује челик везивањем кисеоника у једињење Al_2O_3 и
2. Контролише границе зрна таложењем једињења AlN.

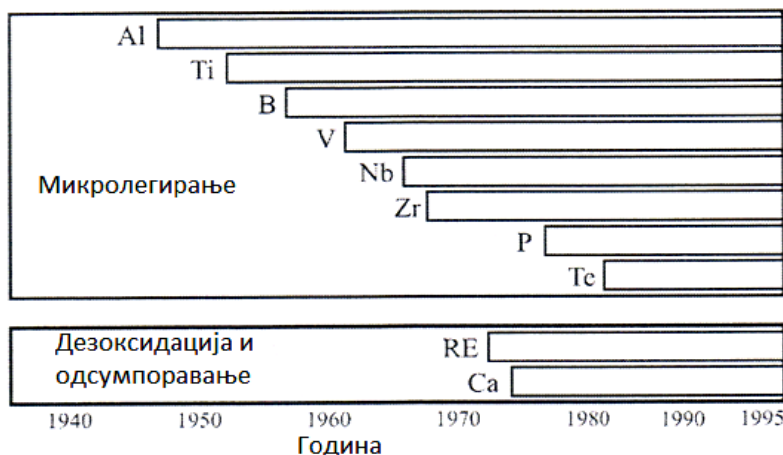
Дезоксидација Al ствара Al_2O_3 у облику fine прашице тако да се стварају бројни центри кристализације што после очвршћавања даје повољну ситнозрну структуру.

Умирени челици се одликују уједначеном структуром, равномерним хемијским саставом и повољним механичким особинама. Све то доводи до повећања динамичке издржљивости, бољих особина на ниским температурама, боље заварљивости и термичке обрадљивости.

2.2.3 Микролегирани челици

Микролегирани¹⁰ челици су развијени на бази C – Mn. Тачније, ови челици су настали као резултат истраживања која су имала за циљ проналажење нових елемената који би у челику могли да замене утицај Al. Тако су развијени потпуно нови, до тада непознати, челици легирани са једним или више елемената као што су Nb, Ti, V, Zr, B и тсл. који се називају микролегирани челици. Назив су добили због мале количине легирајућих елемената (највише 0.15%) при чему је уобичајени садржај угљеника 0.03 до 0.12% (у челицима раније производње и до 0.2%), чиме се задржава добра заварљивост. Доминација неког од наведених елемената искључиво је зависила од његове цене и погодности за термомеханичку обраду. На слици 2.2 је дат дијаграм почетка примене микролегирања са којег се види да се он везује за крај педесетих и почетак шездесетих година прошлог века.

¹⁰ Ови челици су по перформансама и цени између угљеничних и легираних.



Слика 2.2 Хронолошки почеци примене неких микролегирајућих елемената у челицима

С обзиром на чињеницу да су нове конструкције морале да задовоље нове критеријуме у погледу примене материјала, акценат је стављен на нове челике који су у стању да испуне захтеве у погледу јачине, добре заварљивости, могућности извођења разноврсних термомеханичких обрада итд. Повишен напон течења ових челика је омогућио израду лакших конструкција тако да су они почели да се употребљавају за израду мостова, цевовода високог притиска, судова под притиском, елементе железничких вагона, грађевинских хала и др. Основна карактеристика микролегираних челика је да додавањем малих количина легирајућих елемената долази до интензивног смањења зрна и ефекта таложног ојачања услед издвајања честица стабилних карбида, нитрида и карбонитрида. Конкретније, њихови преципитати¹¹ делују као допунски центри рекристализације.

После топле пластичне прераде структура микролегираних челика је ситнозрна и састоји се од феритних зрна, хомогених по облику. Присутна је и мала количина цементита (C_m) (због чега их називају и нископерлитни), као и финих диспергованих честица карбонитрида који се могу уочити на електронском микроскопу. У току завршног ваљања долази до појаве великог броја наглашених места на којима је доминантна појава α -фазе при хлађењу челика испод A_{r3} температуре. Клице се у челику појављују на местима на којима је у већој мери нарушена енергетска баријера (дислокације, границе зрна и субзрна,...). Будући да је реч о пластичној преради на топло, у току прераде се одвијају и супротни процеси, процеси обнављања деформисане структуре, опорављање и рекристализација. Рекристализација је неповољна из аспекта ефекта ојачавања материјала и стога се тежи да се смањи степен рекристализације у процесима прераде.

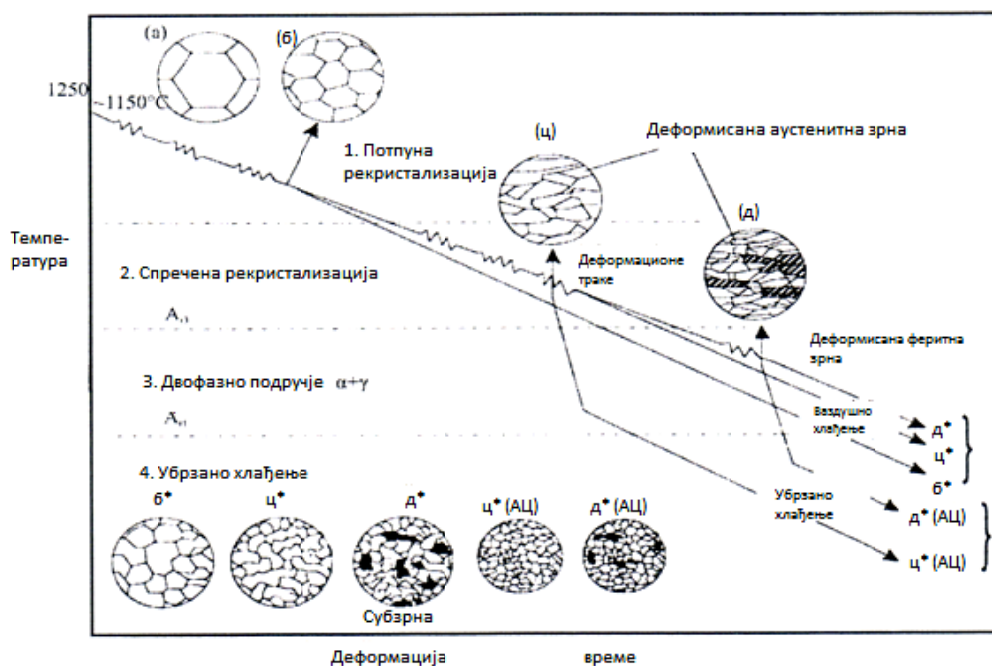
2.2.4 ТМСП челици

ТМСП челици (*Thermo Mechanical Control Processing - ТМСП*), се одликују тзв. „контролисаном микроструктуром“. Добијање ових челика условљено је применом посебне технологије топле пластичне прераде која се још назива и термомеханички контролисана прерада или само термомеханичка прерада. На слици 2.3 дат је схематски приказ термомеханичке прераде микролегираних челика. Постоји неколико технологија за добијање ових челика а свака од њих узима у обзир хемијски састав и процесне параметре прераде (степен редукције ваљања, брзину деформације и температуру).

¹¹ Преципитат или излучевина, талог. Преципитација – излучивање, таложење.

Рекристализационо контролисано ваљање (*Recrystallisation Control Rolling - RCR*). Комплетна топла пластична прерада челика код ове технологије одвија се у рекристализационом подручју тј. у подручју изнад T_{nr}^{12} температуре (температура испод које је рекристализација непотпуна). У овом температурском подручју не долази до термичког таложења. У почетку структура је грубозрна (сл. 2.3а). После ваљања структура се састоји од хомогених рекристалисаних зрна (сл. 2.3б). Ова технологија се користи за прераду дебљих лимова, код којих је немогуће применити класично контролисано ваљање, јер ваљци не могу да издрже тако велики притисак ваљања.

Класично контролисано ваљање (*Conventional Control Rolling - CCR*). Ова технологија се изводи у две фазе: предваљања и завршног ваљања. Предваљање се изводи у температурском подручју у коме је рекристализација потпуна док се завршно ваљање изводи на нижим температурама, односно у подручју спречене рекристализације. Механизам спречавања рекристализације може бити двојак: термичко таложење (дуга пауза – прекидно ваљање) и блокада граница зрна услед присуства Nb и/или V у чврстом раствору (кратке паузе – континуирано ваљање). После завршетка деформисања рекристалисана структура се хлади до температурског подручја $T_{nr} - A_{r3}$. Сада се структура састоји од деформисаних аустенитних зрна, унутар којих се запајају траке (сл. 2.3ц). Ове траке представљају додатно место за настанак клица феритних зрна па се на крају, после хлађења, добија још финија структура него код RCR ваљања (сл. 2.3ц'). Овом технологијом се најчешће израђују гасоводи у облику топоваланих трака дебљине до 14mm (највише 18mm) а све у зависности од снаге машине за намотавање на котур.



Слика 2.3 Схематски приказ термомеханичке обраде микрولةгираних челика

Ваљање у двофазном подручју (*Two Phase Rolling – $\gamma + \alpha + R$*). У суштини ова технологија је модификација CCR технологије. Разлика је само у томе што се у овој технологији завршно ваљање одвија делимично у двофазном подручју. После завршетка поступка у структури се налазе деформисана аустенитна и феритна зрна (слика 2.3д). Завршно ваљање се изводи на релативно ниским температурама. Отпор

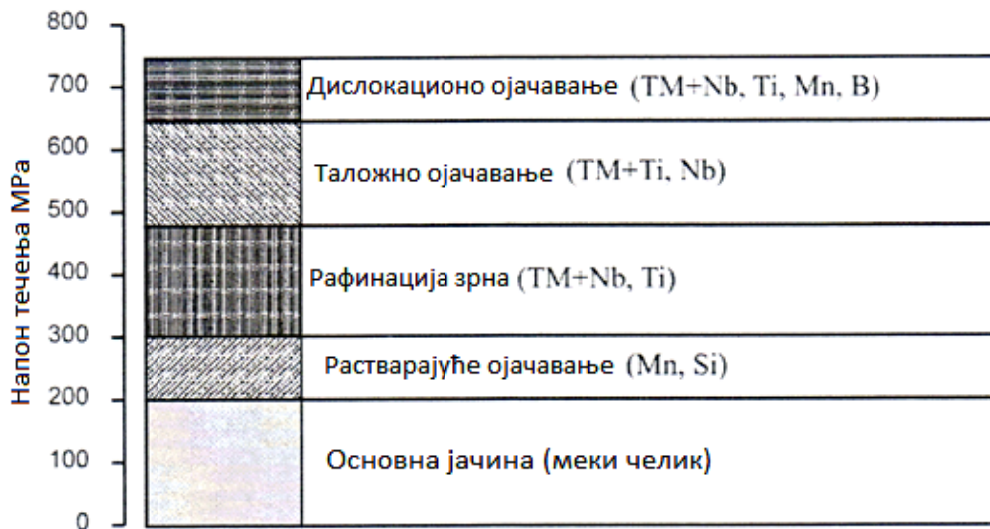
¹² T_{nr} – температура непотпуне рекристализације.

деформацији је велики и јављају се велики контактни притисци због чега се ова технологија најчешће користи за прераду лимова мање дебљине.

Динамичко рекристализационо контролисано ваљање (*Dinamic Recrystallisation Control Rolling - DRCR*). Основна карактеристика ове технологије прераде челика је тзв. динамичка рекристализација. Ово је још једна модификација CCR-а који има за циљ да се деформације из провлака у провлак повећавају све док се укупна акумулирана деформација на завршној ваљаоничкој прузи не повећа толико да дође до те мере да настане динамичка рекристализација. Динамичка рекристализација уситњава аустенитно зрно а самим тим и резултујуће феритно. Ова технологија за сада није комерцијализована.

Класично контролисано ваљање са убрзаним хлађењем (*Conventional Control Rolling + Accelerated Cooling – CCR + AC*). Ова технологија омогућава контролисање микроструктуре челика путем контролисања брзине хлађења. Трака се деформише применом CCR или $\gamma + \alpha + R$ технологије а затим се убрзано хлади до A_{r1} температуре. На овај начин долази до издвајања ферита на вишим температурама а преостали аустенит се богати угљеником и азотом што успорава даљу трансформацију. Тако се обезбеђује да се из таквог аустенита, испод A_{r1} температуре, издвоји бејнит и/или мартензит. Овом технологијом се обезбеђује добијање двофазних челика који поседују веома фино феритно зрно и упоредо мартензит и бејнит.

На слици 2.4 приказан је допринос појединих механизма ојачавања порасту напона течења. На слици 2.5 приказани су доприноси појединих механизма односу између напона течења и температуре преласка из жилавог у крто стање.



Слика 2.4 Допринос појединих механизма повећању напона течења термомеханички прерађеног бејнитног челика



Слика 2.5 Однос напона течења и прелазне температуре крости челика добијених различитим поступцима обраде: *N* - нормализација, *TM* - термомеханичка прерада, *ACC* - убрзано хлађење, *QT* - каљење и отпуштање.

Добијање челика повишене јачине углавном се постиже специјалним поступцима термомеханичке прераде, па је установљено да је потребно пратити све фазе прераде и фабрикације челика, од добијања до заваривања. Процес је назван „Тотална термомеханички контролисана прерада“ и састоји се из следећег:

- **Контрола чистоће челика.** На побољшање механичких својстава челика, пре свих жилавости основног материјала и ЗУТ-а, може се утицати преко његове чистоће. Према досадашњем развоју индустрије могуће је произвести веома чист челик са укупним садржајем нечистоћа (N, O, H, S, P) мањим од 0.005%.
- **Контрола облика неметалних укључака (Sulphur Shape Control - SSP).** При производњи челика посебну пажњу треба обратити на количину сумпора у њему. Присуство чак и веома малих количина $S \leq 0.001\%$ омогућава формирање MnS укључака у централној зони слаба. Ваљањем се ови укључци издужују у траке што даље доводи до пада жилавости. Оштри крајеви траке се понашају као концентрација напрезања. Стога се врши контрола облика неметалних укључака односно превођење издужених у сферне (глобуларне) укључке. То се ради додавањем калцијума у количинама до 0.004%.
- **Контролисање микроструктуре ЗУТ-а.** Код уноса великих количина топлоте, као при заваривању, у ЗУТ-у се уз границу топљења метала појављује прегрејана крупнозрна структура која има лоше механичке особине. Да би се овај ефекат спречио, челицима се додаје Ti у количини од око 0.015%. Он омогућава таложење титан нитрида (TiN) на границама зрна и практично механички блокира раст зрна услед загревања.
- **Температура предгревања слабова пре топлотог ваљања.** Да би се току термомеханичке прераде челика добила повољна хомогена и ситнозрна структура, услов је да материјал после загревања има униформну величину зрна. Због тога, температура предгревања у пећима мора бити нижа од оних на којим отпочиње раст нових зрна. Као најједноставнији начин који може то спречити јесте, као што је већ споменуто, додавање Ti до 0.015%.
- **Контролисано ваљање.** Посебна пажња се посвећује захтеву да се предваљањем не дозволи раст зрна, тако да по завршетку предваљања челик задржи хомогену ситнозрну рекристализану структуру, јер је она услов за добијање униформног ситног феритног зрна по завршетку ваљања. У току завршног ваљања, већим

степеном деформације по провлаку, настаје повећање густине деформисаних трака које служе као додатна места нуклеације феритних зрна, па је коначна структура ситнозрнија.

- *Текстура.* У току завршног ваљања долази до усмеравања зрна и формирања текстуре у складу са правцем ваљања што изазива анизотропију¹³ особина челика. Поједине компоненте текстуре смањују жилавост у попречном правцу па се мора водити рачуна о њиховом присуству пошто утичу и на простирање ултразвучних таласа а тиме и на поузданост испитивања без разарања.
- *Убрзано хлађење.* Убрзањем хлађења се обезбеђује веће потхлађење и брзина стварања клица што додатно доприноси смањењу феритног зрна. Такође, једна од последица убрзаног хлађења је и изостајање јасно изражене границе течења због образовања бејнитита а понекад и мартензита.
- *Модификација контролисаног ваљања.* Најинтензивнија рафинација аустенитног зрна се постиже споменутом динамичком рекристализацијом (*DRCR*), која је последица достизања критичног степена деформације при завршном ваљању. Критични степен деформације доводи до значајног повећања укупне површине границе зрна које даље представљају места на којима ће се формирати нова феритна зрна. Ово је изводљиво само у савремено опремљеним ваљаоницама.

Тотално термомеханички контролисаном прерадом челика обезбеђује се: снижен садржај угљеника а тиме и нижа вредност еквивалента угљеника CE , снижавање укупне количине сумпора, формирање глобуларних укључака, легирање са Ti итд.

2.2.5 Нисколегирани челици повишене јачине

2.2.5.1 Бејнитни челици

Наредна етапа у развоју челика повишене јачине, у односу на микролегиране, јесу челици бејнитне структуре или само бејнитни челици. Садржај угљеника је ограничен на 0.18% уз нешто повећан садржај Mn и Si . Међутим, основни легирајући елементи су Mo (0.5%) и B (0.003%). Испоручују се у нормализационо - жареном или нормализованом и отпуштеном стању. Присуство молибдена у челику који садржи бор не утиче на механичке особине челика ако је садржај Mo мањи од 0.4%. При вишем садржају знатно се повећава затезна чврстоћа (R_m) и напона течења ($R_{p0.2}$) при чему ударна жилавост не опада. Присуство Mo и B у наведеним количинама омогућава добијање бејнитне структуре и при веома малим брзинама хлађења (чак и при хлађењу на ваздуху). Такође, додацима Mn и Cr се снижава температура бејнитне трансформације на $600 \div 300^\circ C$, чиме се постиже уситњавање металних зрна и већа дисперзија карбидних честица што веома доприноси повећању јачине. На тај начин се, после нормализације, може добити напон течења од $460 \div 600 MPa$ по целом пресеку делова (дебљине и до 100 *mm*).

Основни тип у овој класи челика повишене јачине је енглески челик *FORTYWELD*. То је челик са напоном течења око 460 *MPa* направљен на комбинацији поменутих елемената ($Mo + B$) који је заштићен британским патентом. Бејнитни челици имају висок напон течења што их чини применљивим за многобројне заварене конструкције као што су дизалице, железничке платформе, транспортне цистерне, грађевинске машине итд. Не примењују се за конструкције намењене за рад у нискотемпературским срединама.

При заваривању бејнитних челика основни проблем представља могућност настанка хладних прслина у металу шава и ЗУТ-у, као и пад жилавости ЗУТ-а. Овај

¹³ Анизотропија - различитост особина материјала у зависности од правца ваљања.

проблем се решава смањивањем брзине хлађења после заваривања што се остварује предгревањем или повећањем погонске енергије заваривања.

2.2.5.2 Нисколегирани побољшани челици (Q + T – Quenching + Tempering)

Већина челика израђена каљењем и отпуштањем (Q + T челици) су финозрни. То значи да се кале са температуре при којој су настала ситна аустенитна зрна. На тај начин се могу добити челични полупроизводи велике јачине и добре заварљивости.

Типичан пример челика ове групе је амерички челик T1 састава: 0.16% C, 0.9% Mn, 0.87% Ni, 0.5% Cr, 0.45% Mo, 0.06% V, 0.003% B. Посебно је значајан утицај бора (B) јер он доводи до уситњавања примарних зрна, дезоксидације и денитрирања металног купатила, као и до великог повећања прокаљивости. Бор у количини од 0.0015 ÷ 0.003% може заменити 1 ÷ 1.25% Ni, 0.1 ÷ 0.25% Mo, 0.3 ÷ 0.35% Cr, 0.2 ÷ 0.7% Mn, 0.12% V и 1.6% Si. Највеће вредности својставаотпорности ових челика добијају се каљењем на мартензитну структуру. Такви челици имају напон течења $R_{p0.2} = 400 \div 800 \text{ MPa}$.

Каљење и отпуштање ових челика се изводи у скупој и специјалној технолошкој опреми. Каљење се изводи млазевима текуће воде са температуре око 900°C до температуре од око 300°C директно после топлот ваљања или се лимови после ваљања хладе до температуре околине а онда накнадно загревају ради каљења. После тога се изводи отпуштање у проточним пећима на температурама од 500 ÷ 700°C, са задржавањем од 1 h, а затим хлађењем на ваздуху. У зависности од режима отпуштања могу се добити различита механичка својства челика. Тако се на температури отпуштања од 500°C добија тврдоћа од 350 HV, напон течења $R_{p0.2} = 490 \text{ MPa}$ и жилавост $KV = 3.5 \text{ J}$, док се при температури отпуштања од 700°C постиже 230 HV, $R_{p0.2} = 320 \text{ MPa}$ и жилавост од 11 J. Из ових података се уочава да режим отпуштања може побољшати својства деформбилности и дуктилности челика на рачун његове јачине и тврдоће.

При каљењу припремак мора бити поуздано учвршћен између јаких чељусти или вођен између ваљака да се због брзог хлађења не би деформисао. Температура каљења је увек око A_{C3} (око 900°C), када је челик потпуно у аустенитном подручју.

Термички побољшани челици употребљавају се за дизалице, мостове, резервоаре за горива, бродску опрему и сл. У табели 1 су дати карактеристични примери челика повишене јачине из свих претходно наведених група, са механичким особинама и ознакама у домаћим и иностраним стандардима.

Табела 1 Високовредни конструкциони челици

Врста челика	JUS – станд.	PN – станд.	DIN – станд.	GOST – станд.	Механичке особине				
					R_m , MPa	R_{eH} , MPa	A, %	KV , J	
Угљенично - мангански	Č0563	18G2A	St 523	15Г	510÷ 680	315- 355	min 16-18	min 27	
Микролегирани финозрни	ČRV500	18G2AV	St E 47	16Г2АФ	610÷ 770	470- 500	min 16	37- 41	
Ниско- Легирани	Бејнитни	-	15HNМВА	-	14Х2ГМР	740÷ 980	620- 690	min 15	-
	Побољшани	-	14HNМВCu	St E 70	15ГСМФР	780÷ 930	630- 690	min 15	-

2.3 Могућности повећања напона течења

Приликом пројектовања челичних конструкција присутан је стални захтев да се оне изведу уз што мањи утрошак материјала а да се притом не угрози општа и локална сигурност конструкције. Смањење тежине заварене конструкције значи истовремено и смањење времена заваривања и смањени утрошак скупљег додатног материјала. Како је конструисање још базирано на јачини (чврстоћи), као основни параметар за пројектовање се углавном користи напон течења. За повећање овог параметра као најбитнијег могу се користити различити системи легирања и различите технолошке и металуршке мере.

Пластична деформација челика се заснива на процесима који се одвијају померањем дислокација¹⁴ кретањем кристалографски повољно оријентисаних равни.

Према теорији дислокација постоје два начина за повећање напона течења метала:

1. *Добијање метала идеалне металне структуре.* Овај начин је само теоретског значаја јер је добијање метала са идеалном структуром немогуће остварити код већих делова а и економски није оправдано.

2. *Ометање кретања дислокација.* Овај начин повећања напона течења даје мање повећање него први али ипак представља основу развоја челика повишене јачине. Кретање дислокација треба онемогућити али тако да кретање неких ипак буде могуће, да би се обезбедила довољна истегљивост.

