

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ИНЖЕЊЕРСКИХ НАУКА



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Производне технологије

Број индекса: 164/2011

Стефан З. Милошковић

**МЕРЕ ЗА СМАЊЕЊЕ ДЕФОРМАЦИЈА ПРИ МАГ
ЗАВАРИВАЊУ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ ОТПОРНИХ НА
ХАБАЊЕ**

Завршни рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Вукић Лазић, ред. проф – ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ

Факултет инжењерских наука

Катедра за производно машинство

Завршни рад

Предмет: **Производне технологије**

Назив теме:

**МЕРЕ ЗА СМАЊЕЊЕ ДЕФОРМАЦИЈА ПРИ MAG ЗАВАРИВАЊУ ЧЕЛИКА
ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ ОТПОРНИХ НА ХАБАЊЕ**

1. Увод
2. Врсте и преглед челика повишене јачине
3. Избор метода заваривања, додатног материјала и технологије заваривања
4. Термички напони и деформације при заваривању топљењем
5. Практична испитивања основног материјала и заварених спојева
6. Технолошке мере за смањење сопствених напона и деформација
7. Закључак
8. Литература

У Крагујевцу, 01. 10. 2018. године.

Кандидат:

Стефан Милошковић, број индекса: 164/2011

Ментор:

Др Вукић Лазић, ред. проф

У оквиру овог завршног рада кандидат треба да:

- Изврши преглед челика повишене јачине, опише њихов развој, начин добијања и поступак производње;
- Да укаже на заварљивост челика повишене јачине, и да одреди заварљивост челика, као и да предложи метод и технологију заваривања;
- Да укаже на појаву напона и деформација при заваривању, као и испитивања основног материјала;
- Да опише мере за смањење напона и деформација, и да на једном примеру прикаже резултате мерења деформације при МАG заваривању челика повишене јачине.

Препоручена литература:

1. Јовановић М., Лазих В., Арсић Д.: *Наука о материјалима I, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.*
2. Јовановић М., Лазих В.: *Технологија ливења и заваривања, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2016.*

Крагујевац, Октобар 2018 год.

Ментор:

Др. Вукић Лазих, ред. проф.

Резиме:

У овом раду се разматрају челици повишене јачине. У теоријском делу рада утврђена је методологија за оцену заварљивости ових челика, указано је на опште проблеме заварљивости, а такође је дат и преглед челика повишене јачине. Детаљније се у раду анализира заваривање челика класе Hardox 450, методом MAG заваривања као и његови параметри. Због појаве напона и деформација при заваривању дате су мере за њихово смањење при заваривању.

Кључне речи: челик повишене јачине, заварљивост, Hardox 450, технологија заваривања, напони, деформације.

Abstract

In this paper high-strength steels are considered. In the theoretical part of the paper, a methodology for the evaluation of the weldability of these steels has been established, general problems of welding have been pointed out, as well as a review of high strength steel. Welding of Hardox 450 steel, with MAG welding method as well as its parameters is analyzed in detail. Due to the occurrence of stress and strain during welding, measures for their reduction in welding are given.

Key words: high strength steel, weldability, Hardox 450, welding technology, stresses, deformations.

САДРЖАЈ

1. УВОД	1
2. ВРСТЕ И ПРЕГЛЕД ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ.....	3
2.1 Врсте челика повишене јачине	3
2.2 Преглед челика повишене јачине	3
2.2.1 Угљенични челици.....	5
2.2.2 С-Мп челици.....	6
2.2.3 Умирени челици.....	8
2.2.4 Микролегирани челици	9
2.2.5 ТМСР челици	10
3. ИЗБОР МЕТОДА ЗАВАРИВАЊА, ДОДАТНОГ МАТЕРИЈАЛА И ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА	15
3.1 Избор метода заваривања.....	15
3.1.1 Рачунске методе за оцену заварљивости	16
3.1.1.а Оцена заварљивости угљеничних челика	16
3.1.1.б Оцена заварљивости нисколегираних челика	18
3.1.1.в Оцена заварљивости челика повишене јачине.....	19
3.1.1.г Процена склоности челика ка образовању прслина	20
3.1.2 Практичне методе за оцену заварљивости	20
3.2 Технологија МАG заваривања.....	21
3.2.1 Прорачун технолошких параметара МАG заваривања.....	22
3.2.2 Рачунски параметри МАG заваривања.....	24
3.2.3 Основни материјал.....	28
3.2.4 Производња Hardox челика.....	29
3.2.5 Резање Hardox лимова и плоча	31
3.2.6 Савијање Hardox лимова и плоча	32
3.3 Избор додатног материјала за заваривање	32
3.3.1 Избор опреме за заваривање	34
3.3.2 Заваривање челика Hardox 450	35
4. ТЕРМИЧКИ НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ ПРИ ЗАВАРИВАЊУ ТОПЉЕЊЕМ.....	37
4.1. Сопствени напони и деформације при заваривању топљењем	37
4.2 Термички и структурни напони.....	38
5. ПРАКТИЧНА ИСПИТИВАЊА ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА И ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА.....	41
5.1. Испитивања са разарањем.....	41
5.1.1 Испитивање затезањем	41
5.1.2 Испитивање савијањем.....	44
5.1.3 Испитивање ударне жилавости	46
5.1.4 Металографска испитивања.....	48
6. ТЕХНОЛОШКЕ МЕРЕ ЗА СМАЊЕЊЕ СОПСТВЕНИХ НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА	52
6.1 Термичке методе за отклањање деформација и смањење сопствених напона	54
6.2 Мерење деформација	56
6.3 Опис примењиваног уређаја и протокола мерења.....	56
6.4 Резултати мерења деформација	58
7. ЗАКЉУЧАК	63
8. ЛИТЕРАТУРА.....	65

1. УВОД

Данас доминантно место као конструкциони материјали заузимају челици и алуминијумске легуре. Једини индустријски материјал који се производи у већој количини од ова два метала јесте цемент. Према извештају (World Steel Association, www.worldsteel.org) Светског удружења за челик, 2016. године у свету је произведено укупно 1,629 милијарди тона сировог челика, а 2017. године је произведено укупно 1,689 милијарди тона што представља раст у производњи у односу на прошлу годину. Челик је најјефтинији метални конструкциони материјал. У неким областима примене, челик има алтернативе и у јефтинијим металима, па и у скупљим материјалима који поседују боља својства.

Данас постоје различите врсте конструкционих материјала који се могу употребити за израду различитих делова машина и уређаја. У техничкој пракси, уместо чистих метала, углавном се користе легуре које су вишекомпонентног састава, што значи да поред основног метала, садрже и друге легирајуће елементе (метале и неметале). Чак ни такозвани чисти метали уобичајеног квалитета не могу се сматрати за системе са једном компонентом, јер садрже већу или мању количину нечистоћа. У техници се као конструкциони материјали највише примењују челици, а за одливке ливена гвожђа, тј. легуре гвожђа и угљеника. Поред наведених метала у примени су и легуре алуминијума, бакра и титана. Легуре на бази гвожђа су и данас најважније и највише коришћене у техничкој пракси. Од целокупне светске производње метала њихов је удео око 95%. Иако су челици у основи легуре гвожђа и угљеника, комерцијални челици увек садрже и друге елементе, било у виду намерно додатих елемената у циљу легирања и постизања жељених својстава. Различитим комбинацијама легирајућих елемената и угљеника остварују се различита захтевана својства, јер легирајући елемент може побољшавајући једно, да погорша друго својство. Због тога је неопходно за рад у сложеним условима изабрати најпогоднији састав основног материјала (челика) који даје најповољнију комбинацију својстава за одређену намену. Пре само неколико година, процене су говориле да ће индустрија до 2020 године, захтевати промену или алтернативу за око 95% данашњих материјала. Наравно, ове су се прогнозе односиле и на челик [1,2,6].

Шездесетих година прошлог века, научници који се баве науком о материјалима предвиђали су драстично смањење челика а да ће његово место, заменити обојени

метали, полимери и композити. Ово се није остварило, а главни разлог оваквих погрешних процена је супериорност челика у односу на друге материјале, посебно у погледу односа квалитет-цена. На развој челика у протеклих више од 100 година су паралелно утицала два правца: развој и освајање знања из физичке металургије и развој опреме и технологије за производњу челика. Приликом израде одговорних машинских конструкција класични угљенични челици нису у потпуности могли да задовоље захтеве савременог пројектовања, како са становишта квалитета, тако и са становишта економије. Ово се посебно односи на израду конструкција великих димензија, при раду на повишеним или сниженим температурама, повећаним радним притисцима и тсл. Ти захтеви савремене индустрије довели су до развоја нових врста челика повишене јачине.

Челици повишене јачине потискују многе до сада коришћене конструкционе челике захваљујући оптималној комбинацији механичких карактеристика, заварљивости и цене, што је постигнуто пажљивим избором хемијског састава и контролисаном термомеханичком обрадом. Циљ развоја ових челика је постизање вишег напона течења и више затезне јачине, а тиме и више допуштеног оптерећења у раду. Применом ових челика смањује се маса и запремина конструкције, задржан је повољан однос напона течења и затезне чврстоће (R_{eH}/R_m) тако да у случају преоптерећења раније долази до пластичне деформације, а не до лома. Обимно теоријско-експериментално истраживање може да укаже на правилнији приступ проблематици заваривања челика повишене јачине, пре свега из технолошко-металуршког аспекта, не замарујући притом ни економску страну [3].

2. ВРСТЕ И ПРЕГЛЕД ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

2.1 Врсте челика повишене јачине

Ови челици се интензивно развијају у последњих тридесетак година и користе се за израду одговорних конструкција које раде у посебним условима оптерећења, у циљу смањења тежине конструкција, продужења радног века, побољшања технолошких особина материјала и снижења трошкова израде. Захваљујући микрولةгирајућим елементима, који омогућавају добијање ситнозрнасте структуре у процесу ливења, уз термичку обраду и висок степен деформације у току прераде, добијају се повишене механичке особине и отпорност на деформације и хабање. На овај начин добијени су (челици) повишене јачине који имају високе механичке особине и на ниским температурама, као и повишену отпорност на деформације и хабање.

Карактеристично за ове челике је да се у односу на угљеничне одликују повећаним својствима јачине и поред ниског садржаја угљеника ($C < 0.22\%$). Ово повећање јачине резултат је позитивног дејства малих количина легирајућих елемената који не погоршавају заварљивост, за разлику од угљеничних челика код којих повећан садржај угљеника утиче на пораст својства јачине али знатно погоршава заварљивост. Технологија микрولةгирања омогућила је производњу нове категорије челика, који су у ствари конвенционални угљенични челици са минималним додацима легирајућих елемената (мање од 0.50%), у циљу повећања напона течења, јачине на кидање и тврдоће. Челици повишене јачине поседују: повишену затезну јачину, границу развлачења, издужење и жилавост, а ове особине задржавају и при сниженим температурама, уз одличан однос тежине и цене, па су с тога изузетно погодни за индустријску примену. Челици повишене јачине се не сматрају легираним челицима, иако се њихова посебна механичка својства постижу додавањем малих количина легирајућих елемената. Због тога су ови челици сврстани у посебну групу челика са побољшаним механичким својствима додавањем малих количина легирајућих елемената. Издавање у посебну групу је оправдано и због тога што је цена ових челика ближа цени угљеничних челика него цени легираних челика.

2.2 Преглед челика повишене јачине

Основни циљ при избору основног материјала за металне заварене конструкције је да материјал буде што јефтинији, а да притом задовољи тражена механичка својства. Тако од избора одговарајућег материјала у великој мери зависи успех израде заварене

конструкције. У највећем броју случајева за израду заварених конструкција користе се угљенични и легирани челици, а у последње време челици повишене јачине. Економичност примене челика у металним конструкцијама произлази управо из могућности коришћења, обликовања и прераде готових основних конструкционих елемената. Како је производња челика напредовала, конструктор данас има на располагању више врста и могућности избора економски најповољнијег, а квалитетом довољно доброг челика. Такође, постоје класификације конструкција и делова с обзиром на опасност коју би представљао лом конструкције. Ово говори у прилог томе да не мора цела конструкција бити направљена од квалитетног и скупог материјала, већ се мање одговорни делови могу направити и од јефтинијег материјала (челика).

При избору материјала за заварене конструкције угљенични челици углавном задовољавају потребе, а у случају рада на повишеним температурама или агресивним срединама користе се легирани челици или друге легуре. У данашње време се као опште прихваћени конструкциони материјали користе челици повишене јачине, посебно када је реч о одговорним завареним конструкцијама. Разлози за њихову све већу употребу се огледају у релативно ниској цени, повољним механичко-металуршким својствима, лакшим конструкцијама, побољшаној заварљивости и др. Захтеване комбинације механичких својстава, као што су: јачина, жилавост, деформабилност, као и технолошка својства заварљивости, остварују се у складу са већ утврђеним стандардима, било општим, или стандардима самих произвођача. Степен њиховог развоја и добијања је такав да се они релативно лако производе, а механичке особине усклађују се са захтевима крајњих корисника. Сви челици са напоном течења преко 360 МПа сврставају се у челике повишене јачине.

У зависности од степена развоја и примене ових челика у појединим земљама, дате су различите поделе ових челика:

а) Према пољским стандардима, челици повишене јачине деле се на:

- С-Мп челике: ситнозрни феритно-перлитни челици са повећаним садржајем мангана (најчешће $Mn < 1.50\%$),
- микролегиране челике: нискоугљенични ($C < 0.2\%$) микролегирани додацима следећих елемената: Nb, Ti, V, Al, Ta, Zr у укупном садржају мањем од (0.20%),
- нисколегиране челике повишене јачине, који се деле на:

- бејнитне челике: нискоугљенични ($C < 0.18\%$) челици легирани молибденом (0.50%) и бором (0.003%),
- нисколегиране побољшане челике (Q + T – quenched + tempered): нискоугљенични лакозакаљиви челици, специјално термички обрађени.

б) Према чешком стандарду, челици повишене јачине деле се на:

- микролегиране феритно-перлитне челике и
- нисколегиране побољшане челике.

в) Према америчком стандарду, челици повишене јачине деле се на:

- корозивно отпорне челике,
- микролегиране феритно-перлитне челике,
- ваљане перлитне челике,
- челике са ацикличним феритом,
- двофазне челике,
- челике са контролисаним обликом укључака.

2.2.1 Угљенични челици

Челици код којих одлучујући утицај на структуру и својства има садржај угљеника називају се угљенични (нелегирани) челици. Поред гвожђа, као основне компоненте, чији се садржај може мењати од 97.0 до 99.5%, и угљеника ($C = 0.003-2.11\%$), који се намерно додаје, јер доминантно утиче на особине челика, ови челици садрже и један број сталних пратећих елемената као што су: $Mn < 0.8\%$, $Si < 0.6\%$, и нечистоће фосфор и сумпор ($P < 0.04\%$, $S < 0.04\%$), као и гасове O_2 , H_2 , N_2 .

Угљеник се у челицима, у ограниченој количини, налази у интерстицијском чврстом раствору фериту-гвожђа, а већим делом у облику карбида гвожђа (цементита). Због таквог свог положаја у кристалној решетки, он у току њене деформације, која је нпр. последица дејства спољашњег напрезања, представља препреку кретању дислокација. Савладавање ових препрека, потребно је повећати спољашње напрезање. Како је доминантна улога растворених атома угљеника, овај механизам се назива растварајуће ојачавање. Повећање садржаја угљеника у челику доводи до повећања јачине, тако да је додавање угљеника челику била једна од првих метода за повећање његове јачине (чврстине). Међутим, пораст јачине само преко садржаја угљеника је ограничен због ризика од настанка хладних прелина услед закаљивања у подручју зоне

утицаја топлоте завареног споја. С тим у вези, сматра се да челици са садржајем $C < 0.25\%$ нису склони закаљивању.

Структура ових челика углавном је зависила од садржаја угљеника и била је углавном феритна, феритно-перлитна, а веома ретко бејнитна. Због ниског нивоа технологије добијања и прераде, примена ових челика била је везана за присуство нечистоћа S и P које се нису могле успешно одстранити при производњи челика. Сумпор доспева у метал из руда, а такође и из гасова пећи (као продукт сагоревања горива јавља се SO_2). Сумпор се не раствара у гвожђу и било која његова количина образује са гвожђем једињење познато под називом гвожђе-сулфид (FeS), које се топи на око $1200^\circ C$ и излучује се у виду еутектика, који се у облику танког филма распоређује по границама зрна. Температура топљења еутектикума је од $975-985^\circ C$.

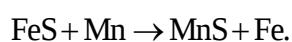
Присуство лакотопљивих и кртих еутектикума, чини челик кртим при $800^\circ C$ и више, тј. у области температура црвеног усијања. Појава носи назив кртост при црвеном усијању. Услед кртости при црвеном усијању, челик са повећаним садржајем сумпора се не може обрађивати пластичном прерадом на топло. Као и сумпор, фосфор слаби механичке особине челика и изазива хладни лом. Он у челику ствара фосфиде који су делимично растворљиви у фериту. Растварајући се у фериту, фосфор (нагло) повећава температуру прелаза у крто стање. Фосфор је склон према ликвацији коју повећава угљеник. При томе настају лакотопљиве еутектике које снижавају чврстину (јачину). Повећање садржаја угљеника у челику доводи до повећања јачине (чврстоће), а с друге стране доводи до повећања кртости челика, тј. смањења жилавости и пораста температуре преласка челика из жилавог у крто стање, погоршање заварљивости и безначајан утицај на смањење тежине конструкције.

