

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**

Душан М. Арсић

**ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ И ИЗБОР
НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА
ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ КЛАСЕ S690QL**

мастер рад

Крагујевац, 2013.

**Факултет инжењерских наука
Универзитета у Крагујевцу**



Назив студијског програма: Машинско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Производно машинство

Предмет: Наука о заваривању

Број индекса: 361/2011

Душан М. Арсић

**ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ И ИЗБОР
НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА
ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ КЛАСЕ S690QL**

мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. Проф. др Вукић Лазић - ментор**
- 2. Проф. др Србислав Александровић**
- 3. Проф. др Драган Милосављевић**

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

- 1) Наведе и опише врсте челика повишене јачине као и њихов развој, примену и поступак производње.
- 2) Укаже на заварљивост челика повишене јачине, и да на одређеном примеру, челику класе S690QL, експериментално и теоријски одреди његову заварљивост и да предложи поступак, додатни материјал и оптималну технологију заваривања.
- 3) На крају рада, студент треба да укаже на методе контроле заварених спојева, предложи најповољнију контролу за разматрани челик и да прикаже резултате спроведене контроле како би заварена конструкција у експлоатацији била поуздана.

Препоручена литература:

- [1] **Јовановић М., Лазих В.:** *Упутство за заваривање челика повишене јачине*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
- [2] **Ђорђевић Д.:** *Оцена технолошко – металуршке заварљивости челика повишене јачине – специјалистички рад*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
- [3] **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања – приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1996.
- [4] **Арсих Д.:** *Оцена заварљивости челика повишене јачине класе S690QL – завршни рад*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац 2011.

У Крагујевцу, 24.06.2013.

ментор:

Др Вукић Лазих, ред. проф.

Резиме: У овом раду се разматрају челици повишене јачине, посебно нисколегирани побољшани челици. У теоријском делу рада утврђена је методологија за оцену заварљивости ових челика, оцењена је заварљивост разматраног челика и изабрани су параметри заваривања за две предложене технологије. На крају је предложена и најповољнија технологија заваривања и оптималан режим заваривања РЕЛ/МАГ и МИГ/МАГ поступцима заваривања овог челика. Оптимална технологија је изабрана на основу експерименталних резултата. Верификација изабране технологије је извршена одређеном контролом изведених заварених спојева, на посебно ригорозним тестовима испитивања заварених конструкција.

Кључне речи: Челици повишене јачине, заварљивост, челик S690QL, температура предгревања, додатни материјал, микроструктура, тврдоћа, контрола.

Abstract: This work is considering high strength steel weldability, with special emphasis on advanced low alloyed Q + T steels. In theoretical part of this work the methodology of evaluation of high strength steel weldability is determined, weldability of considered steel is estimated and welding parameters for the two proposed welding technologies are selected. At the end, the optimal welding technology and optimal welding regime of REL/MAG and MIG/MAG proceeding for welding of this steel are recommended. The optimal technology is chosen based on experimental tests. Verification of the chosen technology is performed by the destructive and non-destructive tests of some of the welded joints. Those tests belong to a group of especially rigorous control tests of welded constructions.

Key words: High strength steel, weldability, steel S690QL, preheating temperature, filler materials, microstructure, hardness, control.

САДРЖАЈ:

Предговор

1. УВОД	1
2. ПРЕГЛЕД ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	4
2.1 Врсте челика повишене јачине	5
2.1.1 Угљенично – мангански (C - Mn) челици.....	6
2.1.2 Умирени челици	6
2.1.3 Микролегирани челици.....	7
2.1.4 ТМСР челици.....	8
2.1.5 Нисколегирани челици повишене јачине.....	12
2.1.5.1 Бејнитни челици	12
2.1.5.2 Нисколегирани побољшани челици (Q + T – Quenching + Tempering).....	12
2.2 Могућности повећања напона течења	13
2.2.1 Технолошки поступци повећања напона течења	14
2.2.1.1 Обликовање на хладно.....	14
2.2.1.2 Обликовање на топло.....	14
2.2.2 Металуршки поступци повећања напона течења.....	15
2.2.3 Термомеханички поступци повећања напона течења	16
2.3 Утицај легирајућих елемената на структурне промене челицима	17
2.4 Производња челика повишене јачине класе S690QL	20
3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ И ПРОБЛЕМИ ПРИ ЗАВАРИВАЊУ	
ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	23
3.1 Појам заварљивости	23
3.2 Проблеми при заваривању челика повишене јачине	25
3.2.1 Проблеми при заваривању Q + T челика повишене јачине.....	26
3.3 Методе за испитивање заварљивости	27
3.3.1 Рачунске методе.....	28
3.3.1.1 Прорачун температуре предгревања	29
3.3.1.1.1 Метод Сеферијана.....	30
3.3.1.2 Параметарске једначине хладних прслина.....	30
3.3.1.3 Параметарске једначине топлих прслина.....	36
3.3.1.4 Параметарске једначине ламеларних прслина	37
3.3.1.5 Параметарске једначине прслина жарења.....	38
3.3.1.6 Други показатељи заварљивости.....	39
3.2.2 Практичне методе (лабораторијске и технолошке пробе).....	40
3.2.3 Процена заварљивости на основу КНЗ дијаграма.....	43
3.4 Оцена заварљивости челика повишене јачине	43
3.4.1 Проблеми заварљивости C – Mn челика.....	44
3.4.2 Проблеми заварљивости микролегираних (финозрних – ТМ) челика.....	45
3.4.3 Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине.....	46
3.4.3.1 Бејнитни челици	46
3.4.3.2 Нисколегирани побољшани челици (Q + T).....	47

3.5 Оцена заварљивости основног материјала - челика класе S690QL	47
3.5.1 Спречавање настанка хладних прслина.....	49
3.5.2 Процена склоности челика ка образовању хладних прслина и одређивање температуре предгревања.....	50
3.5.3 Процена склоности челика ка образовању топлих прслина.....	51
3.5.4 Процена склоности челика ка образовању ламеларних прслина.....	52
3.5.5 Процена склоности челика ка образовању прслина жарења.....	52
3.6 Припрема за заваривање	52
4. ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА ЧЕЛИКА	
КЛАСЕ S690QL	53
4.1 Технолошки параметри заваривања	53
4.1.1 Основни материјал.....	53
4.1.2 Додатни материјал.....	54
4.1.2.1 Додатни материјал од нерђајућег челика.....	55
4.1.3 Предгревање и међупролазна температура.....	57
4.1.3.1 Накнадно загревање.....	58
4.1.3.2 Завршна обрада споја пре настајања прслина.....	58
4.1.3.3 Повећан (висок) унос топлоте.....	59
4.1.3.4 Примена аустенитних додатних материјала.....	59
4.1.4 Унос топлоте.....	59
4.1.5 Време хлађења у температурском интервалу од 800 до 500°C (време $t_{8/5}$).....	60
4.1.6 Заштитни гас.....	61
4.1.7 Редослед заваривања, величина зазора и позиционирање споја.....	62
4.1.8 Накнадна термичка обрада.....	64
4.2 Технологија РЕЛ/МАГ	64
4.2.1 Технолошки поступак РЕЛ заваривања.....	64
4.2.1.1 Прорачун технолошких параметара РЕЛ заваривања.....	64
4.2.2 Технолошки поступак МАГ заваривања.....	67
4.2.1.1 Прорачун технолошких параметара РЕЛ заваривања.....	68
4.2.3 Технологија и параметри РЕЛ/МАГ заваривања.....	72
4.2.3.1 Сучеони спојеви.....	72
4.2.3.2 Угаони спојеви.....	74
4.3 Технологија МИГМАГ	77
4.3.1 Технолошки поступак МИГ заваривања.....	77
4.3.1.1 Прорачун технолошких параметара МИГ заваривања.....	77
4.3.2 Технолошки поступак МАГ заваривања.....	79
4.2.3 Технологија и параметри МИГ/МАГ заваривања.....	79
4.2.3.1 Сучеони спојеви.....	79
4.2.3.2 Угаони спојеви.....	81
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЕНИХ УЗОРАКА	84
5.1 Испитивање затезањем	84
5.1.1 Уводне напомене.....	84
5.1.2 Експериментална испитивања.....	85

5.2 Испитивање ударне жилавости	89
5.2.1 Уводне напомене.....	89
5.1.2 Експериментална испитивања.....	90
5.3 Испитивање савијањем	101
5.2.1 Уводне напомене.....	101
5.4 Мерење тврдоће и испитивање микроструктуре	102
5.4.1 Уводне напомене.....	102
5.4.1.1 Мерење тврдоће.....	102
5.4.1.2 Испитивање микроструктуре.....	103
5.4.2 Експериментална испитивања.....	104
5.4.3 Оцена заварљивости на основу модификованог КНЗ дијаграма.....	116
5.5 Избор најповољније технологије заваривања на основу добијених резултата	118
6. КОНТРОЛА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА	122
6.1 Уводне напомене	123
6.2 Испитивања без разарања	123
6.2.1 Визуелна контрола.....	123
6.2.2 Испитивања пенетрантима (капиларна дефектоскопија).....	124
6.2.3 Испитивање заптивности (непропустљивости).....	125
6.2.4 Магнетна испитивања.....	126
6.2.5 Радиографска испитивања.....	128
6.2.6 Ултразвучна испитивања.....	129
6.3 Примери изведене контроле заварених спојева	130
7. ЗАКЉУЧАК	132
8. ЛИТЕРАТУРА	134

ПРЕДГОВОР

У савременом, технички развијеном свету, присутна је тежња за израдом што лакших носећих конструкција којима се постижу различите погодности, као што су: уштеде материјала и времена у производњи, смањење утрошка енергије у експлоатацији код тешко покретних конструкција типа железничких и шинских возила, дизалица, бродова итд., смањење тежине конструкција, боља антикорозиона својства, мање загађивање околине, бољи квалитет, сигурност и поузданост производа и др.

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

Циљ аутора је да кроз овај рад, теоријско – експерименталног типа, истражи наведену проблематику и дефинише технолошко – металуршку заварљивост, прикаже избор оптималних параметара заваривања челика повишене јачине класе S690QL, као и да објави резултате добијене испитивањем изведених заварених спојева. С друге стране, добијени резултати се могу применити и у управљању интегритетом и квалитетом конструкција израђених од челика повишене јачине са посебним акценом на челик класе S690QL.

Овом приликом желим да се захвалим ментору проф. др Вукићу Лазићу на одвојеном времену и свестраној и несебичној помоћи пруженој при изради овог рада.

1. УВОД

У савременој индустријској производњи, заваривање и заварене конструкције заузимају све важније место. С једне стране, то је заслуга развоја заваривања као веома значајне производне технологије и с друге, масовног развоја челика предвиђених за заваривање од којих се израђују веома одговорне конструкције.

При пројектовању, два најважнија захтева за успешно изведену конструкцију су функционалност и сигурност у условима експлоатације. Због тога се данас, поред чврстоће као основног параметра при пројектовању, мора узети у обзир и опасност од кртог лома која у великој мери зависи од заварених спојева. Међутим, стандардизована правила прикривају потребу за тим захтевима јер се материјали углавном бирају само на основу њихове чврстоће, са основном претпоставком да ће у систему доћи само до еластичних деформација. Међутим, услед готово неизбежног присуства грешака условљених процесом заваривања, у завареним спојевима долази до концентрације напона. На тај начин стварна опасност од лома конструкције зависи од материјала у околини подручја концентрације напона, било да је у питању прекомерна деформација, лом од замора, крти лом или оштећење изазвано пузањем.

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

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

Данас постоји широк асортиман конструкционих (инжењерских) 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 састојке (метале и неметале). Чак ни тзв. чисти метали уобичајеног квалитета се не могу сматрати за системе са једном компонентом јер садрже мању или већу количину нежељених примеса (нечистоћа).

У техници се највише, као конструкциони материјали, користе челици и ливена гвожђа тј. легуре гвожђа и угљеника, затим легуре обојених метала (алуминијум, бакар и тсл.) а у новије време и легуре титана, уз напомену да су легуре на бази гвожђа и данас најпримењиваније у техничкој пракси. Од целокупне светске производње метала њихов удео је око 95%. Иако су челици у основи легуре гвожђа и угљеника они увек

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

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

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

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

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

¹ У алтернативне материјале спадају полимери (пластомери и еластомери), керамике, композити, стакло, и тсл.

до закључка да се заштита растопа од околне атмосфере, у принципу, може остварити на 2 начина: применом топитеља (преко електродне облоге или у виду праха) или потискивањем ваздуха из зоне заваривања (довођењем аргона, хелијума, угљен-диоксида или њихове мешавине)². На основу тих сазнања уведени су следећи поступци заваривања: ручно-електролучно (РЕЛ, 1908.), заваривање под прахом (ЕПП, 1928.), под троском (ЕПТ, 1953.), и поступци заваривања у заштити гаса (МИГ/МАГ и ТИГ, у раздобљу од 1940. до 1950. године). Поред ових поступака велику примену имају и поступци термомеханичког заваривања у које спадају тачкасто, шавно, сучеоно итд [6].

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

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

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

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

У овом раду дат је преглед врста и поступака добијања неколико врста челика повишене јачине. Указано је и на могућност повећања напона течења као и на утицај легирајућих елемената на структурне преображаје. Објашњени су и проблеми заварљивости челика повишене јачине с посебним освртом на класу конструкционих челика S690QL за коју је заварљивост теоријски и практично процењена. Пажња је посвећена и утврђивању склоности овог челика ка образовању прслина у процесу заваривања као и методама за њихово спречавање. Такође, предложене су и две технологије заваривања од којих је, на основу експерименталних резултата добијених на реалним узорцима, изабрана повољнија.

² Поменути гасови делују као заштитни, а Ag и He су инертни јер не образују једињења са кисеоником и другим гасовима при заваривању. Зову се и племенити јер имају последњу орбиту попуњену електронима и самим тим не одају и не примају електроне.

2. ПРЕГЛЕД ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

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

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

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

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

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

2.1 Врсте челика повишене јачине

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

Према српском стандарду (SRPS) ови челици се деле на:

- Опште конструкционе челике, укључујући и С-Мn челике (SRPS EN 10025: 2003¹);
- Финозрне микролегиране челике (JUS С.В0.502²).

Као основа за производњу челика повишене јачине користи се угљенични челик³. Код ових челика главну улогу има угљеник. Он у челику може бити садржан у количинама од 0.03 до 2.11%. Доминантно утиче на особине челика, посебно на његову јачину и тврдоћу. Поред угљеника у угљеничним челицима се још налази и један број пратећих елемената као што су: Mn < 0.8%, Si < 0.6% као и нечистоће P < 0.04%, S < 0.04% и гасови⁴ O₂, H₂ и N₂. Угљеник се гвожђем гради интерстицијске⁵ чврсте растворе. Због таквог свог положаја у кристалној решетки он је ојачава и такође представља препреку кретању дислокација нпр. при затезању. Стога је потребно повећати силу потребну за његово разарање. Али, са друге стране, додавање угљеника неповољно утиче на заварљивост челика па се сматра да је челик заварљив при највећем садржају угљеника C ≤ 0.25%. При већем садржају угљеника од граничног, челик је склон закаљивању и појави хладних прслина у ЗУТ-у⁶. Такође, повећање садржаја угљеника доводи и до немогућности обраде челика на топло што је резултат појаве лако топљивих и кртих еутектика које чине кртим и сам челик при температури од око 800°C и више, односно у зонама црвеног усијања. Та појава се назива кртост при црвеном усијању. Сви ови недостаци, временом су довели до истраживања да се начин производње и сам састав челика промене како би се и његова својства побољшала а да се притом не повећа цена. У даљем тексту детаљније ће бити описани челици повишене јачине по врстама.

¹ Стандард SRPS EN 10025: 2003 – топловаљани производи од нелегираних конструкционих челика. Технички захтеви за испоруку, настао је ревизијом стандарда JUS С.В0.500.1989 (општи конструкциони челици-Технички услови), и представља превод EN 10025:1990 и његове допуне А1:1993. Овај стандард се односи на топловаљане производе од нелегираних основних и квалитетних челика (дефиниције према SRPS EN 10020) намењених за елементе за израду конструкције које се спајају заваривањем, закивцима и завртњевима.

² JUS С.В0.502 (финозрни конструкциони челици – Технички услови за израду и испоруку).

³ Данас се често користи термин нелегирани уместо угљенични.

⁴ O₂ – кисеоник, H₂ – водоник, N₂ – азот.

⁵ Интерстиција – појава уметања атома са малим пречником атома у празнине (интерстиције) кристалне решетке атома гвожђа. Елементи са мањим поменути пречником су С, N и В и они систему Fe-C граде интерстицијске чврсте растворе.

⁶ ЗУТ – зона утицаја топлоте.

2.1.1 Угљенично-мангански (С - Мп) челици

За израду конструкција најчешће коришћени челици јесу угљенични. Међутим, сами угљенични челици су се показали као мање погодни за израду конструкција велике одговорности, већих димензија, за рад у хемијски агресивним срединама, за рад на повишеним и сниженим температурама и тел. Такође, када се тражи конструкција са израженим својствима жилавости, пожељно је да угљеник буде присутан у што мањим количинама. Да би конструкција у оваквим условима имала потребну носивост морали би да се користе већи пресеци што директно проузрокује и повећање тежине. Превазилажење ових проблема омогућено је развојем С – Мп челика (ситнозрни феритно-перлитни челици са повећаним садржајем мангана).