2.3.1 Технолошки поступци повећања напона течења

2.3.1.1 Обликовање на хладно

Обликовање на хладно се дефинише као поступак обраде метала на температурама нижим од температуре на којој се изводи рекристализација (око 550°C). Ако метал оптеретимо до његовог напона течења тада, после уклањања оптерећења, у металу неће доћи до промена јер су остварене деформације еластичне природе. Међутим, уколико оптерећење надмаши напон течења, тада ће у металу доћи до промена услед пластичне деформације. При поновном оптерећивању метала његова својства пластичности опадају али расте напон течења. Да би дошло до пластичне деформације треба применити већу силу, што значи да је метал јачи (чвршћи). Гледано на нивоу кристалне решетке, под дејством напона у зони пластичности ($\sigma > R_{p0.2}$) настаје клизање у повољно оријентисаним равнима што доводи до образовања дислокација и њиховог нагомилавања. Са порастом оптерећења расте њихово нагомилавање и укрштање што даље отежава клизање.

Ојачавање метала под дејством пластичне деформације назива се *деформационо ојачање* метала, а такав метал је познат под називом *деформационо ојачан метал*. При обликовању на хладно мењају се чврстоћа и жилавост и настају последице које се не могу уклонити отпуштањем напона.

Овај поступак има веома широку индустријску примену (танки лимови, жице, профили и др.). Такви облици производа израђују се у железарама ваљањем, искивањем, пресовањем и вучењем у хладном стању.

¹⁴ Дислокација потиче од латинске речи *dislocation*, што значи промена положаја, умереност.

2.3.1.2 Обликовање на топло

Обликовање на топло укључује операцију локалног подешавања и исправљања на температурама које прелазе максималну допуштenu температуру за отпуштање напона (око 700°C). Загревање се прецизно контролише у свакој операцији. У случају нормализованих челика, са гледишта опасности од прекомерног пораста зрна, температура радног комада за време обликовања не сме бити виша од 1050°C, а процес не сме дуго да траје. Ако се обликовање изводи у само једној операцији радни комад се не сме загревати изнад 980°C. Уколико се захтева накнадна термичка обрада, обликовање мора да се заврши изнад 750°C. У случају обликовања када процес траје дуго на температурама од 1000 ÷ 1050°C, и када је укрупњивање зрна неизбежно, пре последњег степена обликовања, неопходно је хлађење на мирном ваздуху на температури нижој од 700°C, да би дошло до трансформације аустенита. Да би обезбедили одређене механичке особине, температура обликовања мора да буде 1050°C а у зависности од дебљине зида зависи и брзина хлађења. Уколико се не могу искористити горе наведене препоруке, потребно је на крају процеса извршити нормализацију коју прописује произвођач.

2.3.2 Металуршки поступци повећања напона течења

Најутицајнији фактори који подижу напон течења јесу:

Структура челика која може бити: феритно – перлитна, бејнитна, мартензитна или сорбитна. Ојачавање чврстог раствора ферита (α -Fe) постиже се пре свега легирањем са Mn и Si. Садржај мангана се обично креће од 1.5 ÷ 2% а садржај силицијума око 0.5%. Атоми легирајућих елемената растворених у фериту због различитих пречника или металних веза, деформишу кристалну решетку гвожђа и на тај начин се ојачање изводи. Ово ојачање је релативно слабо.

Супституцијско и интерстицијско ојачање. Сви легирајући елементи и пратиоци који су присутни у челику образују са гвожђем чврсте растворе. У односу на чисто гвожђе сваки чврст раствор гвожђа има виши напон течења. Елементи који се растварају у гвожђу могу образовати интерстицијски чврст раствор са елементима C, N и B или супституцијски са Mn, Si, Cr, Ni, Cu и др. Утицај супституцијских легирајућих елемената Mn и Si је занемарљив у челицима који су добијени интерстицијски са C и N. Ови елементи ојачавају ферит више него супституцијски, али Mn и Si истовремено повећавају прелазну температуру односно температуру наглог пада ударне жилавости и погоршавају заварљивост. Силицијум у количинама већим од 0.5% повећава еластичност али снижава ударну жилавост. Манган и никал имају добар утицај на снижење прелазне температуре а са повећањем процентуалног учешћа ових елемената расте и напон течења. Такође, проценат угљеника у челику сразмерно утиче на његову јачину али се код челика повишене јачине ограничава на 0.22% због тога што при већим садржајима угљеника челик постаје склон ка закаљивању.

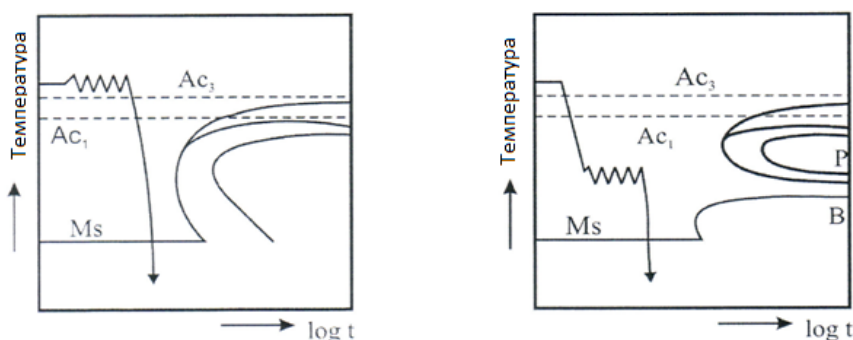
Величина зрна и субзрна. Многим истраживањима је утврђено да напон течења металних материјала зависи од величине металних зрна. Величина зрна утиче на затезну чврстоћу материјала али је тај утицај мањи него на напон течења па стога са уситњавањем зрна расте однос $R_{p0.2}/R_m$. Механизам ојачања овим путем доводи до раста напона течења, ударне жилавости и снижења прелазне температуре. Према томе, ситно зрно је најефикаснији начин за постизање оптималних својстава. У пракси се тежи што ситнијем аустенитном зрну јер оно касније предодређује величину феритног. То се постиже нормализационим жарењем, блокирајућим дејством Al преко алуминијум-нитрида и карбида V, Nb, Ti, као и контролисаним степеном редукације температуре завршног ваљања јер све то одлаже рекристализацију аустенита тј. раста

аустенитног зрна пре његове трансформације у ферит. Одлагању рекристализације доприноси и брзо хлађење са температуре завршног ваљања до температуре преласка у α фазу. Тенденција је да се ваљање изврши на $20 \div 30^\circ\text{C}$ изнад A_{C3} (912°C) температуре и да се по завршеном ваљању брзо хлади. Овај поступак доводи до повећања напона течења и до 150 MPa у односу на нормализационо жарено стање, при истом нивоу ударне жилавости.

Преципитационо (таложно) ојачање. Овај поступак се назива и ојачање честицама или ојачање излучивањем. Најважнији је поступак ојачања код нежелезних легура (Al, Cu и Ni), али користи се и код челика (микролегирани, брзорезни итд). Преципитационо ојачање настаје излучивањем карбида, нитрида и карбонитрида Nb, Ti и V, у фериту при контролисаном хлађењу са температуре ваљања или са температуре нормализационог жарења. Ови елементи су названи микролегирајући због веома ниског садржаја обично 0.10% (изузетно 0.20%). Таложњем се повећава јачина али опада жилавост. У новије време се користи комбинација таложног ојачања и уситњавање зрна користећи Nb, Ti и V.

2.3.3 Термомеханички поступци повећања напона течења

Овај поступак се, како сам назив говори, изводи тако да при обради морамо да истовремено пратимо два параметра, температуру и механички рад обликовања. Процес термичке обраде којим се челик загрева до температуре изнад тачке A_{C3} , држи на тој температури одређено време, затим добијени аустенит пластично деформише на одређени степен и на крају хладу критичном брзином, у циљу добијања мартензитне структуре, назива се термомеханичка обрада. Постоје две врсте ове обраде: високотемпературска (ВТМО) и нискотемпературска термомеханичка обрада (НТМО).



Слика 2.6 Схема високотемпературске термомеханичке обраде (ВТМО) и нискотемпературске термомеханичке обраде (НТМО)

У процесу ВТМО челик се интензивно прерађује (ваља) у области стабилног аустенита на температури мало изнад A_{C3} линије ($\approx 950^\circ\text{C}$). Степен деформације се креће од $40 \div 90\%$. У деформисаним аустенитним зрнима, при температури обраде, одвија се опорављање и рекристализација. Одмах по појави рекристалисаних зрна челик се нагло хлади односно кали. ВТМО се може применити и код угљеничних и код нисколегираних челика. Код нисколегираних подеутектоидних¹⁵ челика се, после ове обраде, постиже затезна јачина од чак 2500 MPa .

У процесу НТМО челик се загрева до температура изнад тачке A_{C3} , хлади до температуре $500 \div 800^\circ\text{C}$, на којој је аустенит још релативно стабилан (метастабилан), ваља и опет хлади (кали) на мартензитну структуру. Пластична прерада у наведеном температурском интервалу је испод температуре рекристализације аустенита. По завршетку прераде челик се отпушта на ниској температури. Овај поступак се може

¹⁵ Подеутектоидни челик је челик са мање од 0.77% C чија је структура перлитно – феритна.

применити само код добро прокаљивих челика. Челици подвргнути овој преради достижу јачину и до 3000 МПа.

Термомеханичку прераду челика одликују веома добра механичка својства у поређењу са својствима добијеним каљењем и отпуштањем. Та висока својства се објашњавају повећањем густине дислокација у мартензиту и дробљењем његових кристала на субзрна величине делова микрометра.

2.4 Утицај легирајућих елемената на структурне промене у челицима

Веома је важно познавати састав и структуру челика у циљу његове лакше класификације. Присуство појединих елемената у челику је неизбежно али се неки намерно додају у циљу побољшања његових особина док су други ту нежељено и обично погоршавају његове особине. Данас се све више производе легирани челици да би се добио што квалитетнији челик а самим тим и квалитетнији готов производ, нарочито због тога што се сматра да ће челик бити главни конструкциони материјал и у овом веку.

У челицима повишене јачине могу се наћи различити хемијски елементи, било као нечистоће, редовни пратиоци, или као намерно додати елементи. При томе, степен утицаја сваког од елемената на структуру и механичке особине челика не зависи само од количине већ и од присуства других елемената у њему. Према утицају на структуру челика легирајући елементи се деле на две основне групе:

- Аустенизаторе или γ – гене елементе (C, Ni, Mn, Cu, N и др.) и
- Феритизаторе или α – гене елементе (Si, Al, Mo, Cr, Ti, V, W, Nb и др.)

Растварање легирајућих елемената у гвожђу се одвија као последица замене атома гвожђа атомима легирајућих елемената. Атоми легирајућих елемената се разликују од атома гвожђа по димензијама и грађи. Они због тога стварају напрезања који изазивају промену њеног параметра. Елементи са мањим атомским пречником од гвожђа умањују а са већим повећавају параметар кристалне решетке.

Угљеник (C) највише утиче на особине и структуру челика и сматра се за основну компоненту у челику. Повећава јачину, тврдоћу, отпорност на хабање, прокаљивост али снижава пластичност и жилавост и погоршава заварљивост. Угљенични и нисколегирани челици са $C > (0.2 \div 0.25\%)$ се сматрају условно заварљивим. У легираним челицима угљеник образује карбиде, који се издвајају по границама зрна, што у аустенитним Cr – Ni челицима ствара услове за међукристалну корозију. У циљу елиминисања те појаве додају се Ti и Nb који делују као стабилизатори. Они везују угљеник у виду стабилних карбида TiC и NbC и тиме спречавају међукристалну корозију. Такође, установљено је да пораст садржаја C и N у челику (у дозвољеним границама) доприноси одржавању својстава отпорности на високим температурама тј. термостојаности.

Азот (N) слично угљенику повећава јачину челика на собној и повишеним температурама. Предност му је што се хемијски не везује за хром, па код Cr – Ni челика не умањује корозиону отпорност. Неповољно је што смањује пластичност а тиме и отежава прераду на хладно.

Манган (Mn) због великог афинитета према кисеонику и сумпору употребљава се као дезоксидатор. Раствара се у решетки $\alpha\text{-Fe}$ ¹⁶ и незнатно утиче на затезну чврстоћу и смањује својства деформације али повећава његову тврдоћу и жилавост. У угљеничним и нисколегираним челицима повећава отпорност заварених спојева ка топлим прслинама јер образује стабилан сулфид MnS са сумпором који је високе температуре топљења ($\approx 1620^\circ\text{C}$). Тако манган везује сумпор и не дозвољава му да са гвожђем гради нискотопљиву еутектику $\text{Fe} - \text{FeS}$ а тиме смањује могућност за настанак врућих прслина. Повећањем садржаја Mn у нискоугљеничним и нисколегираним челицима до 1.5% повећава се јачина и жилавост уз одржање добре пластичности али опада величина феритног зрна при већим количинама.

Силицијум (Si) се раствара супституцијски у решетки $\alpha\text{-Fe}$ и повећава затезну чврстоћу и тврдоћу а нарочито границу еластичности, па се стога користи код челика за опруге. Додавањем силицијума смањује се жилавост јер долази до стварања плочастиг ферита а то смањује енергију удара потребну за лом. У већим количинама се додаје челицима који захтевају већа електрична и магнетна својства. У аустенитним челицима се користи као дезоксидатор јер спречава оксидацију хрома. Силицијум не подлеже сегрегацији¹⁷ и отежава сегрегацију неких састојака као сумпора и фосфора. Смањује критичну брзину хлађења и повећава прокаљивост.

Сумпор (S) са гвожђем образује сулфид гвожђа FeS , који се у челику налази у виду еутектикума $\text{Fe} - \text{FeS}$ распоређеног по границама зрна температуре топљења ($\approx 975 \div 985^\circ\text{C}$), што у принципу умањује отпорност ка прслинама на топло јер настају око солидус температуре. При обради деформисањем на топло на температурама око $1000 \div 1200^\circ\text{C}$ еутектика се топи, веза између зрна слаби и долази до лома. Због тога је садржај сумпора ограничен и зависи од квалитета челика. Креће се у границама од $0.025 \div 0.040\%$.

Фосфор (P) се раствара у решетки $\alpha\text{-Fe}$ и повећава затезну јачину и тврдоћу али смањује својства деформације (издужење и сужење). Умањује и отпорност према прслинама на топло и знатно снижава жилавост, нарочито на сниженим температурама. Посебно негативан утицај има при повишеном садржају C и Ni . Количина фосфора се ограничава на $0.025 \div 0.040\%$ у зависности од квалитета челика.

Хром (Cr) се у нискоугљеничним челицима обично налази у количинама око 0.3%, у легираним челицима $0.7 \div 3.5\%$, у хромовим челицима $12 \div 18\%$ и у хром-никл челицима $9 \div 35\%$. Повишен садржај хрома у угљеничним и нисколегираним челицима погоршава њихову заварљивост на рачун побољшања прокаљивости. Хром повећава ватроотпорност аустенитних челика у оксидационим условима. При садржају хрома преко 12% челик је веома отпоран на корозију. Даљим повећањем садржаја хрома та отпорност и даље расте али при садржају $\text{Cr} > 20\%$ видно опада пластичност. Хром образује веома стабилне карбиде Cr_{23}C_6 , Cr_7C_3 , Cr_3C_2 , који се у челику могу налазити у слободном стању или везани са карбидом гвожђа Fe_3C . Ако челик садржи више угљеника него што је потребно за образовање перлита онда настају услови за образовање слободних карбида хрома. Они се издвајају на границама зрна што може изазвати међукристалну корозију. Критична температура издвајања карбида је $500 \div 800^\circ\text{C}$. Хром изазива померање на горе критичне тачке A_{C1} , што доводи до тога да брзина растварања карбида у аустениту буде знатно мања од брзине растварања

¹⁶ Гвожђе је полиморфан метал и јавља се у две фазе. Фаза $\alpha\text{-Fe}$ (испод 912°C) има просторно центрирану кубну решетку – A_2 док $\gamma\text{-Fe}$, као другој фази при загревању у температурском опсегу од $912 - 1394^\circ\text{C}$, и има површински центрирану кубну решетку A_1 .

¹⁷ Сегрегација представља неравномерну расподелу хемијских елемената легуре што узрокује неуједначеност хемијског састава.

карбида гвожђа у угљеничним челицима. Због тога се при загревању челика који садрже преко 12% хрома, изнад 1000°C и брзом хлађењу, ствара мартензитна структура а при веома спором хлађењу перлит са раствореним карбидима. Са порастом садржаја хрома смањује се термичка проводност што захтева предострожност при загревању челика, нпр. при преради на топло, термичкој обради или заваривању.

Никал (Ni) растворен у феритуповећава јачину и жилавост уз одржавање високе пластичности. Никал има повољан утицај на заварени спој, микроструктура се мења од горњег до доњег бејнита и мартензита, али после жарења за отпуштање напона никал има негативан утицај. Ово се објашњава претпоставком да у току заваривања долази до сегрегације по границама зрна, а у току загревања нечистоће као што су фосфор, калај и антимон дифундују према границама зрна, стварајући међукристалну кртост. Никал је елемент отпоран према оксидацији а у челику делује и као графитизатор (разлаже цементит), па челици богати никлом треба да садрже мање угљеника.

Молибден (Mo) се у конструкционим челицима налази у границама од 0.2 ÷ 0.5%. Изазива уситњавање зрна, повећава жилавост на високим температурама и закаљивост у ЗУТ-у споја. Са повећањем садржаја Мо расту јачина и напон течења, док издужење и контракција опадају при $Mo > 2.3\%$.

Кобалт (Co) повећава затезну јачину, напон течења и нарочито тврдоћу на повишеним температурама.

Алуминијум (Al) се користи при примарном добијању челика као дезоксидатор па остаје у челику обично до 0.08%. Склон је ка стварању тврдих нитрида у површинском слоју смањујући на тај начин осетљивост челика на процес старења. Додатак Al у количини 0.02 ÷ 0.2% утиче на величину зрна првобитног аустенита захваљујући кочионом дејству алуминијум-нитрида и алуминијум-оксида Al_2O_3 . У малим количинама алуминијум не само да кочи пораст зрна већ и смањује опасност од закаљења прелазне зоне. Челици са преко 1% Al су тешко заварљиви.

Волфрам (W) даје челику ситнозрнасту структуру на рачун образовања тешко растворљивих карбида. Прокаљивост се повећава релативно мало док се заварљивост погоршава због велике кртости заваара посебно код челика са већем садржајем угљеника. Волфрам донекле повећава општу корозиону отпорност и отпорност према међукристалној корозији аустенитних челика. Са повећањем садржаја W у челицима опада термичка проводност а повећавају се густина (само до $W = 7.6\%$) и електрични отпор. Челици са високим садржајем волфрама су брзорезни алатни челици.

Тантал (Ta) је елемент са великом склоношћу ка образовању карбида и примењује се у аустенитним хром-никл челицима као стабилизатор који сузбија међукристалну корозију. Он мора бити додат у толикој количини да веже угљеник и тако спречи образовање карбида хрома. За челике повишене јачине битан је утицај Ti, V и Nb који повољно делују у смислу таложења довољно чврстих, довољно ситних и довољно финих честица преципитата. Микролегирајући елементи коче рекристализацију аустенита за време ваљања челика.

Ванадијум (V) се обично додаје од 0.05 ÷ 0.2% и ствара карбонитриде. При загревању, ради нормализације, један део карбонитрида улази у чврст раствор и при хлађењу се издваја у облику финих диспергованих честица и ствара фино зрно. Ванадијум је изразити карбонитрирајући елемент и додаје се да би уситнио зрно и таложно ојачао челик. Такође, са угљеником и азотом ствара преципитате састава: ванадијум-карбонитрид V (C, N). Ванадијум-карбид више утиче на напон течења и на прелазну температуру (T_{pr}) од ванадијум-карбонитрида.

Ниобијум (Nb) се додаје у количинама од 0.005 ÷ 0.08%. Он образује карбонитриде који повећавају напон течења али смањују ударну жилавост. Нормализацијом челика са Nb долази до уситњавања зрна. Ниобијум олакшава стварање плочастог, интергрануларног ферита што има за последицу ниску жилавост. Ниобијум са угљеником и азотом ствара преципитате састава: ниобијум-карбид (NbC), ниобијум-нитрид (NbN) и ниобијум-карбонитрид Nb (C, N).

Титан (Ti) је елемент највећег афинитета према угљенику па се зато често примењује као стабилизатор у челицима отпорним на киселине у циљу везивања угљеника и спречавања настанка карбида хрома. Титан смањује тврдоћу као и величину аустенитног зрна због термички стабилних зрна које образују учвршћене границе. Титан ствара честице титан-нитрида (TiN), титан-карбида (TiC) и оксида када су присутни и други елементи нпр. V, Nb и др. може образовати веома сложене укљичке који могу имати нижу тачку топљења и бити мање стабилне, тако да се тај ефекат титана мора сагледати. При највишој температури (1300°C) излучује се TiN. Он се излучује по границама зрна, делује као допунски центар кристализације и ефикасан је у спречавању раста металног зрна. Титан повећава отпорност завара према прслинама на топло.

Бор (B) је елемент који образује карбиде и веома повећава прокаљивост челика ако се дода у малим количинама. При већим садржајима прокаљивост челика опада и долази до раста зрна. Челицима се обично додаје у малим количинама око 0.003%. Има мали пречник атома што му омогућује да образује интерстицијски чврсти раствор. Бор умањује количину нежељених елемената у металу шава јер лако везује кисеоник образујући оксид који је лако топљив па нестаје у металу шава. Бор има велики афинитет према азоту али не може знатно да повећа јачину.

3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

3.1 Појам заварљивости

Заварљивост је комплексна технолошка карактеристика материјала којом се углавном изражава утицај процеса заваривања на заварени спој и његово понашање за време и после заваривања у топлотном и деформационом смислу. Стога се може рећи да појам заварљивости одређује релативну способност материјала да ствара заварене спојеве одабраном технологијом заваривања и да добијени спојеви задовољавају тражена својства и радне услове. То значи да, нпр. при РЕЛ заваривању, материјал заварљив овим поступком мора образовати спој чија су тражена својства приближно једнака својствима завариваног материјала. Тражена својства своде се на испуњавање одређених захтева у вези са механичким, структурним и хемијским особинама метала шавова и зоне око шавова.

С обзиром на комплексност заварљивости, дефиниције и оцене, подела на уже појмове олакшава проучавање и оцену погодности материјала за одређене заварене конструкције. Према томе, заварљивост можемо поделити на: металуршку, конструкциону и технолошку заварљивост.

Металуршка заварљивост материјала зависи од низа фактора: хемијског састава, структуре, начина производње материјала, садржаја гасова и неметалних укључака итд. При томе ова заварљивост обухвата све металуршке промене у материјалу настале дејством топлоте унете при заваривању. У току процеса заваривања може доћи до недопуштеног погоршања односно снижења механичких и технолошких својстава споја, нарочито у зони око шавова, што значи да код материјала лоше заварљивости могу настати знатне промене хемијског састава, прслине, тврде и крте структурне компоненте и тсл. Утврђено је да су метали и легуре металуршки незаварљиви ако се њихови саставни хемијски елементи не растварају у чврстом агрегатном стању већ образују тврда и крта хемијска једињења (нпр. карбиде). Насупрот томе, заварљиви су сви хомогени метални материјали који стварају чврсте растворе и нееутектичке и еутектичке смеше, односно сви материјали који поседују металуршку заварљивост могу се успешно заваривати применом одговарајуће методе, поступка и технологије заваривања.