2.2.2 C-Mn челици

За одговорне конструкције, које су изложене великим напрезањима, посебно ако су радни услови такви да се од конструкције захтева и добра жилавост на сниженим температурама, угљенични челици нису могли да буду поуздано решење. Повећање жилавости је уопште условљено смањењем количине угљеника у челику, па би то у случају угљеничних челика значило и пад затезне јачине материјала. Међутим, класични угљенични конструкциони челици приликом израде одговорних машинских конструкција показали су се мање употребљивани, како са становишта задовољења квалитета, тако и са становишта економије. То се посебно односи при изради

конструкција великих димензија, при раду на повишеним или сниженим температурама, повећаним спољним радним оптерећењима (притисцима) и др. Понекад, одређени делови и поред основних механичких особина морају имати и посебне особине, као што су корозивна отпорност, термостойаност и др., које се могу постићи додавањем других елемената, тј. легирањем. За конструкције које захтевају побољшане механичке особине, захтев боље жилавости може да испуни само челик са нижим садржајем угљеника. Да би конструкција у оваквим условима имала потребну носивост, морали би да се користе већи попречни пресеци, при чему би конструкција значајно добила на тежини. Превазилажење наведених проблема било је могуће тек развојем нове врсте С-Мн челика (ситнозрни феритно-перлитни челици са повећаним садржајем мангана).

Међу првим методама повећања својства чврстоће применом микролегирања почело је повећањем садржаја мангана код нискоугљеничних челика. Улога мангана у челику је двојака: утиче на ојачање и регулише контролу сумпорних укључака. Манган није био замена за угљеник, јер он у челику образује супституцијски, а не интерстицијски чврсти раствор. Ефекат ојачавања чврстих раствора пре свега зависи од разлике у величини атома. Како су Fe и Mn суседни елементи у периодном систему, ефекат ојачавања чврстог раствора услед присуства мангана и није нарочито изражен. Уобичајено присуство мангана у челицима је у границама од 1.4 до 1.7%. Манган има велики хемијски афинитет према сумпору при чему се гради једињење MnS према реакцији:



Сулфид манган (MnS) се топи на температури $\approx 1620^\circ\text{C}$. Сумпор је обично присутан у гвожђу у виду сулфида гвожђа, који на високим температурама са гвожђем образује еутектику ниске тачке топљења. Оне се распростиру по границама металних зрна док су још у течном стању, а током хлађења очвршћавају у крти филм. Тиме се објашњава чињеница да се челик са течним филмом по границама зрна не може прерађивати на високим температурама, јер постаје крт кад се охлади. Услед великог афинитета Mn и S, најједноставнији начин за потпуно везивање сумпора је додатак довољне количине мангана у челику. Манган се лакше једини са сумпором, стварајући MnS високе тачке топљења који није у течном стању при топлој преради челика и због тога има незнатан утицај на жилавост коначног производа, јер је равномерније распоређен у челику. Ова улога Mn омогућила је да се знатно повећа жилавост у конструкционим челицима. У

току даље прераде MnS се или издужује (ваљањем) или ломи и ситни (ковањем). Присуство великих издужених MnS укључака, у ваљаним производима није пожељно, јер може лако довести до тзв. ламеларног цепања. У новије време, да би се овај проблем елиминисао, у току израде челика додаје се мала количина калцијума (Ca), око 0.0040%. Калцијум служи као модификатор облика MnS, омогућавајући да се створи укључак сферног облика, који је недеформабилан, те не мења свој облик у току било које даље прераде. Само увођење калцијума, постојећим квалитетима челика, повећава жилавост и до 40%.

2.2.3 Умирени челици

У циљу смањења садржаја кисеоника у челику, као последица његовог нестехиометријског довођења у току израде челика, у завршној фази топљења или у ливачком лонцу додају се дезоксидациона средства. У ту групу спадају елементи који имају већи афинитет према кисеонику него гвожђе. Најчешће су коришћени Al и Si, у количини која се одређује на основу последње хемијске анализе у току производње челика, на проби између изливања из лонаца. На овај начин добија се нова врста челика, такозвани умирени челици ($\text{Si} + \text{Al} \approx 0.2\%$). Назив су добили по понашању у току ливења. Пошто више није било слободног кисеоника, није долазило до оксидације преосталог угљеника и издвајања гасовитих продуката угљен-моноксида (CO), површина ја била мирна и нису се запажали мехурићи. Посебно је повољна дезоксидација помоћу Al, јер је уочено да је у неким Al–умиреним челицима дошло до таложења укључака алуминијум-нитрида по границама зрна, који блокирају даљи раст металних зрна. Ово се односи на челике у којима је Al додат у великој количини и који су имали висок садржај азота. Лако стварање алуминијум-нитрида је последица веома великог афинитета Al и N. Алуминијум у челику има двоструку улогу:

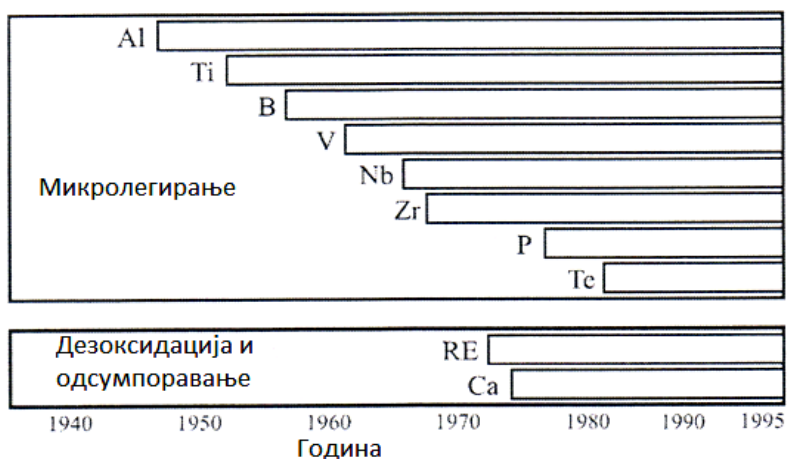
- 1) да изврше тзв. умирење челика везивањем кисеоника у једињење алуминијум-оксид (Al_2O_3) и
- 2) да изврши контролу границе зрна таложењем једињења алуминијум-нитрид (AlN).

Дезоксидација Al ствара Al_2O_3 у облику финих честица, тако да се стварају бројни центри кристализације, што после очвршћивања даје повољну ситнозрнасту структуру. Контрола границе зрна није била од већег интереса за произвођаче челика, јер су техничке могућности биле ограничене у погледу обезбеђења жељене расподеле Al у челику.

Због амфотерности је долазило до стварања укључака типа алумината, што је практично био губитак алуминијума. Умирени челици одликују се уједначеном структуром и равномерним хемијским саставом и повољним механичким особинама. Све то доводи до пораста динамичке издржљивости, бољих особина на ниским температурама, боље заварљивости и термичке обрадивости.

2.2.4 Микрولةгирани челици

Микрولةгирани челици развијени су на бази С-Мп челика, јер су нова истраживања 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 легирајућих елемената Nb, Ti, V, Zr, В и др., који се називају "микрولةгирани челици". Углавном садржај угљеника је од 0.03 до 0.12%, а у челицима раније производње и до 0.2%, чиме се задржава добра заварљивост. На слици 1.1 су приказани почеци примене појединих микрولةгирајућих елемената у челицима.



Слика 1.1 Почетци примене појединих микрولةгирајућих елемената у челицима

Доминација неког од наведених елемената искључиво је зависила од цене и погодности за термомеханичку обраду челика. Развој и примена микрولةгираних челика везује се за почетак шездесетих година прошлог века. С обзиром на чињеницу да су нове конструкције морале да задовоље нове критеријуме у погледу примене материјала, акценат је стављен на нове челике који могу да испуне следеће захтеве: повећање јачине, могућност извођења разноврсних термомеханичких обрада, добру заварљивост и др.

Повишен напон течења ових челика омогућавао је израду лакших конструкција, тако да су се ови челици употребљавали за израду: мостова, цевовода високог

притиска, судова под притиском, елемената друмских возила, железничких вагона, индустријских хала и др. Основна карактеристика микролегираних челика је да додавањем малих количина легирајућих елемената долази до интензивног смањења зрна (ситнозрнаста структура) као и ефеката таложног ојачавања, услед издвајања стабилних честица карбида, нитрида и карбонитрида. Наиме, излучени карбиди, нитриди односно карбонитриди, делују као допунски центри кристализације. Укупна количина легирајућих елемената, најчешће ниобијума, ванадијума и титана у микролегираним челицима не прелази 0.15%.

После топле пластичне прераде структура микролегираних челика је ситнозрнаста и састоји се од феритних зрна, хомогених по облику. Присутна је и мала количина цементита (због чега и ове челике називају нископерлитни), као и финих диспергованих честица карбонитрида, који се могу идентификовати на електронском микроскопу.

У току завршног ваљања долази до појаве великог броја преферентних места, на којима је доминантна појава феритне фазе при хлађењу челика испод температура почетка промене аустенита у ферит. Клице се у челику појављују на местима на којима је у већој мери нарушена енергетска баријера (дислокације, границе зрна и субзрна, двојници, деформационе траке и сл.). Укупан број преферентних места је директна последица примењеног поступка прераде и степена деформације. Пошто се ради о пластичној преради на повишеним температурама, у току прераде се одвијају и супротни процеси, процеси обнављања деформисане структуре, опорављања и рекристализације. Рекристализацијом се смањује густина дислокација, а деформисана структура се замењује недеформисаном.

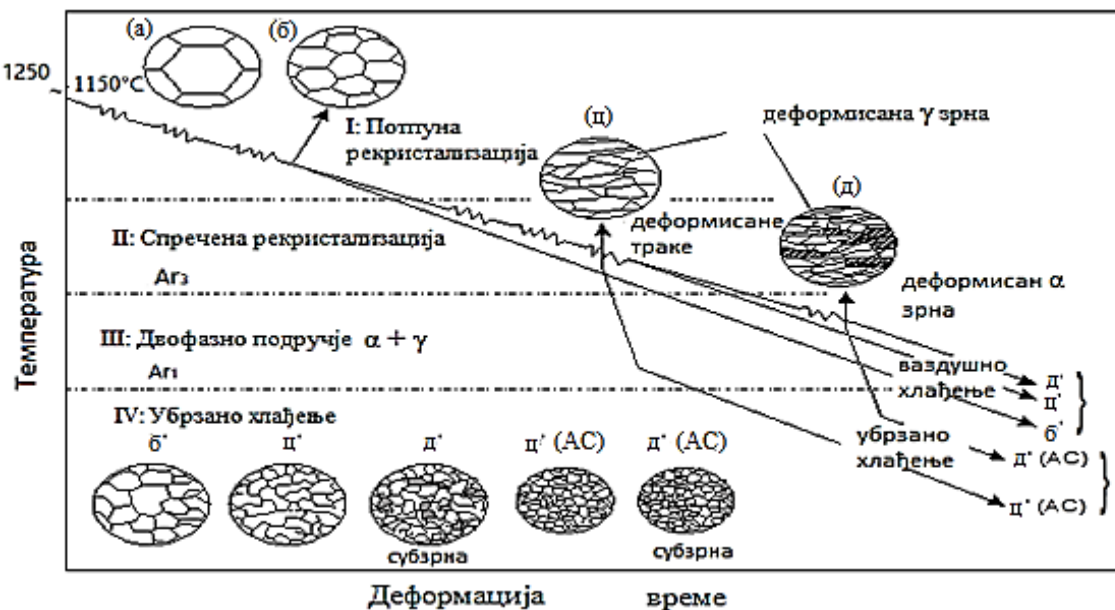
У току прераде упоредо се одвијају два процеса који су супротни по својој природи процес повећања и смањења густине дислокација. Спречавање рекристализације је могуће на два начина:

- 1) смањењем брзине настанка клице и
- 2) смањењем покретљивости граница зрна и субзрна услед присуства растворених атома у чврстом раствору.

2.2.5 ТМСР челици

ТМСР челици (Термо Механички Контролисано Прерађени челици). Карактеристично за ове челике је де се одликују такозваном "контролисаном

микроструктуром". Добијање ових челика условљено је применом посебне технологије топле пластичне прераде, која се назива још и термомеханичка контролисана прерада (Thermo–Mechanical Control Processing-TMCP) или само термомеханичка прерада. На слици 1.2 дат је шематски 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 на ваљаоничком столу, брзину деформације, температуру).



Слика 1.2 Шематски приказ термомеханичке прераде микролегираних челика

Рекристализационо контролисано ваљање (Recrystallization Control–Rolling-RCR). Комплетна топла пластична прерада челика код ове технологије одвија се у рекристализационом подручју, то јест у подручју изнад температуре рекристализације. У овом температурском подручју не долази до термичког таложења, те је статичка рекристализација између провака. Почетна структура челика је грубозрна (слика 1.2а). После деформације (ваљања) структура се састоји од хомогених рекристалисаних зрна (слика 1.2б). Ова технологија се користи за прераду дебелих лимова, код којих није могуће применити класично контролисано ваљање, пошто ваљаонички станови не могу да издрже јако велики отпор деформацији, то јест притисак ваљања.

Класично контролисано ваљање (Conventional Control–Rolling-CCR). У овој технологији предваљање се изводи у температурском подручју у коме је рекристализација потпуна, док се завршно ваљање изводи на нижим температурама, то јест у температурском подручју у коме је рекристализација између провака спречена.

Механизам спречавања рекристализације може бити двојак: а) термичко таложење (дугачка пауза–реверзивно ваљање) и б) блокада граница услед присуства Nb и (или) V у чврстом раствору (кратке паузе–континуирано ваљање). По завршетку деформација рекристалисана структура се хлади до температурског подручја ($T_{NR}-A_{r3}$). По завршетку деформације структура се састоји од деформисаних аустенитних зрна, унутар којих се запажају траке деформације (слика 1.2ц). Ове траке деформације представљају додатна места за настанак клица феритних зрна, па се на крају хлађења добија још финија структура него код RCR ваљања (слика 1.2ц). Овом технологијом се најчешће израђују гасоводи у облику топловаљаних трака, дебљине до 14 mm (највише 18 mm), зависно од снаге машине за намотавање у котур.

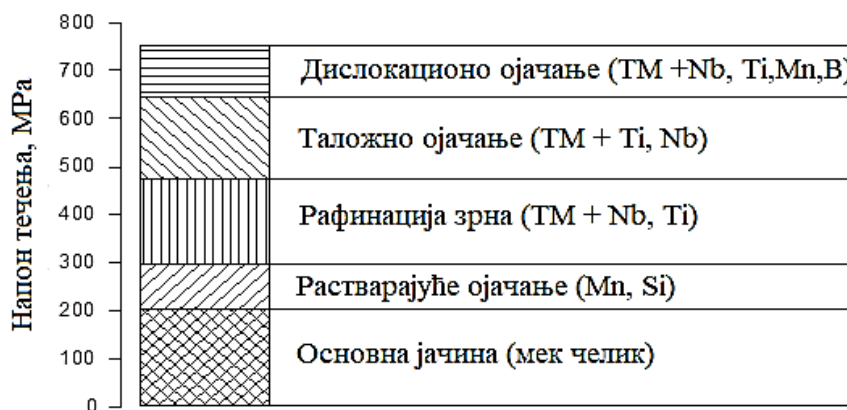
Ваљање у двофазном подручју (Two Phase Rolling– $\gamma+\alpha+R$). Ова технологија је модификација CCR технологије. Разлика је само у томе што се у овој технологији завршно ваљање одвија делимично и у двофазном подручју. После завршетка ваљања у структури се налазе деформисана аустенитна и феритна зрна (слика 1.2д). Завршно ваљање се изводи на релативно ниским температурама. Отпор деформацији је велики, те се ова технологија најчешће користи за прераду лимова мањих дебљина.

Динамичко рекристализационо контролисано ваљање (Dinamic Recrystallizaation Control Rolling - DRCR). Основна карактеристика ове технологије прераде челика је такозвана динамичка рекристализација. Ово је још једна модификација CCR технологије која има за циљ да се деформације из провлака у провлак повећају толико, све док се укупна акумулирана деформација на завршној ваљаоничкој прузи не повећа до те мере да се достигне критични степен деформације потребан за динамичку рекристализацију. Динамичком рекристализацијом се постиже ефекат уситњавања аустенитног зрна, а тиме и резултујућег феритног зрна. Ова технологија за сада није комерцијализована.

Класично контролисано ваљање са убрзаним хлађењем (Conventional Control Rolling + Accelerated Cooling – CCR + AC). Код ове технологије контролисање микроструктуре челика постиже се путем контролисања брзине хлађења. Трака се деформише применом CCR или ваљање у двофазном подручју, а затим се убрзано хлади до A_{r1} температуре. На овај начин, долази до издвајања одређене количине ферита на вишим температурама, а остатак преосталог аустенита се богати угљеником и азотом, успоравајући даљу трансформацију. Тако се обезбеђује да се из таквог аустенита, испод A_{r1} температуре издваја бејнит и (или) мартензит. Овом технологијом

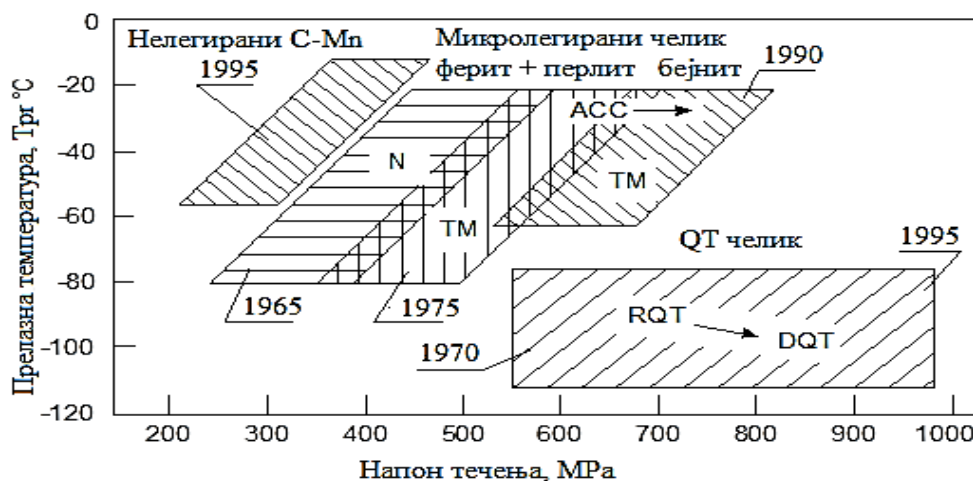
се обезбеђује добијање двофазних челика који поседују веомаfino феритно зрно и упоредо мартензит и бејнит.