Једна од првих метода повећања својстава јачине применом микролегирања је повећање садржаја мангана код нискоугљеничних челика. Уобичајени садржај мангана је од 1.4 до 1.7% а његова улога у челику је двојака: утиче на ојачање и регулише количину сумпорних укључака. Манган није замена за угљеник јер он у челику гради супституцијски⁷ чврсти раствор али манган има велики афинитет према сумпору због чега гради једињење MnS према реакцији:



MnS (сулфид мангана) се топи на температури од око 1620°C. Сумпор је присутан и у гвожђу али у виду сулфида гвожђа који на високим температурама са гвожђем гради еутектику ниске температуре топљења. Оне се, још у течном стању, издвајају по границама металних зрна и за време хлађења очвршћавају у крти филм. Тиме се објашњава чињеница да се челик са течним филмом не може прерађивати на топло јер постаје крт кад се охлади. Међутим, услед великог афинитета мангана према сумпору најједноставнији начин за везивање нежељеног сумпора јесте додавање довољних количина мангана. Манган се лакше једини са сумпором стварајући једињење MnS високе температуре топљења које се не појављује у течном стању при топлој преради челика и због тога има незнатан утицај на жилавост коначног производа јер је равномерније распоређен у челику. Ова значајна улога мангана омогућила је да се значајно повећа жилавост конструкционих челика. У току даље прераде MnS се или ваљањем издужује или ковањем ломи и ситни. Присуство великих издужених укључака MnS није пожељно јер може довести до тзв. ламеларног цепања. У новије време овај проблем се елиминише додавањем малих количина калцијума (Ca) око 0.004%. Калцијум служи као модификатор облика сулфида мангана претварајући га у укључак сферног облика који је недеформабилан, односно не мења свој облик у току било које даље прераде. Само увођење калцијума, постојећим квалитетима челика, повећава жилавост и до 40% [4].

2.1.2 Умирени челици

У циљу смањења садржаја кисеоника у челику, који у њему неминовно остаје у току прераде, у завршној фази топљења или у ливачком лонцу додају се дезоксидациона средства. У ту групу спадају елементи који имају већи афинитет према кисеонику од гвожђа. Најчешће коришћени елементи су Al и Si, у количини која се одређује на основу последње хемијске анализе у току производње челика. На овај начин се добија нова врста челика тзв. умирени челици (Si + Al ≈ 0.2%). Назив су добили по понашању у току ливења јер, како више није било слободног кисеоника,

⁷ Супституцијски чврсти раствор настаје када растворени атоми (растворка) замене атоме основе (растварача).

није долазило до оксидације преосталог угљеника и издвајања гасовитих продуката CO, површина је била мирна - више се нису запажали мехурови. Посебно је повољна дезоксидација помоћу Al јер је уочено да, у неким Al - умиреним челицима, долази до таложења укључака алуминијум нитрида (AlN) по границама који блокирају раст металног зрна. Ово се посебно односи на челике који имају висок садржај азота. Лако стварање алуминијум нитрида је последица великог афинитета Al и N. Дакле, алуминијум у челику има двоструку улогу:

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

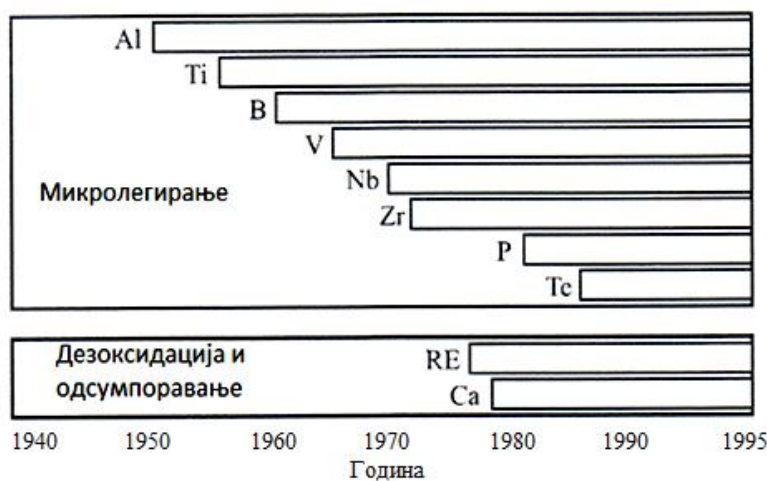
Дезоксидација помоћу Al ствара Al_2O_3 у облику fine прашице тако да се стварају бројни центри кристализације што после кристализације даје повољну ситнозрнасту структуру.

Умирени челици се одликују уједначеном структуром, равномерним хемијским саставом и повољним механичким особинама. Све то доводи до повећања динамичке издржљивости, бољих механичких особина на ниским температурама, боље заварљивости и термичке обрадивости [4].

2.1.3 Микролегирани челици

Микролегирани⁸ челици су развијени на бази C – Mn челика. Тачније, ови челици су настали као резултат истраживања која су имала за циљ проналажење нових елемената који би у челику могли да замене утицај Al. Тако су развијени потпуно нови, до тада непознати челици, легирани са једним или више елемената као што су Nb, Ti, V, Zr, B и тсл. који се називају микролегирани челици. Назив су добили због мале количине легирајућих елемената (највише 0.15%.) при чему је уобичајени садржај угљеника 0.03 до 0.12% (у челицима раније производње и до 0.2%), чиме се задржава добра заварљивост. Доминација неког од наведених елемената искључиво је зависила од његове цене и погодности за термомеханичку обраду. На слици 2.1 је приказан дијаграм почетка примене микролегирања са ког се види да се он везује за крај педесетих и почетак шездесетих година прошлог века.

Развој микролегираних челика је и данас веома интензиван.



Слика 2.1 Хронолошки почеци примене појединих микролегирајућих елемената у челицима

⁸ Ови челици су по перформансама и цени између угљеничних и легираних.

С обзиром на чињеницу да су нове конструкције морале да задовоље нове критеријуме у погледу примене материјала, акценат је стављен на нове челике који су у стању да испуне захтеве у погледу јачине, добре заварљивости, могућности извођења разноврсних термомеханичких обрада итд. Повишен напон течења ових челика је омогућио израду лакших конструкција тако да су они почели да се употребљавају за израду мостова, цевовода високог притиска, судова под притиском, елементе железничких вагона, грађевинских хала и др. Основна карактеристика микролегираних челика је да додавањем малих количина легирајућих елемената долази до интензивног смањења зрна и ефекта таложног ојачања услед издвајања честица стабилних карбида, нитрида и карбонитрида. Конкретније, њихови преципитати⁹ делују као допунски центри рекристализације.

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

2.1.4 ТМСП челици

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

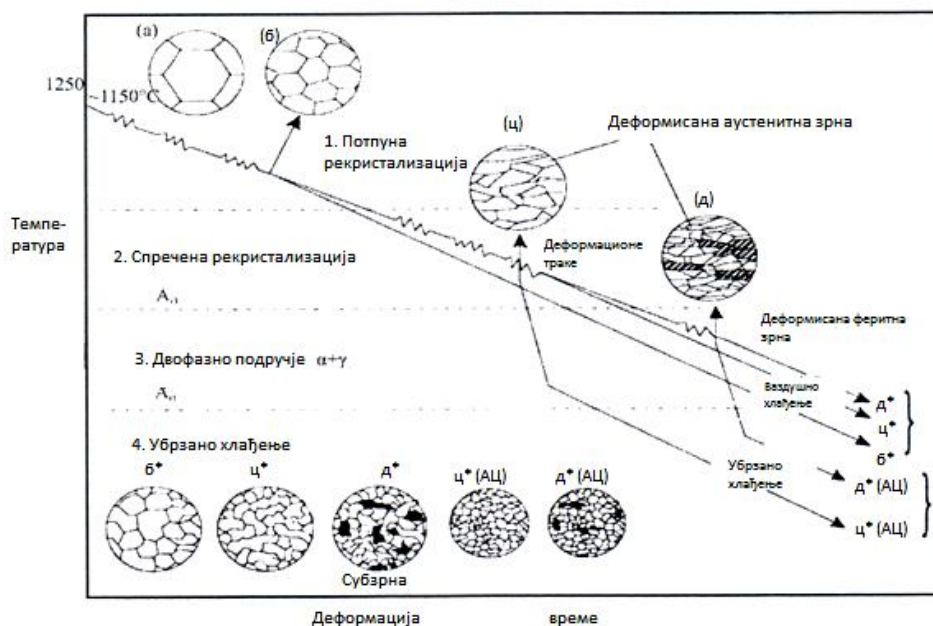
Рекристализационо контролисано ваљање (*Recrystallisation Control Rolling - RCR*). Комплетна топла пластична прерада челика код ове технологије одвија се у рекристализационом подручју тј. у подручју изнад T_{nr} ¹⁰ температуре (температура испод које је рекристализација непотпуна). У овом температурском подручју не долази до термичког таложења. У почетку структура је грубозрна (сл. 2.3а). После ваљања структура се састоји од хомогених рекристалисаних зрна (сл. 2.3б). Ова технологија се користи за прераду дебљих лимова, код којих је немогуће применити класично контролисано ваљање, јер ваљци не могу да издрже толико велики притисак ваљања.

Класично контролисано ваљање (*Conventional Control Rolling - CCR*). Ова технологија се изводи у две фазе: предваљања и завршног ваљања. Предваљање се изводи у температурском подручју у коме је рекристализација потпуна док се завршно ваљање изводи на нижим температурама, односно у подручју спречене рекристализације. Механизам спречавања рекристализације може бити двојак:

⁹ Преципитат или излучевина, талог. Преципитација – излучивање, таложење.

¹⁰ T_{nr} – температура непотпуне рекристализације.

термичко таложење (дуга пауза – прекидно ваљање) и блокада граница зрна услед присуства Nb и/или V у чврстом раствору (кратке паузе – континуално ваљање). После завршетка деформисања рекристалисана структура се хлади до температурског подручја $T_{nr} - A_{r3}$. Сада се структура састоји од деформисаних аустенитних зрна, унутар којих се запажају траке (сл. 2.2ц). Ове траке представљају додатно место за настанак клица феритних зрна па се на крају, после хлађења, добија још финија структура него код RCR ваљања (сл. 2.2ц'). Овом технологијом се најчешће израђују гасоводи у облику топловаљаних трака дебљине до 14 mm (највише 18 mm) а све у зависности од снаге машине за намотавање на котур.



Слика 2.2 Схематски приказ термомеханичке обраде микролегираних челика

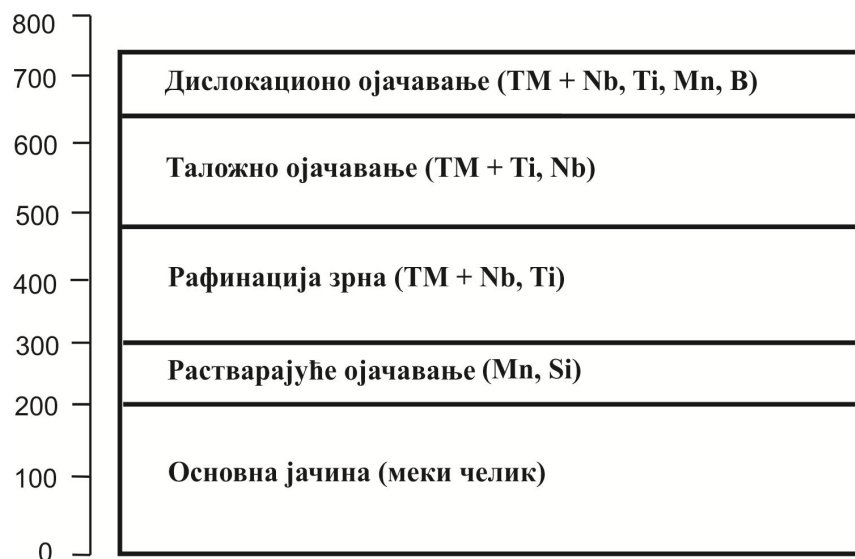
Ваљање у двофазном подручју (*Two Phase Rolling – $\gamma + \alpha + R$*). У суштини ова технологија је модификација CCR технологије. Разлика је само у томе што се у овој технологији завршно ваљање одвија делимично у двофазном подручју. После завршетка поступка у структури се налазе деформисана аустенитна и феритна зрна (слика 2.2д). Завршно ваљање се изводи на релативно ниским температурама. Отпор деформацији је велики и јављају се велики контактни притисци због чега се ова технологија најчешће користи за прераду лимова мање дебљине.

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

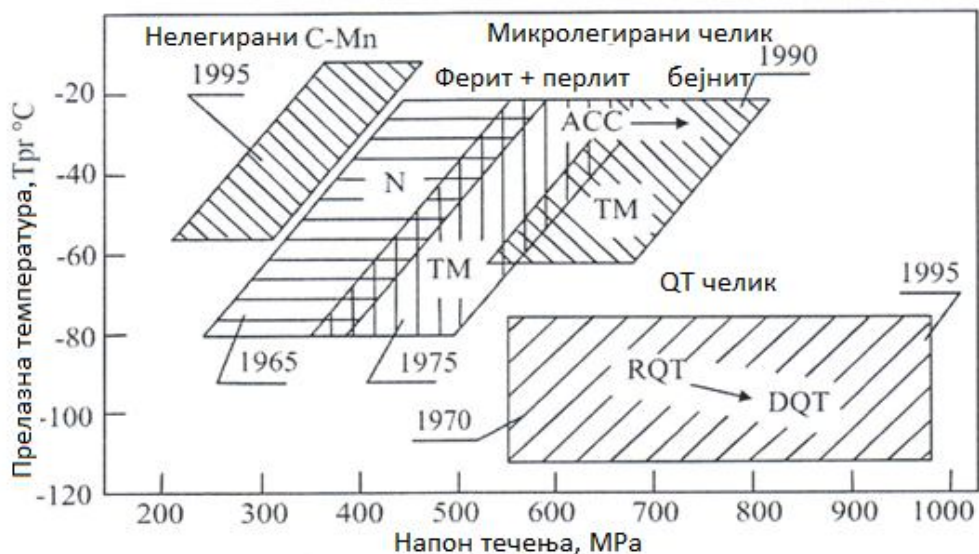
Класично контролисано ваљање са убрзаним хлађењем (*Convential Control Rolling + Accelerated Cooling – CCR + AC*). Ова технологија омогућава контролисање микроструктуре челика путем контролисања брзине хлађења. Трака се деформише применом CCR или $\gamma + \alpha + R$ технологије а затим се убрзано хлади до A_{r1} температуре.

На овај начин долази до издвајања ферита на вишим температурама а преостали аустенит се богати угљеником и азотом што успорава даљу трансформацију. Тако се обезбеђује да се из таквог аустенита, испод A_{T1} температуре, издвоји бејнит и/или мартензит. Овом технологијом се обезбеђује добијање двофазних челика који поседују веома fino феритно зрно и упоредо мартензит и бејнит.

На слици 2.3 и 2.4 су приказани доприноси појединих механизма ојачавања пораста напона течења и односу између напона течења и температуре преласка из жилавог у крто стање.



Слика 2.3 Допринос појединих механизма повећању напона течења термомеханички прерађеног бејнитног челика



Слика 2.4 Однос напона течења и прелазне температуре кртости челика добијених различитим поступцима обраде: N - нормализација, TM - термомеханичка прерада, ACC - убрзано хлађење, QT - каљење и отпуштање

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

- *Контрола чистоће челика.* На побољшање механичких својстава челика, пре свих жилавости основног материјала и ЗУТ-а, може се утицати преко његове чистоће. Према досадашњем развоју индустрије могуће је произвести веома чист челик са укупним садржајем нечистоћа (N, O, H, S, P) мањим од 0.005%.
- *Контрола облика неметалних укључака (Sulphur Shape Control - SSP).* При производњи челика посебну пажњу треба обратити на количину сумпора у њему. Присуство чак и веома малих количина $S \leq 0.001\%$ омогућава формирање MnS укључака у централној зони слаба. Ваљањем се ови укључци издужују у траке што даље доводи до пада жилавости. Оштри крајеви траке се понашају као концентрација напона. Стога се изводи контрола облика неметалних укључака односно превођење издужених у сферне (глобуларне) укључке. То се ради, као што је раније споменуто, додавањем калцијума у количинама до 0.004%.
- *Контролисање микроструктуре ЗУТ-а.* Код уноса великих количина топлоте, као при заваривању, у ЗУТ-у се уз границу топлења метала појављује прегрејана крупнозрна структура која има лоше механичке особине. Да би се овај ефекат спречио, челицима се додаје Ti у количини од око 0.015%. Он омогућава таложење титан нитрида (TiN) по границама металних зрна и практично механички блокира раст зрна услед загревања.
- *Температура предгревања слабова пре топлог ваљања.* Да би се току термомеханичке прераде челика добила повољна хомогена и ситнозрна структура, услов је да материјал после загревања има униформну величину зрна. Због тога, температура предгревања у пећима мора бити нижа од оних на којим отпочиње раст нових зрна. Као најједноставнији начин који може то спречити јесте, као што је већ споменуто, додавање Ti до 0.015%.
- *Контролисано ваљање.* Посебна пажња се посвећује захтеву да се предваљањем не дозволи раст зрна, тако да по завршетку предваљања челик задржи хомогену ситнозрну рекристалисану структуру, јер је она услов за добијање униформног ситног феритног зрна по завршетку ваљања. У току завршног ваљања, услед великог степена деформације, настаје повећање густине деформисаних трака које служе као додатна места нуклеације феритних зрна, па је коначна структура ситнозрнија.
- *Текстура.* У току завршног ваљања долази до усмеравања зрна и формирања текстуре у складу са правцем ваљања што изазива анизотропију¹¹. Поједине компоненте текстуре смањују жилавост у попречном правцу па се мора водити рачуна о њиховом присуству пошто утичу и на простирање ултразвучних таласа а тиме и на поузданост испитивања без разарања.
- *Убрзано хлађење.* Убрзавањем хлађења се обезбеђује веће потхлађење и брзина стварања клица што додатно доприноси смањењу феритног зрна. Такође, једна од последица убрзаног хлађења је и изостајање јасно изражене границе течења због образовања бејнита а понекад и мартензита.
- *Модификација контролисаног ваљања.* Најинтензивнија рафинација аустенитног зрна се постиже споменутом динамичком рекристализацијом (DRCR), која је последица достизања критичног степена деформације при завршном ваљању. Критични степен деформације доводи до значајног повећања укупне површине

¹¹ Анизотропија - различитост особина материјала у зависности од правца ваљања.