Конструкциона заварљивост показује утицај низа параметара на решења заварених елемената 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 заварени спој, нпр. додатног материјала, начина и поступка заваривања, линијске енергије заваривања, брзине хлађења итд. Притом се цени да ли се технолошки поступак изводи без тешкоћа или се морају применити посебне мере (предгревање, жарење, рад у специјалној атмосфери), а оцена се даје управо на основу предузетих мера и других радних услова. Са оперативног аспекта који се односи на понашање неког материјала при заваривању или наваривању, они се оцењују као „добро заварљиви“ ако је шав чист и хомоген, тј. када се основни и додатни материјал спајају у хомогену легуру, а притом се топе без тешкоћа, прскања, појаве прслина, гасних мехурова и других грешака.

Такође, на заварљивост утичу и нечистоће на границама жлеба – нечистоће, масти и уља, коварина и итд, па се препоручује њихово одстрањивање како би добијени резултати били меродавнији.

Општа заварљивост стога представља глобалну оцену појединачно објашњених појмова заварљивости при чему се узима у обзир већи број фактора за оцену квалитета – основни и додатни материјал, заваривачки рад, стање напона у шавовима и у близини концентратора напона и др.

Основни проблеми заварљивости метала и легура своде се на њихова својства која се траже после заваривања. Коначна својства за дати материјал зависе од процеса и појава који настају у основним зонама завареног споја:

- У шаву, где се основни материјал потпуно топи и меша са додатним а затим очвршћава;
- У прелазој зони – зони стапања – полуистопљеног материјала;
- У зони утицаја топлоте (ЗУТ-у), где се материјал мења услед загревања и хлађења у чврстом агрегатном стању.

Многи процеси и промене које настају у овим зонама не могу се непосредно запазити, већ се о њима суди само на основу испитивања изведених спојева, одн. оцењује се склоност материјала ка образовању прслина, склоност ка кртом лому, старењу и др.

Из изложеног се може 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 најнеповољнијим условима заваривања.

То значи да се од завариваног материјала тражи 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 и да издрже сва непредвиђена напрезања у току рада.

Из до сада познатих сазнања за оцену и дефиницију заварљивости запажа се да нема униформних и експлицитних дефиниција овог, за праксу, важног својства. Али се, као пример, може навести најраспрострањенија дефиниција заварљивости Међународне организације за заваривање 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“.

Глобални смисао ове и других дефиниција јесте да су оне саме недовољне и непотпуне за праксу што упућује на даља истраживања заварљивости посебно из аспекта поузданости. То је разумљиво јер је заварљивост један веома комплексан појам и зависи како од самог завариваног материјала тако и од технолошког поступка и врсте заварене конструкције. Из наведеног се запажа да за оцену заварљивости увек треба узимати у обзир узајамну везу (1) конструкције (крутост, дебљина, врста споја), (2) материјала (погодност за заваривање) и (3) технологије (могућност заваривања).

У пракси су уобичајена два приступа за оцену заварљивости:

1. 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 реализовали задовољавајући резултати (потврда технологије).

Међутим, као најважнији критеријум за оцену заварљивости јесте непрекидност тј. метални континуитет завареног споја, који може бити нарушен присуством прслина одређене величине и распореда. Према механизму настајања прслине могу бити:

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

Поред наведеног критеријума хомогености, битан је и критеријум оцене механичких особина:

- тврдоће завареног споја (метала шава, ЗУТ-а и ОМ),
- јачине и
- ударне жилавости.

Вредности тврдоће и чврстоће су линеарно зависне величине па се користе као једноставан показатељ заварљивости јер са њиховим повећањем опадају својства пластичности и жилавости.

3.2 Методе за испитивање заварљивости

У практичним условима нема „идеалне заварљивости“, тј. не може се ниједном методом заваривања добити спој потпуно истих својстава у самом шаву, ЗУТ-у и основном материјалу. Како се стварна заварљивост разликује од идеалне, услед разлике у својствима проузрокованих самим процесом заваривања, то се критеријуми за оцену заварљивости свде на процењивање потребних усвојених показатеља заварљивости.

Према неким препорукама полазна основа за процену заварљивости је испитивање основног материјала. На основу добијених резултата одређују се, уколико је то потребно, и неопходне мере за побољшање заварљивости. У ову сврху се користе:

1. Рачунске методе,
2. Практичне пробе,
3. Технолошке пробе и
4. КНЗ дијаграми.

Подаци потребни за успешну оцену наведеним методама су:

- хемијски састав (материјала) челика,
- дебљина, тип и крутост споја и
- начин заваривања.

3.2.1 Рачунске методе

Процена заварљивости према хемијском саставу челика је оријентациона метода која се заснива на израчунавању тзв. хемијског еквивалентног угљеника CE , који исказује познату чињеницу да се повећањем садржаја угљеника погоршава заварљивост.

Тако се за закаљиве челике CE израчунава помоћу израза:

$$CE = C + \frac{Si}{4} + \frac{Mn}{4}, \quad \% . \quad (3.1)$$

из којег се запажа да повећање садржаја угљеника погоршава заварљивост четири пута више од пратећих елемената силицијума и мангана. За угљеничне челике се додатком

мангана и осталих елемената Cr и Mo, који повећавају склоност ка закаљивању, а погоршавају заварљивост, користи се израз:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}, \quad \% . \quad (3.2)$$

Промена заварљивости, у зависности од квалитативно-квантитативног састава материјала и њиховог утицаја сразмерно угљенику, проучавана је од стране многих аутора, па се у литератури може наћи велики број једначина за израчунавање CE и оцену заварљивости. Али, у пракси се највише користи формула МИЗ¹-а која највише одговара нисколегираним челицима па се за њих највише и примењује:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \quad \% . \quad (3.3)$$

Проучавањем утицаја CE на тврдоћу у ЗУТ-у установљена је корелациона веза:

$$HV_{\max} = 1200 \cdot CE - 200 \text{ и} \quad (3.4)$$

$$HV_{\max} = 1200 \cdot CE - 260. \quad (3.5)$$

Она важи у границама $0.2 < CE < 0.6$ %, јер за веће вредности CE веза више није линеарна. Уз велика упрошћења, занемаривањем низа других утицајних фактора, може се прихватити да је челик заварљив ако коначна тврдоћа у ЗУТ-у није већа од 350 HV, јер се сматра да се до ове вредности не формира мартензитна структура. Ова гранична тврдоћа одговара вредности $CE = 0.45\%$, па се усваја да су челици са $CE < 0.45\%$ заварљиви без примене посебних мера. Челици са $CE > 0.45\%$ су незаварљиви или условно заварљиви уз примену посебних мера (предгревање, жарење, посебни атмосферски услови, и тсл).

3.2.2 Практичне методе (лабораторијске и технолошке пробе)

Практично (лабораторијско) одређивање заварљивости заснива се на проучавању појаве прслина у завареном споју у (1) току процеса заваривања, (2) непосредно после тога или (3) после одређеног временског периода (48 сати). Међутим, оцена заварљивости применом практичних метода проширена је и на испитивање појаве прслина услед накнадног загревања, тј. термичке обраде, као и на настајање прслина при напрезањима тзв. експлоатационе прслине.

Појава прслина у завареним спојевима, уопштено, је резултат напонско-деформационог стања које настаје заваривањем а које материјал смањене пластичности у споју не може поднети.

Критеријуми за оцену заварљивости могу бити различити и заснивају се на одређивању критичне деформације у функцији температуре при заваривању, као и на одређивању критичних напона при којим долази до разарања и појаве прслина.

Због великог броја практичних метода за ова испитивања (око 900), није могуће све појединачно образложити али је битно да све оне утврђују врсту и степен промене испитиваног узорка.

Код већине практичних (технолошких) метода за испитивање заварљивости узорци се излажу термичком циклусу: локално, по целом профилу или загревању и хлађењу исто као и при заваривању (симулумање термичких циклуса). Степен насталих промена се утврђује познатим методама испитивања (затезањем, савијањем, мерењем

¹ МИЗ - Међународни институт за заваривање

тврдоће, жилавости, ...), пре и после термичког дејства, а по потреби се испитује и појава прслина у шаву и околини.

Највећи број проба које се обављају односе се на пробе склоности ка појави хладних и топлих прслина. Хладне прслине веома зависе од количине присутног водоника у металу шаву али и од напонских стања после заваривања. Испитивања овог типа се састоје из оптерећивања делова одмах после заваривања. Предност ових истраживања је могућност кориговања врсте и величине оптерећења, чиме се процењује њихов утицај на хладни лом. Како би се у обзир узео и дифундовани водоник, истраживања се проширују и на симулацију термичких циклуса. Постоји неколико врста симулатора заснованих на електроотпорском или индукционом загревању а симулирање се ради по методи BWRA (British Welding Research Association). У свету су данас најпознатији УМЕТ (РУСИЈА), Termoresto – W (ЈАПАН) и Weld Thermal Cycle Simulator фирме Smit-Wels (САД). Termorestor фирме Fuji Electronik Industrial Co. Ltd. је најсавременији симулатор који имитира не само термички и деформациони циклус заваривања већ је у стању да уведе и водоник за време хлађења.

3.2.3 Процена заварљивости на основу КНЗ дијаграма

У новије време, за оцену заварљивости осим поменутих метода, користе се и трансформациони КНЗ дијаграми. За неке конструкционе челике се могу наћи, углавном у странијој литератури, дијаграми хлађења у условима заваривања, тј. дијаграми разлагања потхлађеног аустенита под утицајем различитих брзина хлађења које одговарају различитим температурским циклусима. Ови дијаграми се у литератури дају у полулогаритамском координатном систему температура – време (логаритамска подела) 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 апсцисну осу дијаграма. У самом КНЗ дијаграму дају се линије које означавају поједине структуре (мартензит, бејнит, ферит, перлит) у зависности од времена $t_{8/5}$.

3.3 Оцена заварљивости челика повишене јачине

Савремене тенденције при пројектовању заварених конструкција нарочито у транспортној техници су смањење тежине а повећање носивости. Код првих заварених конструкција примењивани су челици са напоном течења до 250 МПа, да би се увођењем угљенично – манганских (С - Мп) челика умирених алуминијумом та граница повећала на 300 ÷ 360 МПа. Металуршко-механичким поступцима (микролегирањем и нормализацијом, односно контролисаним ваљањем) та граница је повећана до скоро 450 МПа, а патентирањем (у Енглеској) нисколегираних бејнитних челика она достиже 550 МПа. Најзад, са развојем побољшаних нисколегиранх челика та граница расте и до 700 МПа. Сви челици са $R_p > 360$ МПа сврставају се у челике повишене јачине, а проблеми у вези са њиховом заварљивошћу се морају за сваку групу посебно разматрати.

У литератури се могу наћи различите поделе ових челика, зависно од њихове примене у појединим земљама. Тако се нпр. према пољским стандардима они деле на: С – Мп челике, микролегиране челике и нисколегиране челике повишене јачине. Према чешким стандардима разликују се микролегирани феритно-перлитни челици, бејнитни нисколегирани нормализовани и отпуштени, као и нисколегирани побољшани челици. У Немачким стандардима ови челици су обухваћени стандардима DIN 17100 и DIN 17200.

У нашем стандарду JUS C.B0.500 даје се преглед општих конструкционих C – Mn челика, док стандард JUS C.B0.502 укључује и микролегиране финозрне челике повишене јачине.

3.3.1 Проблеми заварљивости C – Mn челика

Повећање својстава отпорности код ових феритно-перлитних челика настаје услед пораста удела перлита у структури, ојачања ферита манганом који супституијски улази у чврст раствор α -гвожђа и уситњавањем зрна.

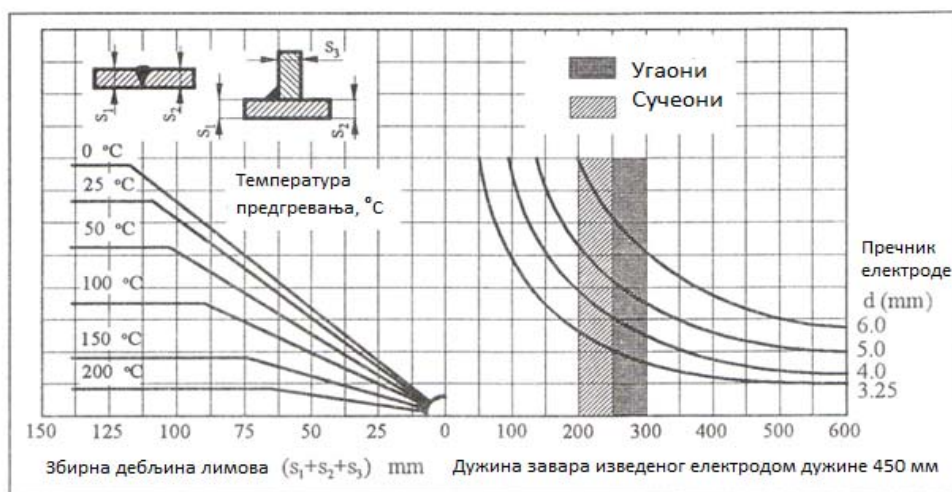
Челици ове групе се испоручују у различитим облицима: шипке, профили и лимови, а намењени су за мостоградњу, грађевинарство, хидро и бродоградњу, резервоаре и тсл. Угљенично - мангански челици са еквивалентним угљеником $CE < 0.45\%$ и са $s < 25 \text{ mm}$ се сматрају добро заварљивим без предгревања. За веће дебљине, као и при заваривању на сниженим температурама неопходно је предгревање или заваривање кратким заварима. Као што је већ поменуто, еквивалентни угљеник се може израчунати по формули:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \% \quad (3.6)$$

За заварене конструкције код којих нема опасности од кртог лома препоручују се: Č0370, Č0460, Č0561, а за делове заварених конструкција изложене затезању користе се Č0461 и Č0562, док се за делове и конструкције код којих постоји опасност од кртог лома препоручују високовредни челици Č0471 и Č0563.

Као основни проблем при заваривању ових челика јавља се склоност ка хладним прслинама, јер се перлит изнад A_{C1} температуре трансформише у аустенит који при брзом хлађењу ЗУТ-а може прећи у мартензит. Због тога се пре заваривања мора извршити потпуно или локално предгревање, а да се само заваривање изводи са већом погонском енергијом. Заваривање се изводи искључиво поступцима и технологијама које се одликују ниским садржајем дифундованог водоника, што код РЕЛ поступка одговара коришћењу базичних сушених електрода. За одређивање температуре предгревања може се применити формула Сеферијана или дијаграм на слици 3.1.

За практичну примену приказаног дијаграма полази се од типа споја и дебљине лима као и од одговарајућег пречника базичне електроде. На основу технолошких параметара заваривања потребно је усвојити или израчунати дужину завара l .



Слика 3.1 Дијаграм за избор температуре предгревања C – Mn челика, РЕЛ поступком, базичним електродама

Препоручена дужина завара је $200 \div 250 \text{ mm}$ код сучеоних и $250 \div 300 \text{ mm}$ код угаоних спојева односно та дужина се израчунава по формули:

$$l = 0.04 \cdot \frac{N_3^2 \cdot k_2 \cdot q^2}{s^2 \cdot v_z \cdot (T_w - T_0)^2}, \text{ cm} \quad (3.7)$$

где је:

k_2 – коефициент непрекидности лука ($k_2^{\text{PEЛ}} = 0.6 \div 0.8$),

$T_w = M_s + 50 \div 100^\circ\text{C}$ – допуштена температура хлађења,

N_3 – фактор облика споја, (за сучеоне $N_3 = 1.5$, за угаоне $N_3 = 0.9$, за угаоне у Т споју $N_3 = 0.8$),

$q = U \cdot I \cdot \eta, \text{ J/s}$ – ефективна снага лука.

На пример, за сучеони спој дебљине 35 mm и пречника електроде за први пролаз $d = 4 \text{ mm}$, са дијаграма се може очитати $T_p = 100^\circ\text{C}$.

У циљу провере да ли усвојени технолошки параметри заваривања дају тражену структуру и механичке особине (оптимална жилавост и одговарајућа тврдоћа), потребно је израчунати време хлађења између 800 и 500°C ($t_{8/5}$) и унети га у дијаграм континуалног хлађења (KNZ) за дати челик.

3.3.2 Проблеми заварљивости микролегираних челика

Микролегирани челици повишене јачине употребљавају се за ценоводе високог притиска, судове под притиском, елементе друмских возила, железничке вагоне и цистерне за превоз гасова, мостове, хале и др.

За челике из ове групе карактеристично је то да садржај угљеника не прелази 0.2% и да се намерно додају мале количине микролегирајућих елемената (Nb, Ti, Al, Ta, Zr, V, и др.) чији збирни садржај не прелази 0.2% . Мали додаци ових елемената се таложе као карбиди, нитриди и карбонитриди, а на повећање јачине делују двојачо: уситњавањем зрна и таложењем и ојачањем чврстог раствора. Уситњавање зрна се постиже нормализационим жарењем или контролисаним ваљањем и хлађењем.

На заварљивост микролегираних челика пресудно утиче склоност ка појави хладних прслина, што зависи од величине еквивалентног угљеника, дебљине и типа споја. У циљу спречавања ових прслина потребно је предгревање које утиче не само на образовање тражене структуре ЗУТ-а већ и на снижење заосталих напона и количине дифундованог водоника из шавова у ЗУТ-у. Температура предгревања овде се повезује са минималном вредношћу међуслојне температуре и може се одредити применом дијаграма са слике 3.1 или помоћу параметарских једначина.

Дужина завара потребна за примену дијаграма одређује се према једначини 3.7 где је $T_w = 60 \div 200^\circ\text{C}$ тј. температура највероватније појаве хладних прслина.

Челици ове групе према стандарду JUS C.B0.502 у ознаци садрже словни симбол ČRN, ČRO и ČRV и број који представља најмању гарантовану границу течења.

Прелиминарно се заварљивост финозрних микролегираних челика са саставом: $C = 0.1 \div 0.18\%$, $Mn = 1.0 \div 1.6\%$ и $Nb = 0.025 \div 0.095\%$ може се проценити помоћу следеће формуле за еквивалентни угљеник:

$$CE = C + \frac{Mn}{10} + 3 \cdot Nb, \% \quad (3.8)$$

Слично се за финозрне челике са додатком ванадијума и азота израчунава:

$$CE = C + \frac{Mn}{10} + \frac{V}{3} + 3 \cdot N, \% \quad (3.9)$$

Челици којима одговара $CE < 0.35\%$ могу се заваривати без посебних мера, док се за челике са $CE = 0.35 \div 0.45\%$ при заваривању под прахом и у заштити CO_2 морају предузети посебне мере. Оне се углавном односе на повезивање температуре предгревања са погонском енергијом и међупрелазном температуром заваривања.

3.3.3 Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине

3.3.3.1 Бејнитни челици

Ови челици представљају, у односу на микролегиране, наредну етапу развоја челика повишене јачине. Најпре су се развили у Енглеској а први такав челик је *FORTYWELD* заштићен британским патентом 611.598. Основни легирајући елементи су: $Mo = 0.5\%$ и $B \approx 0.003\%$ а садржај угљеника је ограничен на 0.18% при нешто већем садржају Mn и Si . Испоручују се у нормализационо жареном или нормализованом и отпуштеном стању. Комбинацијом ($Mo = 0.5\% + B \approx 0.003\%$) добија се бејнитна структура и при веома малим брзинама хлађења (чак и на ваздуху) а додавањем мангана и хрома снижава се температура бејнитне трансформације на $600 \div 300^\circ C$ што веома доприноси уситњавању зрна и већој дисперзији карбида који ојачавају метал. На тај начин се граница течења повећава на $460 \div 600 MPa$.

Бејнитни челици се примењују за израду различитих челичних конструкција типа дизалица, железничких платформи, цистерни, грађевинских машина и тсл. Не примењују се са конструкције изложене ниским температурама.

Основни проблем при заваривању ових челика јесте појава хладних прелина и пад жилавости у ЗУТ-у. Он се решава смањењем брзине хлађења после заваривања што се постиже предгревањем или повећањем погонске енергије.

3.3.3.2 Нисколегирани побољшани челици ($Q + T - Quenching + Tempering$)

Ови $Q + T$ челици - термички побољшани челици примењују се за дизалице, цистерне, резервоаре, мостове, бродску опрему и тсл. Највеће вредности својстава отпорности могу се постићи каљењем на мартензитну структуру при чему тада напон течења достиже и вредности од $400 \div 800 MPa$. Мада су нискоугљенични ($C < 0.2\%$) ипак долази до закаљивања и при релативно спором хлађењу. Легирајући елемент који, код ових челика, има пресудну улогу на повећање јачине је бор (B). Он доприноси уситњавању зрна, дезоксидацији и денитрирању металног купатила, као и великом повећању прокалаивости.

Већина челика добијених каљењем и отпуштањем ($Q + T -$ челици) су финозрни што значи да се кале са температуре при којој су настала аустенитна зрна. На тај начин се добијају челични полупроизводи велике јачине и добре заварљивости.

Будући да су механичке особине нисколегираних побољшаних челика добијене оптималом термичком обрадом, јасно је да ће се те особине при заваривању мењати услед дејства температурских циклуса заваривања. Због тога, при избору термичког режима заваривања није довољно да се узме у обзир само хемијски састав, већ и чињеница да су корисне особине постигнуте и термичком обрадом побољшања. Из

овог разлога се мора за сваки челик ове класе дефинисати опсег варирања брзине хлађења, одакле произилазе и граничне вредности погонске енергије, као и време задржавања ЗУТ-а изнад A_{C3} температуре. Доња гранична вредност погонске енергије одређује се тако да се спрече хладне прслине, а њена максимална вредност као и време задржавања изнад A_{C3} температуре из услова да се пад јачине у делу ЗУТ-а сведе на најмању меру.

За разлику од других констукционих челика, код Q + T – челика, бољи резултати се постижу применом технологија које имају ниже вредности погонске енергије као што су РЕЛ и заваривање у заштити гасова. Нарочито за ове челике важи препорука да се технологија заваривања прописује у зависности од тражених излазних карактеристика завареног споја.

4. ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Заваривање два метала се не може увек успешно остварити. Постоји низ фактора који условљавају успешност тог процеса. Један од њих је и технологија заваривања. Правилно изабрана, технологија заваривања умногоме утиче на успешност извођења заваривања и на карактеристике добијеног споја. Челици WELDOX 700 у које спада и SQ690L се, као што је речено у глави 2., производе у Шведској железари SSAB Oxelösund и она даје следеће податке о њему: $R_m = 760 \text{ MPa}$ и $R_{p0.2} = 700 \text{ MPa}$ као и хемијски састав дат у табели 1 ове главе. Интерна ознака произвођача садржи још и суфиксе D, E и F који се односе на гарантовану ударну жилавост ЗУТ-а: D на -20°C , E на -40°C и F на -60°C . Сви челици класе WELDOX имају гарантовану ударну жилавост од 40 J , одређену на 3 mm од ЗУТ-у најближе линије стапања, при собној температури.

Табела 1 Хемијски састав челика WELDOX 700 (S690QL)

Ознака	Захтев	Садржај хемијских елемената, %														
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	B	Cu	Ti	N	Nb
Weldox 700 (D, E ili F)	Прописани максимум	0.20	1.50	0.60	0.020	0.010	0.70	0.70	2.0	0.09	0.015	0.005	0.30	0.040	0.010	0.040

Квалитет заваривања споја зависи од особина основног материјала (ОМ), додатног материјала (ДМ) као и од геометрије жлеба, вештине заваривача и стања заваривачке опреме.