На слици 1.3 приказан је допринос појединих механизма ојачавања порасту напона течења.



Слика 1.3 Доприноси појединих механизма повећању напона течења термомеханички прерађеног бејнитног челика

На слици 1.4 приказани су доприноси појединих механизма односу између напона течења и температуре преласка из жилавог у крто стање.



Слика 1.4 Однос напона течења и прелазне температуре кртости челика добијених различитим поступцима прераде: 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 потребно пратити све фазе прераде и фабрикације челика, од добијања челика до заваривања. Процес је познат под називом „Тотална термомеханички контролисана прерада" и састоји се у следећем:

- контрола чистоће челика,
- контрола облика неметалних укључака,
- контролисање микроструктуре ЗУТ-а,
- смањење централних сегрегација у слабу,
- температура прегревања слаба пре топлог ваљања,
- контролисано ваљање,
- текстура,
- убрзано хлађење,
- модификација контролног ваљања.

3. ИЗБОР МЕТОДА ЗАВАРИВАЊА, ДОДАТНОГ МАТЕРИЈАЛА И ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА

3.1 Избор метода заваривања

Материјал је заварљив, ако су испуњена следећа три услова:

- 1) Да је могуће остварити материјални континуитет завареног споја између страница делова које треба спојити, без грешака које се јављају приликом израде шав; ово се назива технолошка (оперативна) заварљивост, тј. технолошка заварљивост подразумева могућност заваривања одређеним поступком.
- 2) Ако је претходни услов испуњен, онда даље, шав и његова околина треба да поседују тражене металуршке особине; ово се назива металуршка заварљивост.
- 3) Ако су шавови квалитетно изведени и ако имају захтеване особине, заварена конструкција као целина (с обзиром на њену крутост, њен облик и њене сопствене напоне) треба да има поузданост изведеног споја, па и подсклопова, склопова па и целе конструкције треба да је оптимална. То је конструкциона заварљивост.

При заваривању се могу јавити грешке и у шаву и зони утицаја топлоте. Оне су последица специфичних услова образовања завареног споја – брзих металуршких реакција или деловања сопствених напона и деформација. Углавном су то: прслине, порозност, укључци троске, непроваривање и заједи. Штетан утицај ових грешака се оцењује према насталој концентрацији напона, а не према умањењу ефективног попречног пресека. То даље значи да се у извесној мери могу допустити заобљени дефекти типа гасних мехурова и укључака троске, али никако прслине, непровари и остали концентратори напона. Најопаснија од ових грешака су прслине, па је за процену склоности заварених спојева ка овој врсти дефекта развијен читав низ метода, као што су: *рачунске методе, технолошке пробе и лабораторијска испитивања*, укључујући и *Механику лома*. За оцену глобалне заварљивости, наведене методе се међусобно допуњују, јер појединачна процена није довољно поуздана.

Јасно је, да појам „идеална заварљивост“ у практичним условима губи смисао, тј. ниједном методом се не може добити спој потпуно истих својстава у шаву, ЗУТ-у и основном материјалу. Како се стварна заварљивост разликује од идеалне, услед разлике у својствима које су проузроковане процесом заваривања, то се критеријуми за оцену заварљивости свode на процењивање посебних вредности усвојених показатеља заварљивости. Испитивање основног материјала представља полазну основу за

процену заварљивости. Добијени резултати одређују и евентуалну потребу за примену мера за побољшање заварљивости.

Примењују се:

- 1) рачунске методе и
- 2) практичне пробе.

Подаци потребни за оцену заварљивости наведеним методама су:

- хемијски састав материјала,
- дебљина, тип и понекад крутост завареног споја и
- начин заваривања.

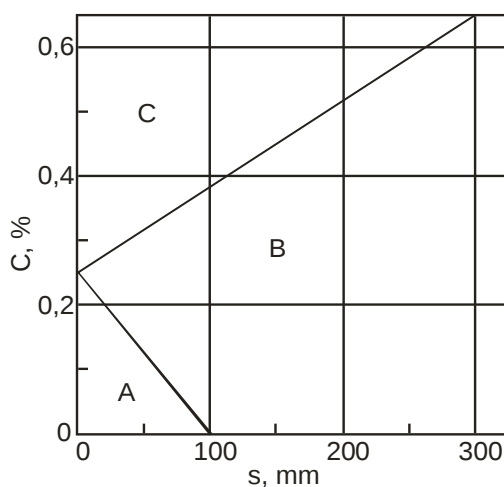
3.1.1 Рачунске методе за оцену заварљивости

3.1.1.а Оцена заварљивости угљеничних челика

Будући да су ови челици намењени углавном за заварене конструкције које су оптерећене на статичка оптерећења, сматра се да сучелици добро заварљиви ако јачина споја одговара јачини основног материјала и ако нема прслина у зони споја, као ни пада пластичности у прелазној зони.

За оцену заварљивости угљеничних челика, користи се дијаграм на слици 2.1, који зависно од дебљине и садржаја угљеника челике разврстава на:

- А. заварљиве,
- В. заварљиве са предгревањем и
- С. заварљиве са предгревањем и накнадном термичком обрадом.



Слика 2.1 Дијаграм за оцену заварљивости нелегираних челика

Предгревањем се смањује брзина хлађења, а тиме и тврдоћа у ЗУТ-у. Сама по себи, висока тврдоћа није штетна, али у комбинацији са дифундованим водоником у ЗУТ-у и његовим преображајем у молекуларни облик, доводи до појаве хладних прслина. Угљенични челици који садрже $C \leq 0.25\%$, $Mn \leq 0.4\%$, $Si \leq 0.3\%$ и P и $S < 0.05\%$, сматрају се добро заварљивим.

Процена заварљивости према хемијском саставу челика је оријентациона метода која се заснива на израчунавању тзв. хемијског еквивалента угљеника – CE, који исказује познату чињеницу да се са повећањем садржаја угљеника погоршава заварљивост. При томе се утицај неког хемијског елемента садржаног у челику, на заварљивост, изражава коефицијентом еквивалентности у односу на угљеник.

Тако се за закаљиве угљеничне челике ($Mn > 0.4\%$ и $Si > 0.3\%$), CE израчунава помоћу израза:

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

Из ове формуле се види да повећање садржаја угљеника утиче на погоршање заварљивости четири пута више од пратећих елемената Si и Mn. За угљеничне челике који још имају додатке Cr и Mo испод граничног садржаја за легирајуће елементе ($Cr < 0.30\%$, $Mo < 0.08\%$), а при томе повећавају склоност ка закаљивању и погоршавају заварљивост, користи се израз:

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

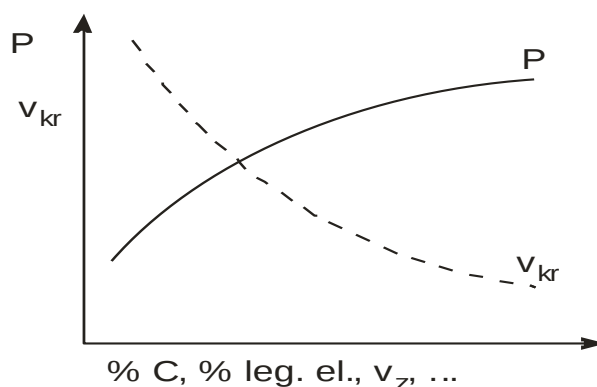
При процени челика ка настанку хладних прслина, поред CE, битан фактор је и брзина хлађења; следи да се при разматрању заварљивости, мора узети у обзир и дебљина заварених делова, јер чињеница је да се делови веће дебљине, при истим условима брже хладе (већи је температурски градијент, односно термички напони), па су склонији ка појави хладних прслина.

Произлази да су добро заварљиви они челици код којих важи: $CE < 0.45\%$ за дебљину $s \leq 25 \text{ mm}$, односно $CE < 0.41\%$ за $s \geq 25 \text{ mm}$. Делови који се по параметрима CE и/или „s“ не уклапају у ове границе, сматрају се условно заварљивим, тј. захтевају предгревање на $100-150^\circ\text{C}$. Оваква процена заварљивости челика, само на основу CE је груба, јер се не узима у обзир начин производње челика, поступак и технологија заваривања [2,3,7,8].

3.1.1.6 Оцена заварљивости нисколегираних челика

Повезујући заварљивост (Z) са прокаљивошћу (P) као реципрочним својствима ($Z=1/P$) и познавајући факторе који повећавају прокаљивост и смањују критичну брзину хлађења (V) оријентационо се може судити о утицају тих фактора на заварљивост (сл. 2.2). И код ових челика угљеник је основни хемијски елемент који утиче на заварљивост, јер доводи до закаљивања у ЗУТ-у и образовања карбида код Cr-Mo челика. Угљеника у овим челицима има до 0.25%, а легирајући елементи који побољшавају корисне особине челика, истовремено лоше утичу на заварљивост.

Промена заварљивости, у зависности од квалитативно-квантитативног садржаја легирајућих елемената у челику и њиховог утицаја сразмерно угљенику, па се у литератури може наћи велики број једначина за израчунавање CE и оцену заварљивости. У пракси се код нисколегираних челика највише користе формуле:



Слика 2.2 Однос заварљивости и прокаљивости

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

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14}, \%$$

$$CE = C + \frac{Mn}{20} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{10}, \%$$

Температурски циклуси заваривања, уколико су вредности CE веће, могу за последицу имати појаву закаљивања у ЗУТ-у. Проучавањем утицаја CE на тврдоћу у ЗУТ-у, установљена је корелациона веза:

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

$$HV_{min} = 1200 \cdot CE - 260 \text{ [2,7,8]}$$

Веза је примењивана у границама $0.2\% < CE < 0.6\%$, јер за веће вредности CE зависност није више линеарна. Уз велике апроксимације, занемаривањем једног броја утицајних фактора, може се сматрати да је челик заварљив ако тврдоћа у ЗУТ-у не надмаши вредност од 350 НВ, јер се сматра да се до ове вредности не формира мартензит. Ова гранична тврдоћа одговара вредности $CE = 0.45\%$, па се усваја да су челици са $CE < 0.45\%$ заварљиви без примене посебних мера, док су челици са $CE > 0.45\%$ условно заварљиви или су незаварљиви.

Спречавање појаве структуре каљења при трансформацији, се обично постиже избором оптималних параметара заваривања или предгревањем, а то значи, смањењем брзине хлађења у области најмање стабилности аустенита, односно повећањем времена хлађења ($t_{8/5}$).

3.1.1.в Оцена заварљивости челика повишене јачине

У данашње време у примени су висококвалитетни конструкциони челици, који имају изузетно висок напон течења (R_{eH}), што их чини веома применљивим у овим конструкцијама где се захтева велика носивост и смањена тежина (нпр. конструкције у транспортној техници). У почетку су се, за прве заварене конструкције, користили челици који су имали напон течења до 250 МПа. Касније су развијени све квалитетнији и јачи челици, као што су:

- 1) Угљенично-мангански (C-Mn) челици, умирени алуминијумом, $R_{eH} = 300-360$ МПа;
- 2) Микролегирани (финозрни – ТМ) челици, који су добијени металуршко-механичким поступком (микролегирањем и нормализацијом, односно контролисаним ваљањем), чиме им је напон течења повећан до приближно 450 МПа.
- 3) Нисколегирани бејнитни челици (први пут произведени у Енглеској), са напоном течења не већим од 550 МПа.
- 4) Нисколегирани побољшани (Q + T) челици чији напон течења може бити и 700 МПа.

У стандардима се не дају потпуни подаци о погодности дотичног челика за заваривање, тј. даје се само препорука о евентуалној потреби за предгревањем, али се то не доводи у везу са технолошким параметрима заваривања, као ни са захтеваним радним карактеристикама конструкције. Иначе код челика повишене јачине заварљивост се одређује на основу параметарских једначина.

3.1.1.г Процена склоности челика ка образовању прслина

Прслине су једна од најчешћих грешака у завареним спојевима. Обично се јављају кад температура споја који се хлади у једно од следећа два температурска подручја: прво температурско подручје се налази одмах испод солидус температуре, а друго у распону од око 300°C до собне температуре. Прслине на високим температурама се јављају пре свега због тога што је на тим температурама метал јако деформационо слаб и има веома ограничену пластичност. Угаони шавови, излазни кратери и зона утицаја топлоте су посебно осетљиви на ову врсту прслина. Појава прслина на нижим температурама, тј. појава хладних прслина, јесте карактеристична за коренске заваре сучеоних спојева у зони утицаја топлоте и у директној је вези са присуством дисоцираног водоника у металу шавова.

3.1.2 Практичне методе за оцену заварљивости

Експериментално одређивање заварљивости, своди се на проучавање појаве настанка прслина у завареном споју, и то:

- 1) у току процеса заваривања,
- 2) непосредно после заваривања и
- 3) после одређеног времена.

Будући да се прслине могу појавити и при накнадном загревању, тј. при термичкој обради завареног споја, као и у условима експлоатације (при радним напрезањима), то се процена заварљивости применом практичних метода проширује и на ове случајеве.

Због формирања тврдих и кртих структура у завареном споју, долази до појаве пада пластичности основног материјала на месту спајања заваривањем, па је јасно да је појава прслина на таквим местима резултат пре свега напонско-деформационог стања.

За оцену заварљивости могу се користити различити критеријуми, који се заснивају на:

- одређивању критичне деформације у функцији температуре при заваривању и
- одређивању критичног напона при коме долази до појаве прслина.

Број метода за оцену заварљивости је изузетно велики и све оне утврђују врсту и степен промене испитиваног пробног узорка. Практичне методе испитивања, углавном подразумевају излагање пробе термичком циклусу, и то:

- локално и
- по целом профилу.

Да би се утврдио степен насталих промена, користе се стандардне методе испитивања: затезање, савијање, мерење тврдоће, мерење ударне жилавости и тсл. Испитивања се изводе пре и после термичког дејства, а по потреби се испитује и појава прелина у шаву и околини.

3.2 Технологија MAG заваривања

Код MAG-заваривања, електродна жица пречника 0,8-2,5mm истовремено је и додатни материјал. На високој температури у луку, део гаса угљен-диоксида (CO_2) се разлаже на CO и O_2 , што значи да је CO_2 активан у току процеса заваривања. Ови начини заваривања заснивају се на континуалном довођењу и топљењу електродне жице у заштити активног гаса (CO_2 -MAG). Извор напајања и помоћна опрема исти су за MAG и MIG, али су различити додатни материјали и заштитни гасови. Уопштено говорећи при заваривању топљивом електродном жицом, могу да се користе следећи заштитни гасови: аргон (Ar), хелијум (He), угљен-диоксид (CO_2) и понекад азот (N_2 -само за Cu) или пак одређене смеше ових гасова. Методима MAG је техно-економски оправдано заваривати лимове, плоче и конструкционе профиле од нискоугљеничких и нисколегираних челика.

Предност MAG у односу на REL углавном је у лакшој механизацији и аутоматизацији, што омогућава знатно већу брзину заваривања, а тиме и продуктивнији рад. MAG заваривање се може механизовати тако што се жица континуално доводи у жлеб помоћу малог електромотора и одговарајућег механизма, па заваривачу остаје само да равномерно помера заваривачки пиштољ дуж линије спајања. У првим годинама примене MAG/MIG-а коришћене су само пуне жице (челичне, алуминијумске, бакарне, зависно од основног материјала), али се последњих деценија све више употребљавају и пуњене жице (челичне фолије се пуне спрашеним металима и топитељима: рутилон (TiO_2) и кречњаком (CaCO_3) и др.

У случају заварених конструкција, међу којима доминантно место имају челичне заварене конструкције, тај захтев условљава и увођење материјала бољих својстава. С обзиром на то да је пројектовање и даље засновано на чврстини материјала, то значи да је увођење челика повишене и високе јачине могућност да се испуни захтев економичности конструкције. Искуство је показало да је за челике веће јачине

(чврстоће) потребно мењати и приступ у пројектовању конструкције, али и у пројектовању технологије. У примени челика повишене и високе јачине у завареним спојевима, проблем прслина је постао значајно ограничење.

У примени челика повишене и високе јачине мења се приступ, па се стицањем сазнања о њиховим особинама и отпорности према прслинама пре њиховог увођења омогућава боље искоришћење и испуњење захтева у погледу сигурности у експлоатацији и економичности конструкције.

Широке могућности избора додатног материјала, поступка заваривања, параметара заваривања и тражених својства споја приморавају данас конструкторе, технологе и произвођаче на тесну међусобну сарадњу. Циљ је одређивање технички најприкладније и најекономичније комбинације својстава: додатни материјал–поступак заваривања–параметри заваривања, а тиме и задовољавајућа својства заварене конструкције као целине.

Варирањем параметара заваривања, утиче се како на квалитет завареног споја, тако и на утрошак енергије, односно на трошкове заваривања, те је због тога потребно параметре заваривања одредити тако да, осим тражених својстава и довољне поузданости, свеукупни трошкови заваривања (материјала и енергије) буду што мањи.

Основу сваког поступка заваривања чини избор примарне и секундарне енергије, односно топлоте унешене предгревањем и топлоте унешене извором енергије заваривања у основни материјал, карактеристичан специфичним топлотним својствима која узрокују формирање температурског поља. То поље непосредно утиче на структуру материјала, чије карактеристике дефинишу механичка својства метала шава, а посебно ЗУТ-а.