границе зрна које даље представљају места на којима ће се формирати нова феритна зрна. Ово је изводљиво само у савремено опремљеним ваљаницама.

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

2.1.5 Нисколегирани челици повишене јачине

2.1.5.1 Бејнитни челици

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

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

При заваривању бејнитних челика основни проблем представља могућност настанка хладних прелина у металу шави и ЗУТ-у, као и пад жилавости ЗУТ-а. Овај проблем се решава смањивањем брзине хлађења после заваривања што се остварује предгревањем или повећањем погонске енергије заваривања.

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

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

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

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

При каљењу припремак мора бити поуздано учвршћен између јаких чељусти или вођен између ваљака да се због брзог хлађења не би деформисао. Температура каљења је увек око A_{c3} (912°C), када је челик потпуно у аустенитном подручју.

Термички побољшани челици употребљавају се за дизалице, мостове, резервоаре за горива, бродску опрему и тсл. У табелици 2.1 су дати карактеристични примери челика повишене јачине из свих претходно наведених група, са механичким особинама и ознакама у домаћим и иностраним стандардима.

Таблица 2.1 Високовредни конструкциони челици [4]

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

2.2 Могућности повећања напона течења

Приликом пројектовања челичних конструкција присутан је стални захтев да се оне изведу уз што мањи угрошак материјала а да се притом не угрози општа и локална сигурност конструкције. Смањење тежине заварене конструкције значи истовремено и смањење времена заваривања и смањени угрошак скупљег додатног материјала. Како је конструисање још базирано на јачини (чврстоћи), као основни параметар за пројектовање се углавном користи напон течења. За повећање овог параметра као најбитнијег могу се користити различити системи легирања и различите технолошке и металуршке мере [4].

Пластична деформација челика се заснива на процесима који се одвијају померањем дислокација¹² кретањем кристалографски повољно оријентисаних равни.

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

¹² Дислокација потиче од латинске речи *dislocation*, што значи промена положаја, умереност.

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

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

2.2.1 Технолошки поступци повећања напона течења

2.2.1.1 Обликовање на хладно

Обликовање на хладно се дефинише као поступак обраде метала на температурама нижим од температуре на којој се изводи рекристализација (око 550°C за челик). Ако метал оптеретимо до његовог напона течења тада, после уклањања оптерећења, у металу неће доћи до промена јер су остварене деформације еластичне природе. Међутим, уколико оптерећење надмаши напон течења, тада ће у металу доћи до промена услед пластичне деформације. При поновном оптерећивању метала његова својства пластичности опадају али расте напон течења. Да би дошло до пластичне деформације треба применити већу силу, што значи да је метал јачи (чвршћи). Гледано на нивоу кристалне решетке, под дејством напона у зони пластичности ($\sigma > R_{p0.2}$) настаје клизање у повољно оријентисаним равнима што доводи до образовања дислокација и њиховог нагомилавања. Са порастом оптерећења расте њихово нагомилавање и укрштање што даље отежава клизање [7].

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

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

2.2.1.2 Обликовање на топло

Обликовање на топло укључује операцију локалног подешавања и исправљања на температурама које надмашују максималну допуштenu температуру за отпуштање напона (око 700°C). Загревање се прецизно контролише у свакој операцији. У случају нормализованих челика, са гледишта опасности од прекомерног пораста зрна, температура радног комада за време обликовања не сме бити виша од 1050°C, а процес не сме дуго да траје. Ако се обликовање изводи у само једној операцији радни комад се не сме загревати изнад 980°C. Уколико се захтева накнадна термичка обрада, обликовање мора да се заврши изнад 750°C. У случају обликовања када процес траје дуго на температурама од 1000 ÷ 1050°C, и када је укрупњавање зрна неизбежно, пре последњег степена обликовања, неопходно је хлађење на мирном ваздуху на температури нижој од 700°C, да би дошло до трансформације аустенита. Да би обезбедили одређене механичке особине, температура обликовања мора да буде 1050°C а у зависности од дебљине зида зависи и брзина хлађења. Уколико се не могу искористити горе наведене препоруке, потребно је на крају процеса извршити нормализацију коју прописује произвођач [7].

2.2.2 Металуршки поступци повећања напона течења

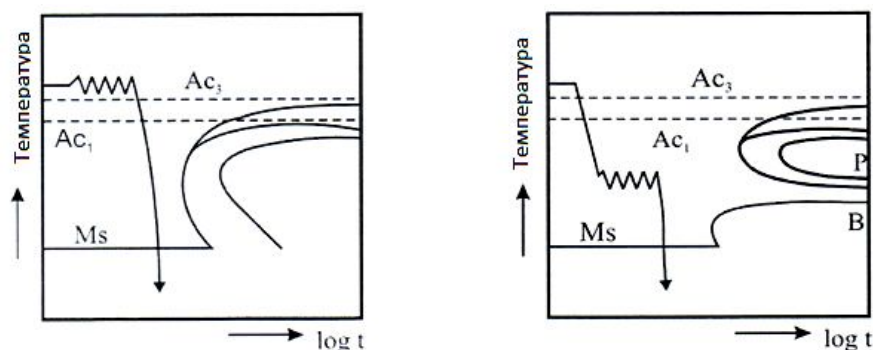
Најугицајнији фактори који подижу напон течења јесу [7]:

- а) **Структура челика** која може бити: феритно – перлитна, бејнитна, мартензитна или сорбитна. Ојачавање чврстог раствора ферита (α -Fe) постиже се пре свега легирањем са Mn и Si. Садржај мангана се обично креће од $1.5 \div 2\%$ а садржај силицијума око 0.5% . Атоми легирајућих елемената растворених у фериту због различитих пречника или металних веза, деформишу кристалну решетку гвожђа и на тај начин се ојачање изводи. Ово ојачање је релативно слабо.
- б) **Супституцијско и интерстицијско ојачање.** Сви легирајући елементи и пратиоци који су присутни у челику образују са гвожђем чврсте растворе. У односу на чисто гвожђе сваки чврст раствор гвожђа има виши напон течења. Елементи који се растварају у гвожђу могу образовати интерстицијски чврст раствор са елементима C, N и B или супституцијски са Mn, Si, Cr, Ni, Cu,... Утицај супституцијских легирајућих елемената Mn и Si је занемарљив у челицима који имају велике количине интерстицијски растворених елемената као што су C и N. Ови елементи ојачавају ферит више него супституцијски, али Mn и Si истовремено повећавају прелазну температуру односно температуру наглог пада ударне жилавости и погоршавају заварљивост. Силицијум у количинама већим од 0.5% повећава еластичност али снижава ударну жилавост. Манган и никал имају добар утицај на снижење прелазне температуре а са повећањем процентуалног учешћа ових елемената расте и напон течења. Такође, садржај угљеника у челику сразмерно утиче на његову јачину али се код челика повишене јачине ограничава на 0.22% због тога што при већим садржајима угљеника челик постаје склон ка закаљивању.
- в) **Величина зрна и субзрна.** Многим истраживањима је утврђено да напон течења металних материјала зависи од величине металних зрна. Величина зрна утиче на затезну чврстоћу материјала али је тај утицај мањи него на напон течења па стога са уситњавањем зрна расте однос $R_{p0.2}/R_m$. Механизам ојачања овим путем доводи до раста напона течења, ударне жилавости и снижења прелазне температуре. Према томе, ситно зрно је најефикаснији начин за постизање оптималних својстава. У пракси се тежи што ситнијем аустенитном зрну јер оно касније предодређује величину феритног. То се постиже нормализационим жарењем, блокирајућим дејством Al преко алуминијум-нитрида и карбида V, Nb, Ti, као и контролисаним степеном редукције и температуре завршног ваљања јер све то одлаже рекристализацију аустенита тј. раста аустенитног зрна пре његове трансформације у ферит. Одлагању рекристализације доприноси и брзо хлађење са температуре завршног ваљања до температуре преласка $\gamma \rightarrow \alpha$ фазу. Тенденција је да се ваљање изврши на $20 \div 30^\circ\text{C}$ изнад A_{C3} температуре и да се по завршеном ваљању брзо хлади. Овај поступак доводи до повећања напона течења и до 150 MPa у односу на нормализационо жарено стање, при истом нивоу ударне жилавости.
- г) **Преципитационо (таложно) ојачање.** Овај поступак се назива и ојачање честицама или ојачање излучивањем. Најважнији је поступак ојачања код нежелезних легура (Al, Cu и Ni), али користи се и код челика (микролегирани, брзорезни итд). Преципитационо ојачање настаје излучивањем карбида, нитрида и карбонитрида Nb, Ti и V, у фериту при контролисаном хлађењу са температуре ваљања или са температуре нормализационог жарења. Ови елементи су названи микролегирајући због веома ниског садржаја обично 0.10% (изузетно 0.20%).

Таложењем се повећава јачина али опада жилавост. У новије време се користи комбинација таложног ојачања и уситњавање зрна помоћу Nb, Ti и V.

2.2.3 Термомеханички поступци повећања напона течења

Овај поступак се, како сам назив говори, изводи тако да при обради морамо да истовремено пратимо два параметра, температуру и механички рад обликовања. Процес термичке обраде којим се челик загрева до температуре изнад тачке A_{C3} , држи на тој температури одређено време, затим добијени аустенит пластично деформише на одређени степен и на крају хлади критичном брзином, у циљу добијања мартензитне структуре, назива се термомеханичка обрада (сл. 2.5). Постоје две врсте ове обраде: високотемпературска (ВТМО) и нискотемпературска термомеханичка обрада (НТМО).



Слика 2.5 Схема високотемпературске термомеханичке обраде (ВТМО) и нискотемпературске термомеханичке обраде (НТМО)

У процесу ВТМО челик се интензивно прерађује (ваља) у области стабилног аустенита на температури нешто изнад A_{C3} температуре ($\approx 950^{\circ}\text{C}$). Степен деформације се креће од $40 \div 90\%$. У деформисаним аустенитним зрнима, при температури обраде, одвија се опорављање и рекристализација. Одмах по појави рекристалисаних зрна челик се нагло хлади односно кали. ВТМО се може применити и код угљеничних и код нисколегираних челика. Код нисколегираних подеутектоидних¹³ челика се, после ове обраде, постиже затезна јачина од чак 2500 MPa .

У процесу НТМО челик се загрева до температура изнад температуре A_{C3} , хлади до температуре $500 \div 800^{\circ}\text{C}$, на којој је аустенит још релативно стабилан (метастабилан), ваља и опет хлади (кали) на мартензитну структуру. Пластична прерада у наведеном температурском интервалу је испод температуре рекристализације аустенита. По завршетку прераде челик се отпушта на ниској температури. Овај поступак се може применити само код добро прокаљивих челика. Челици подвргнути овој преради достижу јачину и до 3000 MPa .

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

¹³ Подеутектоидни челик је челик са мање од $0.77\% \text{ C}$ чија је структура перлитно – феритна.

2.3 Утицај легирајућих елемената на структурне промене у челицима

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

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

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

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

Угљеник (C) највише утиче на особине и структуру челика и сматра се за компоненту у челику. Повећава јачину, тврдоћу, отпорност на хабање, прокаљивост али снижава пластичност и жилавост и погоршава заварљивост. Угљенични и нисколегирани челици са $C > (0.2 \div 0.25\%)$ се сматрају условно заварљивим. У легираним челицима угљеник образује карбиде, који се издвајају по границама зрна, што у аустенитним Cr–Ni челицима ствара услове за међукристалну корозију. У циљу елиминисања те појаве додају се Ti и Nb који делују као стабилизатори. Они везују угљеник у виду стабилних карбида TiC и NbC и тиме спречавају међукристалну корозију. Такође, установљено је да пораст садржаја C и N у челику (у дозвољеним границама) доприноси одржавању својстава отпорности на високим температурама тј. термостојаности [7].

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

Манган (Mn) се због великог афинитета према кисеонику и сумпору употребљава као дезоксидатор. Раствара се у решетки $\alpha\text{-Fe}^{14}$ и незнатно утиче на затезну чврстоћу и смањује својства деформације али повећава његову тврдоћу и жилавост. У угљеничним и нисколегираним челицима повећава отпорност заварених спојева ка топлим прслинама јер образује стабилан сулфид са сумпором (MnS) који је високе температуре топљења ($\approx 1620^\circ\text{C}$). Тако манган везује сумпор и не дозвољава му да са гвожђем гради нискотопљиву еутектику Fe-FeS а тиме смањује могућност за

¹⁴ Гвожђе је полиморфан метал и јавља се у три фазе: Фаза $\alpha\text{-Fe}$ – ферит (испод 912°C) има просторно центрирану кубну решетку – A_2 , $\gamma\text{-Fe}$ – аустенит има површински центрирану кубну решетку – A_1 и егзистира у температурском опсегу од $912\text{-}1394^\circ\text{C}$, и $\delta\text{-Fe}$ – δ -ферит ($1394\text{-}1538^\circ\text{C}$) такође са кубном просторно центрираном кристалном решетком - A_2 .

настанак врућих прслина. Повећањем садржаја Mn у нискоугљеничним и нисколегираним челицима до 1.5% повећава се јачина и жилавост уз одржавање добре пластичности али опада величина феритног зрна при већим количинама [7].

Силицијум (Si) се раствара супституцијски у решетки α -Fe и повећава затезну чврстоћу и тврдоћу а нарочито границу еластичности, па се стога користи код челика за опруге. Додавањем силицијума смањује се жилавост јер долази до стварања плочастог ферита а то смањује енергију удара потребну за лом. У већим количинама се додаје челицима од којих се захтевају већа електрична и магнетна својства. У аустенитним челицима се користи као дезоксидатор јер спречава оксидацију хрома. Силицијум не подлеже сегрегацији¹⁵ и отежава сегрегацију неких састојака као сумпора и фосфора. Смањује критичну брзину хлађења и повећава прокаљивост [7].

Сумпор (S) са гвожђем образује сулфид гвожђа FeS, који се у челику налази у виду еутектикума Fe-FeS распоређеног по границама зрна температуре топљења ($\approx 975 \div 985^\circ\text{C}$), што у принципу умањује отпорност ка прслинама на топло јер настају око солидус температуре. При обради деформисањем на топло на температурама око $1000 \div 1200^\circ\text{C}$ еутектика се топи, веза између зрна слаби и долази до лома. Због тога је садржај сумпора ограничен и зависи од квалитета челика. Креће се у границама од $0.025 \div 0.040\%$ [7].

Фосфор (P) се раствара у решетки α -Fe и повећава затезну јачину и тврдоћу али смањује својства деформације (издужење и сужење). Умањује и отпорност према прслинама на топло и знатно снижава жилавост, нарочито на сниженим температурама. Посебно негативан утицај има при повишеном садржају C и Ni. Количина фосфора се ограничава на $0.025 \div 0.040\%$ у зависности од квалитета челика [7].

Хром (Cr) се у нискоугљеничним челицима обично налази у количинама око 0.3%, у легираним челицима $0.7 \div 3.5\%$, у хромовим челицима $12 \div 18\%$ и у хром-никал челицима $9 \div 35\%$. Повишен садржај хрома у угљеничним и нисколегираним челицима погоршава њихову заварљивост на рачун побољшања прокаљивости. Хром повећава ватроотпорност аустенитних челика у оксидационим условима. При садржају хрома већем од 12% челик је веома отпоран на корозију. Даљим повећањем садржаја хрома та отпорност и даље расте али при садржају Cr > 20% видно опада пластичност. Хром образује веома стабилне карбиде Cr₂₃C₆, Cr₇C₃, Cr₃C₂, који се у челику могу налазити у слободном стању или везани са карбидом гвожђа Fe₃C. Ако челик садржи више угљеника него што је потребно за образовање перлита онда настају услови за образовање слободних карбида хрома. Они се издвајају на границама зрна што може изазвати међукристалну корозију. Критична температура издвајања карбида је $500 \div 800^\circ\text{C}$. Хром изазива померање критичне температуре A_{C1} на горе што доводи до тога да брзина растварања карбида у аустениту буде знатно мања од брзине растварања карбида гвожђа у угљеничним челицима. Због тога се при загревању челика који садрже преко 12% хрома, изнад 1000°C и брзом хлађењу, ствара мартензитна структура а при веома спором хлађењу перлит са раствореним карбидима. Са порастом садржаја хрома смањује се термичка проводност што захтева предострожност при загревању челика, нпр. при преради на топло, термичкој обради или заваривању [7].

Никал (Ni) растворен у фериту повећава јачину и жилавост уз одржавање високе пластичности. Никал има повољан утицај на заварени спој, микроструктура се мења од горњег до доњег бејнита и мартензита, али после жарења за отпуштање напона никал

¹⁵ Сегрегација представља неравномерну расподелу хемијских елемената легуре што узрокује неуједначеност хемијског састава.