Једини проблем који се односи на заварљивост ове класе челика (WELDOX), код делова веће дебљине, односи се на хладне – водоничне прслине. Углавном се ти проблеми могу решити коришћењем аустенитних електрода, контролисаним уносом топлоте и у посебним условима предгревањем или накнадном термичком обрадом. При томе се подразумева коришћење нисководоничних додатних материјала.

Због свега горе наведеног, да би се постигла добра заварљивост споја, неопходно је придржавати се следећих препорука које ће бити објашњене у даљем тексту.

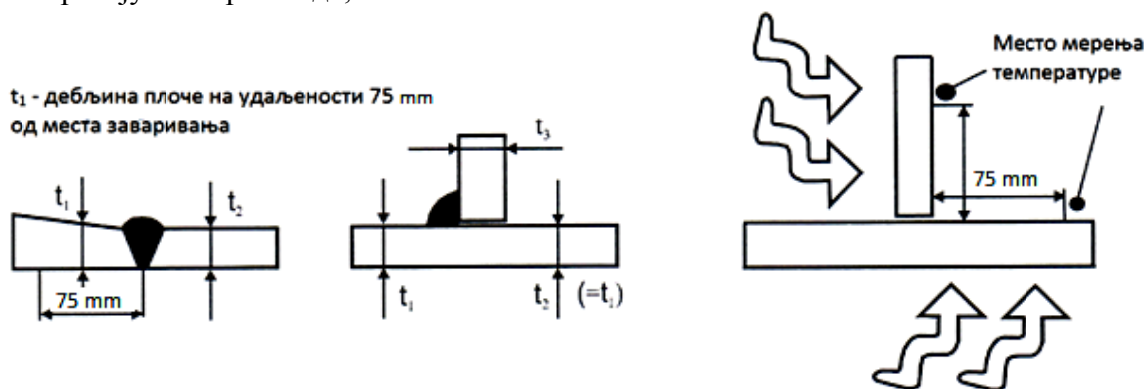
4.1 Предгревање и међупролазна температура

Правилно предгревање и међупролазна (eng. *interpass*¹) температура су само неке од мера за спречавање водоничних (хладних) прслина (сл. 4.2). Поред тога јављају се и:

- Смањење водоника у споју на $H < 5 \text{ ml}/100 \text{ g}$ метала шава;
- Избор одговарајуће температуре предгревања (T_p) и међупролазне температуре ($T_{\text{interpass}}$);

¹ Међупролазна (*interpass*) температура је прелазна температура до које се хлади једнопролазни завар и при којој се почиње са полагањем другог.

- Примена нисководоничних електрода (обавезно чување и сушење по препорукама произвођача);
- Одстрањивање свих нечистоћа из зоне заваривања (влажу из електродне жице, влагу или корозију из жлеба и околине, масти и емулзије садржаних у жлебу), заваривати при малој влажности ваздуха и заштитног гаса;
- Предузимање мера за смањивање заосталих напона у завареном споју;
- Коришћење додатних материјала потребне јачине, не јачих од основног материјала;
- Избор правилног редоследа заваривања који смањује укупне унутрашње напоне и деформације;
- Усвојени зазор у споју треба бити максимално 3 mm (и код сучеоног и угаоног споја);
- Без обзира да ли је потребно предгревање, гасним гориоником пажљиво загрејати непосредну зону споја и његову околину, водећи рачуна да се не загреју изнад препоручених вредности температуре за предгревање (од 150 до 200°C);
- Максимална међупролазна температура је $T_{\text{interpass}} \approx 200 \div 225^\circ\text{C}$ зависно од крутости/дебљине завариваних делова;
- Усвојене температуре предгревања и међупролазне температуре не важе за случај да је унос топлоте већи од 17 kJ/cm (заваривање релативно малом брзином);
- Усвојена је претпоставка да се завар хлади на ваздуху собне температуре (18 ÷ 28°C);
- Захтеване температуре предгревања могу бити остварене на различите начине: Електрични грејни елементи око припремљеног споја често су најбољи избор јер они омогућавају равномерно грејање свих површина. Температуре морају бити приказиване помоћу контактеног или бесконтактеног термометра;
- Време предгревања износи 2 min/mm (и до 5 min/mm) дебљине. Делови се споро загревају и споро хладе;

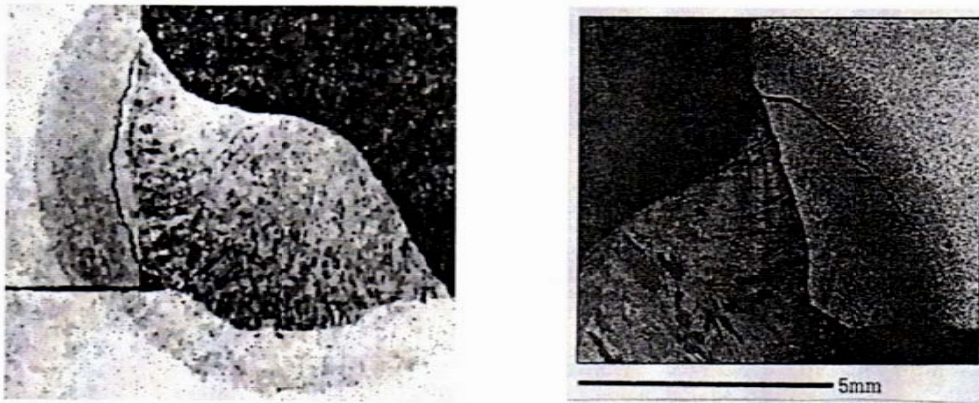


Слика 4.1 Место мерења температуре предгревања

- Ако је дебљина плоче 25 mm температура се мери 2 min после загревања. Ако је плоча дебела 12.5 mm, температура се мери после 1 min. Међупролазна температура може бити измерена на металу шави или основном материјалу у непосредној близини шави;
- Пре заваривања у околини зоне спајања (не и у самој зони) се наноси заштитни спреј за лакше скидање растопљених капљица метала које прште на ОМ;

- Припојне заваре извести према технолошкој документацији (за први завар), зависно од врсте споја и дебљине плоча, а дужина припоја треба да се креће у границама $40 \div 50 \text{ mm}$.

Водоник унет у заварени спој преко заваривачког купатила може бити одстрањен дифузијом. Повишена радна температура (предгревање) и висок унос топлоте, смањују брзину хлађења споја. Виша температура убрзава дифузију и смањује количину заосталог водоника. Смањење брзине хлађења смањује тврдоћу у ЗУТ-у али и ниво заосталих напона, што доприноси смањењу ризика од водоничних прслина.



Слика 4.2 Макрографски приказ хладне (водоничне) прслине у угаоном споју и у ЗУТ-у

Препоручене температуре предгревања, за нормалне услове крутости, нарочито су битне за припојне шавове и коренски пролаз. За строже услове крутости се препоручују више температуре. На температуру предгревања утиче и дебљина плоча. Код WELDOX 700 се препоручује температура предгревања од $150 \div 200^\circ\text{C}$, а максимална међупролазна температура 250°C с циљем да се спречи порозност у металу шавова изазвана турбуленцијом ваздуха.

Препоручене радне температуре предгревања треба да спрече појаву хладних прслина које се односе на линију топљења основног материјала. Међутим, водоничне прслине могу настати и у металу шавова, нарочито код додатног материјала велике јачине, са напоном течења око 600 MPa . Повишене радне температуре треба избегавати зато што оне представљају проблем заваривачу и помоћном особљу. Такође, потреба за предгревањем се може смањити помоћу неких мера као што су:

- А. Накнадно загревање;
- В. Завршна обрада завареног споја пре настанка прслина (у року од 48 сати);
- С. Повећан унос топлоте и
- Д. Примена аустенитних додатних материјала.

4.1.1 Накнадно загревање

Алтернативна допуна вишој радној температури јесте накнадно загревање заваара које убрзава дифузију водоника из шавова и ЗУТ-а. Нарочито је велики ризик настајања водоничних прслина чим температура падне испод 150 до 100°C , па и на собној температури после 48 сати од заваривања. Због тога не треба дозволити да температура падне испод 150°C , већ је треба подићи на 200°C и на њој држати најмање 1 h на сваких 10 mm дебљине. Тачније, што је дуже време накнадног загревања оно је ефективније. За WELDOX 700 температура накнадног загревања не треба да надмаши 200°C , јер то економски није оправдано. Не треба повећавати брзину хлађења, нпр. прскањем воде на завар јер ће то спречити термичку дифузију атомног водоника у околни ваздух.

4.1.2 Завршна обрада завареног споја пре настајања прлина

Као што је напред споменуто, водоничне (хладне) прлине су феномен зависан од температуре (испод $100 \div 150^\circ\text{C}$) и времена. Ове прлине могу настати за време од 48 *h* од заваривања, али је највећа вероватноћа за то у року од неколико сати од завршетка процеса заваривања. Са даљим протоком времена, када се приближава рок од 48 сати, вероватноћа за њихову појаву знатно опада.

Важна напомена: Потреба за предгревањем може се смањити ако се припоји изведу са високим уносом топлоте, а коренски пролази се испуне са што краћим заварима – један за другим. Тиме ће најкритичније време настанка ових прлина истећи на $150 \div 100^\circ\text{C}$. Тачније, претходни пролази својом топлотом делују као да је извршено предгревање за наредни пролаз.

4.1.3 Повећан (висок) унос топлоте

На основу препорука произвођача додатног материјала, потребно предгревање може бити знатно редуковано применом високог уноса топлоте. Висок унос топлоте се може остварити за припојне шавове, као и за заваре испуне и покривне заваре, при чему дужина припојних шавова при заваривању ових челика треба да буде око 50 *mm*.

4.1.4 Примена аустенитних додатних материјала

Аустенитни (нерђајући) депозит шава је материјал у коме се водоник увелико раствара па се тако веома смањује штетан утицај дифузног водоника у ЗУТ-у. Поред тога, аустенитни додатни материјали дају веома жилав и истегљив (дуктилан) метал шава са ниским напоном течења. Стога се ризик од водоничних прлина знатно умањује, јер се контракција заваривачких делова при хлађењу смањује истезањем дуктилног² метала аустенитног шава, што умањује ниво заосталих напона у ЗУТ-у. Нпр, заваривачке радионице оклопних возила користе аустенитне додатне материјале јер не практикују предгревање због могућег пада тврдоће. То су тзв. панцирни челици који по заварљивости одговарају челицима класе HARDOX 500. Аустенитни додатни материјали се могу наћи у виду базичних електрода за РЕЛ заваривање и пуне или пуњене жице за МАГ и МИГ поступке заваривања.

4.2 Унос топлоте

Челици класе WELDOX се заварују уносом топлоте који варира у уским границама да би се добиле добре механичке особине завареног споја. Тај унос топлоте се рачуна по формули:

$$q_l = \frac{U \cdot I}{1000 \cdot v_z} \cdot \eta, \quad \frac{kJ}{cm}, \quad (4.1)$$

где су: *U* – радни напон у *V*, *I* – јачина струје у *A*, *v_z* – брзина заваривања у *cm/s* и η – степен искоришћења топлоте.

Укратко, мањи или већи унос топлоте утиче на:

- жилавост ЗУТ-а,
- својства отпорности и деформације споја,
- заостале напоне завареног споја и
- величину ЗУТ-а.

² Дуктилан – истегљив, жилав

Све горе наведено, проистиче из повезаности уноса топлоте (q_l) и времена хлађења између 800 и 500°C ($t_{8/5}$), које дефинише структурне промене у критичној зони ЗУТ-а.

За конструкциони челик типа WELDOX 700, проблеми заварљивости се углавном свде на спречавање настанка водоничних прслина и постизање минималне вредности жилавости ЗУТ-а од 40 J на собној и 27 J на температури од - 40°C.

Посебну пажњу треба обратити на извођење вишепролазних заварених спојева, код којих се може повећати радна температура, односно повећати унос топлоте. Зато се препоручује прецизна контрола међупрелазне температуре која се регулише дужином завара попуне. Краћи завари повећавају унос топлоте у односу на рачунску вредност (q_l).

4.3 Додатни материјал

За заваривање челика WELDOX 700 треба примењивати базичне сушене електроде тј. електроде које гарантују да садржај водоника у металу шава неће прећи изнад 5 ml/100 g. За заваривање WELDOX-а могу се употребити нисколегирани и високолегирани додатни материјали. Применом додатних материјала мање јачине од основног постиже се већа жилавост споја, већа отпорност на водоничне прслине и нижи заостали напони у завареном споју, посебно у ЗУТ-у.

Код вишепролазних завара од WELDOX 700, нарочито је корисно заваривање са додатним материјалима различитих јачина (сл. 4.3). Припојни шавови и први пролаз заварују се са додатним материјалом мање јачине, а затим се остали пролази изводе са додатним материјалом веће јачине. Ова се техника примењује када се у техничким условима траже приближно иста својства отпорности у свим деловима завареног споја.

За заваривање челика класе WELDOX се препоручују додатни материјали нижег напона течења од основног материјала.



Слика 4.3 Вишеслојно заваривање различитим додатним материјалима

Садржај водоника код базичних нелегираних и високолегираних електрода мора бити мањи или бар једнак 5 ml водоника на 100 g метала шава. То се постиже прецизно регулисаним сушењем и употребом базичних аустенитних електрода. Код МАГ и ТИГ поступака заваривања овако низак садржај водоника се постиже коришћењем додатног материјала у облику пуних жица. Иначе се тај садржај разликује у зависности од врсте и облика додатног материјала.

Не препоручује се заваривање у вертикалном положају одозго надоле (PG).

Електроде се могу бирати и према препорученим табелама (таб. 4.1):

Табела 4.1 Парцијални садржај водоника у додатном материјалу (метод живе)

Поступак заваривања	Тип електроде	Садржај дифузног водоника у додатном материјалу (ml/100g метала шава)
РЕЛ	Базичне – новоотворене	3.5 – 5
	Базичне влажне	5 – 10
	Рутилне	20 – 35
МАГ/МИГ	Пуне жице	2 – 3
	Металом пуњене електроде	2 – 10
	Топитељем пуњене електроде	3 – 15

4.3.1 Додатни материјал од нерђајућег челика

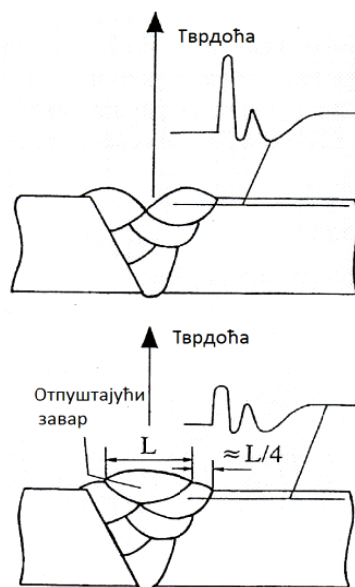
Додатни материјали од нерђајућег челика могу бити употребљивани за заваривање скоро свих конструкционих челика. Они омогућавају заваривање при собној температури без предгревања. Код ових, нерђајућих додатних материјала, водоник не утиче на перформансе у толикој мери као код нелегираних и нисколегираних додатних материјала.

Смањење напона у завареним спојевима

Нижи напон течења додатног материјала у односу на основни, доводи до мањег напона у завареним деловима него при заваривању са додатним материјалима веће јачине, јер, по правилу, материјал мање јачине даје дуктилнији спој него додатни материјал веће јачине.

Ниво заосталих напона у завару се повећава са порастом степена укрућења (ометеног ширења или скупљања). Ако је термичко скупљање заваара ометено у свим правцима настаје вишеосно напонско стање. Ово стање повећава ниво заосталих напона. Концентрација напона настаје на местима локалне промене геометрије или структурне нехомогености (металуршки фактор). Пример су места са променом попречног пресека површине. Још један пример јесу и ивице угаоних шавова.

Најпростији начин да се делује на расподелу заосталих напона јесте примена додатног материјала што мање јачине. Ако се спој мора извести тако да има равномерну тврдоћу на површини, завари попуне се изводе са додатним материјалом мање чврстоће, а покривни завар са додатним материјалом веће јачине. При томе се покривни завар сучеоног споја не наноси по целој ширини отвора жлеба, већ се на крајевима оставља непопуњено око $\frac{1}{4}$ те ширине, према скици са слике 4.4. После хлађења споја надвишење шава се најчешће бриси до нивоа основног материјала. Завари попуне се изводе легуром **INOX B 18/8/6** која има напон течења око 350 МПа. Његово својство је да добро апсорбује вибрације које спој у експлоатацији трпи и да неутралише постојеће напоне. То позитивно утиче на цео шав док се проблем тврдоће решава, као што је већ речено, наношењем покривног заваара веће тврдоће.



Слика 4.4 Смањење поврине тврдоће ЗУТ-а техником отпуштајућег завара

Табела 4.2 Препоручени додатни материјал при заваривању различитих основних материјала

(I) Заваривање WELDOX 700 + WELDOX 700		
Врста електроде	РЕЛ заваривање -обложене електроде-	МАГ/МИГ заваривање -пуна жица-
Коренски завари Међуслојни завари	INOX B 18/8/6 $R_{p0.2} = 350 \text{ MPa}$	MIG 18/8/6 $R_{p0.2} = 380 \text{ MPa}$
Завари испуне Покривни завари	EVБ 80 $R_{p0.2} = 690 \text{ MPa}$	MIG 75 $R_{p0.2} = 690 \text{ MPa}$
(II) Заваривање WELDOX 700 + S 350 JR		
Исти додатни материјали као при заваривању WELDOX 700 + WELDOX 700 варијанта I		
(III) Заваривање S 350 JR + S 350 JR		
Коренски завари + завари испуне	МАГ/МИГ VAC 60 $R_{p0.2} > 410 \text{ MPa}$	РЕЛ EVБ 50 $R_{p0.2} > 440 \text{ MPa}$

4.4 Заштитни гас

Заштитни гас у заваривању има веома важну улогу при неким поступцима заваривања. Та његова важност се нарочито запажа при МАГ/МИГ заваривању. Као заштитни гасови се користе, најчешће, аргон, хелијум, угљен-диоксид и њихове мешавине. Препоручује се мешавина следећег састава: $\text{Ar} + 1\div 3 \% \text{O}_2$ или $\text{Ar} + 2.5\% \text{CO}_2$, за припоје и коренске заваре. За заваре испуне и покривне заваре препоручује се мешавина инертног и активног гаса: $82\% \text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$.

Инертни гасови: Од инертних гасова код нас се углавном користи аргон и његове мешавине док се хелијум више користи у Америци и у Европи. Аргон као заштитни гас мора бити чист односно без примеса јер оне погоршавају квалитет шави. Оне потичу из добијања а најчешће су то кисеоник, угљен-диоксид и вода. Код нас се примењује аргон Ц квалитета³, чистоће 99.96%, испоручује се у челичним боцама означене жутом бојом, запремине 40 l и притиска 150 ÷ 200 bara.

Аргон је једноатоман гас, инертан и нерастворљив у течном металу, и око 38% тежи од ваздуха што је посебно повољно за заваривање у хоризонталном положају.

³ Према стандарду JUS H.F1.018.

Хелијум је такође инертан гас, знатно лакши од ваздуха па то узрокује његову већу потрошњу него аргона при заваривању у хоризонталном положају. Поред тога аргон има нижи степен јонизације од хелијума, што значи да је потребан нижи напон за успостављање и одржавање лука при истој дужини. Из овога произилази и чињеница да се у заштити аргона ослободи мања количина топлоте него у заштити хелијума. Због тога је заштита у аргону погоднија за заваривање танких лимова док је хелијум погоднији за заваривање делова већих пресека.

Предности инертних гасова су: олакшава се успостављање електричног лука, смањује прштање, смањује могућност оксидације, омогућава ефикасну заштиту и тсл.

Активни гасови: Од активних гасова највећу примену има угљен-диоксид (CO_2). Угљен-диоксид је гас без боје, мириса и киселкастог је укуса. Није отрован али се његов дозвољени садржај у ваздуху ограничава на 3% јер преко тог садржаја има штетан утицај на човечији организам. Његова чистоћа износи око 99.8%, без садржаја примеса у виду уља, H_2S , HCl , са дозвољеним садржајем воде до 0.2%. Испоручује се у челичним боцама под притиском од 150 *bara* и запремине 40 *l*. У оваквим условима је у течном стању, јер већ при $p > 73 \text{ bara}$ CO_2 прелази у течност, а при испуштању из боце, без загревања, прелази у чврсто стање истварајући тзв. „суви лед“.

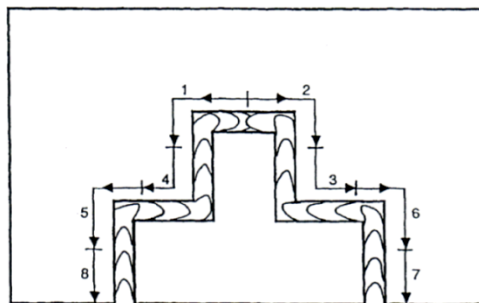
Предности активаног гаса су: даје стабилан лук, смањује порозност шави, повећава уваривање док је мана велико прштање растопљених капљица метала.

Код свих метода заваривања у заштитном гасу, његов проток зависи од врсте споја и дебљине материјала, и креће се у границама 15 ÷ 20 *l/min*.

4.5 Редослед заваривања, величина зазора и позиционирање споја

Појава хладних прслина се може умањити и практичним методама при заваривању као што су:

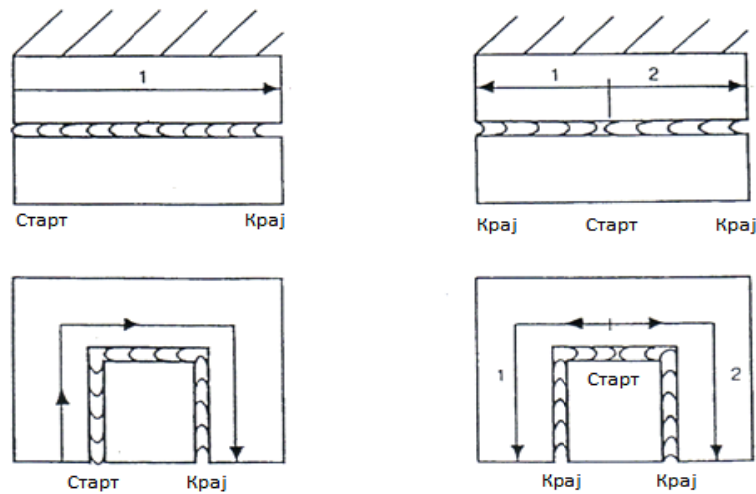
- стартовање и заустављање не изводити у угловима. Уколико је могуће, почетак и крај шави мора бити најмање 5 ÷ 10 *cm* удаљен од угла (сл. 4.5 и 4.7). Разлог за то је појављивање гасних мехурова и укључака троске на почетку, и кратера и прслина на крају, што су недозвољене грешке у зони концентрације напона;
- код елемената за повећање крутости конструкција, препоручује се и полагање додатних завара на угловима (сл. 4.6)
- конструкциона решења заварених спојева бирати према препорукама али увек, када је то могуће, избегавати заваривање на местима са променом попречног пресека.