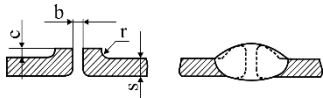
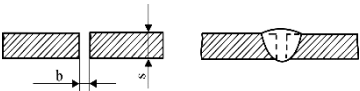
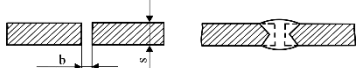
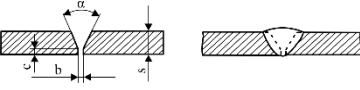
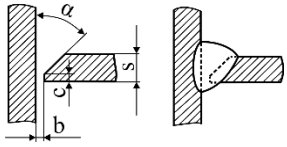
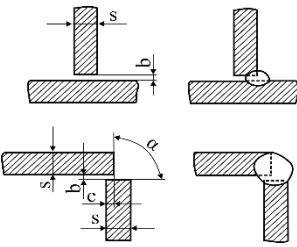
Познавање процеса простирања топлоте и формирања температурског поља могу дати одговоре на питање каква се структура може очекивати на основу параметара заваривања, и обрнуто, одговорити какве је параметре требало употребити да би се формирало температурско поље које ће осигурати повољну структуру метала шава и ЗУТ-а.

3.2.1 Прорачун технолошких параметара MAG заваривања

При извођењу сучеоних спојева у хоризонталном положају и угаоних спојева у коритастом и хоризонтално–вертикалном положају, параметри MAG заваривања се

могу приближно израчунати на основу полазних података као што су врста споја, пречник електродне жице и облик шави. Најпре се, зависно од дебљине делова и врсте споја, бирају облик и димензије жлеба, према подацима датим у табlici 3.1.

Таблица 3.1 Припрема страница за заваривање у заштити CO_2

Врста шави	Попречни пресек жлеба и шави	Димензије жлеба				
		s	α	b	c	r
		mm	°	mm		
Рубни шав		≤ 2		≤ 0.5	s+1	s-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 табlice 3.2 усваја попречни пресек појединих зава и одређује укупан број пролаза. При томе треба поћи од препорука за избор пречника електродне жице (d) зависно од дебљине (s) завариваних делова у сучеоном споју, односно од дебљине шави (a) код угаоних спојева таблица 3.3 и 3.4.

Таблица 3.2 Гранични пресеци појединих завара

Врста споја	Врста завар	Допуштени пресек завар у mm ² за:			
		Положај "а" за пречник жице:			
		d = 1.2 mm		d = 1.6 mm	
Сучеони	Корени завар	11.0		11.0	
	Завари испуне	6.25-64.0		15.0-64.0	
	Покривни завар	15.0-64.0		15.0-64.0	
Угаони	Завари попуне Покривни завар	Положај "б"		Положај "в"	
		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. 0.11/82 разликују се положаји:

а) хоризонталан

б) коритаст

в) хоризонтално-вертикалан

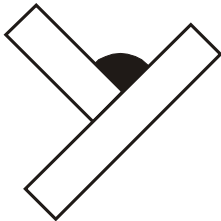
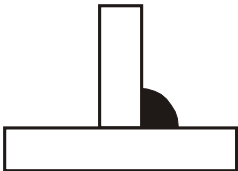


Таблица 3.3 Избор пречника електродне жице – сучеони спој

s, mm	≤2	2-20	10-30
d, mm	0.8	1.2	1.6

Таблица 3.4 Избор пречника електродне жице – угаони спој

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

3.2.2 Рачунски параметри MAG заваривања

У вези са дебљином угаоних шавова треба се држати следећих препорука (односе се на све методе електролучног заваривања): за носећи угаони шав његова дебљина мора бити најмање 3 mm ($a_{\min} = 3 \text{ mm}$), односно највише $a_{\max} = 0.7 \cdot s_{\min}$, где је $s_{\min}$ – најтањи део у споју. Ако се из конструкционих разлога тражи да буде $a_{\max} > 5 \text{ mm}$, угаони шав треба извести са два или више пролаза.

❖ Избор жлеба и граничне површине пресека завара

За MAG 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. У табелици 3.1 дати су неки од

најчешће коришћених спојева односно жлебова. Припрема страница жлеба може се изводити механички, термички или комбиновано. Механичким поступцима, странице се закошавају скидањем струготине. Могу се машински припремати готово сви метали, уз висок квалитет обраде али и релативно високе трошкове. Термичко закошење страница изводи се гасним резањем у смеси ацетилена и кисеоника (или других гасова), резањем плазмом илиу најновије време ласерским сечењем или воденим млазом. Комбиновани поступци – гасно резање па потом машинска обрада, се изводе у случају посебних захтева у погледу квалитета жлеба, односно споја. Пре заваривања, странице жлеба и непосредну околину треба очистити и одмастити, а по потреби и предгрејати гасним пламеном на 100-150°C (око 5 мин/мм дебљине), ради уклањања влаге.

❖ *Маса завара на дужини од 1 cm*

На основу усвојеног пресека одговарајућег завара (A_z) може се израчунати маса завара (M) која је потребна да се попуни део жлеба дужине $L = 1 \text{ cm}$:

$$M = \rho \cdot V = \rho \cdot A_z \cdot L, \text{ g}$$

где је:

$\rho = 7.85 \text{ g/cm}^3$ – густина челичне електродне жице и

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

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

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

❖ *Количина претопљене електродне жице у јединици времена*

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

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

$$m_{1.6} = 0.64 + 0.55 \cdot M - 0.055 \cdot M^2, \text{ g/s (за жицу } d=1.6 \text{ mm).}$$

Танки лимови дебљине до 4 mm заварују се без припреме страница у хоризонталном положају (до 3 mm у осталим положајима), а за лимове већих дебљина израђују се V, X и K–жлебови, слично као за REL–заваривање. Углови отвора жлебова су 40-50°, а зазор између лимова 0-2.5 mm. Претходно усвојене и израчунате величине

омогућавају да се израчуна брзина заваривања, као и брзина топљења електродне жице.

❖ **Брзина заваривања**

Брзина заваривања рачуна се по изразу:

$$v_z = \frac{m \cdot 6000}{A_z \cdot \rho}, \text{ cm / min},$$

где је:

m – маса депонованог метала у g/s,

A_z – површина зава у mm^2 ,

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

❖ **Брзина топљења електродне жице**

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

$$v_t = \frac{0.012732 \cdot A_z \cdot v_z}{d^2}, \text{ cm / min}.$$

❖ **Број пролаза**

Број пролаза може се одредити на два начина:

Према искуственим подацима за различите дебљине лима (таб. 3.5)

Таблица 3.5 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 (A) и зава (A_z):

$$n = \frac{A}{A_z},$$

где је: $A_z = 0.0625 - 0.64 \text{ cm}^2$ зависно од пречника жице, врсте жлеба и др. (таб. 3.5).

Најзад се израчунавају енергетски параметри заваривања у заштити гаса CO_2 :

- јачина струје за електродну жицу пречника $d = 1.2 \text{ mm}$,
- јачина струје за електродну жицу пречника $d = 1.6 \text{ mm}$ и
- 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:

$$I_{1.2} = 308 \cdot \log V_t - 17, \text{ A}$$

$$I_{1.6} = 378 \cdot \log V_t + 26, \text{ A.}$$

❖ **Напон заваривања (радни напон):**

$$U = 14 + 0.05 \cdot I, \text{ V.}$$

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

С обзиром на то да се CO_2 – поступак све више примењује, и да у неким областима потискује гасно заваривање, у литератури се може наћи више различитих метода за одређивање основних параметара заваривања. Тако се према методи W. Andersa прорачун технолошких параметара заваривања у заштити CO_2 разликује од изложеног у следећем:

❖ **Количина претопљене електродне жице**

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

$$m = 2.5 \cdot \sqrt{\frac{A_z \cdot \rho}{500}}, \text{ g / s,}$$

где је:

A_z – усвојени попречни пресек зава у mm^2 и

ρ – густина материјала у g/cm^3 .

❖ **Брзина заваривања**

Брзина заваривања рачуна се према изразу:

$$v_z = \frac{3600 \cdot m}{A_z \cdot \rho}, \text{ m / h.}$$

❖ **Брзина топљења електродне жице**

Брзина топљења електродне жице:

$$v_t = 649.1 \cdot \frac{m}{d^2}, m/h,$$

где је: d–пречник електродне жице у mm.

❖ *Јачина струје заваривања*

Јачина струје заваривања:

$$I = 236 \cdot m^{0.737}, A$$

❖ *Напон заваривања*

Напон заваривања (радни напон):

$$U = 26.6 \cdot m^{0.26}, V$$

При прорачуну параметара заваривања по методи W. Andersa треба пажљиво изабрати површину попречног пресека заваара у функцији од пречника жице, врсте заваара, положаја заваривања, прорачунати количину претопљене електродне жице m ($m_{\max} = 2.5 \text{ g/s}$), јер сви остали параметри су директно зависни од ових величина.

3.2.3 Основни материјал

Hardox челични лимови (плоче) су намењени за висока оптерећења на хабање што им омогућава висока тврдоћа, висока чврстина и одлична жилавост. Примењују се за опрему која се користи у експлоатацији руда, и која је изложена различитим врстама напрезања на хабање, клизање и ударна оптерећења, често комбинована са великим деформацијама. Примена челичних плоча од Hardox-а са тврдоћом од 400 или 500 HB може издржати најтеже услове хабања. Hardox челик је пет пута постојанији од плоча израђених од меких нискоугљеничних челика, док је Hardox 500 три пута постојанији од Hardox 400. Чврстина (издржљивост) Hardox плоча је веома велика, као и висок степен отпорности на различитим температурама у најекстремнијим условима. Ово чини Hardox челике нарочито отпорним на ударна оптерећења.

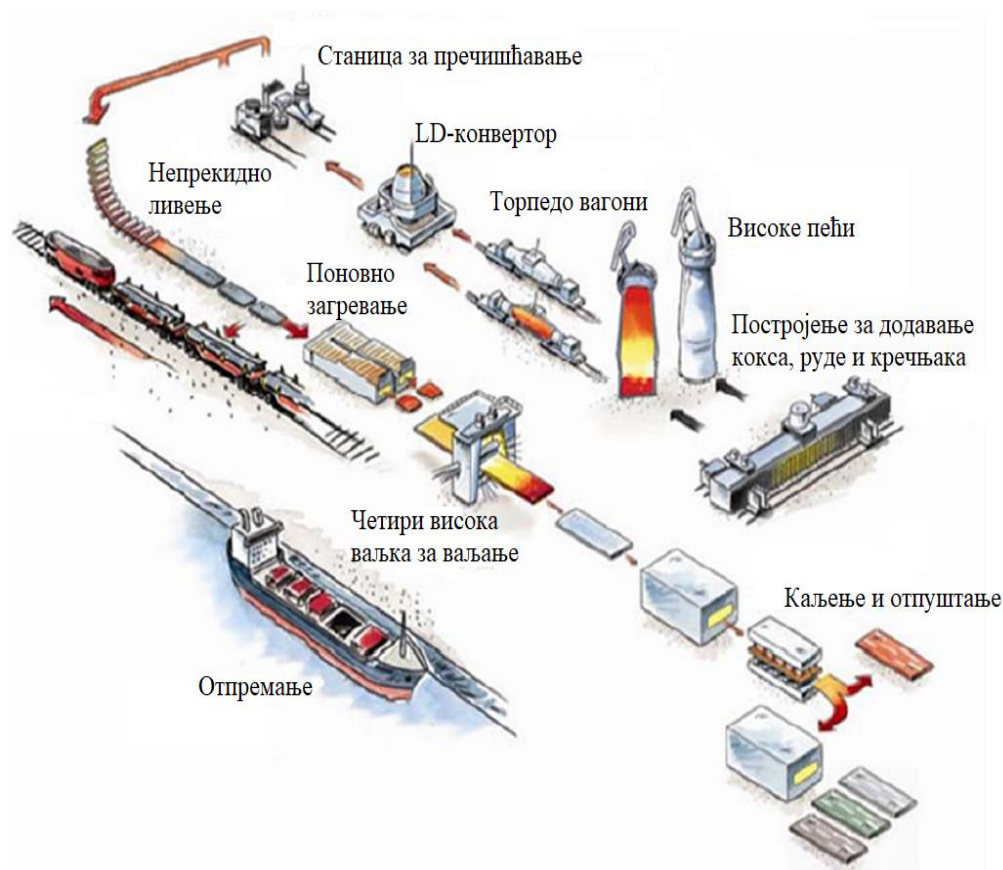
Hardox 450 није стандардизован SRPS стандардом, па је његов хемијски састав одређен испитивањем у Централној лабораторији Заставе у Крагујевцу на оптичком емисионом спектрометру (квантометру)(tab. 3.6).

Таблица 3.6 Хемијски састав челика *Hardox 450*

Дебљина плоче, mm	Хемијски састав	Метода	Опрема	Проценат, %
6	C	SRPS C.A1.011	D.O.4L.28	0.18
	Mn	SRPS C.A1.011	D.O.4L.28	1.28
	Si	SRPS C.A1.011	D.O.4L.28	0.57
	S	M.K.3.L.01	D.O.4L.12	0.002
	P	SRPS C.A1.011	D.O.4L.28	0.005
	Al	SRPS C.A1.011	D.O.4L.28	0.039
	Bo	SRPS C.A1.011	D.O.4L.28	0.0026
	Nb	SRPS C.A1.011	D.O.4L.28	0.027

3.2.4 Производња *Hardox* челика

Класе *Hardox* челика производе се у Шведској. Израђују се по строго контролисаном хемијском саставу и тачно дефинисаним производним фазама. *Hardox* челици се производе ливењем у инготе. Пре ваљања, инготи се загревају на приближно 1200°C, а затим прогресивно ваљају до захтеваног коначног облика, тј. у облику плоча или профила. Температуре загревања слабова обично су ниже у поређењу са уобичајним ваљањем. За *Hardox* челике контролисано ваљање завршава се у аустенитном подручју. Први део ваљања изводи се у подручју рекристалисаног аустенита, (изнад 950°C), где се рекристализација обавља већ при ваљању, док се аустенитно зрно смањује редукцијом дебљине улошка. Ваљање се затим наставља у подручју метастабилног аустенита (између $A_{\gamma 3}$ и $A_{\gamma 1}$), где долази до хладне деформације, а аустенитна зрна остају деформисана. За време трансформације свако деформисано аустенитно зрно даје многе феритне зачетке по кристалним границама и деформацијским појасевима који настају у унутрашњости кристалних зрна. После завршене трансформације ствара се велики број феритних зрна која побољшавају својства јачине и жилавости. На слици 3.1 дат је шематски приказ процеса производње ових челика.



Слика 3.1 Шематски приказ процеса производње Hardox челика

Hardox челици су прави избор за производњу радних делова машина и уређаја изложених интензивном хабању (најчешће јакој абразији). Висока отпорност на абразивно хабање и тврдоћа Hardox челика омогућава примену код различитих радних делова грађевинских машина, као што су багери, ровокопачи, дробилице, сепаратори, млинови и тсл. Тврдоћа и јачина ових челика остварена је побољшањем (каљење + отпуштање). Осим тога, ови челици су погодни за пластичну прераду, машинску обраду и заваривање. Ове јединствене особине Hardox челика омогућавају израду производа-радних делова са високом отпорношћу на хабање и релативно ниском ценом. Hardox 450 није намењен за рад на температурама изнад 250°C. Тада, долази до пада тврдоће и јачине, тј. повољних својстава остварених примарном производњом.

Узимајући у обзир дебљину лима, заварљивост основног материјала, енергетске могућности поступка заваривања и др. одабран је поступак полуаутоматског заваривања топливом електродном жицом у заштити активног гаса. Скраћена ознака овог поступка је MAG (Metal Active Gas).

3.2.5 Резање Hardox лимова и плоча

За резање Hardox плоча могу се применити сви познати поступци (таб. 3.7). Како ови челици добијају своја својства кроз процесе посебне термичке обраде, у обзир треба узети и количину топлотне енергије за резање, зависно од методе резања. Због тога посебну пажњу треба обратити на утицај примењене методе сечења и опасност од појаве тврдих и кртих фаза.

Таблица 3.7 Примењени поступци резања и најважнији параметри

Поступак резањем	Дебљина mm	Брзина резања mm/min	Ширина резања mm	Толеранција mm	Ширина ЗУТ-а mm
Абразивно воденим млазом	4-150	8-150	1-3	± 0.2	0
Ласером	4-20	600-2200	<1	± 0.2	0.4-3
Плазмом	4-40	1200-6000	2-4	± 1.0	2-5
Гасно	4-150	150-700	4-10	± 2.0	4-10

Абразивно резање воденим млазом је најбоља метода када постоји ризик од појаве прслина при резању, и зато се овај поступак препоручује за дебеле плоче од Hardox челика. Површина резања је доброг квалитета. Резање ласером, са опремом која је данас ограничено доступна код нас, примењује се за лимове дебљине до 20 mm. Резање плазмом може да се користи за плоче дебљине до 40 mm. Површина резања је доброг квалитета, али странице имају тенденцију закошења.

Гасно резање (гориви гас, земни гас или ацетилен) се најчешће користи и има широко поље примене. Може да се примени за лимове и плоче свих дебљина. При гасном резању ризик од настанка прслина повећава се са порастом дебљине и тврдоће плоче. За спречавање настанка прслина неопходно је применити предгревање или смањење брзине резања. Ширина зоне предгревања је најмање 100 mm са сваке стране планираног реза, пре почетка, и одржавање препоручене температуре предгревања до завршетка резања. Ризик од настанка прслина услед резања се смањује регулисаним хлађењем, зашта је погодна употреба електроотпорног загревања. Предгревање може такође да се изводи помоћу гасног пламена. Смањењем брзине резања (за око 20%), такође потпомаже предгревању зоне реза и смањује ризик од настанка прслина (таб.3.8).

Резање под водом може да се примени и плазменим и гасним поступком сечења. У оба случаја ширина ЗУТ-а се смањује. Вода делује као расхладно средство и обезбеђује уједначенију температуру плоче.