има негативан утицај. Ово се објашњава претпоставком да у току заваривања долази до сегрегације по границама зрна, а у току загревања нечистоће као што су фосфор, калај и антимоно дифундују према границама зрна, стварајући међукристалну кртост. Никал је елемент отпоран према оксидацији а у челику делује и као графитизатор (разлаже цементит), па челици богати никлом треба да садрже мање угљеника [7].

Молибден (Мо) се у конструкционим челицима налази у границама од $0.2 \div 0.5\%$. Изазива уситњавање зрна, повећава жилавост на високим температурама и закаљивост у ЗУТ-у споја. Са повећањем садржаја Мо расту јачина и напон течења, док издужење и контракција опадају при $Mo > 2.3\%$ [7].

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

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

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

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

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

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

Титан (Ti) је елемент највећег афинитета према угљенику па се зато често примењује као стабилизатор у челицима отпорним на киселине у циљу везивања угљеника и спречавања настанка карбида хрома. Титан смањује тврдоћу као и

величину аустенитног зрна због термички стабилних зрна које образују учвршћене границе. Титан ствара честице титан-нитрида (TiN), титан-карбида (TiC) и оксиде а када су присутни и други елементи нпр. V, Nb и др. може образовати веома сложене укључке који могу имати нижу тачку топљења и бити мање стабилне, тако да се тај ефекат титана мора сагледати. При највишој температури (1300°C) излучује се TiN. Он се излучује по границама зрна, делује као допунски центар кристализације и ефикасан је у спречавању раста металног зрна. Титан повећава отпорност заваара према прслинама на топло.

Бор (В) је елемент који образује карбиде и веома повећава прокаљивост челика ако се дода у малим количинама. При већим садржајима бора прокаљивост челика опада и долази до раста зрна. Челицима се обично додаје у малим количинама око 0.003%. Има мали пречник атома што му омогућава да образује интерстицијски чврсти раствор. Бор умањује количину нежељених елемената у металу шава јер лако везује кисеоник образујући оксид који је лако топљив па нестаје у металу шава. Бор има велики афинитет према азоту – образује нитриде, али не може знатно да повећа јачину [7].

2.4 Производња челика повишене јачине класе S690QL

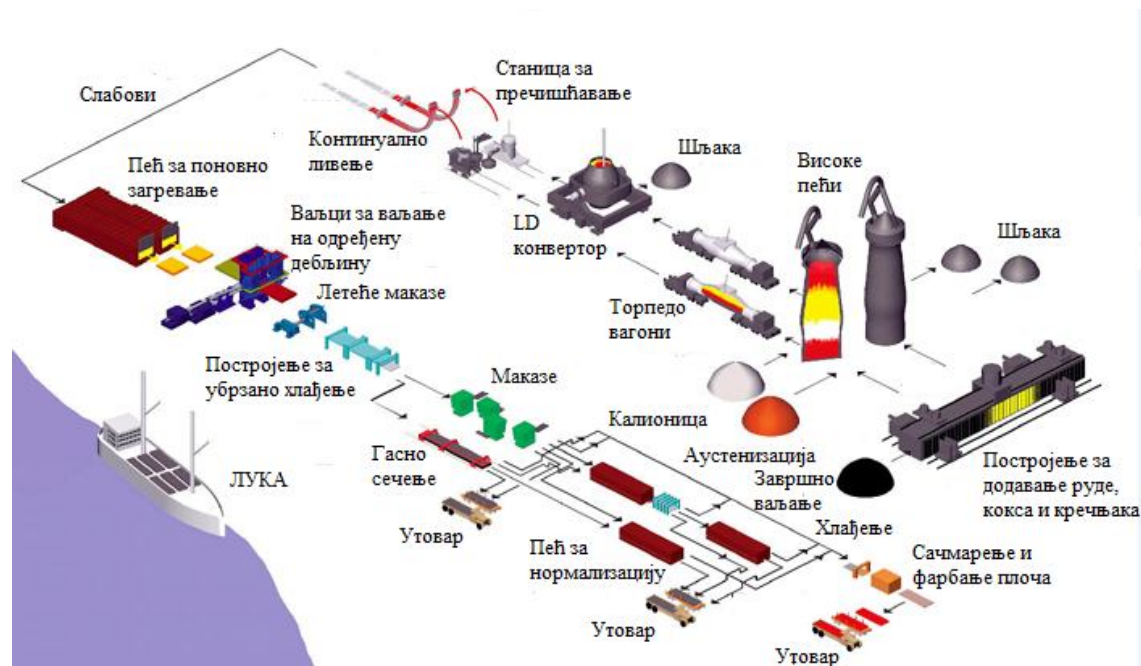
Класе челика S690QL¹⁶ се добијају по строго контролисаном хемијском саставу и тачно дефинисаним производним фазама. То омогућава да се остваре повољне механичке особине са уским границама толеранција. Разликују се две врсте ових челика: конструкциони и челици за судове под притиском. Њихова структура је феритно-перлитна па спадају у групу добро заварљивих челика али само за плоче релативно мале дебљине. За веће дебљине треба се придржавати препорука које се, углавном, односе на предгревање, контролисан унос топлоте при заваривању и на термичку обраду пре, у току и после заваривања. Добијају се поступцима термомеханичке обраде челичних полупроизвода на високим температурама (ваљање и контролисано хлађење).

Постоје три модификације¹⁷ ове класе челика а разликују се само у погледу температура на којима им се гарантује енергија удара ЗУТ-а од 27 J. Те три модификације су: S690Q, S690QL, и S690QL1. Челик S690QL има гарантовану ударну жилавост од 27 J на температури од -40°C.

S690QL челици се производе ливењем у инготе. Пре ваљања инготи се загревају на приближно 1200°C а затим прогресивно ваљају до захтеваног коначног облика – плоча или профила. Први део ваљања се изводи у зони рекристализованог аустенита (изнад 950°C), где се рекристализација одвија већ при ваљању, док се аустенитно зрно смањује редукијом дебљине улошка. Ваљање се онда наставља у подручју метастабилног аустенита где долази до хладне деформације а аустенитна зрна остају деформисана. За време трансформације свако аустенитно зрно даје много феритних зачетака по својим кристалним границама зрна. После завршене трансформације настао је велики број феритних зрна која побољшавају својства јачине и жилавости челика. Схематски приказ процеса производње ових челика приказан је на слици 2.6 [13].

¹⁶ Комерцијална ознака челика S690QL је WELDOX (Железара SSAB – Oxelösund, Шведска)

¹⁷ S690Q = Weldom 700D (-20°C), S690QL = Weldom 700E (-40°C) и S690QL1 = Weldom 700F (-60°C).



Слика 2.6 Схематски приказ процеса добијања челика S690QL

Постројење за додавање кокса, руде и топитеља. Ово постројење је састављено од око 100 пећи које испоручују угаљ. Пећи могу примити око 14 тона угља и загрејане су на 1000°C. После приближно 20 сати од суве дестилације угаљ постаје кокс. Кокс је у ствари камени угаљ који садржи више од 90% угљеника и има изузетну калоричност. Даље се кокс пуни у вагоне и хлади водом у торњевима за гашење.

Високе пећи. Кроз горњи отвор пећи, у одређеним количинама и по одређеном редоследу, убацују се комади руде гвожђа (магнетит, сидерит,...), кокса и топитеља¹⁸. Кокс углавном служи као гориво али такође омогућава да гасови несметано струје кроз материјал у пећи. Сирово гвожђе се испушта кроз отвор на дну саме пећи, приближно на сваких 4-5 сати по 400-500 тона тако да дневна продукција достигне и 2000 тона. Поред отвора за испуштање сировог гвожђа нешто изнад постоји и отвор за испуштање шљаке или згуре (састава SiO₂, CaO, Al₂O₃ и др.). У зависности од хлађења растопа угљеник садржан у њему (око 4-5%) се може излучити у слободном облику у виду графита или у везаном као карбид гвожђа (цементит Fe₃C). При спором хлађењу и додавању силицијума угљеник се излучује у виду фино распоређеног графита у металу који се зове сиво ливено гвожђе (због боје прелома). Супротно томе, ако се растоп брже хлади, уз смањење Si и додатак Mn угљеник се излучује као цементит и настаје бело ливено гвожђе, намењено за прераду у челик. Висока пећ ради непрекидно а за време рада се само допуњује неопходним сировинама.

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

LD конвертор (пећ). У LD конвертору (добили назив по Аустријским железарама Linz Donawitz), се истопљено ливено гвожђе продувава чистим кисеоником. У конвертору се сирово гвожђе из пећи меша са ситним комадима челика.

¹⁸ Топитељи потпомажу сагоревање и издвајање шљаке на површину растопа и смањују температуру топлења. Као топитељ се најчешће користи кречни камен CaCO₃ мада то може да буде и SiO₂.

Непосредно пре почетка реакције са кисеоником додаје се топитељ који потпомаже издвајање троске на површину растопа. У конвертор се спушта цев кроз коју се удубава кисеоник. Удубани кисеоник реагује са гвожђем док гвожђе оксид (FeO) реагује са угљеником и примесима. Ливено гвожђе постаје челик тек када се садржај угљеника смањи на мање од 2.11%. Из LD конвертора растопљени челик се најпре претаче у казан а затим преноси до станица за пречишћавање.

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

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

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

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

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

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

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

Класа челика S690QL се добија загревањем до температура у аустенитном подручју, затим каљењу са тих температура, уз ваљање на високим или нижим температурама, и на крају отпуштањем у циљу добијања структуре ситнозрног перлита.

3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ И ПРОБЛЕМИ ПРИ ЗАВАРИВАЊУ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Заваривање представља комплексан процес спајања материјала, најчешће метала, који обухвата и обједињује више чинилаца у циљу добијања завареног споја жељених карактеристика. Са развојем нових челика долази и до интензивног пораста истраживања у областима заваривања јер је више од 50% свих ваљаних челичних производа намењено за заваривање. Када се говори о проблемима који се при заваривању јављају, највећи проблем, између осталих, је заварљивост материјала. Како је и сама заварљивост врло комплексан појам то ће у наредном делу рада овој проблематици бити посвећено више пажње, с посебним освртом на заварљивост челика повишене јачине и челика класе S690QL.

3.1 Појам заварљивости

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

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

Металуршка заварљивост материјала зависи од низа фактора: хемијског састава, структуре, начина производње материјала, садржаја гасова и неметалних укључака итд. При томе ова заварљивост обухвата све металуршке промене у материјалу настале дејством топлоте унете при заваривању. У току процеса заваривања може доћи до недопуштеног погоршања, односно снижења механичких и технолошких својстава споја, нарочито у зони око шавова, што значи да код материјала лоше заварљивости могу настати знатне промене хемијског састава, прслине, тврде и крте структурне компоненте и тсл. Утврђено је да су метали и легуре металуршки незаварљиви ако се њихови саставни хемијски елементи не растварају у чврстом агрегатном стању већ образују тврда и крта хемијска једињења (нпр. карбиде). Насупрот томе, заварљиви су сви хомогени метални материјали који стварају чврсте растворе и нееутектичке и еутектичке смеше, односно сви материјали који поседују металуршку заварљивост могу се успешно заваривати применом одговарајућег метода, поступка и технологије заваривања [6].

Конструкциона заварљивост показује утицај низа параметара на решења заварених елемената конструкције, нпр.: дебљине, врсте, броја и распореда спојева, величине шавова и њихове расподеле, које конструктор поставља пројектним захтевом за дату конструкцију зависно од начина оптерећења и радних услова [6].

Технолошка заварљивост обухвата утицај технолошких параметара на заварени спој, нпр. додатног материјала, начина и поступка заваривања, линијске енергије

заваривања, брзине хлађења итд. Притом се цени да ли се технолошки поступак изводи без тешкоћа или се морају применити посебне мере (предгревање, жарење, рад у специјалној атмосфери), а оцена се даје управо на основу предузетих мера и других радних услова. Из оперативног аспекта који се односи на понашање неког материјала при заваривању или наваривању, они се оцењују као „добро заварљиви“ ако је шав чист и хомоген, тј. када се основни и додатни материјал спајају у хомогену легуру, а притом се топе без тешкоћа, прскања, појаве прслина, гасних мехурова и других грешака [6].

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

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

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

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

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

Из изложеног се може закључити да је при заваривању неког материјала потребно утврдити:

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

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

Из до сада познатих сазнања за оцену и дефиницију заварљивости запажа се да нема униформних и експлицитних дефиниција овог, за праксу, веома важног својства. Али се, као пример, може навести најраспрострањенија дефиниција заварљивости Међународног института за заваривање¹ која гласи [6]:

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

¹ ИВ – International Institute of Welding (МИЗ)

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

У пракси су уобичајена два приступа за оцену заварљивости:

1. Процена задовољавајућих вредности показатеља заварљивости за испитиваани облик споја, материјал и начин заваривања (тестирање материјала) и
2. Избор услова и других мера при заваривању да би се реализовали задовољавајући резултати (потврда технологије).

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

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

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

- тврдоће завареног споја (метал шава, ЗУТ и ОМ),
- чврстоће (јачине) и
- ударне жилавости.

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

3.2 Проблеми при заваривању челика повишене јачине

Поред горе споменуте заварљивости, постоји још низ проблема који се могу јавити при заваривању. Челици повишене јачине се, условно, сматрају заварљивим. Под појмом условно се мисли на примену мера које ће помоћи успешно извођење процеса заваривања, али и поред примене одређених мера долази до деградације особина у зони утицаја топлоте. Нежељене појаве које се могу уочити при заваривању ових челика су: пораст тврдоће, смањење жилавости, повећање прелазне температуре кртости и појава различитих врста дисконтинуитета. Свакако је најбитније обезбедити сигурност од кртог лома, чему доприноси постизање довољно ниске температуре кртости. Како би заваривање било продуктивније, тежи се избегавању предгревања али никако уколико то угрожава квалитет извођења процеса. Предгревање се у неким случајевима може надоместити повећаним уносом топлоте (погонске енергије q_1).

Код заваривања челика повишене јачине, појава прслина и кртих фаза је везана за брзо хлађење шава и његове околине у области температура највеће нестабилности аустенита. Како би се избегле те нежељене појаве тежи се смањењу брзине хлађења, односно продужавању времена хлађења – фазних промена. Та брзина хлађења, која не сме да се прекорачи јер долази до настанка кртих фаза, се назива критична брзина

хлађења (v_{kr}) и тачно је дефинисана за сваки челик. У случају прекорачења критичне брзине хлађења долази до настанка мартензита који узрокује појаву прслина. Смањење брзине хлађења се може постићи:

- предгревањем целог завариваног предмета до одређене температуре а затим његовим заваривањем или
- применом параметара заваривања који обезбеђују довољну количину топлоте, не само за топлење додатног материјала и ивица заваривачког купатила, већ и за загревање највеће могуће запремине завариваног дела у околини шави.

У низу случајева се могу применити оба горе споменута начина за смањење брзине хлађења. Повећање тврдоће изазвано структурним трансформацијама се најчешће јавља у грубозрнастој области ЗУТ-а. Један од најважнијих чинилаца је количина унете топлоте при заваривању и она има директан утицај на излазна својства завареног споја. Подаци о оптималном уносу топлоте се врло често могу наћи у препорукама произвођача челика, на основу чега се могу одредити параметри заваривања (I , U и v_z), према релацији:

$$q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta_i \cdot \frac{J}{cm}, \quad (3.1)$$

где је: q_l – погонска (линијска) енергија заваривања у J/cm ,

U – напон лука у V ,

I – јачина струје у A ,

v_z – брзина заваривања у cm/s и

η_i – степен искоришћења (зависи од поступка заваривања).

На структуру, а тиме и на својства ЗУТ-а и метала шави, пресудан утицај има време хлађења челика у температурском опсегу од 800 до 500°C ($t_{8/5}$). У том интервалу температура се одвија највећи део структурних промена (распад аустенита) које битно утичу на његова својства. За одређивање добијене структуре се користе трансформациони дијаграми и то: ТТТ² (Time – Temperature – Transformation) дијаграми из којих се на основу познате вредности $t_{8/5}$ могу донети закључци о добијеној структури и тврдоћи при хлађењу челика и КН³ дијаграми чија је употреба прикладнија и меродавнија у случају праћења структурних промена при заваривању. Разлика између две горе споменуте врсте дијаграма је у томе што су у КН дијаграму унете криве континуалног хлађења челика различитим брзинама и у зависности од тих брзина резултујуће структуре и тврдоће, док у дијаграму изотермалног распада аустенита коначна структура зависи од температуре и времена држања на њој.

3.2.1 Проблеми при заваривању Q + T челика повишене јачине

Ови челици, у које спада и S690QL, су нискоугљенични ($C < 0.2\%$) али и поред тога склони су закаљивању, чак и при релативно спором хлађењу. С обзиром на то, при заваривању ових челика није довољно само водити рачуна о технолошким параметрима којима се постиже правилно формирање шави, већ се мора водити рачуна и о уносу топлоте јер она може негативно утицати на заварени спој. Зато код ових челика промена структуре, механичких својстава и осетљивост према прслинама може

² Ови дијаграми се називају још и IRA (Изотермални Распад Аустенита) или S криве.

³ Дијаграми континуалног хлађења се називају још и АРА (Анизотермални Распад Аустенита) или CCT (Continuous Cooling Transformation) дијаграми.

зависити од температурских циклуса. Главне карактеристике температурских циклуса услед којих се одвијају наведене промене су: максимална температура, време задржавања изнад A_{C3} температуре и брзина хлађења у температурском интервалу најмање стабилности аустенита ($800 - 500^{\circ}\text{C}$).