Слика 4.5 Пример добро изабраног редоследа заваривања: 1 – заваривање увек изводити од средине према слободним крајевима, 2 – почетак и крај заваривања никада не позиционирати на угловима



Слика 4.6 Пример побољшања угаоне геометрије



Слика 4.7 Примери побољшања редоследа заваривања

4.6 Накнадна термичка обрада

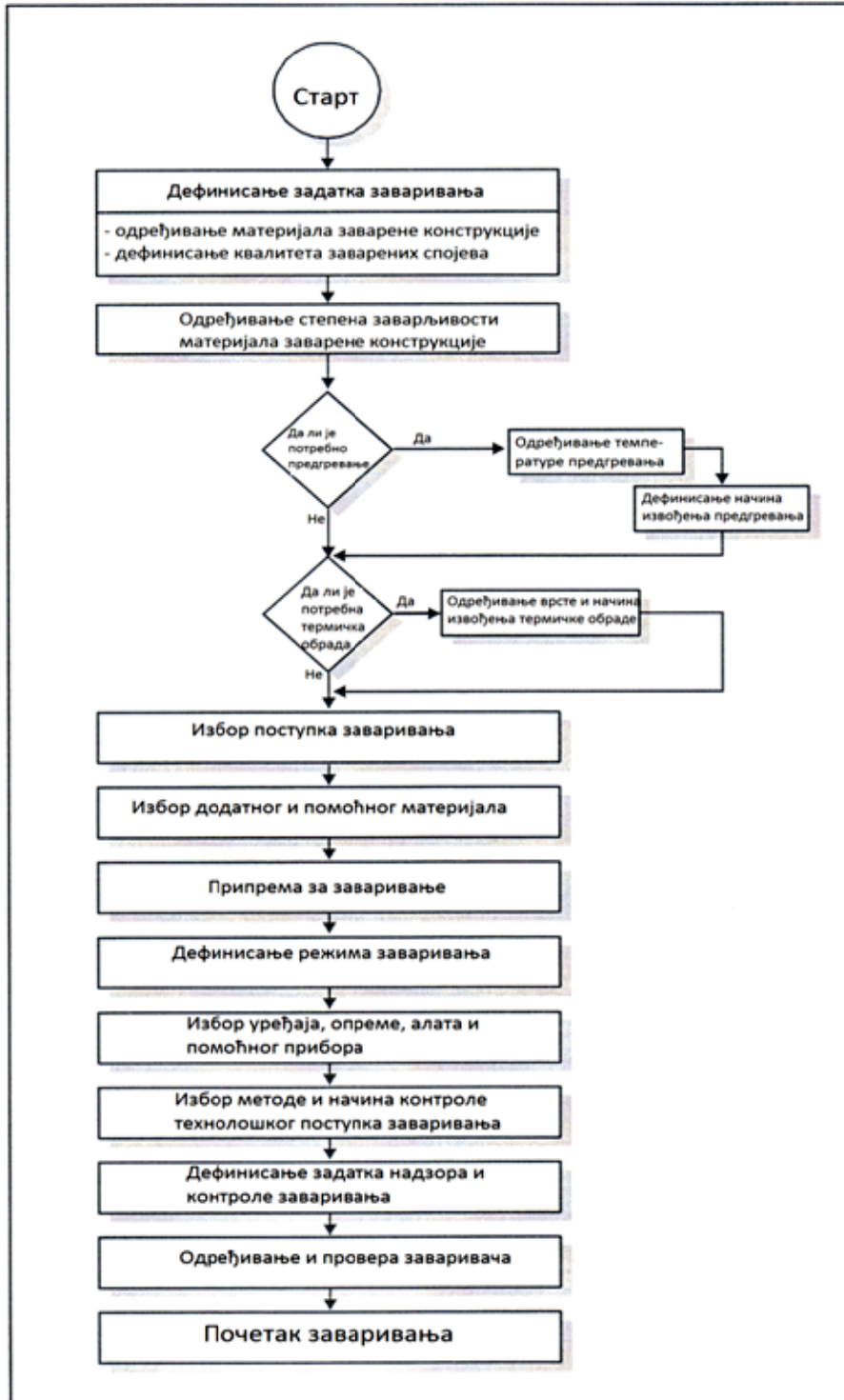
Заостали напони (термички и структурни) по завршетку заваривања теже да деформишу сам спој и његову околину и ослабе део конструкције на којој је спој остварен. Будући да је то непожељно, изводи се термичка обрада отпуштања у циљу смањења нивоа заосталих напона. Жаре се само неки склопови односно спојеви. Отпуштањем се повећава и граница замора завареног споја, односно постиже се равномернија расподела напона између шава и плоче а тиме се смањује и концентрација напона.

4.7 Технолошки поступак МАГ заваривања

При пројектовању заварених конструкција стално је присутан захтев за што мањим утрошцима енергије по јединици производа. У случају заварених конструкција, међу којима доминирају челичне, тај захтев условљава и увођење материјала знатно бољих својстава. Будући да се још увек при пројектовању конструкција узима у обзир јачина материјала, то значи да се увођењем челика повишене јачине добило на економичности конструкције. Међутим, све те предности су условне кад је у питању заваривање, будући да су ти челици добијени различитим техномеханичким процесима, при излагању термичким и деформационим циклусима услед заваривања нарушава се равнотежа и структура постаје хетерогена што је непожељна појава у материјалу. Те

због тога ови челици захтевају пажљиво одабране параметре заваривања и њихову доследну примену при заваривању. Познавање процеса простирања топлоте и формирања температурског поља могу дати одговоре на питање каква се структура може остварити на основу изабраних параметара, и обрнуто, изабрати параметре у циљу добијања пожељне структуре.

На слици 4.8 је приказана схема процеса заваривања.

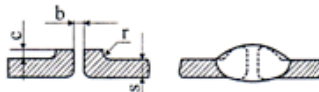
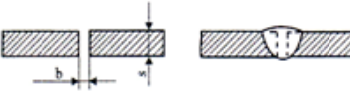
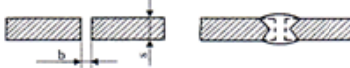
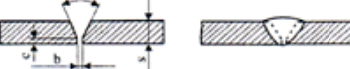
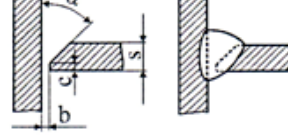
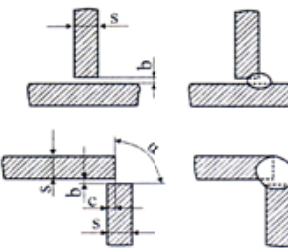


Слика. 4.8 Схема процеса заваривања

4.7.1 Прорачун технолошких параметара МАГ заваривања

При извођењу сучеоних спојева у хоризонталном положају и угаоних спојева у коритастом и хоризонталном положају, параметри МАГ заваривања се могу приближно израчунати на основу полазних података као што су врста споја, пречник електродне жице и облик шавва. Најпре се, у зависности од дебљине делова и врсте споја, бирају облик и димензије жлеба према подацима датим у табели 4.3.

Табела 4.3 Припрема страница за заваривање у заштити активног гаса (CO_2)

Врста шавва	Попречни пресек жлеба и шавва	Димензије жлеба				
		s	α	b	c	r
		mm	°	mm		
Рубни шав		≤ 2		≤ 0.5	s+1	$s \div 1.5s$
I - шав		≤ 2		≤ 0.5		
		2÷3		≤ 0.8		
		3÷6		≤ 1		
Двострани I - шав		6÷12		1÷3		
V - шав		5÷20	30÷50	≤ 2	1.5÷2.5	
1/2 V - шав		3÷16	40÷55	≤ 2	1.5÷2.5	
Угаони шав		>1		≤ 2		
		1÷4	90	≤ 2	≤ 2	
		>4	60÷90	≤ 2	≤ 2	

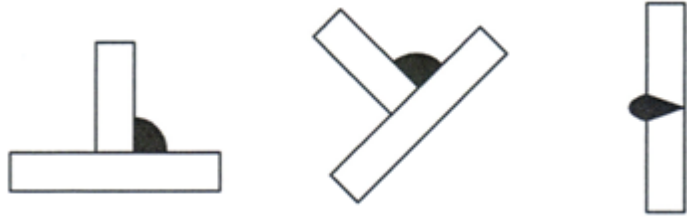
Даље се на основу података из табеле 4.4 усваја попречни пресек појединих завава и одређује укупан прој пролаза. При томе се полази од препорука о пречницима електродне жице зависно од дебљине делова у сучеоним спојевима (таб. 4.5) односно од дебљине шавва код угаоних спојева (таб. 4.6).

Табела 4.4 Гранични пресеци појединих завара

Врста споја	Врста завара	Допуштени пресек завара у mm^2			
		Положај „а“ за пречник жице			
		d = 1.2 mm		d = 1.6 mm	
Сучеони	Коренски завар	11.0		11.0	
	Завар испуне	6.25-64.0		15.0-64.0	
	Покривни завар	15.0-64.0		15.0-64.0	
Угаони	Покривни завар Завари попуне	Положај „б“		Положај „ц“	
		d = 1.2 mm	d = 1.6 mm	d = 1.2 mm	d = 1.6 mm
		6.25-64.0	15.0-36.0	6.25-36.0	15.0-36.0
		15.0-64.0	15.0-64.0	15.0-36.0	15.0-36.0

Према SRPS С.НЗ. 011/82 разликују се положаји:

а) Хоризонталан б) Коритаст ц) хоризонтално – вертикалан



Табела 4.5 Избор пречника електродне жице – сучеони спој

s, mm	<2	2-20	10-30
d, mm	0.8	1.2	1.6

Табела 4.6 Избор пречника електродне жице – угаони спој

s, mm	2	3	>3
d, mm	1.2	1.2	1.6

4.7.2 Рачунски параметри МАГ заваривања

У вези са дебљином угаоних шавова треба се држати следећих препорука (односе се на све методе електролучног заваривања): носећи угаони шав мора имати дебљину (а) од најмање 3 mm а највише $d_{max} = 0.7 \cdot s_{min}$ где је s_{min} – најтањи део у споју. Ако се из конструкционих разлога захтева већа дебљина носећег угаоног шав (3 ÷ 5 mm) он се изводи из више пролаза.

Избор жлеба и граничне површине пресека завара

Стандард SRPS С.ТЗ.001 детаљније дефинише типове спојева и врсте шавова, а облици и димензије жлебова за заваривање челика топљењем дефинише стандард SRPS С.ТЗ.030. За МАГ/МИГ заваривање не постоје посебни стандарди али треба знати да код дебљих пресека жлебови треба да имају мањи размак, мање затупљење и мањи угао отвора жлеба него за остале поступке заваривања топљењем.

Припрема страница жлеба се може извести механички, термички или комбиновано. Механичким поступцима, странице се закошавају скидањем струготине (тестерисање, рендисање, брушење и тсл.), уз напомену да обрада уз виши квалитет

обрађене површине повећава трошкове. Такође, могуће је и термичко закошење страница гасним сечењем у смеши ацетилена и кисеоника или резање плазмом.

Пре заваривања, странице жлеба и његову околину треба очистити и одмастити, а по потреби и предгрејати гасним пламеном на $100 \div 150^\circ\text{C}$ (око 10 min) у циљу отклањања влаге.

Маса завара на дужини од 1 cm

На основу усвојеног пресека завара (A_z) може се израчунати маса завара (M) која је потребна за попуњавање дела жлеба од $L = 1 \text{ cm}$:

$$M = \rho \cdot V = \rho \cdot A_z \cdot L, \text{ g}, \quad (4.2)$$

где је: $\rho = 7.86 \text{ g/cm}^3$ – густина електродне жице,

$V = A_z \cdot L$ – јединична запремина завара на дужини од 1 cm,

A_z – усвојена површина попречног пресека једног завара cm^2 ,

$L = 1 \text{ cm}$ – јединична дужина завара.

Количина претопљене електродне жице у јединици времена

Количина претопљене електродне жице у јединици времена (брзина топљења у g/s) израчунава се према изразима:

$$m_{1.2} = 0.64 + 0.11 \cdot M + 0.14 \cdot M^2, \text{ g/s}, \text{ за жицу пречника } 1.2 \text{ mm} \text{ и} \quad (4.3)$$

$$m_{1.2} = 0.64 + 0.55 \cdot M + 0.055 \cdot M^2, \text{ g/s}, \text{ за жицу пречника } 1.6 \text{ mm} \quad (4.4)$$

Танки лимови дебљине до 4 mm заварују се без припреме ивица у хоризонталном положају (до 3 mm у осталим положајима), а за плоче већих дебљина израђују се V, X и K жлебови, слично као за РЕЛ заваривање. Углови отвора жлебова су $40 \div 50^\circ$, а зазор између лимова $0 \div 2.5 \text{ mm}$.

На основу претходно усвојених вредности и израчунатих величина можемо израчунати брзину заваривања као и брзину топљења електродне жице.

Брзина заваривања

Брзина заваривања v_z се рачуна по изразу:

$$v_z = \frac{m \cdot 6000}{A_z \cdot \rho}, \frac{\text{cm}}{\text{min}} \quad (4.5)$$

где је: m – маса депонованог материјала у g/s,

A_z – површина завара у mm^2 и

ρ – густина додатног материјала у g/cm^3

Брзина топљења електродне жице

Брзина топљења електродне жице ($v_t = 1.2 \div 25 \text{ m/min}$) рачуна се по изразу:

$$v_t = \frac{0.012732 \cdot A_z \cdot v_z}{d^2}, \text{ cm/min}, \quad (4.6)$$

Број пролаза

Број пролаза се може одредити на два начина:

Према подацима за различите дебљине лима (табела 4.7)

Табела 4.7 Оријентациони избор броја пролаза у зависности од дебљине основног материјала

s, mm	4÷8	6÷12	8÷15	15÷20	20÷30
N	2	3	6	8	12

На основу површине попречног пресека жлеба А и завара А_z:

$$n = \frac{A}{A_z}, \quad (4.7)$$

где је: А_z = 0.0625 ÷ 0.64 cm² зависно од пречника жице, врсте жлеба и тсл. (таб. 4.4).

Најзад се израчунавају енергетски параметри заваривања у заштити гаса CO₂:

- Јачина струје за електродну жицу пречника 1.2 mm;
- Јачина струје за електродну жицу пречника 1.6 mm;
- Радни напон електричног лука.

Јачина струје заваривања

Јачина струје заваривања (I_{1.2} и I_{1.6}) за пречнике жице d = 1.2 и d = 1.6 mm рачуна се према следећим изразима:

$$I_{1.2} = 308 \cdot \log v_t - 17, A \text{ и} \quad (4.8)$$

$$I_{1.6} = 378 \cdot \log v_t + 26, A \quad (4.9)$$

Напон заваривања (радни напон)

$$U = 14 + 0.05 \cdot I, V \quad (4.10)$$

На крају треба напоменути да се код сучеоних спојева усвајају различити пресеци коренског завара, завара испуне и покривног завара, али тако да збир њихових попречних пресека буде већи од површине попречног пресека одговарајућег жлеба.

Напомене и препоруке у вези прорачуна технолошких параметара МАГ заваривања.

Поред поменутих параметара заваривања, на квалитет завареног споја утичу још и: дужина извученог (слободног) дела електродне жице, положај жичане електроде (пиштоља за заваривање) у односу на раван споја, врста заштитног гаса и његова потрошња, удаљеност млазнице од површине радног комада, врста заштитног гаса и његова потрошња, поларитет електроде, положај заваривања и др.

Прорачунати параметри заваривања служе као полазни подаци за избор режима заваривања у заштити CO₂. Такође, врши се и њихова корекција уколико је то неопходно. После изведених спојева усвајају се параметри заваривања који дају најбоље резултате. У табелама 4.8 и 4.9 су дате препоруке за избор режима заваривања нискоугљеничних и нисколегираних конструкционих челика.

Табела 4.8 Режији полуаутоматског и аутоматског заваривања у заштитном гасу CO₂

Дебљина материјала	Зазор	Број пролаза	Пречник електродне жице	Струја заваривања	Напон	Брзина заваривања	Проток гаса
mm	mm	-	mm	A	V	m/h	l/min
0.6-1	0.5-0.8	1	0.5-0.8	50-60	18-20	20-25	6-7
1.2-2.0	0.8-1.0	1-2	0.8-1.0	70-100	18-20	18-24	10-12
3-5	1.6-2.0	1-2	1.6-2.0	180-200	28-30	20-22	14-16
6-8	1.8-2.2	1-2	2.0	250-300	28-30	18-22	16-18
8-12	1.8-2.2	2-3	2.0	250-300	28-30	16-20	18-20

Табела 4.9 Режији полуаутоматског и аутоматског заваривања угаоних шавова у заштитном гасу CO_2

Дебљина материјала	Пречник електродне жице	Катета шавва	Број пролаза	Струја заваривања	Напон	Брзина заваривања	Слободни део електроде	Проток гаса
<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	-	<i>A</i>	<i>V</i>	<i>m/h</i>	<i>mm</i>	<i>l/min</i>
1.0-1.3	0.5	1.0-1.2	1	50-60	18-20	18-20	8-10	5-6
1.0-1.3	0.6	1.2-2.0	1	60-70	18-20	18-20	8-10	5-6
1.5-2.0	0.8	1.2-2.0	1	60-75	18-20	16-18	8-10	6-8
1.5-2.0	0.8	1.5-3	1	70-110	18-20	16-18	8-10	6-8
1.5-3.0	1.2	2-3	1	90-130	20-22	14-16	10-12	8-10
3-4	1.2	3-4	1	120-150	20-22	16-18	10-12	8-10
3-4	1.6	3-4	1	150-180	28-30	20-22	16-18	12-14
5-6	1.6	5-6	1	230-260	28-30	26-28	16-18	16-18
5-6	2.0	5-6	1	260-300	28-30	29-31	20-24	16-18
7-9	2.0	7-9	1	300-350	30-32	20-22	20-24	18-20
9-11	2.0	9-11	2	300-350	30-32	24-26	20-24	18-20
11-13	2.0	11-13	3	300-350	30-32	24-26	20-24	18-20
13-15	2.0	13-15	4	300-350	30-32	24-26	20-24	18-20

4.8 Технолошки поступак РЕЛ заваривања

РЕЛ се сврстава у поступке заваривања топљењем, помоћу топлоте ослобођене у електричном луку. Заштита растопа од штетног деловања гасова из околине (азот, кисеоник) остварује се помоћу облоге електроде. Струја заваривања може бити једносмерна и наизменична, јачине $25 \div 450 A$, радног напона $15 \div 40 V$ и брзине заваривања до $120 mm/min$.

РЕЛ заваривање почиње успостављањем електричног лука између врха електроде и основног материјала. Лук топи ивице основног материјала и електроду и ствара метално купатило које од ваздуха штити слој троске и гасова који потичу из облоге. Лук се прекида када се електрода потроши да остане $50 mm$ од ње. Обија се троска и заваривање наставља новом електродом.

4.8.1 Технолошки параметри РЕЛ заваривања

Основни параметри РЕЛ заваривања су: пречник електроде (језгра), јачина струје заваривања, радни напон, дужина лука и брзина заваривања.

Пречник електроде се бира према дебљини завариваног материјала, облику и димензијама жлеба и положају завареног споја. Обично се за коренски завар узима електрода мањег а за остале заваре већег пречника. Када је реч о електродама треба поменути и то да постоје различити типови електрода. Могу бити: киселе (оксид гвожђа), кисело-рутилне, базичне, целулозне, оксидне, рутилне (средња или дебела облога) и др. Пречник електроде (d) зависи од дебљине завариваних делова (s) и од врсте споја. За сучеони спој пречник електроде се бира из табеле 4.10 док ће о врсти жлебова бити речи касније.

Табела 4.10 Избор пречника електроде за сучеони спој

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

За извођење коренског завара код плоча дебљине веће од 10 mm треба усвојити електроду чији је пречник мањи за 1 mm од препоручене вредности.

Јачина струје заваривања бира се на основу пречника електроде и типа облоге. Усваја се максимална и минимална вредност при чему је, испод минималне вредности, лук нестабилан а изнад максималне облога се прегрева и круни па се жица може оголити. За хоризонталан положај заваривања усвајају се максималне вредности јачине, за вертикалан средње и изнад главе минималне. Приближно се јачина струје може одредити помоћу израза:

$$\begin{aligned} I &= (20 \div 25) \cdot d && \text{за } d < 4 \text{ mm} \\ I &= (35 \div 50) \cdot d && \text{за } d = 4.0 \text{ и } 5.0 \text{ mm} \\ I &= (15 + 6 \cdot d) \cdot d && \text{за } d > 5 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.11)$$

где је: I – јачина струје у A ,

d – пречник електроде у mm .

Напон заваривања (радни напон) се може израчунати помоћу израза:

$$U = 20 + 0.04 \cdot I, \quad V \quad \text{или} \quad (4.12)$$

$$U = 12 + \frac{l \cdot d}{10} \cdot \frac{I}{A}, \quad V, \quad (4.13)$$

где је: I – јачина струје у A ,

$l = 3 \div 6$ – дужина лука у mm ($l \approx d$ – за рутилне и $l \approx d/2$ за базичне електроде),

I/A – густина струје у A/mm^2 ,

A – површина попречног пресека језгра електроде у mm^2 .

Константа топљења се израчунава према изразу:

$$D = m_d / I \cdot t, \quad g/A_{min} \quad (4.14)$$

m_d – део масе шави добијен топљењем електроде (језгро + облога) у g ,

I – средња препоручена јачина струје заваривања у A ,

t – време топљења у min .

Дужина лука мора бити константна како се не би угрозила његова стабилност као и заштита растопа. Да дужина лука не би расла при топљењу електроде заваривач мора да стално примиче электроду.

Брзина заваривања дефинише степен истопљености ивица односно при великој брзини заваривања добија се уска гусеница и недовољно стапање ивица основног материјала што даље узрокује добијање порозних шавова јер се метално купатило брзо хлади па растворени гасови остају заробљени унутра. Мала брзина заваривања доводи до прегревања материјала и преливање троске испред металног купатила сто може узроковати укључке троске у металу шави. Брзина заваривања се израчунава према изразу:

$$v_z = \frac{D \cdot I}{100 \cdot \rho \cdot A_n}, \quad \frac{m}{h} \quad (4.15)$$

где је: D – константа топљења у $g/A \cdot h$ ($D = 7 \div 12$ зависно од врсте електроде)

I – јачина струје заваривања у A ,

ρ – густина додатног материјала у g/cm^3 ,

A_n – површина попречног пресека завара у cm^2 .

Са друге стране постоји емпиријска веза између погонске енергије заваривања q_l и површине попречног пресека A_n :

$$q_l = 580 \cdot A_n \cdot \frac{J}{cm} \quad (4.16)$$

односно:

$$\frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta = 580 \cdot A_n \quad (4.17)$$

одакле се добија:

$$v_z = \frac{U \cdot I}{580 \cdot A_n} \cdot \eta, \quad \frac{cm}{s} \quad (4.18)$$

При вишеслојном заваривању потребно је одредити укупан број пролаза, полазећи од површине попречног пресека жлеба и пресека одговарајућих завара. Ако се узме у обзир и надвишење шава, потребан број пролаза за попуњавање жлеба (n) се може одредити помоћу израза:

$$n = \frac{A - A_1}{A_n} + 1, \quad (4.19)$$

где је: A – површина попречног пресека у mm^2 ,

$A_1 = (6 \div 8) \cdot d$ – површина пресека првог завара у mm^2 ,

$A_n = (8 \div 12) \cdot d$ – површина пресека осталих завара у mm^2 ,

d – пречник електроде (језгра) у mm .