Таблица 3.8 Редукована брзина сечења (mm/min) са могућношћу употребе без предгревања

Дебљина плоче, mm	<40	40	45	50	60	70	80
Hardox 450	Без редукције	230	200	180	170	160	150
Hardox 400	Без редукције	Без редукције	230	210	200	190	180

3.2.6 Савијање Hardox лимова и плоча

Минимални препоручени радијуси алата (R) и калупни отвори ширине (W) када је линија савијања управна (вертикална) или паралелна на правац ваљања (таб. 3.9).

Таблица 3.9 Минимални препоручени радијуси алата (R) и калупни отвори ширине (W) за челик Hardox 450 [9]

Дебљина mm	Вертикално R/s		Паралелно R/s		Вертикално W/s		Паралелно W/s	
	Hardox 450	Hardox 400	Hardox 450	Hardox 400	Hardox 450	Hardox 400	Hardox 450	Hardox 400
$s < 8$	3.5	2.5	4.0	3.0	10.0	8.5	10.0	10.0
$8 \leq s < 20$	4.0	3.0	5.0	4.0	10.0	10.0	12.0	10.0
$s \geq 20$	5.0	4.5	6.0	5.0	12.0	12.0	14.0	12.0

3.3 Избор додатног материјала за заваривање

Избор додатног материјала је у складу са механичким својствима основног материјала и његовој осетљивости на настанак хладних прслина изазваних водоником из метала шава. Код примене ручног електролучног заваривања обложеним електродама препоруке су да се користе нисководоничне базичне сушене електроде које имају садржај водоника $\leq 5 \text{ ml/100 g}$ метала шава. То се постиже прецизно регулисаним сушењем и употребом аустенитних електрода. Код MAG заваривања додатним материјалом у облику пуних жица може се постићи овако низак садржај водоника у металу шава. Садржај водоника у металу шава за друге типове додатних материјала, као што су нпр. прашком пуњене жице (MAG), износи онолико колико

произвођачи додатних материјала гарантују. Ако се додатни материјал чува у складу са препорукама произвођача, садржај водоника биће одржан у означеним границама.

Приликом заваривања Hardox челика треба користити додатне материјале који имају повећану жилавост, тј. затезну чврстоћу испод 500 МПа. Овај додатни материјал смањује преостали ниво напона (напрезања) у споју односно постиже се већа деформабилност метала шавова, тако се смањује могућност настанка хладних прелина. Ако је шав изложен интензивном хабању, за завршни слој попуне могу да се понекад користе електроде за тврдо наваривање. Предгревање треба избегавати коришћењем аустенитног нерђајућег челика. Заваривање Hardox челика аустенитним додатним материјалом могуће је у следећим случајевима:

- ако је радни комад круто укљештен;
- ако се не може применити предгревање;
- ако је дебелина плоче (дела) већа од 60 mm.

У табlici 3.10 приказани су подаци о изабраној жици (електроди) за заваривање.

Таблица 3.10 Избор електроде

Поступак заваривања	MAG				
Произвођач електроде	СЖ, Железара Јесенице, Словенија				
Ознака	VAC 60				
Стандард	EN 440 G3Si1 DIN 8559 SG – 2 AWS A5.18 ER 70 S-6				
Пречник	Ø 1.2 mm				
Струја заваривања	Једносмерна, E+				
Опис електроде	Погодна је за заваривање нелегираних и нисколегираних челика чврстоће до 530 МПа, котловских лимова, цеви, челик за бродоградњу, микролегираних челика и челичних лимова				
Хемиски састав чистог зава, %	C	Si	Mn	P	S
	0.08	0.90	1.50	< 0.025	<0.025
Механичка својства чистог зава	Напон течења R _p , МПа	Затезна чврстоћа R _m , МПа	Издужење A ₅ , %	Жилавост на - 40°C KV, J	
	> 410	510-590	> 22	> 47	

Садржај дифундованог водоника у металу шава при заваривању у заштитним гасовима по литературним подацима за чисту жицу износи 2-7 ml/100g. Уз претпоставку да је складиштење, припрема и употреба додатног материјала строго контролисана, у прорачунима се претпоставља да је садржај дифундованог водоника ограничен на 3 ml/100 g чистог метала шава.

3.3.1 Избор опреме за заваривање

За заваривање је коришћен апарат за електролучно заваривање VarioSinergic 4000 "Fronius", следећих карактеристика:

- називна снага P = 1.1-1.2 kW;
- напон празног хода U_o = 51 V;
- заваривање струјама I = 30-400 A;
- прикључни напон U = 15.5-34 V, 50/60 Hz.

3.3.2 Заваривање челика Hardox 450

Еквивалент угљеника код челика Hardox 450 може се израчунати помоћу следеће једначине:

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

Уобичајене вредности еквивалента угљеника CE Hardox челика за конкретне дебљине лима дате су у таб. 3.11 (S 355 у таб. је дат ради поређења).

Таблица 3.11 Вредности CEV Hardox челика

Ознака Челика	Дебљина, mm	CEV
S355	5-100	0.39-0.43
Hardox 400	4-130	0.36-0.70
Hardox 450	4-80	0.41-0.62
Hardox 500	5-80	0.58-0.68

Hardox 450 може се заваривати свим електролучним поступцима заваривања топљењем. Међутим, није загарантована општа подобност заваривања ових челика, већ се захтевају одговарајуће мере предострожности, почев од избора поступка заваривања, додатног материјала, до режима заваривања и строго контролисаног уноса топлоте тј. линијске (погонске) енергије заваривања. Дакле, при изради одговорних заварених конструкција од Hardox челика потребно је очувати примарне особине тј. очувати јачину, тврдоћу и жилавост (посебно у ЗУТ-у).

У односу на заваривање REL поступком, предност је MAG-а и EPP-а поступака, због једноставнијег управљања процесом контролисања количине унете клочичине топлоте. Утицајни фактори који утичу на механичке карактеристике завареног споја су:

- особине додатног материјала,
- особине основног материјала,
- температура предгревања,
- количина унете топлоте при заваривању,
- међуслојна температура,
- геометрија жлеба,
- вештине заваривача,
- стање заваривачке опреме и тсл.

- Код заваривања Hardox 450 челика потребно је:
- одржати тврдоћу зоне утицаја топлоте (ЗУТ-а) и
- остварити повољну (тражену) жилавост (ЗУТ-а).

Технолошка решења за заваривање челика Hardox 450 усмерена су на:

- спречавање настанка хладних прслина и
- одређивање услова заваривања за добијање захтеваних особина (тврдоће и жилавости) ЗУТ-а које обезбеђују поузданост завареног споја.

4. ТЕРМИЧКИ НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ ПРИ ЗАВАРИВАЊУ ТОПЉЕЊЕМ

4.1. Сопствени напони и деформације при заваривању топљењем

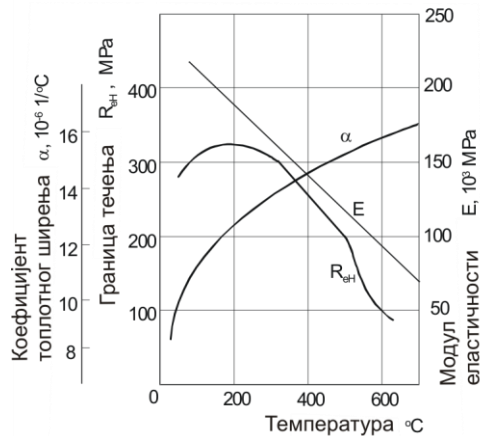
При спором и равномерном загревању слободног металног комада, настаје равномерно издужење без појаве унутрашњих напрезања. Супротно томе, ако је материјал спречен да се при загревању слободно шири, промене димензија биће немогуће, онда ће се појавити унутрашње напрезање, односно напони. Самим тим што се заваривање остварује локализованим загревањем и хлађењем, то ствара неравномерно температурско поље, односно ометено ширење и скупљање при загревању и хлађењу. Тиме се ствара унутрашње напрезање тј. **термички напони** који су сразмерни разлици температура (ΔT) у појединим зонама завареног споја:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

где је: E - модул еластичности, а α - коефицијент линеарног термичког ширења.

Величине E и α , као и напон течења R_{eH} зависе од температуре (сл. 4.1), односно температурског поља, тако да је проблематика термичких напона и деформација веома сложена како са гледишта теоријске анализе тако и практичне провере.

Поред термичких напона могу се у завареном споју појавити и локални структурни напони као последица преображаја аустенита у фазе различитих специфичних запремина (перлит, бејнит, мартензит). Мартензит има највећу специфичну запремину, те се кад је опкољен другим стру-ктурним фазама не може слободно ширити. Структурни напони су занемарљиво ниски при заваривању нискоугљеничних челика, јер се код њих фазне промене одвијају у пластичном подручју ($T > 600^\circ\text{C}$), те се околни материјал локално сабија (незнатан деформациони отпор) уз готово слободно ширење новостворених фаза. Супротно томе, код ниско и високолегираних челика фазне се промене дешавају у еласто-пластичном или еластичном подручју (потхлађени аустенит), што спречава слободно ширење управо образованог мартензита тако да он остаје притиснут.

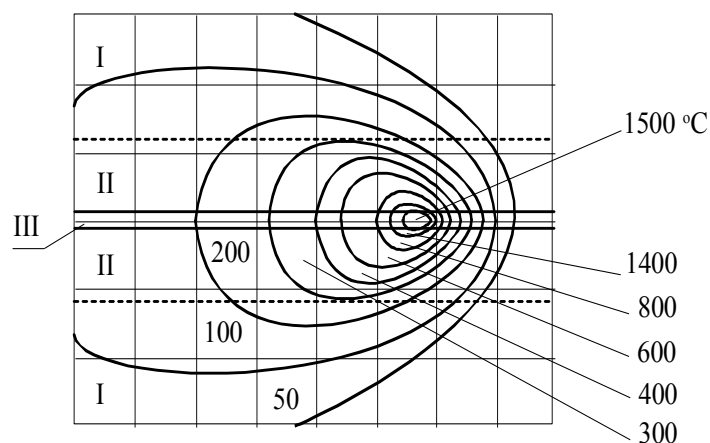


Слика 4.1 Особине челика на повишеним температурама

Структурне промене при заваривању челика не зависе само од његовог хемијског састава и температуре преображаја, већ и од брзине хлађења при температури најмање стабилности аустенита. Зато се у металургији заваривања уводи појам "кинетики промене аустенита", чиме се истиче да на преображај аустенита утиче и време. Тако се нпр. при веома брзом хлађењу ЗУТ-а са 800-500°C добија мартензит, при нешто споријем хлађењу у бејнит и при још споријем хлађењу перлит. Стога се при заваривању закаљивих челика морају предузети мере да се продужи време хлађења од 800-500°C, тј. да се смањи брзина хлађења (углавном предгревањем пре заваривања).

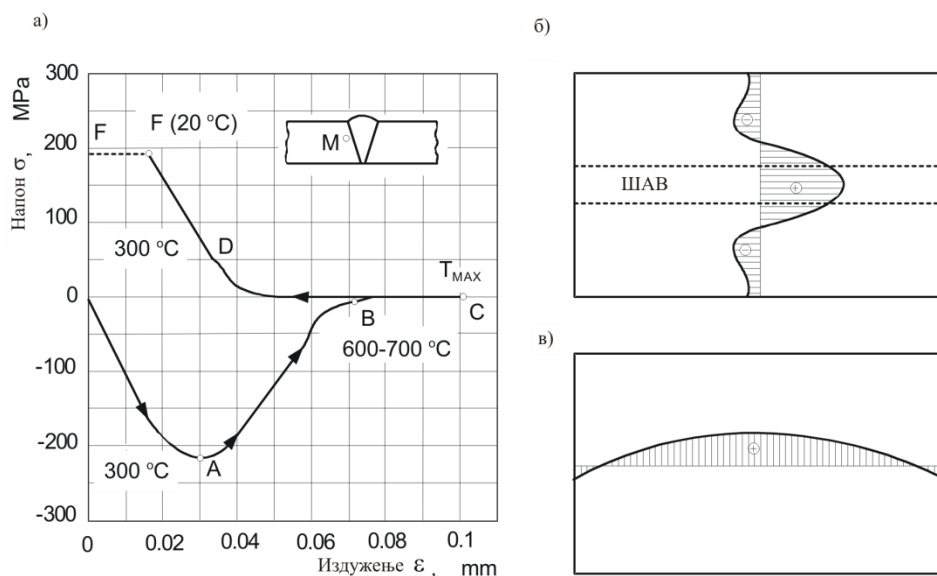
4.2 Термички и структурни напони

Термички и структурни напони зову се **сопствени напони** јер потичу од процеса заваривања, а не од спољних сила и момената. Сопствени напони увек су праћени одговарајућим деформацијама како за време процеса заваривања тако и по окончању тог процеса. За време самог процеса заваривања они се мењају како по величини тако и по знаку па се зову прелазни напони, док се напони који се трајно задржавају после заваривања и хлађења споја називају заостали сопствени напони. И једни и други неповољно делују на особине завареног споја; прелазни напони могу довести до појаве прслина, нарочито на топло, а заостали напони могу изазвати промену димензија и облика концентрацију напона, прерасподелу напонског стања, прслине и крти лом, поготову ако прва експлоатација заварене конструкције започиње на ниским температурама.



Слика 4.2 Температурско поље око покретног топлотног извора

Приликом анализе термичких напона и деформација треба имати у виду чињеницу да код конструкционих челика при температури нижој од 300°C настају еластичне деформације, при температури између 300 и 600°C еласто-пластичне и изнад 600°C пластичне деформације. Сходно томе, температурско поље око покретног топлотног извора (сл. 4.2) може се поделити на три зоне, у којима термички напони изазивају све врсте наведених деформација. Зона I обухвата област (симетричну у односу на осу шави) која је у току заваривања била загрејана до 300°C , што значи да се ту појављују еластичне деформације; зона II је најкритичнија област завареног споја, јер су у њој биле достигнуте температуре од 300 до 1500°C што условљава појаву како еласто-пластичних тако и чисто пластичних деформација; штавише у тој зони се на изотерми 600°C мења знак заосталих термичких напона од затежућих у шаву и околини у притискујуће у даљим тачкама; најзад се у зони III постижу температуре изнад тачке топљења, те се очвршћивањем тог растопа добија метал шави чије су особине зависне од металуршких, напонско-деформационих, технолошких и других фактора.



Слика 4.3 Прелазно напонско-деформационо стање тачке ЗУТ-а (а), заостали попречни (б) и уздужни напони (в)

Ако се посматра тачка "М" у ЗУТ-у, прецизније у основном материјалу испод зава (сл. 4.3), уочава се да је она у фази загревања изложена притиску због знатно веће запремине растопа него чврсте фазе. Тај притисак ствара напоне и деформације који су у линеарној вези до око 300°C. Даљим порастом температуре смањује се деформациони отпор материјала у тачки М, те и при nižем напону настају велике деформације. Деформациони отпор у пластичном подручју (600-700°C) изузетно је низак па су и деформације релативно велике чак и при напону блиском нули. Крајња тачка "С" на апсцисној оси одговара максималној прелазној деформацији проузрокованој највишом температуром одређеном из температурског циклуса за тачку М (сл. 4.3). После постизања максималне температуре, топлотни извор се удаљава од тачке М те настаје фаза хлађења, а при температури око 600°C притискујући напони прелазе у затежуће. Управо је то прелазно напонско-деформационо стање, критично за појаву прслина, како у шаву тако и у ЗУТ-у. Од температуре 300°C па до околне температуре зависност σ - ϵ опет је линеарна јер тачка М залази у зону еластичног затезања. Најзад, када се заварени спој охлади до околне температуре остају последице: трајно попречно скупљање и заостали напони који могу достићи напон течења.

5. ПРАКТИЧНА ИСПИТИВАЊА ОСНОВНОГ МАТЕРИЈАЛА И ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

5.1. Испитивања са разарањем

Разликују се контроле са разарањем и без разарања. Контрола са разарањем изводи се на узорцима који се исецају из појединих делова завареног споја, или на споју у целини. Углавном се узорци припремају за механичка и металографска испитивања.

Од механичких проба најчешће се изводе испитивање затезањем, испитивање савијањем, испитивање ударне жилавости, а од металографских макроскопско и микроскопско испитивање.

5.1.1 Испитивање затезањем

Овим се испитивањем одређује отпорност завареног споја на дејство спољних затежућих сила. Уопште се пробом на затезање одређује јачина на кидање (R_m , МПа), издужење (A_5 , A_{11} , %) и сужење (Z , %).

Приликом овог испитивања, најпре се одређују механичке особине основног материјала (сл. 5.1а), а затим завареног споја: на пробама са паралелним (сл. 5.1б) и удубљеним боковима (сл. 5.1в).

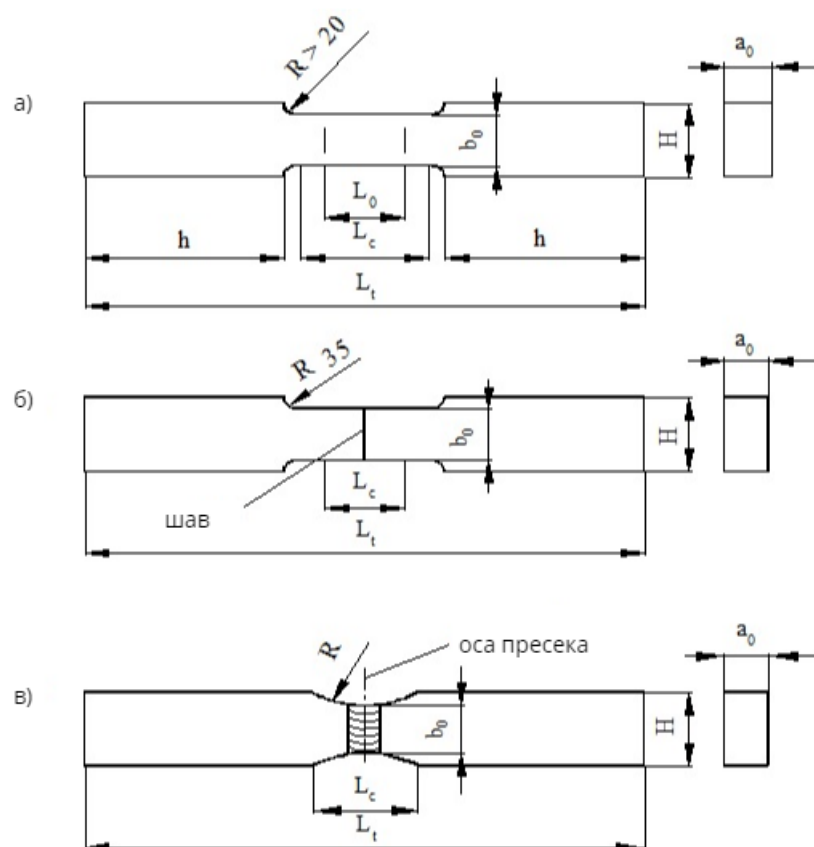
Радна или мерна дужина незаварене пробе треба да буде $L_0 = 5 \cdot d_0$, где је:

$$d_0 = 1.13 \cdot \sqrt{A_0}$$

Остале димензије пробе, у mm, дате су у табlici 5.1.