Оптимални параметри заваривања се одређују из услова да брзина хлађења и време задржавања изнад A_{C3} температуре буду у границама у којима се постижу најбоље особине завареног споја. За одређивање брзине хлађења, у литератури постоји низ аналитичких израза али је из практичних разлога боље да се користи време хлађења између 800 и 500°C тј. $t_{8/5}$.

Код $Q + T$ челика, контролисати услове и параметаре заваривања тако да изабрана температура предгревања као и међуслојна (прелазна, *interpass*⁴) температура буду довољно високе да спрече настанак хладних прслина, с једне стране, а да буде довољно ниска да спречи нарушавање структуре постигнуте производњом челика што се огледа у паду пластичности и јачине у ЗУТ-у.

Заварене конструкције од $Q + T$ челика могу показати склоност ка образовању прслина под утицајем поновног загревања (отпуштање) с обзиром на нестабилно структурно стање тих челика и тежњу такве структуре да пређе у стабилније стање (да смањи ниво слободне енергије). Треба ипак да се истакну следећи проблеми који су битни из аспекта склоности ка кртом лому заварених спојева од ових челика:

- ограничена резерва пластичности, због велике јачине челика,
- могућност постојања локалних зона мање пластичности у односу на остатак конструкције и
- могућност настајања прслина (пре свега водоничних) у процесу заваривања у металу шави и ЗУТ-у, које могу представљати потенцијално место за настанак кртог лома.

Код нисколегираних побољшаних ($Q + T$) челика, чији је један од представника разматрани челик S690QL, за разлику од других конструкционих челика, боље је примењивати неку од технологија које дају нижу погонску енергију, као што је РЕЛ заваривање и заваривање у заштити гаса. За ове челике нарочито важи препорука да се технологија заваривања прописује повезано са траженим излазним карактеристикама завареног споја. Те препоруке подразумевају:

- да за РЕЛ заваривање погонска енергија (q_l) буде у границама $8 - 12 \text{ kJ/cm}$ и
- за ЕРР поступак од $13 - 30 \text{ kJ/cm}$.

3.3 Методе за испитивање заварљивости

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

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

⁴ *Interpass* температура је температура до које се охлади једнопролазни завар у тренутку када се почиње са полагањем наредног завара.

- рачунске методе,
- практичне (лабораторијске) методе,
- технолошка испитивања (пробе) и
- оцена заварљивости на основу КНЗ дијаграма.

Подаци потребни за успешну оцену заварљивости наведеним методама су:

- хемијски састав основног материјала,
- дебљина, тип и кругост споја и
- начин заваривања.

3.3.1 Рачунске методе

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

Тако се за закаљиве челике CE израчунава помоћу израза [3, 9]:

$$CE = C + \frac{Si}{4} + \frac{Mn}{4}, \quad \% . \quad (3.2)$$

Из наведеног израза (3.2) се запажа да повећање садржаја угљеника погоршава заварљивост четири пута више од пратећих елемената силицијума и мангана. За угљеничне челике се додатком мангана и осталих елемената Cr и Mo , који повећавају склоност ка закаљивању, а погоршавају заварљивост, користи се израз [3, 9]:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4}, \quad \% . \quad (3.3)$$

Промена заварљивости, у зависности од квалитативно-квантитативног састава материјала и њиховог утицаја сразмерно угљенику, проучавана је од стране многих аутора, па се у литератури може наћи велики број једначина за израчунавање CE и оцену заварљивости. Али, у пракси се највише користи формула МИЗ-а која највише одговара нисколегираним челицима, па се за њих највише и примењује [3, 9]:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \quad \% . \quad (3.4)$$

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

$$HV_{max} = 1200 \cdot CE - 200 \text{ и} \quad (3.5)$$

$$HV_{max} = 1200 \cdot CE - 260 . \quad (3.6)$$

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

услови, и тсл). Препоручене вредности за хемијски еквивалентни угљеник, у зависности од начина добијања челика, су [3, 6, 9]:

- за нормализоване челике $CE = 0.38 \div 0.43\%$
- за контролисано хлађене челике $CE = 0.34 \div 0.40\%$
- за убрзано хлађене челике $CE = 0.30 \div 0.36\%$

На основу експерименталних истраживања и дугогодишњег искуства, CE може да се примени за оцену заварљивости на следећи начин:

- ако је $CE > 0.50\%$ могућност добијања јединствених спојева, који испуњавају све предвиђене захтеве, веома је мала и неопходно је применити низ технолошких мера,
- за $0.30\% < CE < 0.50\%$ могу да се добију спојеви захтеваног квалитета али уз примену предгревања и других технолошких мера и
- ако је $CE < 0.30\%$ могуће је добити спојеве захтеваног квалитета и без додатних технолошких мера.

Међутим, оваква искуствена процена не може бити прецизна јер се при прорачуну хемијског еквивалента угљеника, осим хемијског састава, не узима у обзир ниједан утицајни фактор (дебљина спојева, крутост завареног споја и др.). Због тога се за прецизну оцену заварљивости челика повишене јачине чешће користе параметарске једначине. Параметарске једначине се примењују за оцену заварљивости челика до дебљине од 60 mm, и хемијског састава у следећим границама: C = 0.07 – 0.22%; Ni < 1.2%; Cu < 0.5%; P < 0.03%; S < 0.03%; Mn = 0.4 – 1.4%; Mo = 0 – 0.7%; Cr < 1.25%; Si < 0.6%; V < 1.2%; B < 0.005% и H = 1 – 5 ml/100g.

3.3.1.1 Прорачун температуре предгревања

За постизање захтеваних карактеристика завареног споја, неопходно је правилно утврђивање услова заваривања. Један од тих услова, можда и основни, јесте предгревање.

Предгревање подразумева постепено и равномерно загревање радних предмета пре заваривања на одређену температуру и одржавање те температуре у току заваривања, све до завршетка процеса. Предгревање може бити локално и потпуно. Потпуно се предгревају делови мањих димензија док се локално користи за веће делове и представља јефтинији начин загревања дела.

Разлози за примену предгревања су:

- утицај на брзину хлађења у ЗУТ-у,
- утицај на дифузију водоника у шаву,
- смањење термичких напона при заваривању,
- смањење количине топлоте потребне за топљење метала високе топлотне проводљивости и др.

Температура предгревања (T_p) мора бити оптимална и једнака за све време заваривања, односно ни прениска, када предгревање не би имало сврху али ни превисока како не би дошло до деградације својстава материјала добијених примарном прерадом. Температура предгревања се одређује на основу хемијског састава и дебљине основног материјала, температуре околине, начина одвођења топлоте (врста и облик споја) и количине топлоте која се уноси у процес заваривања.

Предгревање се користи у више случајева и то:

- када се заварује на ниским температурама (нижим од + 5°C)

- код материјала добре топлотне проводљивости (Cu, Al, Ag,...)
- код делова велике дебљине,
- када је хемијски еквивалент угљеника већи од 0.40% и др.

3.3.1.1.1 Метод Сеферијана

Постоји више израза за израчунавање температуре предгревања при чему се добар део њих у прорачуну ослања само на еквивалентни угљеник. С обзиром на то да поред еквивалентног угљеника на заварљивост утиче и низ других фактора, такви прорачуни нису потпуно поуздани. Због тога је Сеферијан извео израз за укупни еквивалентни угљеник као збир хемијски еквивалентног угљеника и еквивалентног угљеника дебљине јер дебљина делова има утицај на заварљивост. Тај израз гласи [3]:

$$[C] = [C]_h + [C]_s, \quad (3.7)$$

где су:

$$[C]_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7Mo}{90}, \%, \quad (3.8)$$

$[C]_h$ - хемијски еквивалентни угљеник,

$[C]_s$ - еквивалентни угљеник дебљине (s у mm),

па се добија:

$$[C] = [C]_h \cdot (1 + 0.005 \cdot s), \%. \quad (3.9)$$

За условно заварљиве челике Сеферијан је предложио емпиријски израз за одређивање T_p , који је добијен као резултат испитивања расподеле тврдоће у зони испод наваара различитих нисколегираних челика.

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{[C] - 0.25}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.10)$$

3.3.1.2 Параметарске једначине хладних прслина

Хладне или водоничне прслине настају после завршетка заваривања или после полагања појединих завара при вишеслојном заваривању. Настају на температурама нижим од 300°C . Хладне прслине могу настати и до 48 сати по завршетку заваривања. Могу се појавити у ЗУТ-у и у металу шава и могу бити подужне или попречне. Могу бити површинске и унутрашње па самим тим и теже за откривање. Хладне прслине настају услед:

- појаве матрентитне или доњо-бејнитне структуре,
- довољне количине дифундованог водоника и
- притискујућих напона одређене величине.

Хладне прслине се могу елиминисати правилним избором технолошких параметара заваривања и правилним избором основног материјала.

За оцену склоности ка хладним прслинама $C - Mn$ челика, нелегираних и нисколегираних челика са напоном течења од $272 - 870 MPa$ се примењују емпиријски изрази који узимају у обзир хемијски састав основног материјала, количину дифундованог водоника и критичну дебљину споја. Склоност ка прслинама се може

израчунати према више аутора. Тако се према чешким ауторима дају следећи изрази [3]:

$$P_{hp} = P_{CM} + \frac{K}{40000} + 0.015 \cdot \log \frac{H}{2.77}, \quad \text{за } K \leq 1300, \quad (3.11)$$

$$P_{hp} = P_{CM} + \frac{K}{40000} + 0.075 \cdot \log \frac{H}{2.77}, \quad \text{за } K > 1300, \quad (3.12)$$

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo + V}{15} + 5B. \quad (3.13)$$

где је: $K = 70 \cdot s$ – фактор крутости сучеоних спојева,

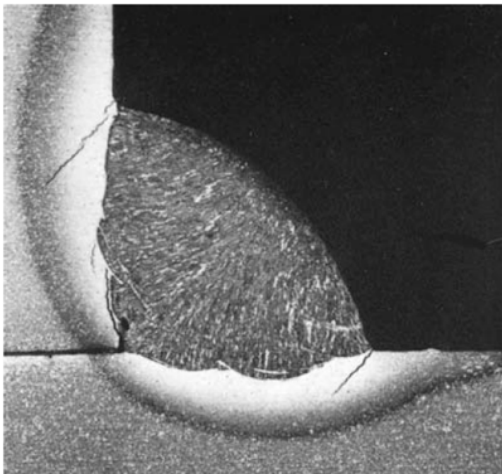
s – дебљина завариваног материјала у mm и

H – садржај дифундованог водоника у $ml/100g$ метала шави.

Заварени спој за који се добије $P_{hp} \leq 0.24$ се сматра отпорним према хладним прслинама, док је за вредности $P_{hp} > 0.24$ потребно предгревање на температури израчунатој према следећем изразу [3, 9]:

$$T_p = 1600 \cdot P_{hp} - 308, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.14)$$

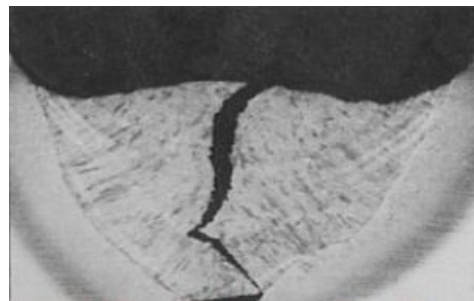
Један од основних задатака при електролучном заваривању јесте спречавање настанка хладних прслина (слике 3.1, 3.2 и 3.3) у завареном споју и ЗУТ-у, и добијање заварених спојева тражених механичких особина.



Слика 3.1 Макрографски приказ хладних прслина у ЗУТ-у



Слика 3.2 Микрографски приказ хладне прслине



Слика 3.3 Макрографски приказ хладне прслине у металу шави

За испуњавање тог задатка неопходна је примена таквих температурских циклуса за време заваривања који обезбеђују одређену (повољну) брзину хлађења споја у температурској области највеће нестабилности аустенита и његовог преображаја, при чему не доводе до предугог задржавања изнад A_{C3} температуре јер може доћи до пораста зрна. Максимална брзина хлађења зависи од хемијског састава, дебљине радних делова као и од садржаја водоника у растопљеном металу.

По аналогији са формулом за еквивалентни угљеник, од стране јапанских аутора (*Imo* и *Bessyo*) је предложен показатељ склоности нисколегираних челика ка образовању хладних прслина при заваривању [3, 9]:

$$P_C = P_{CM} + \frac{s}{600} + \frac{H}{60}, \% , \quad (3.15)$$

$$P_{CM} = C + \frac{V}{10} + \frac{Mo}{15} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + 5B, \% , \quad (3.16)$$

где је: P_{CM} – показатељ који узима у обзир хемијски састав основног материјала и који се израчунава, у зависности од процентуалног садржаја легирајућих елемената, по датој формули,

s – дебљина основног материјала у mm и

H – количина дифундованог водоника у $ml/100g$ метала шава, измерена глицеринском методом или методом живе.

Осим горе наведених једначина јапанских аутора, у литератури се може наћи и једначина руских научника Мисипћенка и Косаткина [3]:

$$P_{CE} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{14} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0.0024 \cdot s, \% . \quad (3.17)$$

Предгревање, као мера за спречавање појаве прслина, се препоручује ако су вредности израчунате према параметарским једначинама у опсегу $0.25 \div 0.40$. Тада се потребна температура предгревања добија:

$$T_p = 1440 \cdot P_C - 392, ^\circ C . \quad (3.18)$$

Практична примена једначине 3.19 је сложена јер она важи за заваривање на обичном режиму и за релативно узак опсег вредности P_C , тачније за $0.25 < P_C < 0.40$. Међутим, при заваривању челика повишене јачине дијапазон промене P_C је шири $0.25 < P_C < 0.50$. Функција $T_p = f(P_C)$ није линеарна за вредности које излазе из поменутог опсега, већ има експоненцијални карактер па се зависност $T_p = f(P_C)$ са довољном тачношћу описује једначином [3]:

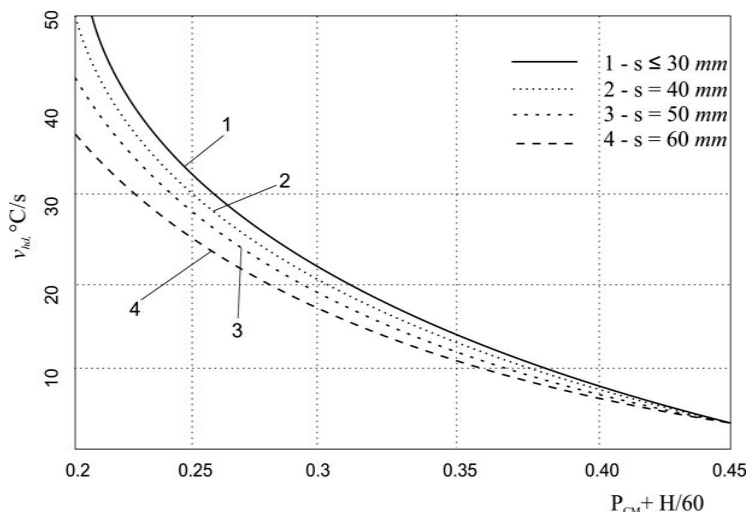
$$T_p = 350 \cdot \{1 - e^{[-5 \cdot (P_C - 0.27)]}\}, ^\circ C . \quad (3.19)$$

На појаву хладних прслина утиче: садржај водоника, тврдоћа, дебљина и крутост споја па се због међусобне интеракције не може одредити максимална дозвољена тврдоћа ЗУТ-а, а да се притом не узме у обзир садржај дифундованог водоника. Зато се, за челике повишене јачине, тврдоћа повезује са садржајем дифундованог водоника чија се вредност усваја из таблице 3.1 или се одређује експериментално глицеринским тестом

Таблица 3.1 Садржај заосталог водоника у металу шави

Начин заваривања		Садржај водоника у ml/100g
У смеши гасова CO ₂ (МАГ) или Ar (ТИГ)	Чиста жица	2 ÷ 7
	Прљава жица	6 ÷ 12
Ручно – електролучно (РЕЛ)	Базичне несушене електроде	12 ÷ 20
	Базичне електроде сушене на 100-150°C	6 ÷ 12
	Базичне електроде сушене на 400-500°C	3 ÷ 7
	Ругилне електроде	20 ÷ 35
Под прахом (ЕПП)	Чиста жица или сушени прах	5 ÷ 10
	Прљава жица и несушени прах	10 ÷ 25

Максимална дозвољена брзина хлађења првог завара v_{hd} (Q + T) челика се може одредити помоћу дијаграма приказаног на слици 3.4, добијеног технолошким испитивањем по методи Текен (*Tekken*), из услова да се не појаве хладне прслине у завареном споју.



Слика 3.4 Зависност максимално дозвољене брзине хлађења од показатеља $P_{CM} + H/60$

Када се одреди v_{hd} у следеће изразе 3.21. 3.22 и 3.23 треба заменити $v = v_{hd}$ и $T_K = 500^\circ\text{C}$, одакле затим може да се израчуна $(T_K - T_0) = f(q_l)$. Затим се по познатој процедури одређује q_l и најзад $(T_K - T_0)$, односно температура предгревања $T_P - T_0$.