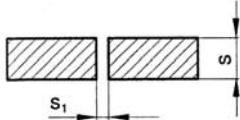
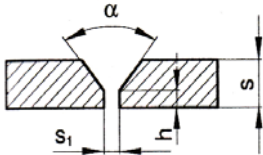
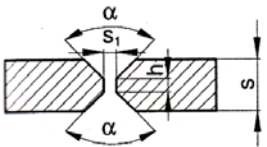
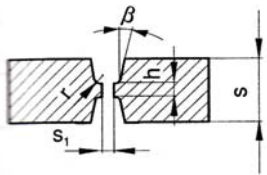
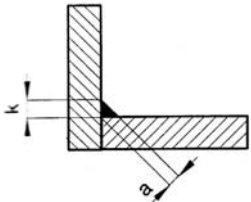
Основни енергетски параметри електролучног заваривања (U, I, v_z) су међусобно повезани преко **линијске енергија заваривања**:

$$q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta, \quad (4.20)$$

која мора бити константна дуж целог шава: q_l се још зове и **погонска енергија заваривања**, а η – **степен искоришћења** топлотне енергије.

Врста жлеба се бира из табеле 4.11 а може бити: I, V, X, U, 2U, угаони жлеб итд.

Табела 4.11 Основне врсте жлебова за РЕЛ заваривање

Врста жлеба	Димензије жлеба	Површина жлеба
<p>I – жлеб $s = 1-3 \text{ mm}$ – за једностран I - жлеб $s = 3-6 \text{ mm}$ – за двостран I - жлеб</p> 	$s_1 = (0.2) \text{ mm}$	$A = s \cdot s_1$
<p>V – жлеб $s = 3-20 \text{ mm}$</p> 	$\alpha = 60^\circ$ $s_1 = 0-4 \text{ mm}$ $h = 0-3 \text{ mm}$	$A = s \cdot s_1 + (s-h)^2 \cdot \text{tg } \alpha/2$
<p>X – жлеб $s = 12-40 \text{ mm}$</p> 	$\alpha = (50-70)^\circ$ $s_1 = 2-4 \text{ mm}$ $h = 0-3 \text{ mm}$	$A = s \cdot s_1 + 1/2 \cdot (s-h)^2 \cdot \text{tg } \alpha/2$
<p>2U – жлеб $s > 40 \text{ mm}$</p> 	$\beta = (5-10)^\circ$ $s_1 = 0-3 \text{ mm}$ $h = 0-3 \text{ mm}$ $r = 5 \text{ mm}$	$A = s \cdot s_1 + 2r \cdot (s-2r-h)^2 + \pi r^2 + (s-2r-h)^2 \cdot \text{tg } \beta$
<p>Угаони шав</p> 		$A = k^2 / a = a^2$

5. ПРИМЕНА И ПРИМЕРИ ЗАВАРЕНИХ КОНСТРУКЦИЈА

Као што је већ речено у савременој индустријској производњи заварене конструкције заузимају веома важно место. У складу с тим и развој нових материјала и технологија иде у смеру оптимизације конструкционих и технолошких решења у погледу побољшања особина машина, уређаја, конструкција, уз смањење њихове тежине, цене, повећања квалитета, продуктивности и продужења радног века.

Данас постоји широк асортиман конструкционих материјала који се могу употребити за израду различитих врста конструкција и делова машина. Будући да се у овом раду детаљније обрађују челици повишене јачине са посебним освртом на класу S690QL, треба поновити њихове главне предности односно повишену јачину и напон течења, издужење, жилавост уз задржавање истих својстава и на сниженим температурама, и веома повољан однос тежине и цене. Заваривање ових челика је олакшано у односу на челике који су по јачини у истој класи (нпр. побољшани челици).

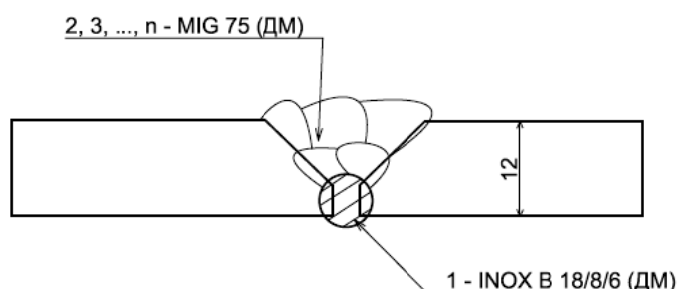
Свака заварена конструкција се састоји из великог броја спојева како сучеоних тако и угаоних. Иако на угаоне спојеве отпада и до 80% свих спојева, сучеони заварени спојеви су подједнако важни као угаони.

5.1 Врсте заварених спојева

5.1.1 Сучеони спојеви

Сучеони спој приказан на слици 5.1 урађен је технологијом заваривања која подразумева полагање коренског завара од мекше легуре тј. мање тврдоће и наношења завара испуне од легуре веће јачине. То омогућава да спој има потребну јачину а истовремено и повећану жилавост, како на собним тако и на сниженим температурама. Међуслојни слој има улогу да неутралише деформације и да „покупи“ заостале напоне у споју.

За међуслојну электроду узета је легура **INOX B 18/8/6¹** састава: 19% Cr, 9% Ni, 7% Mn и C < 0.12%. Њена јачина је 590 ÷ 690 MPa док је напон течења 350 MPa. Завари испуне се наносе електродом **MIG 75** чији је напон течења 690 MPa. Детаљан хемијски састав ових електрода дат је у табели 5.1.



Слика 5.1 Сучеони спој

¹ Комерцијална ознака произвођача – Железарне Јесенице, Словенија.

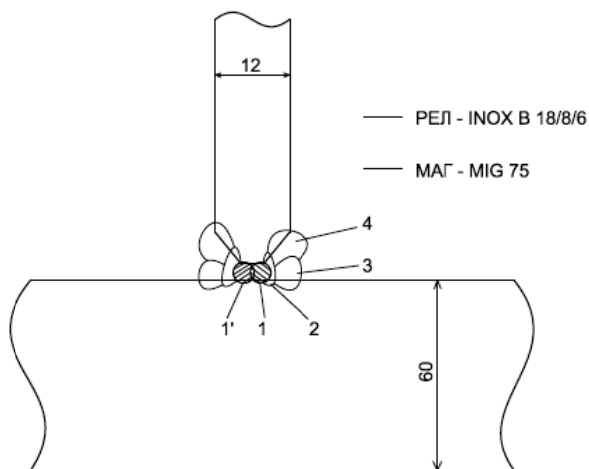
Табела 5.1 Хемијски састав електрода

Тип жице	Хемијски састав, %						Механичке особине чистог метала шави			
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	R_m, MPa	$R_{p0.2}, MPa$	$A_5, \%$	KV, J
INOX B 18/8/6	0.12	0.8	7	19	9	-	590-690	> 350	> 40	> 80 (+ 20°C)
MIG 75	0.6	0.6	1.7	0.2 5	1.5	0.5	770-940	> 690	> 17	> 47 (- 40°C)
INOX B 18/8/6	Примењује се као међуслојна за nanoшење коренских завара у циљу смањивања нивоа заосталих напона и повећања пластичности и жилавости завареног споја.									
MIG 75	За заваривање ситнозрних челика повишене јачине са напоном течења до 690 MPa.									

Треба истаћи и то да се коренски завар полаже РЕЛ заваривањем а завари испуне МАГ технологијом због веће продуктивности МАГ-а у односу на РЕЛ.

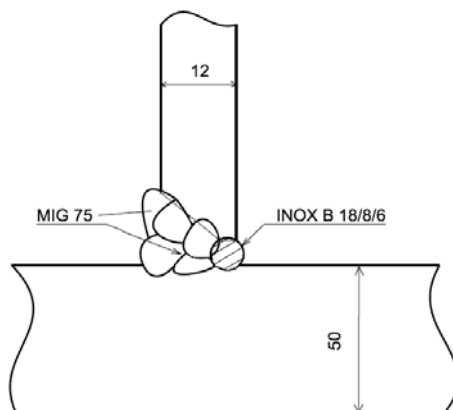
5.1.2 Угаони спојеви

Технологија заваривања угаоних спојева је идентична као код сучеоних с тим што се код угаоних спојева заварују делови различитих дебљина (нпр 12 за 50 mm, 12 за 60 mm, и тсл). Спој на слици 5.2 представља угаони спој са К – жлебом.



Слика 5.2 Угаони спој – К жлеб

У случајевима када се овакав спој не може извести због неприступачности, тада се заваривање изводи у 1/2 V – жлебу (сл. 5.3) (нпр. заваривање већег броја ребара на малој удаљености у циљу повећавања крутости конструкције).

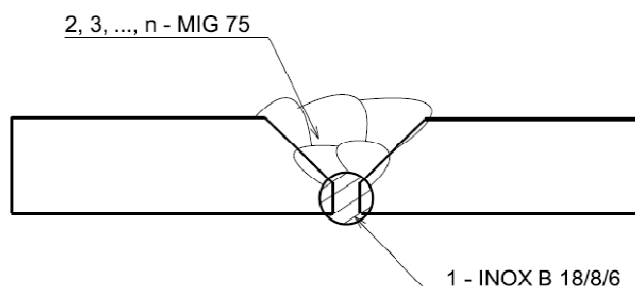


Слика 5.3 Угаони спој – 1/2 V жлеб

Технологија заваривања оваквог споја је иста као заваривање сучеоних спојева – коренски завар се изводи РЕЛ-ом, електродом **INOX B 18/8/6**, а остали (покривни) МАГ-ом, електродном жицом **MIG 75**.

5.2 Параметри заваривања

5.2.1 Сучеони спојеви



Слика 5.4 Сучеони спој

ТЕРМИЧКА ОБРАДА:

Предгревање: $T_p = 150 \div 200^\circ\text{C}$ (нижа за 12 mm, виша за 50 mm);

Међуслојна температура: $T_{\text{interpass}} = 200 \div 225^\circ\text{C}$ (мах.);

Отпуштање: $T_{\text{отр}} = 150 \div 200^\circ\text{C}$ (нижа за 12 mm, виша за 50 mm);

Време прогревања: 2 - 5 min/mm дебљине зида (споро загревање и хлађење);

Спојеве после заваривања и загревања прекрити изолационим материјалом у циљу споријег хлађења.

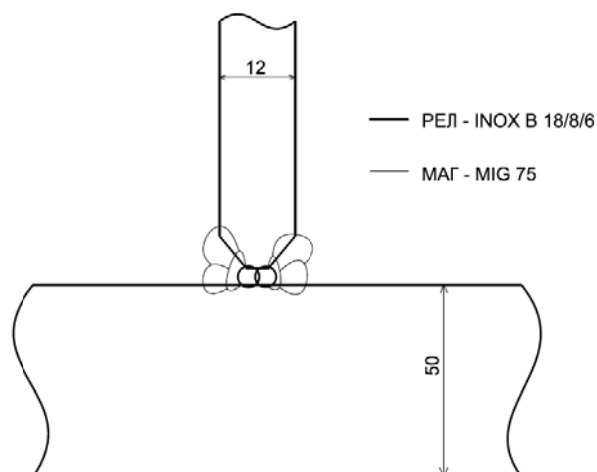
КОРЕНСКИ ПРОЛАЗИ – РЕЛ ЗАВАРИВАЊЕ:

Додатни материјал	INOX B 18/8/6 ; пречник електроде $\varnothing 3.25 \text{ mm}$
Струја заваривања, I_{z1}	$\approx 120 \text{ A}$
Радни напон, U_1	$\approx 24.5 \text{ V}$
Брзина заваривања, v_{z1}	$\approx 0.2 \text{ cm/s}$
Погонска енергија, q_{11}	$\approx 12000 \text{ J/cm}$
Дубина уваривања, δ_1	1.7 mm (min)

ОСТАЛИ ПРОЛАЗИ – МАГ ЗАВАРИВАЊЕ:

Додатни материјал	MIG 75 ; пречник жице $\varnothing 1.2 \text{ mm}$
Струја заваривања, $I_{z2, 3, 4, \dots}$	$\approx 240 \div 250 \text{ A}$
Радни напон, $U_{2, 3, 4, \dots}$	$\approx 25 \text{ V}$
Брзина заваривања, $v_{z2, 3, 4, \dots}$	$\approx 0.35 \text{ cm/s}$
Погонска енергија, $q_{12, 3, 4, \dots}$	$\approx 15000 \text{ J/cm}$
Дубина уваривања, $\delta_{2, 3, 4, \dots}$	$\approx 2 \text{ mm}$
Заштитни гас	82% Ar + 18% CO ₂

5.2.2 Угаони спојеви



Слика 5.5 Угаони спој – V жлеб

ТЕРМИЧКА ОБРАДА:

- Предгревање: $T_p = 150 \div 200^\circ\text{C}$ (нижа за 12 mm, виша за 50 mm);
- Међуслојна температура (Interpass): $T_{\text{interpass}} = 200 \div 225^\circ\text{C}$ (max.);
- Електрични грејни елементи, спроводити контролу температуре
- Време прогревања: 2 - 5 min/mm дебљине зида (споро загревање и хлађење);

ЗАВАРИВАЊЕ:

- Коренски завар – РЕЛ - базична електрода **INOX B 18/8/6**
- Остали пролази – МАГ - електродна жица **MIG 75**
- Заштитни гас: 82% Ar + 18% CO₂

ПРОЦЕСНИ ПАРАМЕТРИ РЕЛ-а:

- Погонска енергија $q_l \approx 12 \text{ kJ/cm}$
- Дубина уваривања $\delta = 1.7 \text{ mm}$
- Пречник електроде $\varnothing 3.25 \text{ mm}$
- Струја заваривања $I_z = 120 \text{ A}$
- Радни напон $U = 24.5 \text{ V}$
- Брзина заваривања $v_z = 0.2 \text{ cm/s}$

ПРОЦЕСНИ ПАРАМЕТРИ МАГ-а:

- Погонска енергија $q_l \approx 15 \text{ kJ/cm}$
- Дубина уваривања $\delta = 2 \text{ mm}$
- Пречник електродне жице $\varnothing 1.2 \text{ mm}$
- Струја заваривања $I_z = 240\text{-}250 \text{ A}$
- Радни напон $U = 25 \text{ V}$
- Брзина заваривања $v_z = 0.35 \text{ cm/s}$

5.3 Примери заварених спојева

Као што је већ спомеуто заварени спој може бити изведен као угаони или као сучеони зависно од конструкције делова али као главни циљ поставља се тежња да метал шава, ЗУТ-а и основни материјал буду приближних особина како механичких тако и хемијских. Одабраном комбинацијом додатних материјала и усвојеним параметрима заваривања изведено је више проба на карактеристичним угаоним и сучеоним спојевима. На тим узорцима су извршена макрографска и микрографска испитивања. Најпре је изведено мерење најважнијих геометријских величина (дубина уваривања, дебљина шава, надвишење и тсл.), а затим су измерене тврдоће појединих зона споја и прочитана микроструктура тих зона. На наредним сликама биће приказани неки од припремљених узорака.

ПРИМЕР 1: Угаони спој - дебљине предмета 8 и 12 mm



Први пролаз, легура **INOX B 18/8/6** препознатљива по светлијој боји од осталих слојева (аустенитна микроструктура).

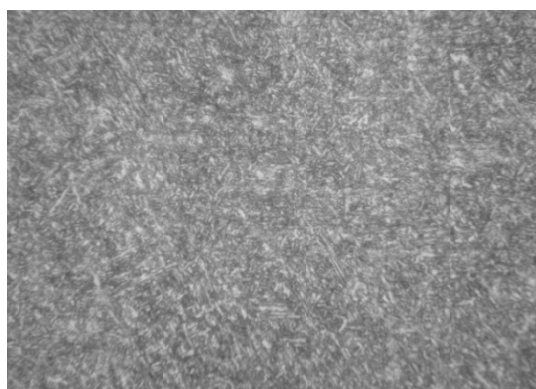
Слика 5.6 Макроскопски изглед угаоног споја

Микроструктура:

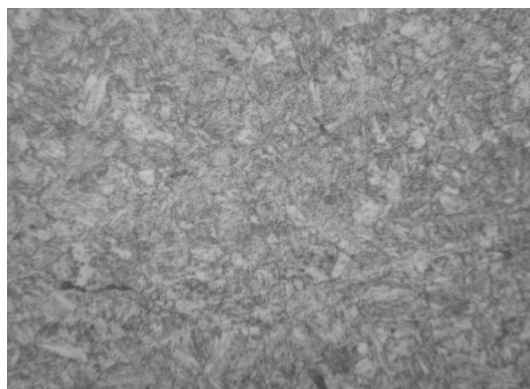
Основни материјал (ОМ): међуфазна структура побољшања – сорбит, тврдоће 255 HV

ЗУТ: међуфазна структура побољшања, тврдоће 283 – 299 HV

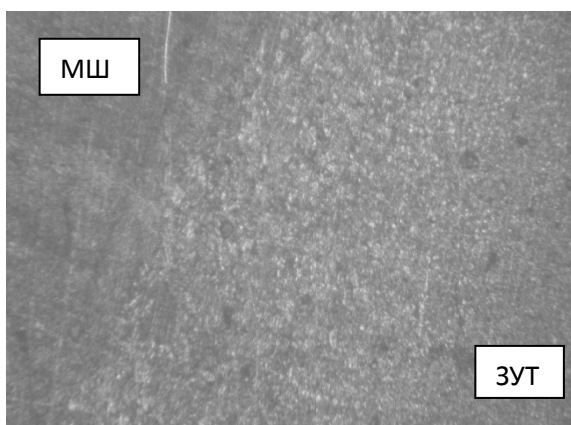
Метал шава (МШ): Отпуштени мартензит, тврдоће 368 HV; Корен споја – 229 HV



МШ



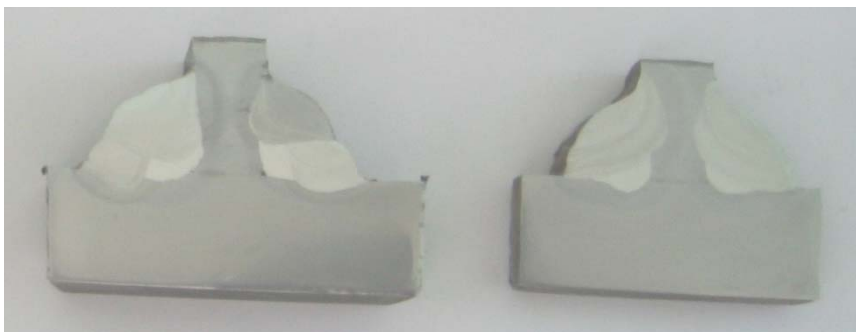
ОМ



МШ + ЗУТ

Слика 5.7 Микроструктуре појединих зона завареног споја – пример 2 (800x)

ПРИМЕР 2: Угаони спој - дебљине предмета 8 и 12 mm



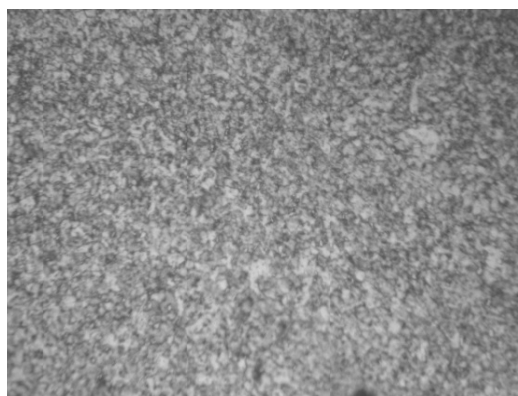
Слика 5.8 Макроскопски снимак угаоних спојева

Микроструктура:

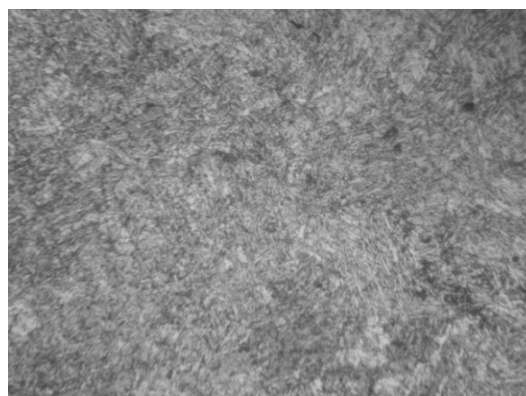
Основни материјал: међуфазна структура побољшања – сорбит, тврдоће 313 HV

ЗУТ: међуфазна структура побољшања, тврдоће 239 – 321 HV

Метал шава: Отпуштени мартензит, тврдоће 378 – 389 HV; Корен споја – 283 – 297 HV



ОМ



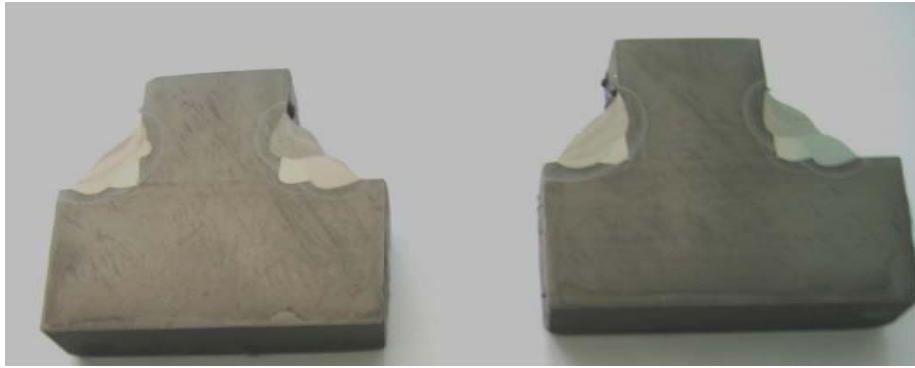
ЗУТ



МШ

Слика 5.9 Микроструктуре појединих зона завареног споја – пример 2 (800x)

ПРИМЕР 3: Угаони спој - дебљине предмета 25 mm



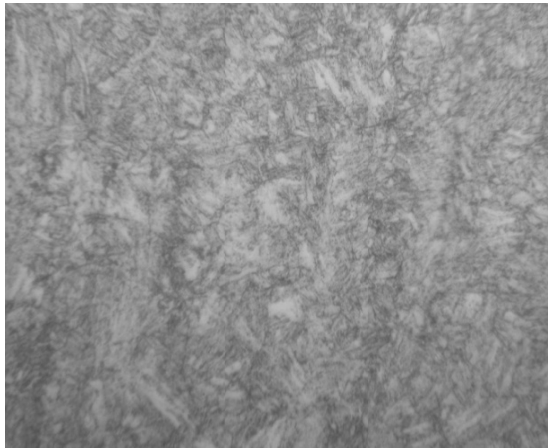
Слика 5.10 Макроскопски снимак угаоних спојева

Микроструктура:

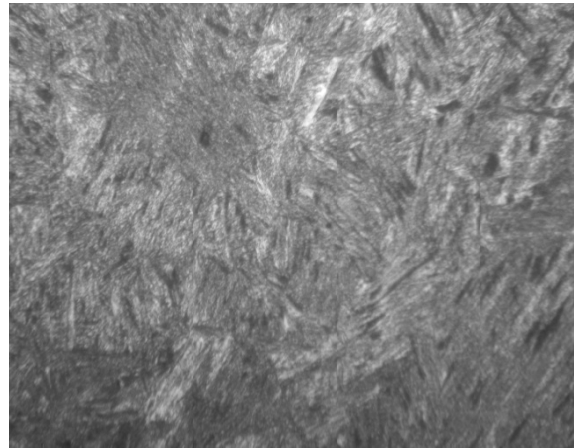
Основни материјал: међуфазна структура побољшања – сорбит, тврдоће 321 HV

ЗУТ: међуфазна структура побољшања, тврдоће 378 HV

Метал шав: Отпуштени мартензит, тврдоће 313 – 339 HV; Корен споја – 290 – 297 HV



ОМ



ЗУТ



МШ

Слика 5.11 Микроструктуре појединих зона завареног споја – пример 3 (800x)

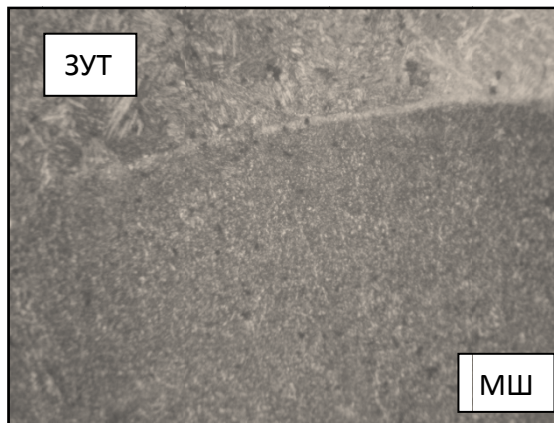
ПРИМЕР 4: Угаони и ивични спојеви различите дебљине



Слика 5.12 Макроскопски снимак угаоно заварених спојева



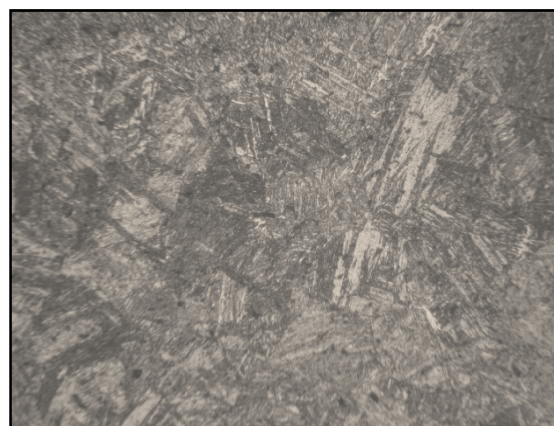
ОМ



ЗУТ + МШ



МШ



ЗУТ

Слика 5.11 Микроструктуре појединих зона завареног споја – пример 4 (200x)

Микроструктура:

Основни материјал: међуфазна структура побољшања, тврдоће 276 – 321 HV

ЗУТ: међуфазна структура побољшања, тврдоће 276 – 290 HV

Метал шава: Отпуштени мартензит, тврдоће 339 – 426 HV; Корен споја – 290 – 297 HV

Микроструктура метала шава коренских пролаза оцењена је као аустенитна, тврдоће око 224 – 245 HV.