Таблица 5.1 Епрувете за испитивање затезањем ОМ и заварених спојева.

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



Слика 5.1 Пробе за испитивање затезањем: а) основног материјала, б,в) заварених спојева

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

- **Затезна чврстина (јачина на кидање):**

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}, \text{ МПа.}$$

- **Релативно процентуално издужење:**

$$A_5 = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100, \%$$

- **Напон течења или технички напон течења:**

$$R_p = \frac{F_p}{A_0} \quad \text{или} \quad \left(R_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0} \right), \text{ МПа.}$$

где је:

F_m - максимална сила, N,

A_0 - површина почетног попречног пресека пробе, mm²,

ΔL - трајно издужење прекинуте пробе, mm,

F_p ($F_{p0,2}$) - сила на граници течења, N,

L_0 - почетна дужина пробе, mm.

- **Модул еластичности:**

$$E = \frac{F \cdot L_e}{\Delta L \cdot A_0}, \text{ МПа,}$$

где је:

F - сила затезања, N,

L_e - усвојена мерна дужина екстензомера, mm,

A_0 - попречни пресек пробе, mm,

ΔL - издужење (еластично), mm.

Пробе са паралелним боковима (сл. 5.1б), намењене су за одређивање механичких особина споја у целини; димензије проба (у mm) дате су у (таблици 5.2).

Таблица 5.2 Заварене пробе са паралелним боковима за испитивање затезањем

a_0	до 20	20-50	> 50
b_0	25	30	30
H	35	40	40
L_t	250	300	350
L_C – ширина лица шави + 10 mm			

Пробе са удубљеним боковима (сл. 5.1в) намењене су за одређивање механичких особина самог шави; потребне димензије (у mm) дате су у (таблици 5.3) ($L_t = 250$ mm).

Таблица 5.3 Заварене пробе са удубљеним боковима за испитивање затезањем

a_0	до 5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
b_0	15	25	35	25	20	30
H	30	40	50	40	35	45

Јачина метала шава према изразу:

$$R_m = 0.926 \cdot \frac{F_m}{A_0}, \text{ МПа,}$$

где се коефицијентом 0.926 коригује привидно повећање јачине настало као последица ометеног истезања због облика пробе, тј. троосног напонског стања.

Приликом анализе добијених резултата, треба имати у виду чињеницу да се заварен спој састоји од основног материјала, зоне утицаја топлоте и претопљеног и измешаног основног и додатног материјала (шав, вар). Механичке особине споја у целини не могу се одредити по принципу најслабије карике у ланцу, будући да и најслабија компонента у завареном споју ојачава због ометаног деформисања.

Емпиријска је чињеница да се проба углавном разара у ЗУТ-у, што значи да је основни материјал ослабљен деловањем термичких циклуса. Супротно томе, заварени спојеви са великим дефектима (укључи троске, поре, непровар) кидају се на местима грешки.

Издужење се при испитивању не мери, јер се проба састоји из три различита материјала (ОМ, ЗУТ, шав), који се и друкчије издужују. Будући да је реч о материјалима различитих јачина и дуктилности, каже се да је заварен спој механички анизотропан. Степен нехомогености изражава се *коефицијентом механичке неравномерности* (k_m):

$$k_m = \frac{R_{0.2}^s}{R_{0.2}}$$

$k_m < 1$ - слабији шав од основног материјала

$k_m = 1$ - хомоген спој

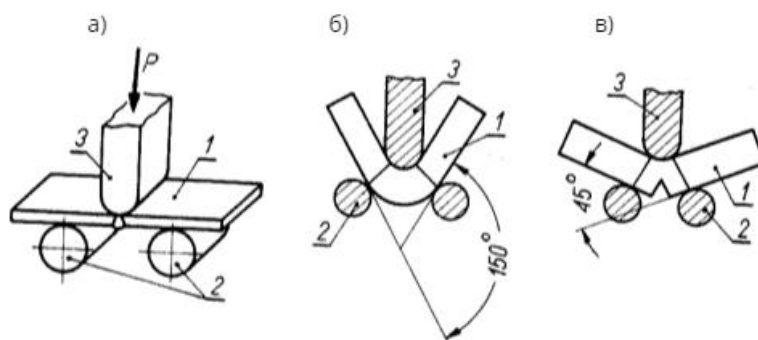
$k_m > 1$ - јачи шав од основног материјала

где су : $R_{0.2}^s$ и $R_{0.2}$ - технички напон течења шава и ОМ.

5.1.2 Испитивање савијањем

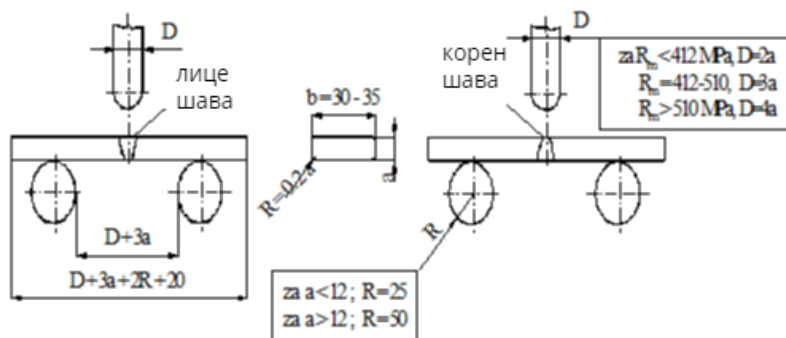
Резултати добијени при испитивању савијањем служе за процену пластичности завареног споја. Заварени узорци се после одговарајуће припреме подвргавају дејству силе савијања (сл. 5.2). Ако се за време савијања пробе постигне најмања тражена вредност угла савијања без појаве прслине, то је резултат испитивања позитиван

(сл. 5.2б). Ако се у току испитивања уоче у шаву мале прслине (сл. 5.2в) резултат је негативан под условом да је угао савијања мањи од траженог.

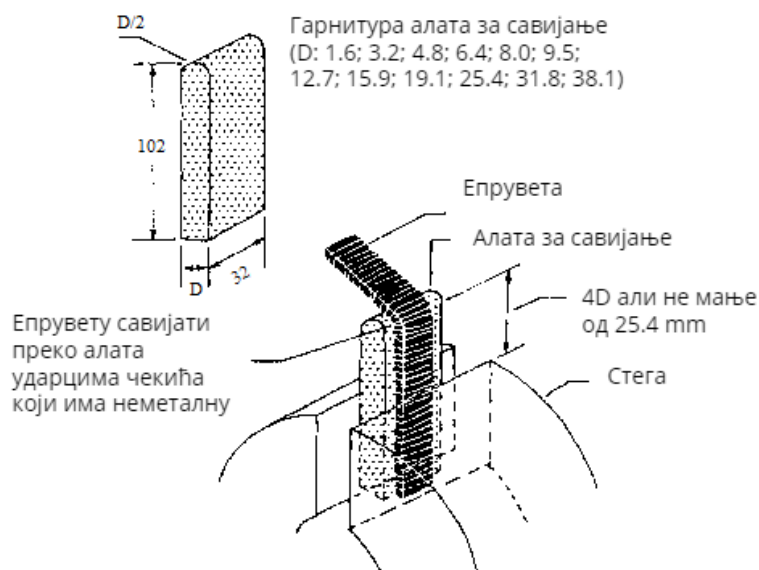


Слика 5.2 Испитивање савијањем: а) почетни положај, б) проба без грешки у шаву, в) прскање шаву при малом углу савијања; 1- заварена проба, 2- ваљци за ослањање, 3- притискивач

Испитивање савијањем које има за циљ да се одреди деформациона способност шаву и зоне утицаја топлоте, изводи се према стандардизованим условима датим на слици 5.3. Две пробе, једна са лицем шаву у зони затезања, а друга са коренским шавом у тој зони, испитују се непрекидним савијањем брзином око 2 mm/s, све до појаве прслине величине преко 2 mm. Мера пластичности је угао савијања при појави прслине.



Слика 5.3 Испитивање савијањем



Слика 5.4 Радионичка проба савијања са шавом на радијусу

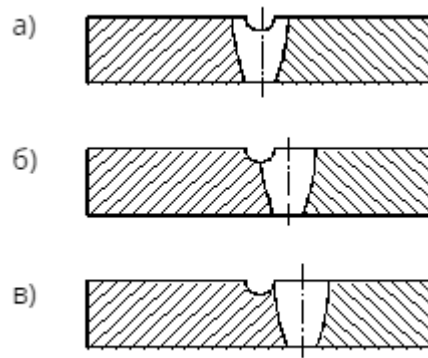
За разлику од стандардизованих проба које се изводе на лабораторијским машинама, радионичко испитивање може се извести ручно помоћу чекића, стеге и алата за савијање (сл. 5.4). Овим се испитивањем најлакше може проценити пластичност завареног споја, грешке налепљивања, грешке при метализацији, наваривању, али и проверити стручна способност заваривача.

Начин испитивања приказан је на слици 5.4. Једино што се посебно мора направити гарнитура алата радијуса од 2 до 35 mm, што значи од веома оштре до благе кривине. Испитивани узорак се савија ударцима дрвеног чекића или чекића са тврдом композитном плочом на радној површини. Гарнитура наведених алата служи и да се одреди минимални радијус савијања лима без опасности од појаве површинских прслина. Ово је битно да би се одредило гранично савијање танких или дебелих лимова у оквиру припрема профила за заваривање.

5.1.3 Испитивање ударне жилавости

Циљ овог испитивања је да се одреди отпорност материјала на дејство ударних динамичких сила. Стандардизована ударна жилавост одређује се на сучеоним спојевима дебљине преко 10 mm, јер то одговара стандардном попречном пресеку пробе.

Одређује се жилавост: метала шава, зоне стапања и зоне утицаја топлоте (сл. 5.5 а,б,в).

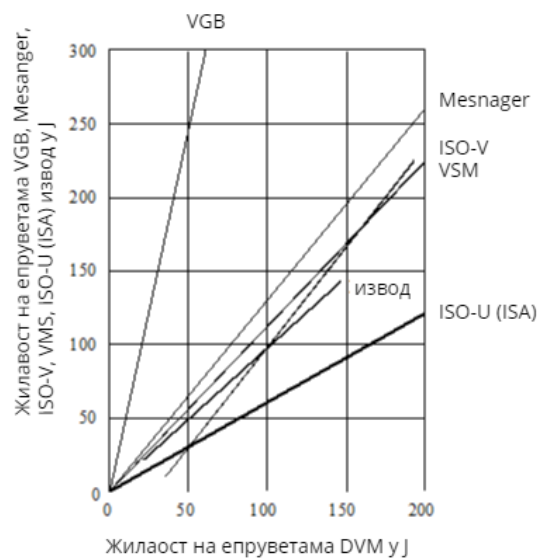


Слика 5.5 *Пробе за испитивање жилавости*

Ударна жилавост одређује се помоћу Шарпијевог клатна на коме се читава расположиви рад (A_1) и неутрошени рад (A_2) и затим рачуна утрошени рад за лом епрувете (A_0):

$$A_0 = A_1 - A_2, \text{ J.}$$

Као мерило жилавости по Шарпију узима се утрошени рад за лом епрувете (A_0) у Џулима ($1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$). Жилавост се углавном испитује пре избора основног материјала, додатног материјала, поступка и технологије при изради значајних заварених конструкција, као нпр. судова под притиском, мостова и сличних спојева код којих постоји опасност од кртог лома. У практичним условима понекад је потребно међусобно упоредити величине жилавости одређене различитим методама. Из тог разлога овде се даје дијаграм на слици 5.6 који то омогућава.



Слика 5.6 *Поређење величина жилавости одређених различитим методама*

5.1.4 Металографска испитивања

У пракси се сва металографска испитивања обављају помоћу две групе метода:

- **Макроскопска**, која обухватају визуелну контролу и увећања до $20\times$ и
- **Микроскопска** испитивања, са повећањем од $20-2000\times$ (оптички микроскопи) и са повећањем више десетина хиљада пута (електронски микроскопи), примењују се за детаљнију тј. потпунију анализу унутрашње грађе.

Макроскопска испитивања често претходе микроскопским испитивањима и у низу случајева дају дефинитивне закључке о грађи метала и легура и грешкама у њима. Испитивање се састоји у визуелном прегледу узорака или помоћу лупе са мањим повећањем (до $20\times$). Структура која се може уочити голим оком назива се макроструктура. Макроструктура може бити испитивана непосредно на површини комада или детаља, на прелому или изрезаном узорку после одмашћивања, брушења и нагризања површине адекватним хемијским реагенсима. Нагризање омогућава да се уоче метал шава, ЗУТ и основни материјал као што је приказано на сликама 5.7 до 5.14.



Слика 5.7



Слика 5.8



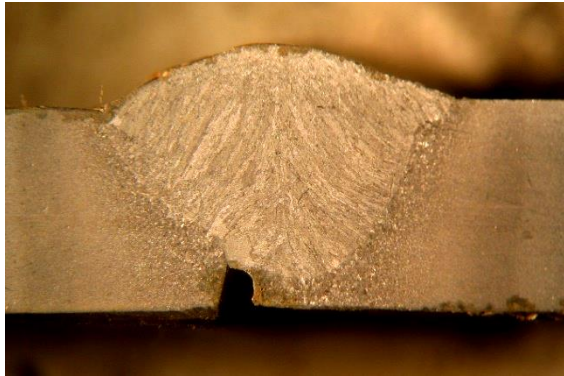
Слика 5.9



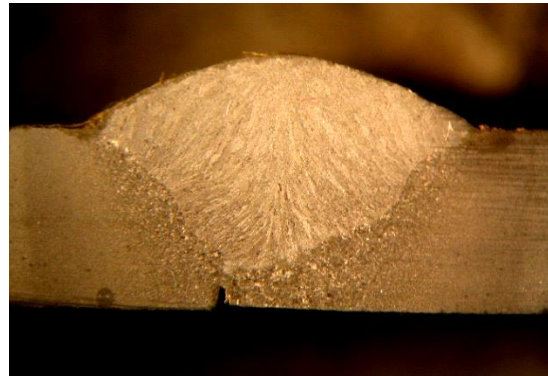
Слика 5.10

На сликама 5.7 до 5. 10 је приказ сучеоно заварених спојева (двострано заваривање)

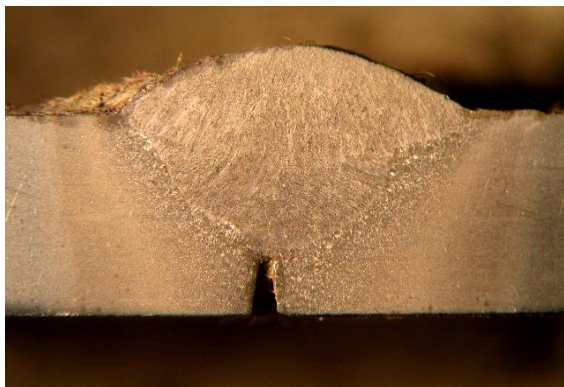
Макро прегледом завареног споја лако се може запазити да је код неких заварених узорака непроварен корен слике 5.11 до 5.14. Непроварен корен је грешка која није дозвољена, јер представља велики концентратор напона. Такође, изражена је несиметричност завара у односу на осу жлеба.



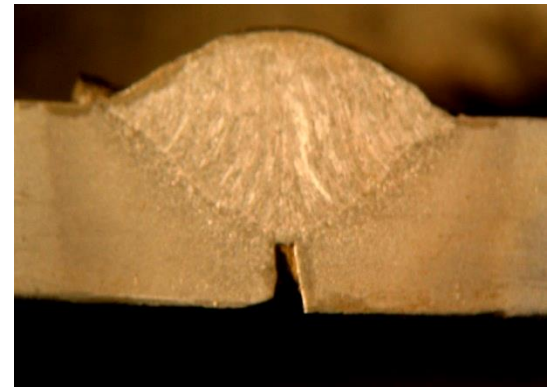
Слика 5.11



Слика 5.12



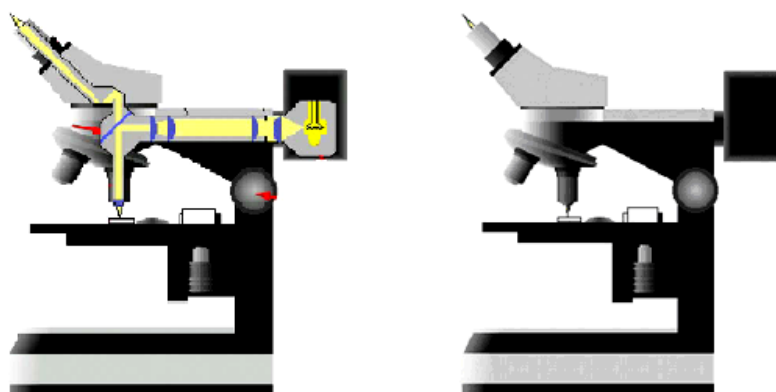
Слика 5.13



Слика 5.14

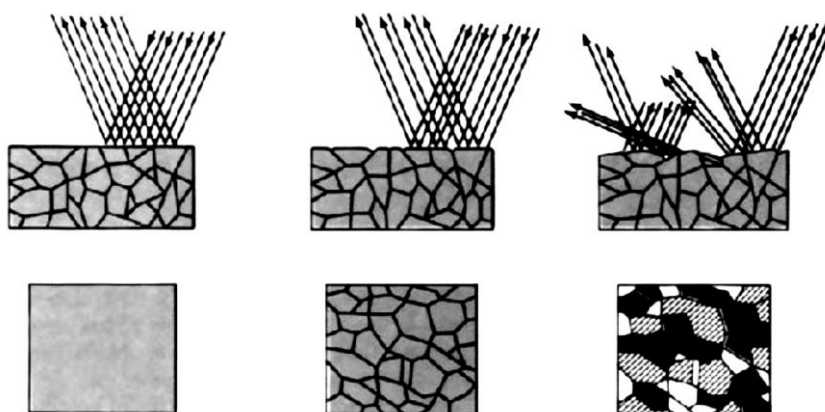
На сликама 5.11 до 5.14 је приказана грешка при заваривању (непроварен корен)

Микроскопска испитивања заварених спојева омогућавају да се одреди тип микроструктуре, удео појединих структура, величина зрна, њихова оријентација, расподела и величина укључака. Структура која се не може видети голим оком, већ уз помоћ микроскопа (сл. 5.15), па се и назива микроструктура.