Приликом прорачуна брзине хлађења на основу аналитичких израза полази се од параметара P_X којим се процењује дебљина, односно да ли су плоче танке или дебеле:

$$P_X = \rho \cdot c \cdot s^2 \cdot \frac{T_K - T_0}{q_l \cdot N_3} \tag{3.20}$$

Вредности $P_X > 0.90$ односе се на дебеле плоче за које је:

$$v = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \frac{(T_K - T_0)^2}{q_l \cdot N_3}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}, \quad (3.21)$$

а вредност $P_X < 0.33$ на танке лимове којима одговара:

$$v = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot c \cdot \rho \cdot s \cdot \frac{(T_K - T_0)^2}{q_l \cdot N_3}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (3.22)$$

За плоче средњих дебљина, када је вредност P_X између, односно $0.33 < P_X < 0.90$ брзина хлађења се добија као:

$$v = 2 \cdot k \cdot \pi \cdot \lambda \cdot \frac{(T_K - T_0)^2}{q_l \cdot N_3}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (3.23)$$

Из горе наведеног се може закључити да се допуштена брзина хлађења може остварити различитим комбинацијама линијске енергије и температуре предгревања. Овако одређене температуре предгревања су ниже него оне добијене по претходним формулама, али су практична испитивања показала да је то сасвим довољно за спречавање хладних прслина при заваривању сучеоних спојева, уз обавезну примену нисководоничних електрода ($H = 2 \div 4 \text{ ml}/100\text{g}$).

Поред циља да се спречи настанак прслина, тежи се и да се повољне механичке особине очувају у што је могуће већој мери. Тако је најповољнији случај и најбољи показатељ успешног заваривања када се, нпр. при испитивању затезањем лом епрувете деси на основном материјалу а не у завареном споју. Како би се механичке особине нисколегираних побољшаних челика сачувале потребно је познавати и минималну допуштену брзину хлађења (v_{hmin}) ЗУТ-а, при чему се полази од величине ударне жилавости, која се нормативно прописује за одређени тип споја. Тако за нисколегиране челике ($0.19 < P_X < 0.31$) та брзина износи $v_{hmin} = 0.8 \div 3.5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{s}$, и расте у складу са повећањем степена легираности челика. Установљена је корелациона веза између брзине хлађења v_{hmin} при којој се гарантује ударна жилавост при -40°C на нивоу захтева за основни материјал, и показатеља P_{CM} [3, 9]:

$$v_{hmin} = -3.1 + 19.2 \cdot P_{CM}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (3.24)$$

Познавање брзина хлађења (v_{hmax} и v_{hmin}) омогућава да се одреде оптимални режими заваривања, како у погледу спречавања настанка хладних прслина, тако и очувања повољних механичких особина остварених спојева.

Поред горе наведених једначина, Мајнер (*Meunier*) је извео израз за критичну брзину хлађења на 300°C (v_{kr}):

$$\log v_{kr} = k - (4.62 \cdot C + 1.05 \cdot Mn + 0.54 \cdot Ni + 0.5 \cdot Cr + 0.66Mo), \quad (3.25)$$

где је: $k = 3.38$ – за дебеле плоче ($s \geq s_{gr}$) и

$k = 3.00$ – за танке лимове ($s < s_{gr}$).

Стварну брзину хлађења на 300°C (v_{300}) одређујемо према једначини Котрела [3]:

$$v_{h300} = \left(\frac{122 \cdot q_l}{10^6 \cdot N} + 0.05 \right)^{-2}, \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (3.26)$$

Тако прорачунату брзину хлађења треба упоредити са критичном (v_{kr}), при чему се сматра да је за $v_{300} > v_{kr}$ структура мартензитна, а за $v_{300} < v_{kr}$ мешовита мартензитно-бејнитна или чисто бејнитна структура (или $t_{8/5} \leq t_{100}$ и $t_{8/5} > t_{100}$).

На основу односа (v_{300}/v_{kr}), садржаја дифундованог водоника и крутости споја, изведена је параметарска једначина која гласи:

$$P_s = \log \frac{v_{300}}{v_{kr}} + \frac{H}{10} + \frac{K}{5000}, \% , \quad (3.27)$$

где је: H – садржај дифундованог водоника у $ml/100g$,

$K = 66 \cdot s$ – крутост завареног споја и

s – дебљина радних делова (обично $s = 5 \div 50 \text{ mm}$).

При $P_s < -0.5$ хладне прслине се не јављају, док за $P_s = 0.3$ постоји вероватноћа за њихову појаву од 50% и при $P_s > 1.0$ оне увек настају.

Ако се у горњој једначини замени $P_s = -0.5$ и унесу одговарајуће вредности за v_{kr} , H и K , може се израчунати потребна брзина хлађења v_{300} , при којој се хладне прслине неће појавити. Повезујући даље ову брзину са претходно датим изразима $v_{300} = f(q_1, T_0, N)$, може се одредити оптимална погонска енергија и остали параметри заваривања. Код поступака заваривања у заштити гасова проблем се решава избором одговарајуће погонске енергије, док се код РЕЛ поступка, због ограничења у погледу максималне јачине струје, не може увек остварити прорачуната погонска енергија. То значи да се код ручних поступака заваривања не може увек добити тражена структура само одабиром параметара заваривања, већ и предгревањем или се, у најгорем случају, не може ни добити.

За нисколегиране челике и челике повишене јачине, температура предгревања одређена на неки од претходно приказаних начина, не би практично смела да буде виша од температуре почетка разлагања потхлађеног аустенита:

$$T_p \leq M_s , \quad (3.28)$$

јер би у супротном могле да настану топле (ликвационе) прслине. Ако се за основни материјал не располаже дијаграмом континуалног хлађења (КН, КНЗ), M_s температура се приближно израчунава према изразу:

- за угљеничне и нисколегиране челике:

$$M_s = 539 - 423 \cdot C - 30.4 \cdot Mn - 17.7 \cdot Ni - 12.1 \cdot Cr - 7.5 \cdot Mo , ^\circ C . \quad (3.29)$$

- за челике повишене јачине:

$$M_s = 550 - 361 \cdot C - 39 \cdot Mn - 20 \cdot Ni - 39 \cdot Cr - 28 \cdot Mo , ^\circ C . \quad (3.30)$$

Ако је прорачуната температура предгревања виша од $300^\circ C$ или виша од M_s температуре, онда се за такав челик, дати спој и технологију заваривања морају извести технолошке пробе за оцену склоности ка хладним прслинама, нпр. Текен (*Tekken*).

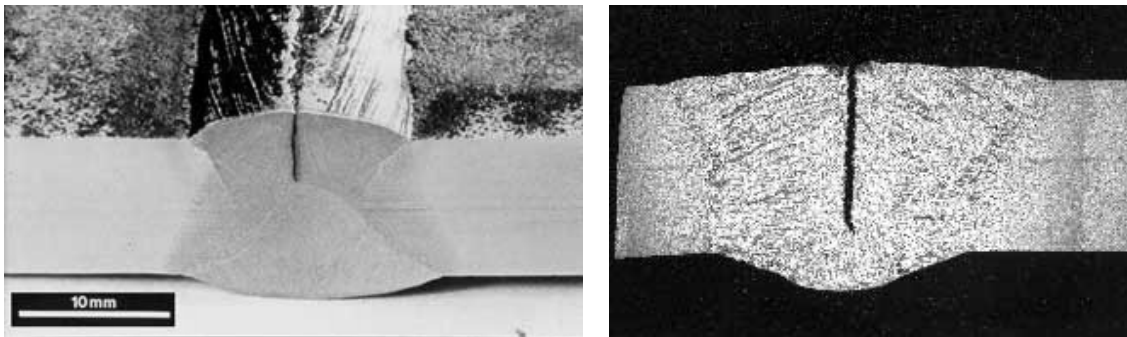
Температура предгревања и оптимални параметри заваривања се одређују према еквивалентном угљенику, одговарајућим параметарским једначинама, КНЗ дијаграму и др. Међутим, и тако одређен режим заваривања треба прихватити са одређеном резервом. Прописана технологија се прво испитује на узорцима (моделима) и у зависности од добијених резултата она се оверава као добра или одбацује. Која ће се

особина завареног споја разматрати и узети као критеријум оцене квалитета (статичка јачина, динамичка издржљивост, тврдоћа, отпорност на хабање, корозиона отпорност и др.), зависи од тражених радних особина конструкције.

3.3.1.3 Параметарске једначине топлих прслина

Топле прслине настају за време хлађења челика у температурском подручју око солидус температуре (800 - 900°C). Могу бити кристалizacione, уколико се појаве у металу шава или ликвационе уколико се јаве у ЗУТ-у. Главни узрок њихове појаве јесу мала деформациона способност и ниска технолошка отпорност метала током хлађења, у чврсто-течном стању на границама зрна. Практична испитивања су показала да је појава топлих прслина извесна ако у металу шава постоје састојци склони ка образовању нискотопљивих еутектика и хемијских једињења издвојених по границама зрна.

Параметарске једначине које служе за оцену склоности челика ка настајању топлих прслина су добијене регресионом анализом резултата великог броја проба прслинама (слика 3.5). Те пробе се углавном односе на метал шава, тј. кристалizacione (сегрегационе) прслине, али се показало да се изведени изрази могу применити и за оцену склоности челика ка прслинама које настају у ЗУТ-у, односно ликвационим прслинама. Напомена да добијени резултати параметарских једначина нису потпуно меродавни важи и у овом случају и не треба се ослањати само на њих при прописивању технологије заваривања. Они више имају информативни карактер и служе углавном за рационализацију скувих технолошких проба, тј. на избор заваривања тих проба.



Слика 3.5 Макрографски приказ топлих прслина у металу шава

Као и за хладне прслине, и за топле постоји већи број формула изведених од стране више аутора. Тако према руским изворима, склоност нискоугљеничних челика ка врућим прслинама се може оценити помоћу модификованог еквивалентног угљеника (CE_m):

$$CE_m = C + 2 \cdot S + \frac{P}{3} + \frac{Si - 0.4}{10} + \frac{Mn - 0.8}{12} + \frac{Ni}{12} + \frac{Cu}{15} + \frac{Cr - 0.8}{15}, \% \quad (3.31)$$

Челици који имају $CE_m > 0.45\%$ су склони ка топлим прслинама и обрнуто.

Јапански аутори дају израз за израчунавање H.C.S.⁵:

$$H.C.S. = \frac{C \cdot (S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100}) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V} \quad (3.32)$$

⁵ Hot Crack Sensitivity.

Оцена склоности ка врућим прслинама по критеријуму Н.С.С. зависи од врсте челика. Угљенични и нисколегирани челици су склони ка врућим прслинама ако је Н.С.С. > 4, док је за челике повишене јачине ($R_m > 700 \text{ MPa}$) та граница знатно нижа, тачније: Н.С.С. > 2 за танке лимове и Н.С.С. > 1.6 за дебеле лимове.

Поред опште оцене према SE_m и Н.С.С., у сврху поређења челика исте класе још се понекад одређује температурски интервал кристализације ($\Delta T = T_1 - T_s$) и критична брзина деформисања (v_{krd}). Уколико је ΔT мало, челици се добро заварују електродама сличног хемијског састава као основни материјал (хомоген спој). Међутим, велики број високолегираних челика и већина нежелезних легура има велику разлику између ликвидус (T_1) и солидус (T_s) температуре па се мора изабрати такав додатни материјал који ће смањити ΔT (хетерогени спојеви). Тако се ствара тзв. “еутектичка испуна” која зацељује почетне прслине.

ΔT и v_{krd} се приближно могу одредити на основу следећих израза:

- за угљеничне челике:

$$\Delta T = 238 \cdot S + 53.7 \cdot C - 3.6 \cdot Mn, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.33)$$

$$v_{krd} = 27.7 - 76 \cdot C - 184 \cdot S + 24 \cdot Mn, \text{ mm/min}. \quad (3.34)$$

- за легиране челике:

$$\Delta T = 609 \cdot S + 113 \cdot C + 20 \cdot Si - 8.7 \cdot Mn - 14Mo, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.35)$$

$$v_{krd} = 27.7 - 42 \cdot C - 411 \cdot S - 3.3 \cdot Si + 5.6 \cdot Mn + 6.7Mo, \text{ mm/min}. \quad (3.36)$$

- за високолегиране челике:

$$\Delta T = 609 \cdot S + 113 \cdot C + 20 \cdot Si - 8.7 \cdot Mn - 14Mo, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.37)$$

$$v_{krd} = 27.7 - 42 \cdot C - 411 \cdot S - 3.3 \cdot Si + 5.6 \cdot Mn + 6.7Mo, \text{ mm/min}. \quad (3.38)$$

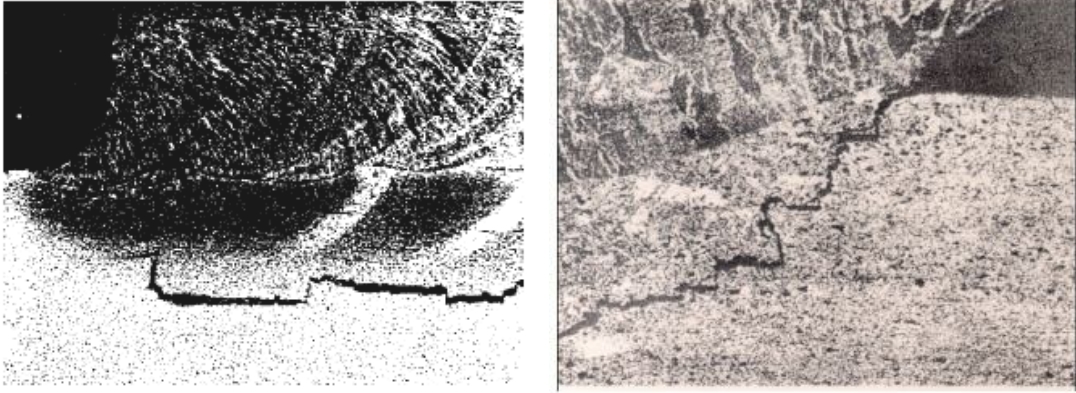
Ови изрази служе за поређење челика исте класе, а на кристализационе прслине су отпорнији челици са мањом вредношћу ΔT а већом v_{krd} .

3.3.1.4 Параметарске једначине ламеларних прслина

Полазећи од чињенице да ламеларно цепање код челичних плоча велике дебљине настаје услед тракастих укључака сулфида (и дејством сила нормалних на плочу), јапански истраживачи су извели параметарску једначину:

$$P_L = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo + V}{15} + \frac{H}{60} + 5 \cdot B + 6 \cdot s. \quad (3.39)$$

Челик се сматра отпорним на ламеларне прслине ако је $P_L < 0.40$. Овај вид процене није довољно прецизан, јер узима у обзир само хемијски састав челика, садржај дифундованог водоника (H) и садржај нечистоћа (S), а не обухвата неке друге битне факторе као што су: облик сулфидних укључака у челику, крутост споја и тсл. Свеобухватније методе за оцену склоности ка ламеларним прслинама су технолошке пробе које узимају у обзир све утицајне факторе. Од технолошких проба препоручују се: *Det Norske Veritas*, *Granfield* и др.



Слика 3.6 Макрографски приказ ламеларних прлина у ЗУТ-у

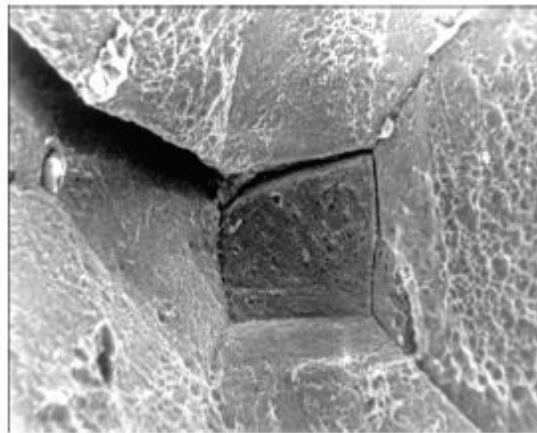
3.3.1.5 Параметарске једначине прлина жарења

Прсине жарења (сл. 3.7) настају при накнадној термичкој обради заварених спојева, најчешће када се челик подвргне жарењу за отклањање заосталих напона. Постоје две групе прлина жарења и то:

- прсине настале у нискотемпературској области (200 - 300°C) још у току загревања на температуру жарења и
- прсине настале у току жарења на одговарајућој температури жарења.

Најчешће настају прсине у почетном стадијуму загревања, нарочито при високим температурама загревања. Тада долази до неравномерног загревања дела, настанка термичких напона који се могу сабрати са структурним и надмашити јачину материјала, односно створити прсину. Неретко, прсине жарења настају на местима иницијалног почетка развоја водоничне прсине и уз помоћ високе температуре долази до њеног ширења. Прсине жарења се најефикасније могу спречити малом брзином загревања, нарочито до температуре од 300°C. Та брзина би, за делове већих димензија, требало да буде у границама од 15 до 20°C/h.

У литератури постоји већи број израза који се користе за оцену склоности челика ка образовању прлина жарења, као и израза који служе за међусобно поређење челика према тој склоности.



Слика 3.7 Микроскопски приказ интеркристалних прлина жарења

Тако се нпр. за челик који садржи $C \leq 0.18\%$ и $Cr \leq 1.55\%$ препоручује израз:

$$\Delta G = Cr + 3.3 \cdot Mo + 8.1 \cdot V - 2. \quad (3.40)$$

Ако је $\Delta G \geq 0$ – челик је склон високотемпературским прслинама жарења. У случају када је $\Delta G = 0 \div 1$ сматра се да је челик, намењен вишеслојном заваривању, склон прслинама жарења испод навара.