Анализом скоро свих металографских избрусака, остварених напред прописаном технологијом, режимима заваривања и комбинацијом додатних материјала, установљен је готово исти тип микроструктуре, а измерене су и приближно исте вредности појединих зона споја. Дакле, може се рећи да вредности измерених тврдоћа и очитане микроструктуре појединих зона споја углавном задовољавају захтеве стандарда и одговарајућих интерних техничких прописа и упутстава.

6. МЕТОДИ КОНТРОЛЕ

6.1 Врсте грешака у завареним спојевима

При изради заварених конструкција, у завареним спојевима се појављују мање или веће грешке, па је задатак контроле да утврди облик, распоред, врсту и величину грешке и то како она утиче на сигурност конструкције. С обзиром на то постоје следећи квалитети заварених спојева:

1. Класа В – висок ниво квалитета,
2. Класа С – средњи ниво квалитета и
3. Класа D – низак ниво квалитета.

Класа В се односи на најодговорније спојеве и конструкције које су изложене цикличним динамичким оптерећењима или високим притисцима а чији би лом могао да угрози људске животе или да изазове велике материјалне губитке. У конструкције ове врсте спадају: парни котлови, друмски и железнички мостови, бродови, дизалице, шасије аутомобила и камиона и др.

Класа С се односи на статички оптерећене конструкције као и за остале конструкције чија хаварија не угрожава људске животе нити изазива веће материјалне губитке. У ову групу спадају: постоља машина алатки, цевоводи, носеће конструкције котлова итд.

Класа D обухвата мање значајне заварене конструкције типа малих резервоара и цевовода без притиска, металне ограде и тсл.

Такође, контрола која се мора спровести може се поделити на:

- претходну,
- текућу и
- завршну контролу.














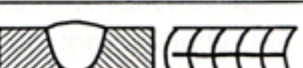
Претходна контрола има за циљ да провери својства основног и додатног материјала, припрему за заваривање, исправност опреме за заваривање и мерних инструмената, избор режима заваривања, као и квалификацију заваривача.

Текућа (процесна) контрола утврђује да ли се одржавају предвиђена технологија и режими заваривања, исправност опреме и инструмената као и мере заштите на раду.

Завршна контрола обухвата димензиону контролу и спољни изглед шава, контролу унутрашњих грешака и структуре као и контролу механичких својстава (тврдоћа, жилавост, јачина на кидање).

Будући да су споменуте могуће грешке у завареном споју, у табели 6.1 дат је њихов преглед.

Табела 6.1 Преглед могућих грешака у завареном споју

Тип грешке	Схема и приказ	Тип грешке	Схема и приказ
Лоптасти мехури		Подужне пррлине	
Подужни мехури		Попречне пррлине	
Ланчasti мехури		Зракасте пррлине	
Троска		Прокапљине	
Тракаста троска		Неравно лице	
Метални укључци		Заједи	
Налепљивање		Непровар	

6.2 Врсте контроле

Генерално, контролна испитивања заварених спојева се изводе методама контроле са разарањем и без разарања.

6.2.1 Испитивања са разарањем

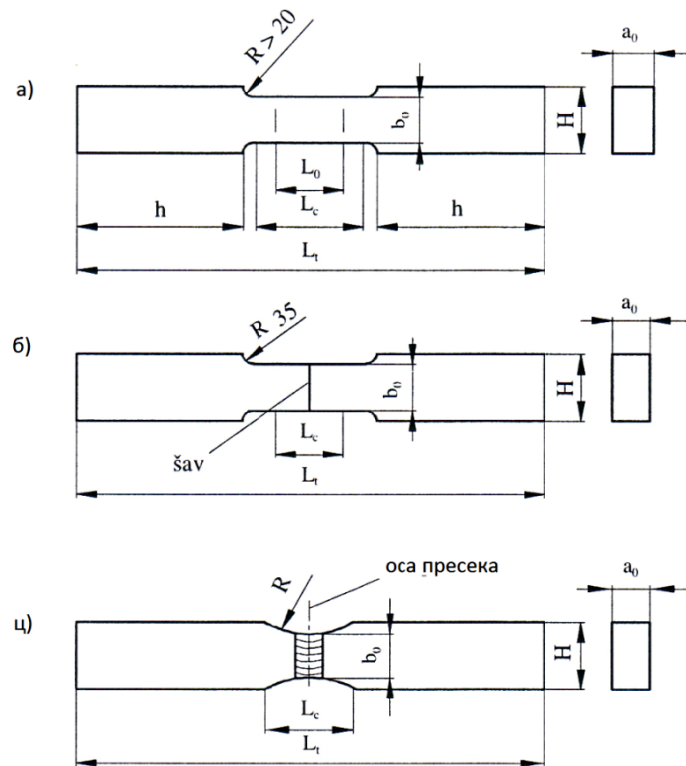
Контрола са разарањем се изводи на узорцима који се исецају из појединих делова завареног споја или на споју у целини. Узорци се припремају за механичка и мателографска испитивања. Од механичких проба најчешће се примењују испитивање затезањем, савијањем и испитивање ударне жилавости, а од мателографских макроскопско и микроскопско испитивање.

6.2.1.1 Испитивање затезањем

Овим испитивањем се одређује отпорност завареног споја на дејство спољашњих затезућих сила. Испитивањем затезањем одређујемо јачину на кидање (R_m , МПа), издужење (A_5 , A_{11} , %) и сужење (Z , %). Пробе се изводе у циљу одређивања ових параметара како основног материјала тако и самог завара (сл. 6.1). Мерна дужина незавареног узорка треба да буде $L_0 = 5 \cdot d_0$, где је $d_0 = 11.3 \cdot \sqrt{A}$. остале димензије узорка, у mm, су дате у табели 6.2.

Табела 6.2 Димензије узорка

a_0	b_0	H	W	L_0	L_c	L_t
15	30	40	70	120	135	305



Слика 6.1 Испитивање затезањем: а) основног материјала, б), ц) завареног споја

Циљ испитивања затезањем је да се одреде следеће карактеристике основног материјала:

- **Затезна чврстоћа (јачина):**

$$R_m = F_m/A_0, \text{ MPa} \quad (6.1)$$

- **Релативно процентуално издужење**

$$A_5 = \Delta L/L_0 \cdot 100, \text{ \%} \quad (6.2)$$

- **Техничка граница течења (конвенционални напон течења):**

$$R_p = F_p/A_0 \text{ или } (R_{p0.2} = F_{0.2}/A_0), \text{ MPa} \quad (6.3)$$

где је: F_m – максимална сила, N ,

A_0 – површина почетног попречног пресека узорка, mm^2 ,

ΔL – издужење прекинуте пробе, mm ,

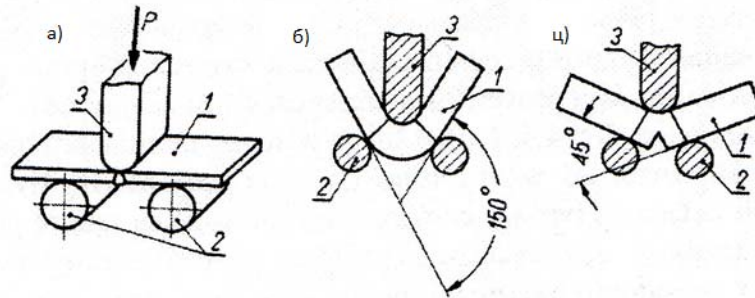
F_p ($F_{0.2}$) – сила на граници течења, N ,

L_0 – почетна дужина пробе, mm .

Такође, разликују се испитивања на епруветама са паралелним боковима (сл. 6.1 а) и б) и удубљеним боковима ц)).

6.2.1.2 Испитивање савијањем

Резултати добијени савијањем служе да се одреди пластичност споја. Заварени узорци се после одговарајуће примене подвргавају дејству силе савијања (сл. 6.2). Ако се за време пробе постигне најмања тражена вредност угла савијања, без појаве прслина, сматра се да је резултат испитивања позитиван (сл. 6.2б). Ако се у току испитивања уоче мале прслине у шаву резултат је негативан под условом да је угао савијања мањи од траженог (сл.6.2ц).

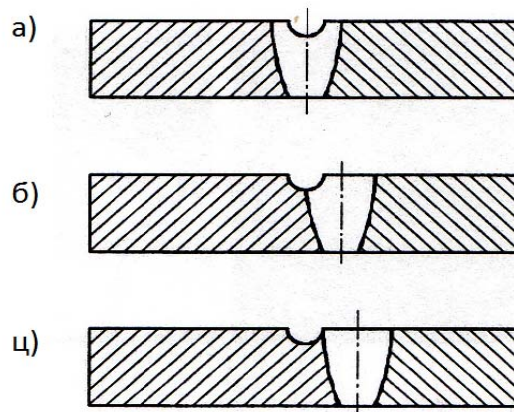


Слика 6.2 Испитивање савијањем: 1 – заварени узорак, 2 – ослони ваљци, 3 - притискивач

Испитивање савијањем има за циљ да се одреди деформациона способност шава и зоне утицаја топлоте. Изводи се према стандардизованим условима и то две пробе, једна са лицем шаву у зони затезања, а друга са кореном шаву у зони затезања. Испитују се непрекидним савијањем брзином од око 2 mm/s , све до појаве прслине веће од 2 mm . Мера пластичности је угао савијања при појави прслине.

6.2.1.3 Испитивање ударне жилавости

Циљ овог испитивања је да се одреди отпорност материјала на дејство ударних динамичких сила. Испитивање се изводи на Шарпијевом клатну на коме се рачунају расположиви рад A_1 и неутрошени рад A_2 и затим се речуна утрошени рад A_0 као разлика претходна два. Утрошени рад за лом епрувете представља мерило жилавости и исказује се у J . Испитују се сучеони спојеви дебљине преко дебљине преко 10 mm , при чему се одређује се жилавост метала шаву, зоне стапања и зоне утицаја топлоте (сл. 6.3 а, б, ц).

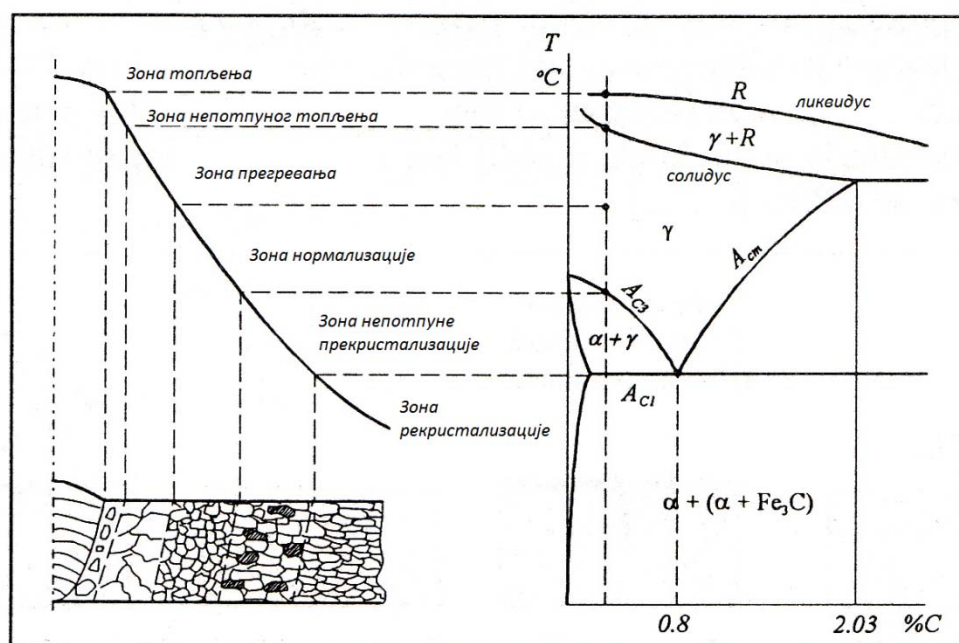


Слика 6.3 Испитивање ударне жилавости

6.2.1.4 Металографска испитивања

Металографска испитивања се састоје из анализирања микроструктуре завареног споја, зоне утицаја топлоте и основног материјала. У зависности од тога колико пута се увећава снимак узорка разликујемо *макроскопска* и *микроскопска* металографска испитивања.

Макроскопска испитивања се изводе голим оком или при увећању до 30 пута малог узорка исеченог из завареног споја. Притом се контролишу шав, ЗУТ и основни материјал. Површине се брусе и полирају а после и нагризају специјалним хемијским средством што омогућава да се уоче метал шав, ЗУТ и основни материјал. На основу ових испитивања утврђују се линија стапања, регуларност ЗУТ-а, недовољно или превелико уваривање, порозност, укључци троске, хладни спојеви и др. Утврђују се и структура шав, ЗУТ-а и основног материјала (сл. 6.4), ширина ЗУТ-а као и микроструктура свих зона.



Слика 6.4 Структурне промене при заваривању нискоугљеничног челика

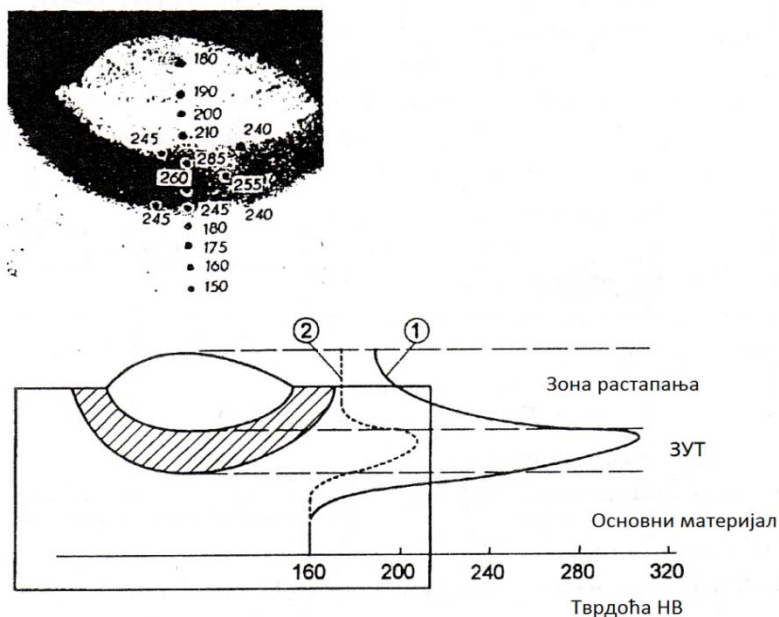
Микроскопска испитивања се заснивају на анализирању припремљених узорка са увећањем од 200 ÷ 500 пута (па и више). Изводе се на металографским микроскопима. Посматра се: средиште шав, зона стапања, зона непотпуног топљења, зона прегревања, нормализације рекристализације, као и непромењен основни материјал.

6.2.1.5 Расподела тврдоће у завареном споју

Из дефинције идеалне заварљивости произлази да сви делови завареног споја (шав, ЗУТ и основни материјал) треба да буду једнаких механичких, физичких и хемијских особина. У најважније механичке особине убрајају се: затезна чврстоћа, тврдоћа и жилавост. Јачина шав у ЗУТ-у се мења од слоја до слоја, зависно од термичког циклуса којима су они били подвргнути. С обзиром на захтевану равномерност, обично се тражи да највећа тврдоћа у ЗУТ-у буде највише за 20 до 30% већа од тврдоће основног материјала. У противном примењује се предгревање или жарење после заваривања. Главни разлог због којег се тврдоћа ограничава јесте да се спрече хладне или водоничне прслине. Зато се за челике са $CE > 0.40\%$ мора смањити

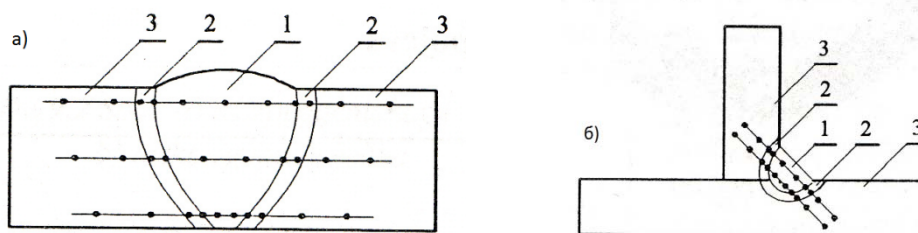
брзина хлађења и снизити садржај водоника у металу шава. Брзина хлађења се смањује предгревањем делова, повећањем погонске енергије (уноса топлоте) и повећањем пречника електроде док се садржај водоника смањује сушењем електрода, чишћењем страница завариваних делова од рђе, боје, масти и сл. Када се водоник нађе у шаву и зона стапања презасити њиме долази до његове дифузије у хладније делове који се заварују. Водоник прелази у ЗУТ, али не излази из те зоне. У току даљег хлађења водоник дифундује до места дисконтинуитета, јер је гранична растворљивост водоника на 100 g метала шава око 1 cm^3 , при собној температури. На прекидним местима – гасним мехуровима, слојевима међузрна, итд. атомни водоник прелази у молекуларни што је праћено екстремно високим локалним притисцима. Истовременим деловањем ових и термичких напона а евентуално и структурних, може се надмашити јачина материјала и доћи до појаве прелина што је честа појава код кртих структурних трансформација чија је тврдоћа већа од 350 HV.

Узорци или пробе се припремају за испитивање тако што се најпре поравнају лице и корен шава са основним материјалом, а затим се брусе. Изводи се и нагризање да би се јасније уочиле границе шава и ЗУТ-а у циљу мерења тврдоће у свим зонама споја. Као критеријум за оцену тврдоће и кртости споја узима се највећа измерена тврдоћа испод зава (сл. 6.5).



Слика 6.5 Тврдоћа навара: 1) без предгревања, 2) са предгревањем ($T_p = 200^\circ\text{C}$)

Будући да тврдоћа измерена на једном месту не може да буде у потпуности меродавна, мерења се изводе на више места обележених на слици 6.6. На сучеоним спојевима дебљине веће од 15 mm тврдоћа се мери у три нивоа: у близини лица, у средини и у близини корена шава. За спојеве дебљине 5 ÷ 15 mm мерење се изводи у два нивоа и за лимове тање од 5 mm тврдоћа се мери само по средњој линији.



Слика 6.6 Мерење тврдоће: а) сучеони спој дедљи од 15 мм, б) угаони шав “Т” споја

Сматра се да је заварени спој добар и поуздан уколико тврдоћа у ЗУТ-у не надмаши 350 HV.

6.2.2 Испитивања без разарања

У испитивања без разарања заварених спојева спадају: *визуелна контрола*, *пробе непропустљивости* (херметичности), *радиографске пробе* (рендгенским x и γ -зрацима), *магнетна* и *ултразвучна* испитивања.

6.2.2.1 Визуелна контрола

Иако је шав лепог изгледа не мора да значи да нема грешака па се с обзиром на то контрола без разарања започиње очним прегледом готовог споја. Контролишу се димензије шав, површинске грешке шав, провар по дебљини једнострано завареног споја итд.

6.2.2.2 Пробе херметичности (капиларна дефектоскопија)

Пробе херметичности имају за циљ да одреде пропустљивост шав а изводе се помоћу нафте, креде, пенетраната, воденог притиска или компримованог ваздуха.

Проба непропустљивости помоћу **нафте** изводи се тако што се на корен шав нанесе слој креде а лице шав се накваси нафтом. Пролазак нафте кроз шав се манифестује затамњењем креде на корену. Проба траје најмање 1 h а за прецизна испитивања и до 8 h.

Проба херметичности помоћу **пенетраната или капиларне дефектоскопије**, тј. обојене течности за откривање грешака, обавља се после пажљивог чишћења испитиване површине. Пенетрант је у ствари течност црвене боје мале вискозности или течности са додатком флуоресцентних материја. Откривају се грешке које излазе на површину као нпр. поре, прслине, нехерметичност и др. Испитивана површина се накваси пенетрантом и на местима прслина се појављују изразито црвени зарези чија ширина указује на дубину прслине. Ово је најстарији начин контроле заварених спојева.