Слика 5.15 Шема принципа рада и изглед оптичког микроскопа

При микро испитивању уочава се предгревање, прогревање, распоред оксида по границама зрна, промена састава метала као последица сагоревања одређених елемената, микропрслине, микроукључци, гасни мехурови малих димензија и сл. Микроструктура се најчешће оцењује на нагриженим узорцима и то помоћу оптичких (20 до 2000х) и у новије време помоћу електронских микроскопа (сл. 5.15).

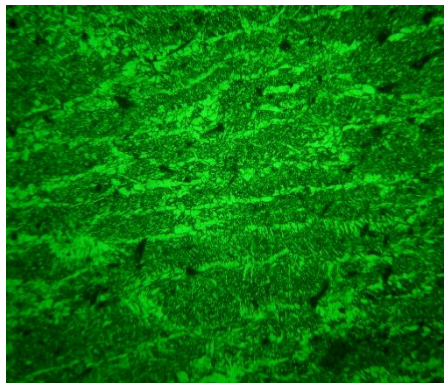


Слика 5.16 Одбијање светлосних зрака са ненагриженог и нагрижених узорака

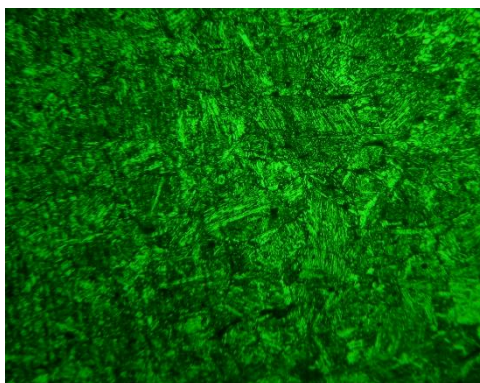
Принцип рада оптичких микроскопа заснива се на усмеравању и пропуштању светлосног зрака кроз систем сочива, призми, филтера, пропусних огледала и одбијања зрака од припремљене површине узорка ка објективу и окулару, где се уочава увећана слика структуре (сл 5.16). Поред посматрања микроструктура појединих зона на оптичким микроскопима могуће је и фото снимање микроструктуре (слике 5.17 до 5.19).



Слика 5.17 Основни материјал Hardox 450 (200x) Међуфазна структура побољшања



Слика 5.18 Шав (200x) Ферит и ламеларни перлит



Слика 5.19 ЗУТ (200x) Видманитетенова структура

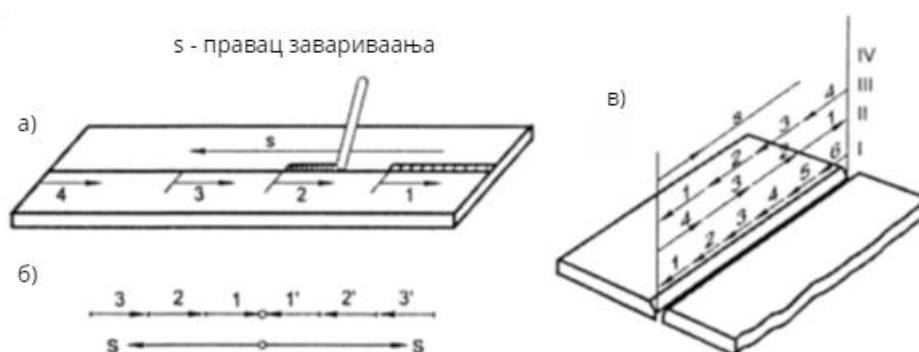
Овде нису детаљније анализиране грешке завареног спојева и врсте микроструктура, већ смо указано на неопходност примене ове процедуре у реалним поступцима израде одговорних заварених конструкција. Детаљније је ова проблематика анализирана у раду [3].

6. ТЕХНОЛОШКЕ МЕРЕ ЗА СМАЊЕЊЕ СОПСТВЕНИХ НАПОНА И ДЕФОРМАЦИЈА

Применом одговарајућих мера, пре и у току заваривања, могу се знатно смањити сопствени напони и деформације. Термички сопствени напони ($\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$) сразмерни су градијенту температуре који је одређен:

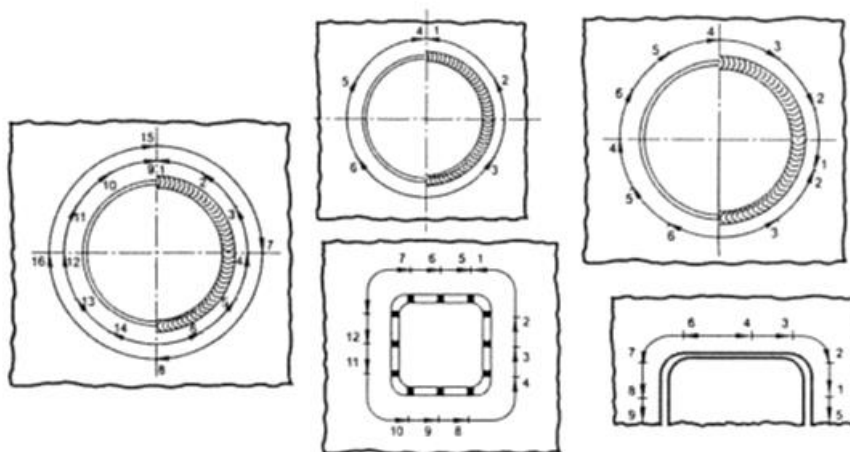
- количином унете топлоте и њеном концентрацијом,
- обликом завариваних делова (масивно тело, плоча, штап),
- техником заваривања (једнослојно/једнопролазно, вишеслојно/вишепролазно, једнострано или обострано, са предгревањем или без предгревања, итд.).

Деформације се могу знатно смањити ако се води рачуна о редоследу полагања зава. Највеће деформације настају при једнопотезном (непрекидном) извођењу шави од почетка до краја. Због тога се препоручује да се дугачки шавови изводе са краћим заварима, техником повратног корака, или повратног корака са прескоком (сл. 6.1а). Дужина зава, нпр. код REL-а обично одговара једној претопљеној електроди. Дугачке шавове је најбоље изводити од средине ка крајевима (најбоље са два заваривача истовремено) (сл. 6.1б), никако од крајева ка средини. Редослед вишеслојног заваривања у V - жлебу приказан је на слици 6.1в.



Слика 6.1 Извођење дугачких једнопролазних шавова (а, б) и вишепролазних(в)

У случају извођења комбинованих сучеоних и угаоних шавова, најпре се заварују сучеони, а затим угаони, односно подужни па попречни. При заваривању цеви или профилних цеви за плочу, редослед наношења зава је шематски приказан на слици 6.2.



Слика 6.2 Шема извођења кружних и шавова цев-плоча и профилна цев-плоча

При изради склопова од дебљих предмета, на сличан начин се изводи вишеслојно/вишепролазно заваривање, уз примену додатног материјала са бољим својствима пластичности. Општа је препорука да се бира додатни материјал који има већу пластичност од основног, посебно за носеће шавове чији пресек под дејством спољашњег оптерећења "ради" заједно са основним материјалом. При томе, треба избегавати нагомилавање зава и нарочито укрштање шавова посебно код динамички оптерећених конструкција. Број шавова треба да је што мањи, као и запремина истопљеног метала. При пројектовању заварених конструкција треба прописати предгревање и искивање зава (осим покривног) и предвидети мере за смањење напона и деформација, водећи рачуна да се избегне укрштања шавова.

Сложене заварене конструкције најбоље је формирати од претходно заварених подсклопова, који се на крају повезују у конструкциону целину. Пожељно је употребити специјалне уређаје за монтажу и притезање (тзв. позиционере), који омогућавају повратно-степенасто полагање зава, посебно код аутоматизованих поступака заваривања.

Припоји се не полажу на местима где се шавови укрштају, а при настављању зава после замене електроде не треба чекати да температура падне испод међуслојне температуре за дати челик (300 до 200°C). Сложеност разматраних проблема и избор конструкционо-технолошких мера за смањење сопствених напона захтева темељну студију сваког појединачног случаја, а горње препоруке служе само као опште смернице.

6.1 Термичке методе за отклањање деформација и смањење сопствених напона

И поред свих предузетих конструкционо–технолошких мера, тешко је у производним условима извести заварени спој без сопствених напона и деформација. Зато су потребне и накнадне мере за смањивање сопствених напона и отклањања деформација; мере које је рационално применити, деле се на две групе: *термичке* и *механичке*.

Термички начини заснивају се на загревању у границама еластичности (до 650°C за челик) и прогревању на тој температури (2-5 min/mm дебљине радног предмета (не мање од $\frac{1}{2}$ h)), а затим постепеном хлађењу у пећи; тада настаје релаксација напона ($\sigma = E \cdot \epsilon_{el}$, при $T > 650^\circ\text{C}$, $\epsilon_{el} \rightarrow \epsilon_{pl}$). У пракси се често примењује локално загревање (гасно-пламеним горионицама, индукционим грејачима и другим изворима топлоте); зоне око шавов загревају се до температуре $< A_{C1}$; (око 650°C) па настаје смањење сопствених напона (по принципу преласка $\epsilon_{el} \rightarrow \epsilon_{pl}$). Осим термичког попуштања напона, на располагању су и механички методи: пиновање (искивање шавов заобљеним пробојцем) или ваљање површине зава. Овим поступцима индукују се повољни заостали напони притиска, што смањује или елиминише затежуће заостале напоне у површинским слојевима шавов; код вишеслојних шавов, први и задњи слој не смеју бити пиновани због опасности од оштећења. Да би се спречило прекомерно деформисање елемената заварене конструкције, потребно је пре заваривања предузети адекватне мере. При томе се полази од тога да су дебели пресеци склони ка великим заосталим напонима, а танки великим деформацијама.

Деформисање се смањује или потпуно елиминише фиксирањем завариваних предмета, као и коришћењем симетричних жлебова и посебних технолошких мера. Облик жлеба зависи од дебљине елемената, технологије извођења шавов, која укључује избор оптималних параметара и праваца и редоследа полагања појединих зава и шавов у целини. При избору начина заваривања треба узети у обзир врсту ОМ и дебљину радних предмета, облик заварене конструкције, услове у којима се шавови изводе (у хали или на отвореном простору), као и стање околне атмосфере (температуру, влажност, ваздушна струјања). Параметри заваривања бирају се тако да се постигне највећи унос топлоте при максималној брзини заваривања. Правац, начин и редослед полагања зава, бирају се у зависности од дебљине и облика конструкције,

као и од дужине шавова. Због тога, дугачке шавове REL–ом треба изводити повратним кораком, а вишеслојне шавове тако да се сваки наредни слој наноси у супротном смеру од претходног.

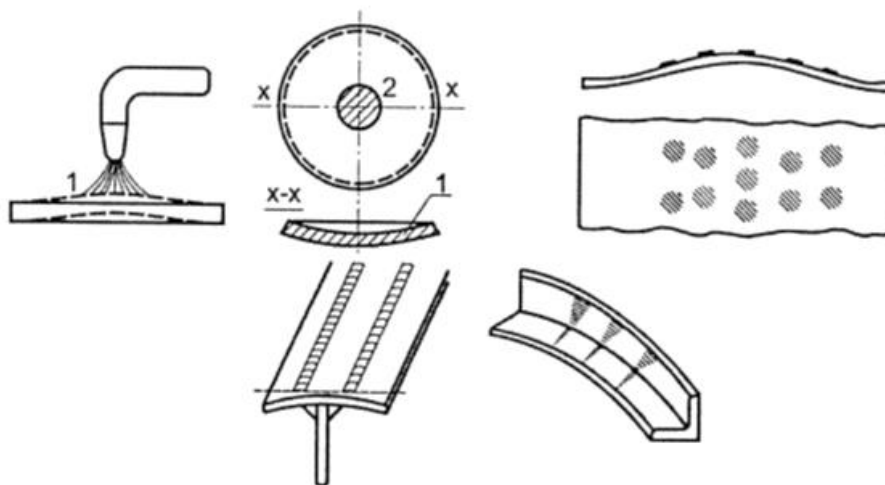
Претходно позиционирање плоча обавља се пошто се предвиди очекивано угаоно деформисање. Угао између плоча бира се тако да се после заваривања спојени делови спонтано врате у хоризонтални положај.

Технолошке мере за умањење деформација су тзв. методе уравнотежавања деформација. Завари у споју полажу се по одсечцима, што омогућава да деформисање сваког наредног одсечка буде у супротном смеру. Завари треба да буду релативно кратки, јер се тиме смањује крутост. Мана ових метода је што се може применити само у случају симетричних шавова чија дужина не прелази 600 mm. Примери технолошких метода за смањење деформација дати су на слици 6.1 за подужни шав и на слици 6.2 за кружне и квадратне шавове изведене на кружним и профилним цевима.

Механичка отклањање деформација после заваривања изводи се:

- исправљањем на хладно спољним силама које стварају супротну трајну деформацију и
- исправљање на топло (сл. 6.3) локалним загревањем испупчене стране до њеног преласка у пластичне стање; овај поступак захтева велико искуство, јер у противном могу настати супротни ефекти, тј. још веће деформисање.

После исправљања препоручује се жарење за уклањање (или смањење) заосталих напона насталих локалним деформисањем на хладно.



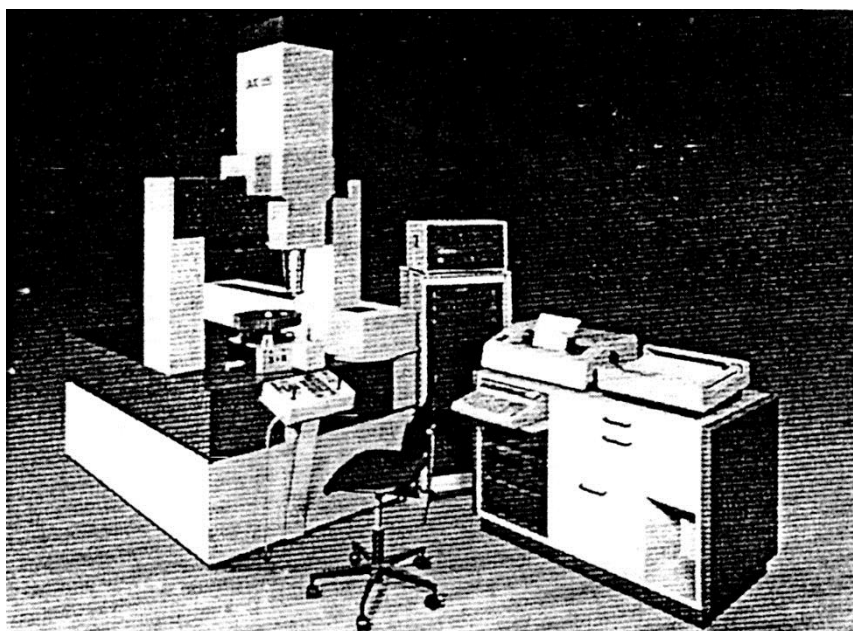
Слика 6.3 Исправљање локалним загревањем гасним пламеном

6.2 Мерење деформација

У циљу мерења деформација на примеру заваривања челика Hardox 450 коришћени су узорци у облику танких плоча. Испитивање је изведено на једном припремку (деформације су мерене после полагања првог пролаза и другог пролаза са супротне стране).