Челици хемијског састава: $C = 0.1 \div 0.25\%$, $Cr = 0 \div 1.5\%$, $Mo = 0 \div 0.2$, $Cu = 0.1\%$ и $(V, Ti, Nb) = 0 \div 0.15\%$ су склони прслинама жарења ако је параметар $P_z > 0$.

$$P_z = Cr + Cu + 2 \cdot Mo + 10 \cdot V + 7 \cdot Nb + 5 \cdot Ti - 2. \quad (3.41)$$

Постоји и израз који омогућава међусобно поређење челика и гласи:

$$SP = 0.4 \cdot Mn + Cu + 5 \cdot Al - 3 \cdot (Ti + Sn). \quad (3.42)$$

Челик са већом вредношћу SP је више осетљив на прсLINE жарења и обрнуто.

За коначну оцену склоности челика према прслинама жарења треба извести технолошке пробе, нпр. кружну пробу заварљивости BWRA.

3.3.1.6 Други показатељи заварљивости челика

За коначну оцену заварљивости челика, осим до сада наведених, користе се и заварени узорци на којима се испитују механичке особине, жилавост и тврдоћа у попречном пресеку завареног споја.

Тврдоћа се најчешће користи као контролна величина и у позитивној је корелацији са јачином а у негативној са истегљивошћу. Максимална допуштена тврдоћа се повезује са садржајем дифундованог водоника, а у вези је са појавом хладних прслина. За прорачун максималне тврдоће ЗУТ-а се користе следећи изрази:

- за нискоугљеничне челике ($R_m < 300 \text{ MPa}$)

$$HV_{max} = 90 + 1050 \cdot C + 47 \cdot Si + 75 \cdot Mn + 30 \cdot Ni + 31 \cdot Cr + 40 \cdot V, \quad (3.43)$$

- за микролегиране и нисколегиране челике и $q_1 = 17 \text{ kJ/cm}$

$$HV_{max} = 1450 \cdot \left(C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo + V}{15} + 5 \cdot B \right), \quad (3.44)$$

- за случај да је брзина хлађења већа од критичне, тј. када је $t_{8/5} \leq t_{100}$ (чисто мартензитна структура)

$$HV_{max} = 812 \cdot C - 293. \quad (3.45)$$

Овако прорачунате вредности тврдоћа дају само оријентациону оцену о могућности заваривања са или без предгревања. Тако се нпр., код C – Mn челика сматра да тврдоћа ЗУТ-а до 350 HV није опасна са становишта појаве хладних прслина. За нисколегиране и микролегиране челике дозвољена тврдоћа се повезује са садржајем дифундованог водоника (таб. 3.2).

Таблица 3.2 Зависност тврдоће ЗУТ-а од садржаја заосталог водоника у металу шави

H, ml/100g	> 20	10 ÷ 20	5 ÷ 10	1 ÷ 5
HV _{max}	250	375	400	450

Поред пораста кртости и склоности ка хладним прслинама, нагли пораст тврдоће, нпр. код нискоугљеничних челика са 190 на 400 HV, доводи до пораста осетљивости на зарезе. Зато се уводи и допунско ограничење као:

$$HV_{max} = (1.2 \div 1.3) \cdot HV_{OM}, \quad (3.46)$$

где је: HV_{OM} - тврдоћа основног материјала.

При испитивању затезањем одређује се јачина на кидање завареног споја и она се упоређује са јачином основног материјала. У практичним условима се захтева да заварени спој има исту или већу јачину од основног материјала, што се може остварити правилним избором додатног материјала и параметара заваривања. Јачина се мења почев од средишта шави па све до краја ЗУТ-а а њена промена се може установити симулирањем температурских циклуса заваривања на узорцима основног материјала.

Поред тврдоће и јачине, веома важна особина завареног споја је и ударна жилавост, нарочито за конструкције које раде у условима променљивих оптерећења и на сниженим температурама. Испитивање ударне жилавости се изводи на епруветама исеченим из различитих зона попречног пресека завареног споја и са концентрисаним U или V жлебом на тачном одређеном месту, с циљем да се нађе најкритичније место.

Међутим, у условима променљивих температура (нпр. конструкције које раде на отвореном) није битна само апсолутна ударна жилавост већ и тзв. прелазна температура која означава средњу вредност температурске области преласка жилавог стања материјала у крто. Тачније, прелазна температура представља температуру испод које постоји опасност од појаве кртог лома. За одговорне заварене конструкције постоји захтев да прелазна температура завареног споја не буде нижа од прелазне температуре основног материјала. Заварене конструкције које не испуњавају овај захтев могу се користити само у затвореном и при температури већој од прелазне.

Постоји једначина за израчунавање прелазне температуре на граници ЗУТ-а и основног материјала која важи само у случају аутоматског заваривања под прахом и гласи:

$$T_{pr} = -70 + 290 \cdot C + 28 \cdot Mn + 46 \cdot Cu + 25 \cdot Cr + 23 \cdot Mo - 6 \cdot Ni, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (3.47)$$

3.3.2 Практичне методе (лабораторијске и технолошке пробе)

Практично (лабораторијско) одређивање заварљивости заснива се на проучавању појаве прслина у завареном споју у:

1. Току процеса заваривања,
2. Непосредно после тога или
3. После одређеног временског периода (48 сати).

Међутим, оцена заварљивости применом практичних метода проширена је и на испитивање појаве прслина услед накнадног загревања, тј. накнадне термичке обраде, као и на настајање прслина при напрезањима тзв. експлоатационе прслине. Појава прслина у завареним спојевима, уопштено, је резултат напонско-деформационог стања које настаје заваривањем а које материјал смањене пластичности у споју не може поднети.

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

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

При оцењивању заварљивости челика, полази се од тога да заварени спој мора најпре да буде хомоген, тј. без присутних икаквих прслина, микропрслина, неметалних укључака, пора, непроварених места и тсл. Поред основног услова хомогености, заварени спој мора да поседује и одређене особине које се од њега очекују у процесу експлоатације. Грешке које се могу јавити у завареном споју се могу поделити у две групе:

1. Површинске (прслине, непровар, заједи) и
2. Просторне или запреминске (укључци троске, гасни мехурови и тсл.)

У зависности од важности конструкције, и од степена сигурности који она мора да поседује, техничким стандардима и прописима се прописује и дозвољени ниво појединих грешака које су дефинисане стандардом SRPS С.Т3.020. Присуство грешака у споју не значи увек и губитак радне способности заварене конструкције. Наиме, у последње време се допушта присуство одређених врста грешака али на конструкцијама мање важности, чија евентуална хаварија услед експлоатације не може да доведе до великих материјалних губитака или људских жртава. С друге стране, за конструкције високог степена одговорности заварени спој мора бити изведен без грешака. У вези са тим прописан је стандард (SRPS EN ISO 5817:2008) који дефинише ниво дозвољених грешака у зависности од њиховог типа и експлоатационих карактеристика конструкције. Према њему, постоје три класе грешака и то: В, С и D при чему свака од њих, ретроспективно, прописује одговарајуће захтеве. Притом, контрола квалитета заварених спојева мора да буде таква да се могу разликовати грешке веће од допуштених. Оцена о стању споја из аспекта квалитета мора бити независна, свеобухватна и објективна.

При развијању идеје о дозвољеној грешки поткритичне величине, полазимо од искуства да грешка највише утиче на следеће начине оштећења:

- крти лом и
- разарање услед замора.

На ове механизме разарања највише утичу површинске грешке типа прслина, микропрслина или непроварених места. Поред величине појединачних грешака важна је и њихова количина и узајамна конфигурација. Најопасније грешке су свакако прслине, јер изазивају високу концентрацију напона па је највећи део проба њима и прилагођен. Као што је већ речено, постоји велики број експерименталних метода за процењивање заварљивости које су сврстане у карактеристичне групе, али ниједна од њих не даје целокупну слику о заварљивости неког материјала, већ обично податак о заварљивости испитиваног материјала са становишта захтеваних особина, предвиђеног поља примене или очекиваног понашања у експлоатацији. За металне материјале, посебно челике, у оквиру заварљивости најбитније је одредити склоност материјала ка:

- појави хладних прслина,
- појави топлих прслина,
- појави ламеларних прслина,
- појави прслина жарења и
- кртом лому.

У глобалном погледу, у пракси се најчешће појављују хладне прслине и издвајају се на првом месту као главна опасност за заварене конструкције, али се никако не смеју занемарити остали типови прслина јер свака прслина у условима погодним за њено ширење може довести до развоја прслине до критичног нивоа и до отказа завареног споја. Експерименталне методе испитивања заварљивости се заснивају на изучавању појаве прслина у завареном споју и то у току звааривања, непосредно после заваривања или у року од 48 h после заваривања.

У последње време, процена заварљивости применом практичних метода је проширена и на испитивање прслина које настају услед накнадног загревања, односно термичке обраде, као и на настајање прслина при напрезањима, тзв. експлоатационих прслина. Критеријуми за оцену заварљивости се најчешће заснивају на одређивању критичне деформације услед заваривања у функцији температуре и критичног напона при коме долази до појаве прслина. Методе за оцену склоности ка топлом и хладном лому су веома значајне и најчешће се користе при усвајању нових врста основних и додатних материјала, њиховој систематизацији и избору као и при оправдавању избора поступка заваривања. Највећу примену имају пробе склоности ка појави хладних прслина, јер се при испитивању може узети у обзир и утицај параметара заваривања.

Те пробе се деле у следеће групе:

1. Пробе слободних спојева; спојеви су неукљештени и могу слободно да се деформишу;
2. Пробе укрућених спојева;
3. Пробе са самоукљештењем; пробни елементи се монтирају тако да изведени шав изазива самоукљештење и
4. Пробе са насилним укљештењем; применом посебних алата и направа са којима се елементи споја принудно укрућују.

Код већине практичних (технолошких) метода за испитивање заварљивости узорци се излажу термичком циклусу: локално, по целом профилу или загревању и хлађењу исто као и при заваривању (симулрање термичких циклуса). Степен насталих промена се утврђује познатим методама испитивања (затезањем, савијањем, мерењем тврдоће, жилавости, ...), пре и после термичког дејства, а по потреби се испитује и појава прслина у шаву и околини.

Највећи број проба које се обављају се односе на пробе склоности ка појави хладних и топлих прслина. Хладне прслине веома зависе од количине присутног водоника у металу шаву али и од напонских стања после заваривања. Испитивања овог типа се састоје из оптерећивања делова одмах после заваривања. Предност ових истраживања је могућност кориговања врсте и величине оптерећења, чиме се процењује њихов утицај на хладни лом. Како би се у обзир узео и дифундовани водоник, истраживања се проширују и на симулацију термичких циклуса. Постоји неколико врста симулатора заснованих на електроотпорском или индукционом загревању а симулирање се изводи по методи BWRA⁶. У свету су данас најпознатији УМЕТ (РУСИЈА), Thermoresto – W (ЈАПАН) и Weld thermal Cycle Simulator фирме Smit-Wels (САД). Thermorestor фирме Fuji Electronik Industrial Co. Ltd. је најсавременији симулатор који не само да симулира термички и деформациони циклус заваривања већ има и системе за увођење водоника за време хлађења. За испитивање по методи BWRA се користи једноставна техника симулирања која се састоји из

⁶ BWRA - British Welding Research Association.

загревања узорка у пећи на 950°C и затим хлађењу. После тога узорци се испитују статичким и/или динамичким затезањем.

У табlici 3.3 је дат преглед и предност неких експерименталних метода за испитивање заварљивости.

Таблица 3.3 Преглед практичних проба за оцену заварљивости

Критеријум		Врста пробе	Назив пробе	Оцена
Склоност ка прелинама	Хладним	Самоукрућење	CTS, Fisco, Tekken, крстаста, кружна	Прелине се појављују или не појављују
		Са регулисаним напоном	TRC, RRC, LTP, IMPLANT	
		Са симулираним термичким циклусима	BWRA и имитацијом загревања: - Електричним отпором - Индукцијом (струјом високе фреквенције)	
	Топлим	Укрућена	Fisco, Tekken, кружна	
		Са регулисаним напоном	Varestraint, Bauman	
	Ламеларним	Металографска, структурна, механичка	Испитивање затезањем у правцу дебљине лима	
	Жарења	Изотермичка кратковременог течења		
Механичке особине	Тврдоћа	Мерење тврдоће	Метода Викерс	$HV < HV_{max}$
	Својства чврстоће	Испитивање затезањем	Затезање	$R_m^{OM} \approx R_m^{шава}$
	Ударна жилавост	Испитивање жилавости	Метода Шарпи	Прелазна температура

3.3.3 Процена заварљивости на основу КНЗ дијаграма

У новије време, за оцену заварљивости осим поменутих метода, користе се и трансформациони КНЗ дијаграми. За неке конструкционе челике се могу наћи, углавном у иностраној литератури, дијаграми хлађења у условима заваривања, тј. дијаграми разлагања потхлађеног аустенита под утицајем различитих брзина хлађења које одговарају различитим температурским циклусима. Ови дијаграми се у литератури дају у полулогаритамском координатном систему температура – време (логаритамска подела) или температура – време хлађења од 800 до 500°C. Ово време се означава са $t_{8/5}$ и такође у логаритамској подели се наноси на апсцисну осу дијаграма. У самом КНЗ дијаграму дају се линије које означавају поједине структуре (мартензит, бејнит, ферит, перлит) у зависности од времена $t_{8/5}$.

3.4 Оцена заварљивости челика повишене јачине

Савремене тенденције при пројектовању заварених конструкција, нарочито у транспортној техници, су смањење тежине а повећање носивости. Код првих заварених конструкција примењивани су челици са напоном течења до 250 МПа, да би се увођењем угљенично – манганских (С - Мп) челика умирених алуминијумом та граница повећала на 300 ÷ 360 МПа. Металуршко-механичким поступцима

(микролегирањем и нормализацијом, односно контролисаним ваљањем) та граница је повећана до скоро 450 МПа, а патентирањем (у Енглеској) нисколегираних бејнитних челика она достиже и 550 МПа. Најзад, са развојем побољшаних нисколегираних челика та граница расте и до 700 МПа. Сви челици са $R_p > 360$ МПа сврставају се у челике повишене јачине, а проблеми у вези са њиховом заварљивошћу се морају за сваку групу посебно разматрати.

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

У нашем стандарду SRPS С.В0.500 даје се преглед општих конструкционих С – Мп челика, док стандард SRPS С.В0.502 укључује и микролегиране финозрне челике повишене јачине.

3.4.1 Проблеми заварљивости С – Мп челика

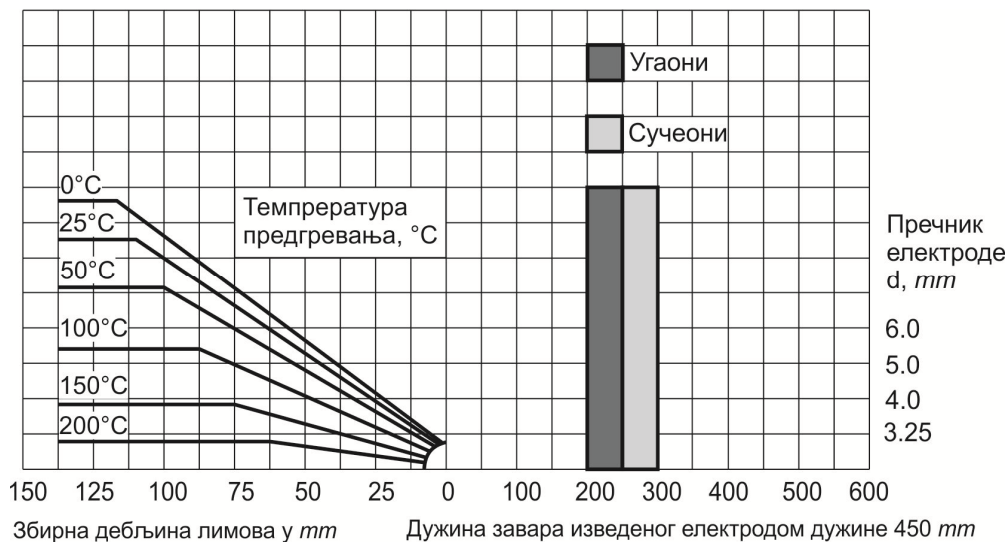
Повећање својстава отпорности код ових феритно-перлитних челика настаје услед пораста удела перлита у структури, ојачања ферита манганом који супституијски улази у чврст раствор α -гвожђа и уситњавањем зрна.

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

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \% . \quad (3.48)$$

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

Као основни проблем при заваривању ових челика јавља се склоност ка хладним прслинама, јер се перлит изнад A_{c1} температуре трансформише у аустенит који при брзом хлађењу ЗУТ-а може прећи у мартензит. Због тога се пре заваривања мора извршити потпуно или локално предгревање, а да се само заваривање изводи са већом погонском енергијом. Заваривање се изводи искључиво поступцима и технологијама које се одликују ниским садржајем дифундованог водоника, што код РЕЛ поступка одговара коришћењу базичних сушених електрода. За одређивање температуре предгревања може се применити формула Сеферијана (израз 3.10) или дијаграм на слици 3.8.



Слика 3.8 Дијаграм за избор температуре предгревања C – Mn челика, РЕЛ поступком, базичним електродама

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

Препоручена дужина завара је 200 ÷ 250 mm код сучеоних и 250 ÷ 300 mm код угаоних спојева односно та дужина се израчунава по формули:

$$l = 0.04 \cdot \frac{N_3^2 \cdot k_2 \cdot q^2}{s^2 \cdot v_z \cdot (T_w - T_0)^2}, \text{ cm}, \quad (3.49)$$

где је:

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

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

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

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

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

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

3.4.2 Проблеми заварљивости микролегираних (финозрних – ТМ) челика

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

За челике из ове групе карактеристично је то да садржај угљеника не прелази 0.2% и да се намерно додају мале количине микролегирајућих елемената (Nb, Ti, Al,

Та, Zr, V, и др.) чији збирни садржај не прелази 0.2%. Мали додаци ових елемената се таложе као карбиди, нитриди и карбонитриди, а на повећање јачине делују двојачко: уситњавањем зрна и таложењем и ојачањем чврстог раствора. Уситњавање зрна се постиже нормализационим жарењем или контролисаним ваљањем и хлађењем.