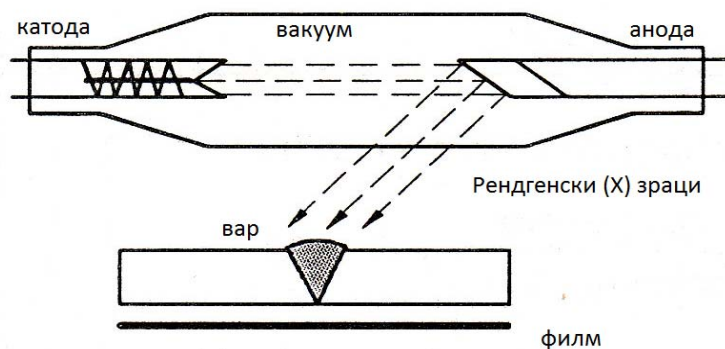
Слика 6.7 Схема капиларне дефектоскопије

Проба херметичности помоћу **воденог притиска** се састоје из пуњења посуде водом и посматрања са спољашње стране. Цурење или влажење указују на лош заварени спој.

6.2.2.3 Радиографска испитивања

За откривање унутрашњих грешака у завареном споју највише се примењују рендгенски зраци (*Röntgen - X-зраци, 1895. год.*) и γ -зраци. Контрола се заснива на особини јонизујућег зрачења да пролази кроз материјале који су непропустљиви за обичну и видљиву светлост.

Рендгенски (X) зраци (вештачки) стварају се у вакуумској цеви која садржи аноду и катоду напонске разлике $100 \div 400 \text{ kV}$ (сл. 6.8). Катода загрејана мрежицом емитује електроне који услед напонске разлике ударају у аноду (волфрамски диск у бакарном блоку) и своју кинетичку енергију претварају у топлоту и X-зраке. Места грешки у завару нпр. непровар, мехурови, поре, неметални укључци и тсл, лакше пропуштају X-зраке и фотографска плоча (филм) са друге стране постаје више осветљена. После развијања плоче добија се радиограм (снимак) на коме се могу уочити грешке на основу тамнијих и светлијих места.



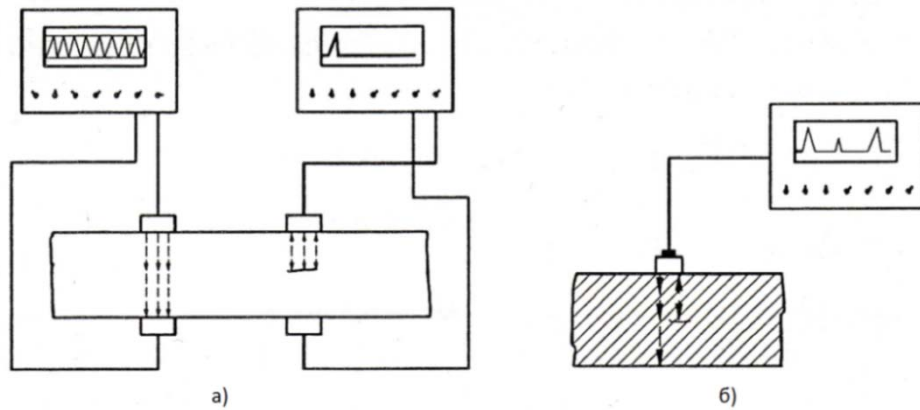
Слика 6.8 Схема испитивања X-зрацима

Поред испитивања X-зрацима постоји и испитивање γ -зрацима (природни) помоћу специјалних радиоактивних изотопа кобалта, цезијума, талијума или иридијума.

6.2.2.4 Ултразвучна испитивања

Ултразвучно испитивање се изводи помоћу ултразвучних таласа високе фреквенције ($0.5 \div 6$ милиона осцилација (импулса) у секунди, *MHz*). Ултразвучни таласи се простиру кроз метал, а одбијају се кад наиђу на грешку (слично као што се звучни таласи у чујном домену одбијају од препреке (ехо)).

Ултразвучне осцилације се стварају помоћу пиезоелектричног ефекта, и специјалним сондама преносе на претходно уљем премазану површину испитиваног споја. Постоје две методе ове контроле: пригушење (сл. 6.9а) и ехо-метод (сл. 6.9б). Код методе пригушења, давач и пријемник таласа се постављају са супротних страна узорка. На местима дефекта сигнал незнатно слаби (пригушује се), а од веће сигнал се одбија.



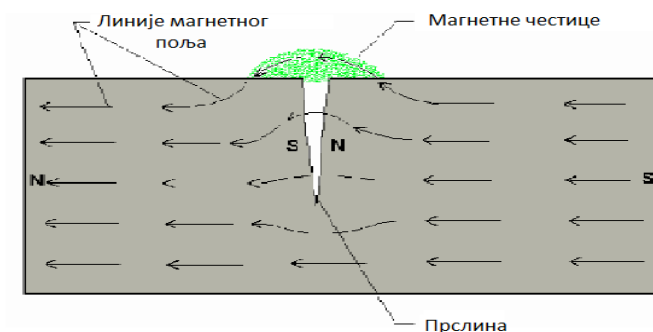
Слика 6.9 Ултразвучна контрола: а) метод пригушења, б) ехо-метод

Предност ехо-метода је што је потребна само једна сонда која је истовремено и давач и пријемник. На "здравим" местима, ултразвучни талас се одбија од граничне површине узорка и враћа се у сонду. Растојање између улазног и излазног сигнала на екрану сразмерно је дебљини узорка. Уколико талас наиђе на неку грешку онда се део таласа раније одбија, појављујући се као сигнал дефекта између улазног и излазног сигнала.

Методама ултразвучне контроле могу се открити све унутрашње грешке у завареним спојевима као и разлиставање (ламеларно цепање) дебелих лимова. Овако се откривају дефекти мањих димензија него другим методама али је потребан висок ниво специјализације радника за правилно читање слике на екрану.

6.2.2.5 Магнетна испитивања

Ово испитивање се изводи помоћу мешавине гвозденог праха и машинског уља којим се посипају претходно очишћене површине испитиваних делова. Затим се специјалним електромагнетним уређајем образује магнетно поље на испитиваном исечку завареног споја. Ако спој садржи дисконтинуитете односно површинске грешке или грешке на дубини до 6 mm, онда ће линије магнетног поља мењати свој правац због прекида метала а гвоздени прах ће се локално скупљати око грешке и тако открити њено место (сл. 6.10).



Слика 6.10 Магнетна дефектоскопија

Такође, треба поменути и хладне (водоничне) прслине које најчешће настају у периоду од 48 сати после заваривања а које представљају један од највећих проблема у заваривању. После истека овог времена садржај водоника се толико смањи да опасност од њиховог настајања више не постоји. Прекидне прслине које излазе на површину се

могу уочити и голим оком ако су довољно велике али је ипак много боље испитивања базирати на испитивања без разарања: пенетранте, магнетни флуks, ултразвук и радиографију.

Уколико до појаве водоничних прелина ипак дође, препорука је да се завар пребруси и изглеби до краја и репарира шав. Код динамички оптерећених конструкција прелине се могу ширити и на крају довести до разарања конструкције. Будући да су челици класе WELDOX веома дуктилни заморни лом неће настати код тањих плоча. Такође, утицај прелина на отпорност конструкције може се проценити применом *механике лома*. С обзиром на то да су та сазнања теоријске природе, закључујемо да је репаратурно заваривање најбоља и најсигурнија мера коју треба предузети. Мале прелине у некритичним зонама конструкције, чији лом неће изазвати озбиљне последице, се могу прихватити.

6.3 Примери контроле заварених узорака

Контрола заварених спојева извршена је од стране акредитоване фирме. Вршена су механичка испитивања и испитивања без разарања, пре свих ултразвучном методом и методом пенетрантним течностима. Резултати испитивања ће помоћу дијаграма и слика бити приказани у даљем тексту рада.

6.3.1 Испитивање затезањем

Припремљене епрувете из основног материјала и завареног споја (сл. 6.11) су затезане на кидалици ZWICK/ROELL Z 100 мерног опсега $1 \div 100 \text{ kN}$ (сл. 6.12). Брзина деформисања износила је 10 mm/min .



Епрувета за испитивање – ОМ



Епрувета после испитивања - ОМ



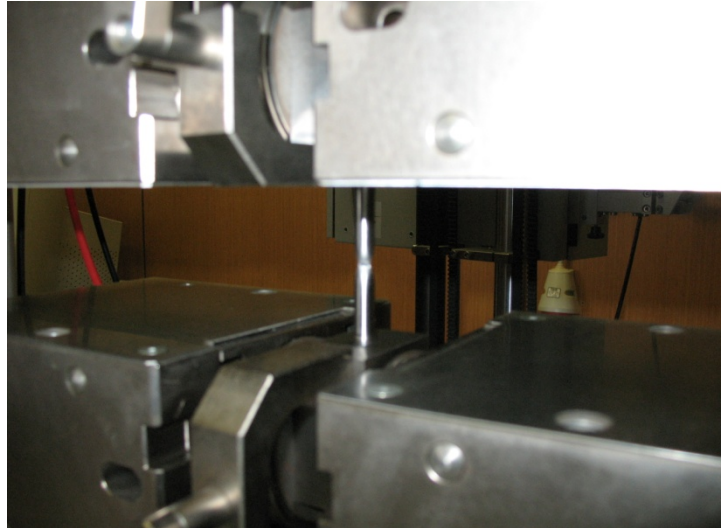
Епрувета за испитивање – заварени спој



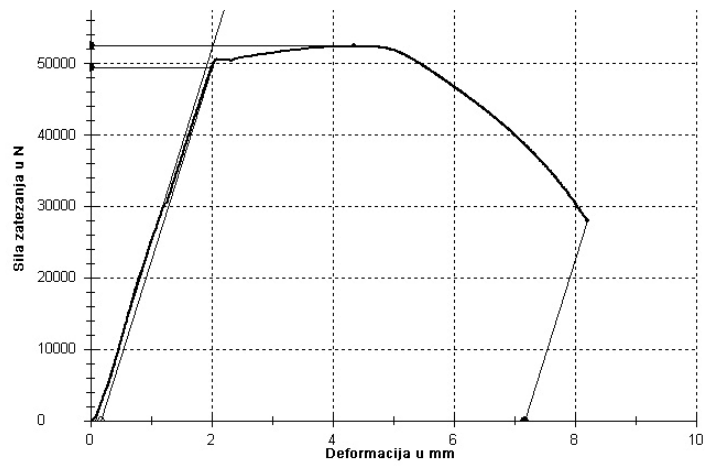
Епрувета после испитивања – заварени спој

Слика 6.11 Изглед епрувета за одређивање најважнијих механичких својстава (ОМ и заварени спој)

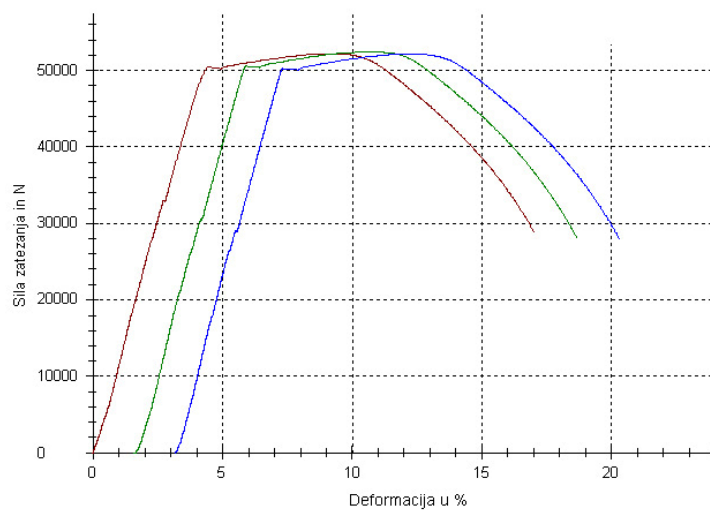
На сликама 6.13 и 6.14 су дати дијаграми затезања припремљених епрувета, док су у табели 6.2 дати резултати испитивања ($R_{p0,2}$, R_m , A_5 , S_0 и L_0).



Слика 6.12 Испитивање затезањем на кидалици ZWICK/ROELL Z 100



Слика 6.13 Дијаграм затезања основног материјала (епрувета бр. 1)



Слика 6.14 Збирни дијаграм кривих затезања (3 епрувете)

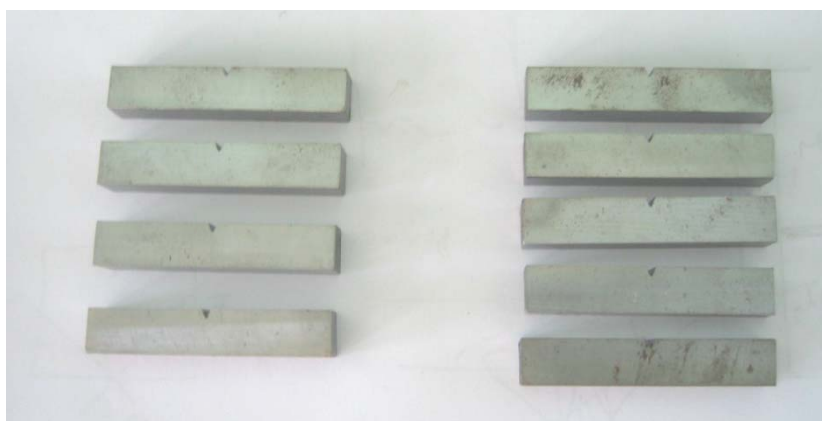
Табела 6.2 Збирни резултати испитивања затезањем (3 епрувете)

Бр.	L_0	S_0	$R_{p0,2}$	R_m	A_5
	<i>mm</i>	<i>mm²</i>	<i>MPa</i>	<i>MPa</i>	<i>%</i>
1	48.00	50.52	972.27	1032.29	14.65
2	48.00	50.52	977.10	1037.64	14.78
3	48.00	50.39	996.27	1033.99	14.92

На сличан начин испитиване су и епрувете припремљене из сучеоно завареног споја. Добијене вредности су се кретале у границама: $R_m = 910 \div 913 \text{ MPa}$, $R_{p0,2} = 870 \div 878 \text{ MPa}$ и $A_5 = 8.75 \div 10.2\%$. Иако добијени резултати указују на правилно одабрану технологију заваривања и додатни материјал, за поузданије, како резултате, тако и закључак потребна су допунска испитивања на већем броју епрувета.

6.3.2 Испитивање ударне жилавости

Слично као и при испитивању затезањем припремљене су епрувете из основног материјала (сл. 6.15) и завареног споја (сл. 6.16) које су испитиване на Шарпијевом клатну у акредитованој лабораторији. Резултати испитивања ударне жилавости основног материјала на собној и сниженим температурама дати су у табели 6.3.



Слика 6.15 Епрувете са V жлебом - ОМ



Слика 6.16 Епрувета за испитивање ударом – заварени спој

Табела 6.3 Вредности ударне жилавости ОМ на собној и сниженим температурама

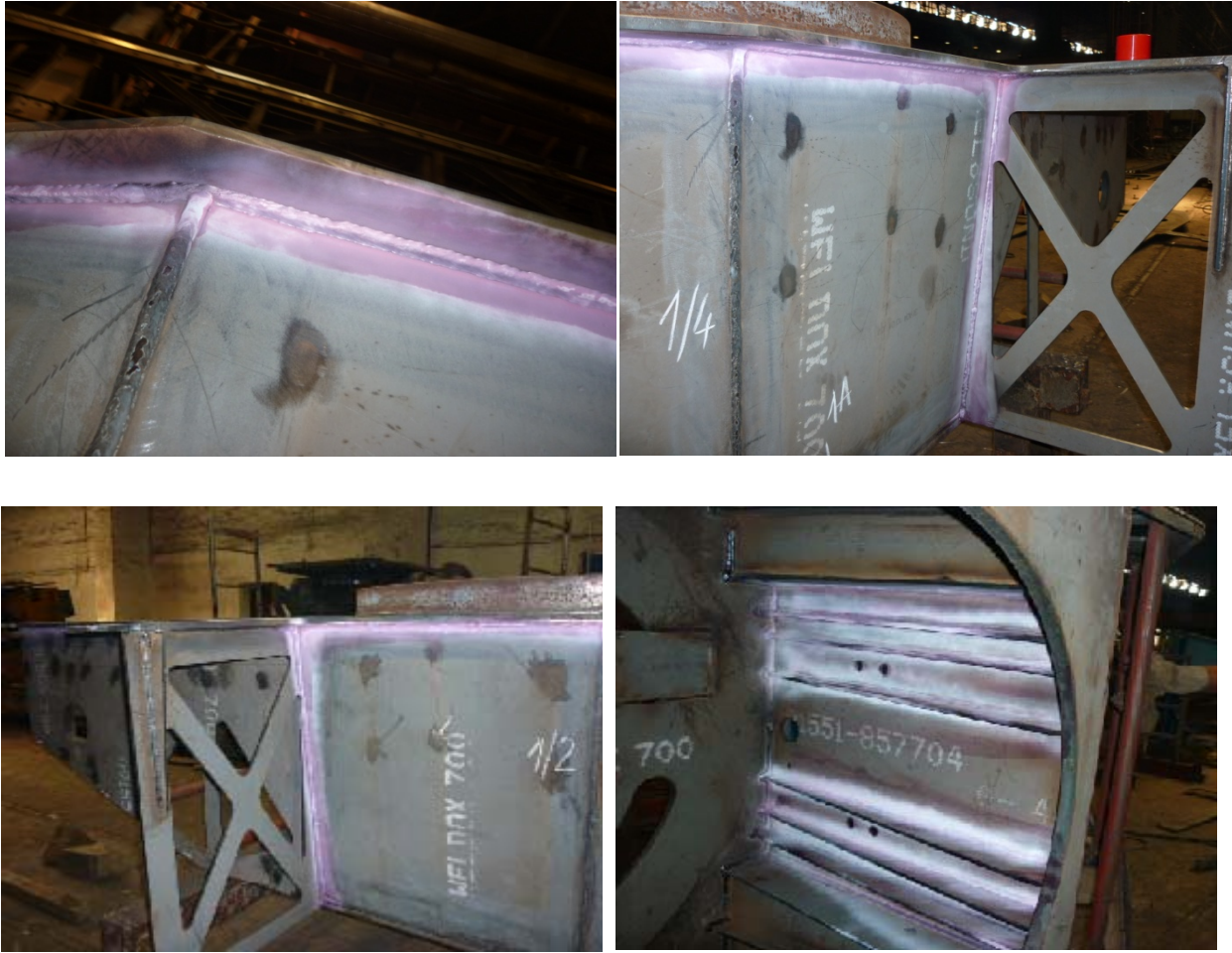
Врста материјала	Температура, °C	Жилавост лома, KV, J
Основни материјал WELDOX 700 (S690QL)	+ 20	172; 166; 171; 158
	- 40	157; 167; 155

При испитивању ударне жилавости завареног споја добијене су нешто ниже вредности у односу на основни материјал, али за поузданији закључак су неопходна додатна испитивања на већем броју узорака.

6.3.3 Ултразвучна контрола и контрола пенетрантним течностима

Као и претходне две и ове контроле су извршене од стране акредитоване фирме, а један део резултата испитивања је дат на сликама 6.17 и 6.18.

**Слика 6.18** Ултразвучна контрола



Слика 6.17 Контрола заварених спојева пенетрантним течностима

7. ЗАКЉУЧАК

Заваривање челика повишене јачине може се извести применом уобичајених поступака заваривања топљењем, при томе се добијају заварени спојеви одговарајуће јачине, тврдоће и жилавости који се не могу упоређивати са својствима основног материјала али се те особине могу доста приближити особинама основног материјала што и јесте главни циљ заваривања. Споменути челици се намећу као општеприхваћени конструкциони материјали за израду заварених високо одговорних конструкција. Разлози за њихову све већу примену су сасвим оправдани, а огледају се у релативно повољној цени, веома добрим механичко-металуршким особинама, смањеној тежини, побољшаној заварљивости и тсл. Челици повишене јачине се користе за израду челичних конструкција са повећаним захтевима као што су: цевоводи високог притиска, мостови, цистерне, пароводи, железнички вагони, делови војних возила, кранови итд.

Имајући у виду да је добијање челика повишене јачине условљено применом сложених комбинација металуршких и термомеханичких процеса, од посебног је значаја очување њихових особина при заваривању. У овом раду дата су општа објашњења везана за проблематику заварљивости ових челика. Нарочито се указује на:

- преглед поступака добијања разних врста челика повишене јачине;
- повољне економске ефекте примене ових челика који се пре свега огледају у значајним уштедама на тежини конструкције;
- поступке добијања микролегираних челика;
- могућности повећања напона течења, као и утицај појединих микролегирајућих елемената (Ti, Nb, V, Cr, B и др.) на структурне преображаје у челику а све у циљу побољшања његових својстава;
- склоност челика WELDOX 700 (S690QL) ка образовању прелина, као и мерама за њихово спречавање;
- прописивање најповољније технологије заваривања челика WELDOX 700;
- избор оптималних параметара заваривања МАГ и РЕЛ поступцима;
- микроструктуру метала шава, ЗУТ-а и основног материјала.

WELDOX 700 челик је намењен за израду конструкција изложених великим статичким и динамичким (ударним) оптерећењима и због тога мора да задржи добре механичке особине у што ширем дијапазону радних температура тврдоћу, јачину, жилавост на собним и сниженим температурама. Поред свих тих услова јавља се и услов заварљивости самог челика. С обзиром на то да се челици повишене јачине добијају додавањем различитих микролегирајућих елемената и посебним поступцима термо-механичке прераде, при заваривању се мора водити рачуна да услед загревања и хлађења појединих зона не дође до нарушавања повољне структуре основног материјала.

Дакле, после детаљне анализе најважнијих својстава основног материјала и процене његове заварљивости, избора најповољније комбинације додатних материјала, поступка и технологије и спроведених испитивања, утврђена је најповољнија технологија заваривања и искоришћена је на реалној конструкцији. Заварена конструкција предложеном технологијом, подвргнута је ригорозним тестовима на којима се показала веома поузданом.

Такође, како би се постигла добра својства завареног споја, приближна својствима основног материјала, поред свега наведеног, неопходно је придржавати се препорука произвођача челика, као и сазнања других истраживача из ове области.

8. ЛИТЕРАТУРА

- 1) **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања – приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, 1996.
- 2) **Јовановић М., Лазих В.:** *Технологија заваривања – скрипта*, Машински факултет у Крагујевцу, 2010.
- 3) **Ђорђевић Д.:** *Оцена технолошко – металуршке заварљивости челика повишене јачине – специјалистички рад*, Крагујевац, 2010.
- 4) **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В., Ратковић Н.:** *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, 2003.
- 5) **Ђорђевић В., Вукићевић М.:** *Машински материјали – практикум за вежбе први део*, Београд, 1998.
- 6) **Јовановић М., Лазих В., Александровић С., Милосављевић Д., Маринковић П., Недељковић Б.:** *Оцена заварљивости и избор најповољнијег поступка и технологије заваривања челика повишене јачине WELDOX 700*, Машински факултет у Крагујевцу, 2009.
- 7) **Јовановић М., Лазих В.:** *Упутство за заваривање челика повишене јачине*, Машински факултет у Крагујевцу, 2008.
- 8) *Југословенски стандард – Критеријуми прихватљивости грешака заварених спојева*, Савезни завод за стандардизацију, Београд, 1995.
- 9) *Каталог додатних материјала и електрода*, Железарне Јесенице, Словенија.
- 10) **Радаковић З.:** *Предавања и вежбе*, Машински факултет у Београду – www.mas.bg.ac.rs, Јун 2011.
- 11) www.weldox.com, Мај 2011.
- 12) www.mfkg.kg.ac.rs/наставни материјал, Јун 2011.
- 13) **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања – приручник, друго издање*, Машински факултет у Крагујевцу, 2011.