6.3 Опис примењиваног уређаја и протокола мерења

Према утврђеном распореду мерних тачака у x -у равни, приступило се мерењу координате z . Сва мерења су извођена на трокоординатном мерном уређају OPTON UMC 850 (сл. 6.4). Основни технички подаци примењиваног мерног система дати су у табlici 6.1.[3]



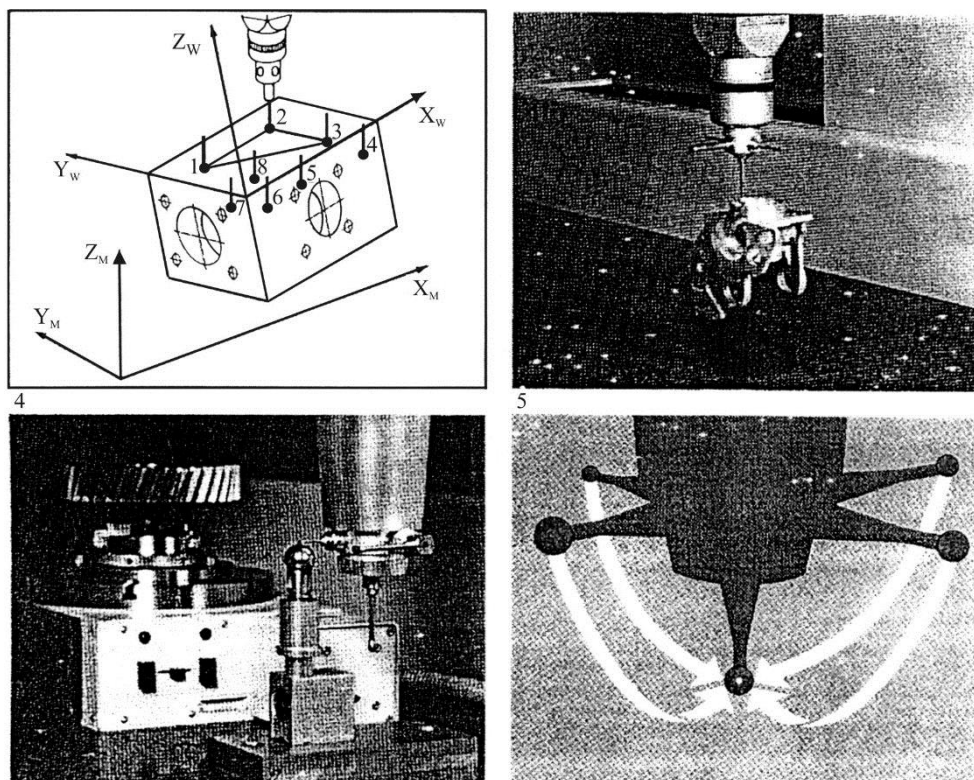
Слика 6.4 Изглед мерног уређаја- тип WMM850

Таблица 6.1 Основни технички подаци мерног уређаја - OPTON UMC 850

Мерни опсег у (mm):	WMM 850 X=850 Y=1200 Z=600
Дозвољена грешка при мерењу дужинских мера у зависности од мерне дужине L (при 20°C)	$\left(2.9 + \frac{L}{250}\right) \mu m$
Одступање управности произвољне осе у односу на упоредну праву	$\leq 1''$
Површина стола, mm ²	1000x1600
Слободна висина испод портала, mm	750
Максимална слободна висина испод мерне праве, mm	633
Мерни систем	Фотоелектрични
Резолуција	1 μm
Могућност понављања (репродукције)	0.5 μm
Мерна сила при узимању података	< 0.01 N
Дозвољена маса радног комада, kg	1000
Маса мерног уређаја, kg	3000
Маса управљачког ормана, kg	110
Површина за постављање мерног уређаја, mm ²	1600x1600
Површина за постављање управљачког ормана, mm ²	600x600

Поступак мерења који почиње довођењем радног предмета–припремка у координатни систем мерног уређаја извођен је према слици 6.5, односно према следећим процедурама које су поновљене при сваком новом мерењу:

- "опипавање" површине плоче у равни x-y са по четири тачке, одређивање угла закривљености $w_1 - x/z$ и $w_2 - y/z$, као и одређивање средње закривљености $s/\min/\max$;
- исправљање у простору w;
- избор нулте тачке по оси z;
- исправљање у равни по оси y;
- исправљање по углу w;
- избор координатног система по y-оси и довођење у нулти положај;
- "опипавање" само једне тачке по x-оси (ограничавање равни 0yz);
- додељивање нулног положаја x-оси;
- заузимање полазног положаја за избор почетне тачке 1 која је "нула" по z-оси[3].



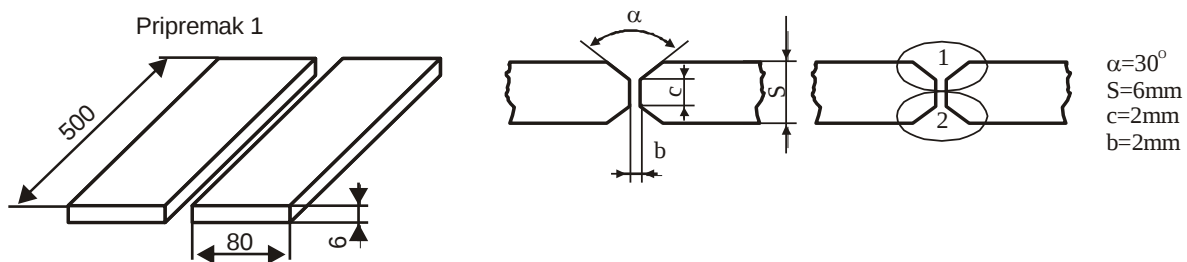
Слика 6.5 Избор референтног координатног система радног комада у односу на координатни систем уређаја

Резултати ових мерења омогућују да се да прегледна анализа одступања како у назначеним правцима, тако и у простору.

6.4 Резултати мерења деформација

У овом поглављу биће описана кратка процедура мерења деформација на примеру сучеоно заварених плоча дебљине 6 mm од челика Hardox 450 (тзв. моделска испитивања).

Најпре су припремљени узорци према слици 6.6, а затим су делимично заварени ("прихефтани") према слици 6.7. Циљ делимичног заваривања јесте одржавање константног зазора у корену желеба ради елиминације грешке непроваривања. Затим је изведено двострано заваривање MAG методом. После заваривања плоча у сучеоном споју изведено је баждарење плоча према слици 6.8, а добијени резултати мерења деформација на трокоординатној машини за мерење, графички су приказани на сликама 6.9, 6.10 и 6.11.



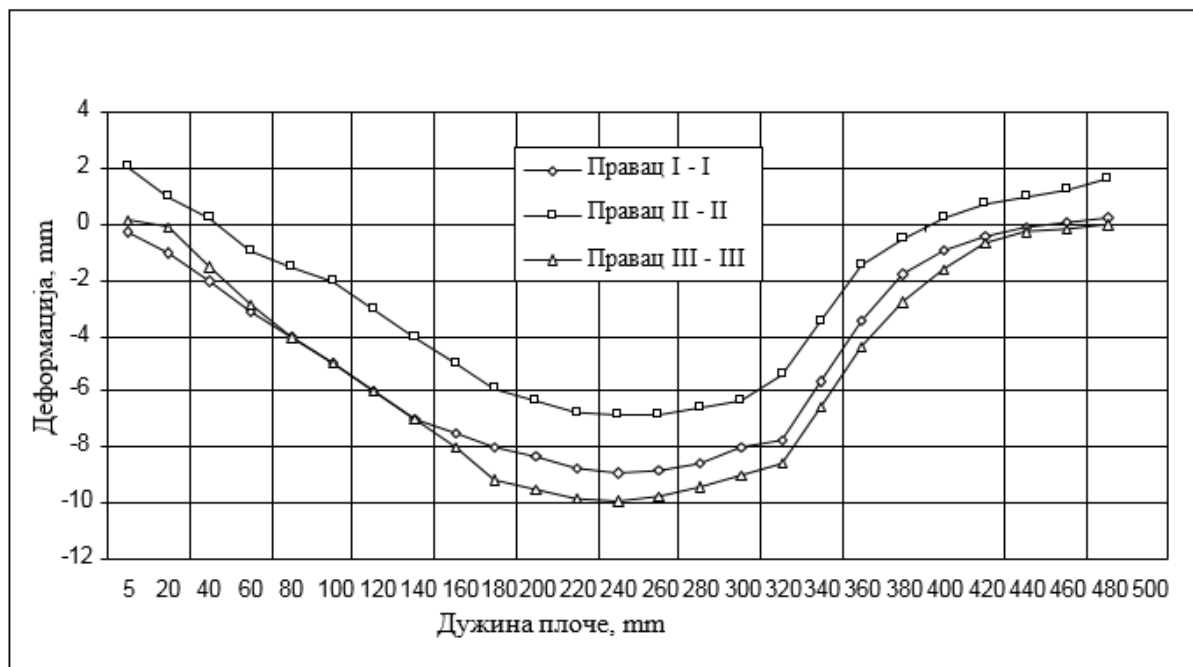
Слика 6.6 Узорак 1 – скица плоча, облик и димензије жлеба са редоследом извођења пролаза



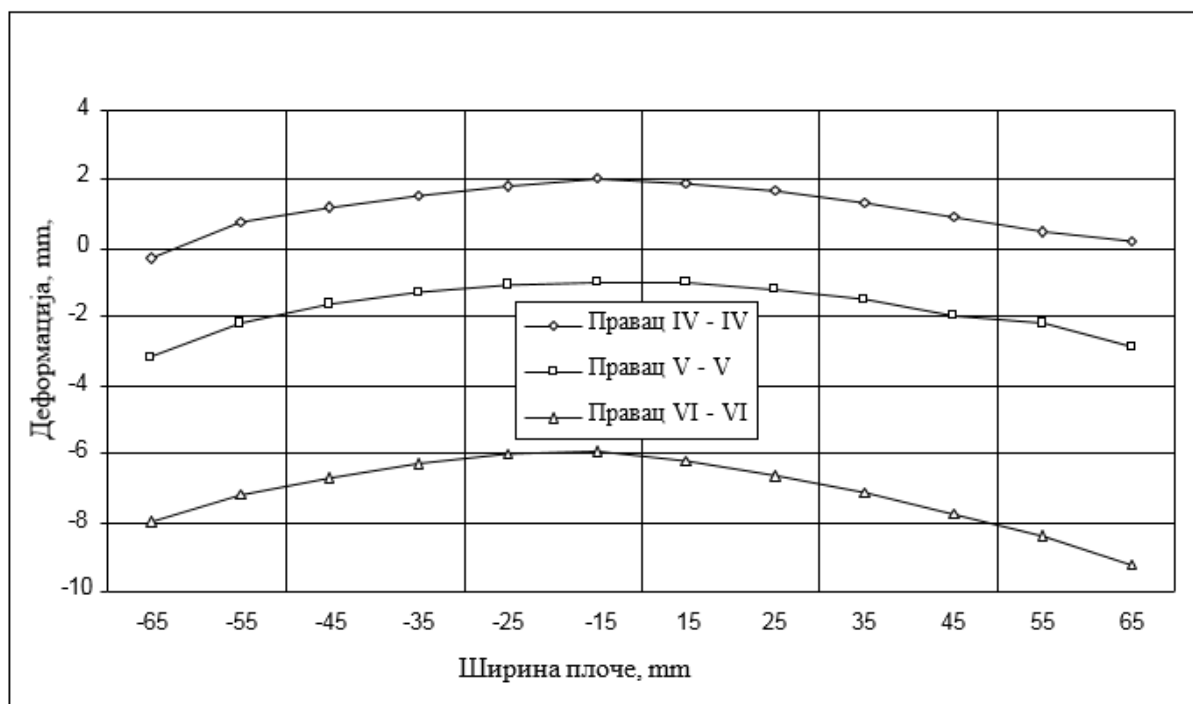
Слика 6.7 Узорак 1 – димензије плоча, облик и димензије жлеба са редоследом извођења пролаза



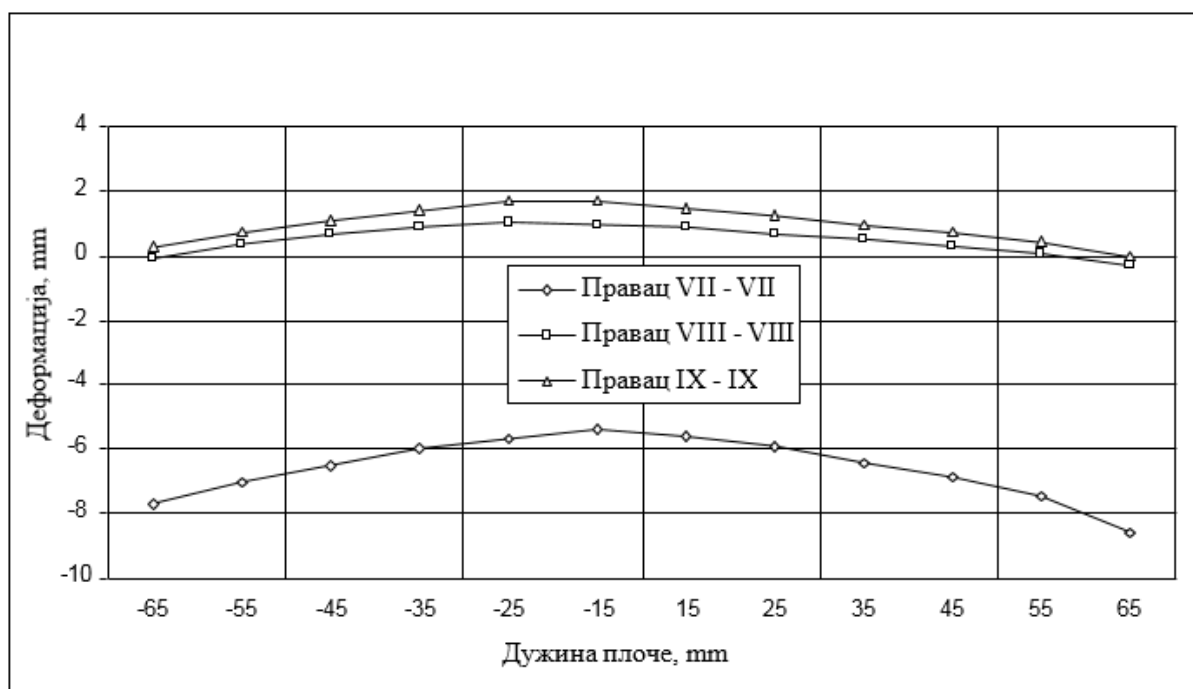
Краћом анализом добијених резултата (сл. 6.9, 6.10 и 6.11) може се закључити да су деформације неизбежан пратилац заваривања и да се могу делом умањити правилном применом технички-технолошких мера, које су детаљно описане у поглављу 6.



Слика 6.9 Уздужне деформације припремка



Слика 6.10 Попречне деформације припремка



Слика 6.11 Попречне деформације припремка

7. ЗАКЉУЧАК

Заваривање челика повишене јачине може се извести применом уобичајених поступака заваривања топљењем. При томе се добијају заварени спојеви одговарајуће јачине и жилавости, који се могу упоређивати са својствима основног материјала. Ови челици су опште прихваћени конструкциони материјали, посебно када је реч о одговорним завареним конструкцијама. Разлози за њихову све већу примену огледају се у релативно повољној цени, добрим механичко-металуршким својствима, лакшим конструкцијама, побољшаној заварљивости и тсл. Челици повишене јачине употребљавају се за израду челичних конструкција са повећаним захтевима као што су: товарни сандуци камиона, високопритисни цевоводи, судови под притиском, железнички вагони, цистерне за превозење гаса, елементи друмских возила, мостови, индустријске хале, различите заварене конструкције итд.

Имајући у виду да је добијање челика повишене јачине условљено применом сложених комбинација металуршких и термомеханичких процеса, очување њихових изузетних особина при заваривању је од посебног значаја. Узимајући у обзир све већу примену челика повишене јачине, овај рад је пре свега био усмерен на технолошко-металуршке заварљивости у реалним условима.

У теоријском делу рада дата су општа објашњења значајна за проблематику заварљивости челика повишене јачине. Нарочито се указује на:

- одговарајући преглед поступака добијања разних врста челика повишене јачине, према различитим националним стандардима;
- оцени заварљивости челика повишене јачине;
- напонско и деформационо стање у завареним спојевима;
- испитивања основног материјала Hardox 450 (хемијски састав, примена и производња);
- методе испитивања заварљивости челика повишене јачине, како теоријске тако и практичне;
- избор параметара заваривања MAG поступком, наведених из литературе;
- мере за смањење сопствених напона и деформација.

При примени различитих поступака заваривања челика Hardox 450 треба се придржавати препорука произвођача, базираних на искуствима стеченим у производњи и примени ових материјала.

У теоријском делу рада наведена су општа објашњења, у циљу разумевања проблематике заварљивости челика повишене јачине. Челик намењен за израду реалних конструкција треба да издржи велика ударна оптерећења, да задржи добре механичке особине (тврдоћу, јачину, жилавост и др.) на собним и сниженим температурама и да посебно буде отпоран на ударно абразивно хабање. Из тих разлога за наведене заварене пробе се користио челик који је добијен посебним поступцима термомеханичке прераде, па је очување његових изузетних својстава у свим зонама завареног споја од изузетног значаја. Проблематику заварљивости челика Hardox 450 треба размотрити комплексно, јер су најважније особине завареног споја у великој мери зависне од технолошких параметара заваривања.

У нешто мњем обиму дати су експериментални резултати сучеоно изведених спојева посебно када је реч о макро и микро структури и деформацијама изазваним заваривањем моделски припремљених плоча. Деформације су неизбежан пратилац заваривања, али правилном применом техничко-технолошких мера треба их свести на најмањи ниво.

8. ЛИТЕРАТУРА

- 1) Јовановић М., Лазих В., Арсић Д.: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- 2) Јовановић М., Лазих В.: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- 3) Ђорђевић Д.: *Оцена технолошко-металушке заварљивости челика повишене јачине*, специјалистички рад, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2006.
- 4) Радовић Н., Дробњак Ђ.: *Развој челика за израду заварених конструкција повишене сигурности*, Заваривање и заварене конструкције, 2006, Свеска 51, бр. 4, стр. 155-164.
- 5) Радовић Н.: *Савремени материјали*, уводно предавање, 30. Јубиларно саветовање производног машинства Србије и Црне Горе 2005. са међународним учешћем, Врњачка Бања, 2005. Године, стр. 47-56.
- 6) Јовановић М., Лазих В.: *Машински материјали - рукописи предавања*, Машински факултет - Факултет инжењерских наука, Крагујевац, 2007-2018.
- 7) Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.: *Технологија заваривања – приручник, друго издање*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- 8) Јовановић М., Лазих В.: *Практум РЕЛ и МАГ/МИГ заваривања*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
- 9) http://www.mtladv.com/wp-content/uploads/2016/01/168_HARDOX_450_UK_Data-Sheet.pdf, Интернет страница - приступљено: септембар 2018.