На заварљивост микролегираних челика пресудно утиче склоност ка појави хладних прслина, што зависи од величине еквивалентног угљеника, дебљине и типа споја. У циљу спречавања ових прслина потребно је предгревање које утиче не само на образовање тражене структуре ЗУТ-а већ и на снижење заосталих напона и количине дифундованог водоника из шавова у ЗУТ-у. Температура предгревања овде се повезује са минималном вредношћу међуслојне температуре и може се одредити применом дијаграма са слике 3.8 или помоћу параметарских једначина.

Дужина завара потребна за примену дијаграма одређује се према једначини 3.49 где је $T_w = 60 \div 200^\circ\text{C}$, тј. температура највероватније појаве хладних прслина.

Челици ове групе према стандарду SRPS С.В0.502 у ознаци садрже словни симбол ČRN, ČRO и ČRV и број који представља најмању гарантовану границу течења.

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

$$CE = C + \frac{Mn}{10} + 3 \cdot Nb, \% \quad (3.50)$$

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

$$CE = C + \frac{Mn}{10} + \frac{V}{3} + 3 \cdot N, \% \quad (3.51)$$

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

3.4.3 Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине

3.4.3.1 Бејнитни челици

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

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

примењују се за конструкције изложене ниским температурама због пада ударне жилавости. Основни проблем при заваривању ових челика јесте појава хладних прслина и пад жилавости у ЗУТ-у. Он се решава смањењем брзине хлађења после заваривања што се постиже предгревањем или повећањем погонске енергије.

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

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

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

Будући да су механичке особине нисколегираних побољшаних челика добијене оптималном термичком обрадом, јасно је да ће се те особине при заваривању мењати услед дејства температурских циклуса заваривања. Због тога, при избору термичког режима заваривања није довољно да се узме у обзир само хемијски састав, већ и чињеница да су корисне особине постигнуте и термичком обрадом побољшања. Из овог разлога се мора за сваки челик ове класе дефинисати опсег варирања брзине хлађења, одакле произлазе и граничне вредности погонске енергије, као и време задржавања ЗУТ-а изнад A_{C3} температуре. Доња гранична вредност погонске енергије одређује се тако да се спрече хладне прслине, а њена максимална вредност као и време задржавања изнад A_{C3} температуре из услова да се пад јачине у делу ЗУТ-а сведе на најмању могућу меру.

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

3.5 Оцена заварљивости челика класе S690QL

У оквиру овог поглавља биће изложени резултати испитивања заварљивости челика S690QL рачунским путем, а у складу са раније споменути изразима.

Хемијски еквивалент угљеника је рачунат у складу са формулом МИЗ-а (израз 3.4) при чему се он још обележава и као CEV. Међутим, железара SSAB, када су у питању челици повишене јачине, преферира CET формулу за израчунавање еквивалентног угљеника. По њима, CET формула је подобнија за употребу на челицима повишене јачине, док CEV формулу, такође признају као валидну али сматрају да се она више фокусира на угљеничне и нисколегиране челике мање јачине од челика класе S690QL. Најпре је у табlici 3.4 приказан хемијски састав S690QL а затим у табlici 3.5 упоредни приказ *CE* добијен према оба израза. Уочава се разлика добијених вредности у зависности од коришћене формуле и дебљине завариваних делова.

Таблица 3.4 Хемијски састав челика S690QL

Ознака	Захтев	Садржај хемијских елемената, %														
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	B	Cu	Ti	N	Nb
S690QL	Прописани max	0.20	1.50	0.60	0.020	0.010	0.70	0.70	2.0	0.09	0.015	0.005	0.30	0.040	0.010	0.040

Таблица 3.5 Вредности укупног еквивалентног угљеника

Ознака	Дебљина, mm	Хемијски еквивалентни угљеник, CE	
		$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}, \%$	$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}, \%$
S690QL	до 5	0.48	0.34
	5-10		0.31
	10-20		0.31
	20-40		0.34
	40-80		0.39
	80-100		0.39
	100-160		0.41

Челик S690QL је заварљив готово свим поступцима електролучног заваривања топљењем, али општа заварљивост није загарантована већ се морају применити одређене мере предострожности, почев од избора поступка заваривања, додатног материјала, до режима заваривања и строго контролисаног уноса топлоте, тј. линијске (погонске) енергије заваривања. Општи циљ примене тих мера је смањење опасности од настанка хладних прслина али и очување примарних особина, пре свега, ЗУТ-у као најкритичније зоне.

Када се говори о поступку заваривања, пре свега се мисли на електролучне поступке РЕЛ и МАГ/МИГ. Предност МАГ/МИГ поступака је једноставније управљање процесом али и продуктивност, јер се заваривање може аутоматизовати и тако повећати брзина заваривања. Фактори који утичу на излазне механичке карактеристике завареног споја су:

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

Очување особина при заваривању разматраног челика се, пре свега, односи на:

- одржавање жењене јачине у зони споја – не мање од основног материјала и

- остваривање повољне жилавости ЗУТ-а.
- Стога се технолошка решења за заваривање односе на:
- спречавање настанка хладних прслина и
 - постизање горе споменутих жељених особина које обезбеђују поузданост споја.

3.5.1 Спречавање настанка хладних прслина

Као што је већ напоменуто, челици класе S690QL су условно заварљиви јер су подложни настанку хладних прслина. Како би се смањила опасност од њиховог настајања потребно је придржавати се следећих мера:

- смањење водоника у споју на $H < 5 \text{ ml}/100 \text{ g}$ метала шави;
- избор одговарајуће температуре предгревања (T_p) и међупролазне температуре ($T_{\text{interpass}}$);
- примена нисководоничних електрода (обавезно чување и сушење по препорукама произвођача);
- одстрањивање свих нечистоћа из зоне заваривања (влага из електродне жице, влага или корозија из жлеба и околине, масти и емулзије садржане у жлебу), заваривати при малој влажности ваздуха и заштитног гаса;
- предузимање мера за смањивање заосталих напона у завареном споју;
- коришћење додатних материјала потребне јачине, не јачих од основног материјала;
- избор правилног редоследа заваривања који смањује укупне унутрашње напоне и деформације;
- Усвојени зазор у споју треба бити максимално 3 mm (и код сучеоног и угаоног споја);
- без обзира да ли је потребно предгревање, гасним гориоником пажљиво загрејати непосредну зону споја и његову околину, водећи рачуна да се не загреју изнад препоручених вредности температуре за предгревање (од 150 до 200°C);
- максимална међупролазна температура је $T_{\text{interpass}} \approx 200 \div 225^\circ\text{C}$ зависно од крутости/дебљине завариваних делова;
- усвојене температуре предгревања и међупролазне температуре важе за случај да је унос топлоте $17 \text{ kJ}/\text{cm}$ или већи (заваривање релативно малом брзином);
- усвојена је претпоставка да се завар хлади на ваздуху собне температуре ($18 \div 28^\circ\text{C}$);
- захтеване температуре предгревања могу бити остварене на различите начине: Електрични грејни елементи око припремљеног споја често су најбољи избор јер они омогућавају равномерно грејање свих површина. Температуре морају бити мерене помоћу контактеног или бесконтактеног термометра;
- време предгревања износи $2 \text{ min}/\text{mm}$ дебљине (и до $5 \text{ min}/\text{mm}$). Делови се споро загревају и споро хладе;

Водоник унет у заварени спој преко заваривачког купатила, може бити одстрањен дифузијом. Повишена радна температура (предгревање) и висок унос топлоте (погонска енергија) смањују брзину хлађења споја. Са повећањем температуре се повећава и степен дифузије и самим тим се количина водоника у завареном споју смањује. Смањење брзине хлађења смањује тврдоћу ЗУТ-а и ниво заосталих напона а повећава жилавост што доприноси смањењу ризика од настанка хладних прслина.

Температура предгревања зависи од количине унете топлоте, величине еквивалентног угљеника и одвођења топлоте преко запремине основног материјала (дебљина и правци). Препоручена температура предгревања је $150 \div 200^{\circ}\text{C}$ у зависности од дебљине (са повећањем дебљине расте и температура), док је минимална температура предгревања ограничена на 125°C . Температуру предгревања треба одржавати и контролисати у току процеса заваривања. Минималну температуру предгревања треба повећати за (25°C) за сваку од следећих ситуација:

- Када се заваривање изводи са уносом топлоте у интервалу од $10 \div 16 \text{ kJ/cm}$,
- Када су заваривани делови укљештени,
- За температуре ниже од $+ 5^{\circ}\text{C}$ и
- Када је повећана влажност ваздуха.

У неким случајевима се може извести и накнадна термичка обрада на температури предгревања у трајању од најмање 5 min/mm дебљине плоче и не мање од једног часа.

3.5.2 Процена склоности челика ка образовању хладних прслина и одређивање температуре предгревања

Као што је већ речено, појава хладних прслина зависи од хемијског састава челика, садржаја дифундованог водоника и крутости или дебљине завариваних делова. Процена склоности челика ка настанку хладних прслина се изводи рачунски помоћу параметарских једначина јапанских и чешких аутора приказаних у оквиру тачке 3.3.1.2. У таблицама 3.6, 3.7 и 3.8 су дати резултати за челик S690QL, добијени на основу датих једначина хладних прслина.

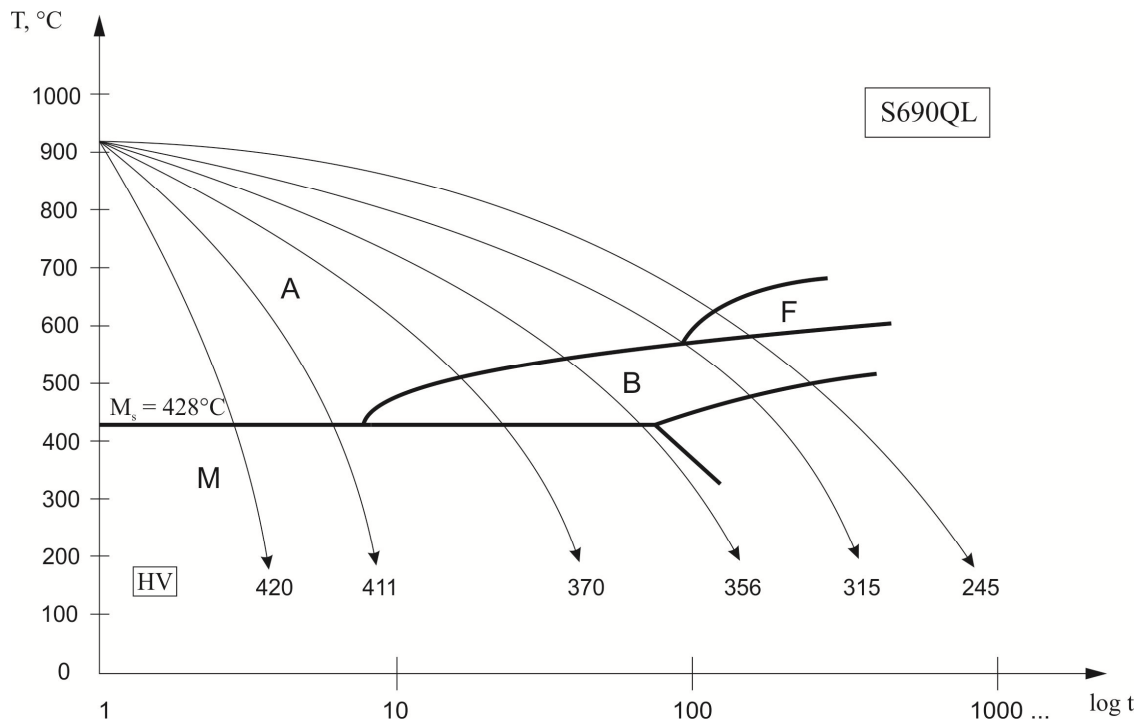
Таблица 3.6 Вероватноћа појаве хладних прслина и температуре предгревања

Челик	Критеријум	Ознака	Израз	Добијена вредност	Услов појаве прслина	Напомена	$T_p, ^{\circ}\text{C}$	Израз за T_p
S690QL, 15 mm	СЕ	СЕ	3.4	0.48	$CE > 0.45\%$	Склон је	-	-
	Формула Сеферијана	[C]	3.7	0.645	-	-	220	3.10
	Јапански аутори	P_C	3.15	0.529	$P_C > 0.3$	Склон је	247	3.18
		P_{CM}	3.16	0.438				
	Чешки аутори	P_{hp}	3.11	0.484	$P_{hp} > 0.24$	Склон је	457	3.14
		P_{CM}	3.13	0.456				

Напомена: Температура предгревања се усваја у опсегу од $150 - 200^{\circ}\text{C}$ како би се очувале повољне механичке особине добијене приарном прерадом. Снижавање температуре предгревања на вредности мање од израчунатих је омогућено употребом високопластичних аустенитних електрода за извођење коренских пролаза као и повећаним уносом топлоте.

Са КН дијаграма за челик S690QL (сл. 3.9) се може прочитати да је температура почетка образовања мартензита $M_s = 428^\circ\text{C}$. Рачунски, та температура се може одредити по формули [3]:

$$M_s = 550 - 361 \cdot C - 39 \cdot Mn - 20 \cdot Ni - 39 \cdot Cr - 28 \cdot Mo, ^\circ\text{C} \quad (3.52)$$



Слика 3.9 КНЗ дијаграм за челик S690QL

Замењивањем процентуалног удела хемијских елемената у формулу (3.52) добија се рачунска вредност "мартензит старт" температуре $M_s = 332.4^\circ\text{C}$, што указује на то да изабрани опсег температура предгревања неће утицати на структурне промене у челику.

КНЗ дијаграм овог челика се може искористити за процену коначне структуре материјала и то израчунавањем времена $t_{8/5}$, уношењем те вредности у дијаграм и читавањем микроструктуре. На тај начин се успоставља веза између теоријских процена излазне структуре и структура које се стварно добијају.

3.5.3 Процена склоности челика ка образовању топлих прслина

Склоност челика ка образовању топлих прслина се утврђује на основу параметара CE_m и $H.C.S.$ (изрази 3.31 и 3.32). Резултати прорачуна према наведеним параметрима дати су у табlici 3.7.

Таблица 3.7 Вероватноћа појаве топлих прслина

Челик	Параметар	Израз	Израчуната вредност	Услов склоности	Напомена
S690QL	CE_m	3.31	0.485	> 0.45%	Склон је
	H.C.S.	3.32	2.47	> 2	Није склон

3.5.4 Процена склоности челика ка образовању прслина жарења

Склоност челика ка образовању прслина жарења се утврђује на основу параметарских израза 3.40 и 3.41 за прорачун ΔG и P_z . Резултати прорачуна према наведеним параметрима дати су у таблици 3.8.

Таблица 3.8 Вероватноћа појаве прслина жарења

Челик	Параметар	Израз	Израчуната вредност	Услов склоности	Напомена
S690QL	ΔG	3.40	1.739	> 0	Склон је
	P_z	3.41	1.15	> 0	Склон је

3.5.5 Процена склоности челика ка образовању ламеларних прслина

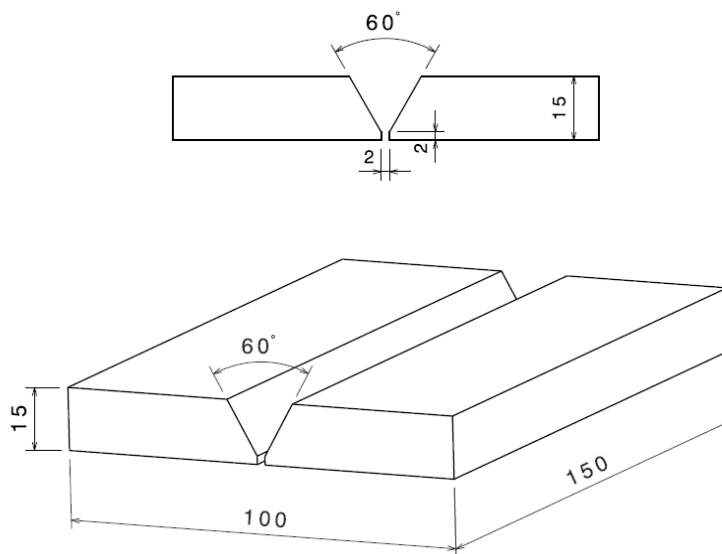
Челик се сматра отпорним на ламеларне прслине ако је, према изразу 3.39, вредност параметра $P_L \leq 0.40$. Добијена вредност параметра је дата у таблици 3.9.

Таблица 3.9 Вероватноћа појаве ламеларних прслина

Челик	Параметар	Израз	Израчуната вредност	Услов склоности	Напомена
S690QL	P_L	3.39	0.64	≤ 0.40	Склон је

3.6 Припрема за заваривање

Припрема плоча за заваривање подразумева спровођење свих прописаних технолошких операција у циљу припреме плоча за заваривање. Ивице и околина жлеба на растојању од најмање 30 mm морају бити очишћени до металног сјаја, без присутних масноћа, рђе, прљавштине и тсл. Димензије плоче као и облик и димензије жлеба су приказани на слици 3.10.



Слика 3.10 Димензије плоче и облик и димензије жлеба

4. ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА ЧЕЛИКА КЛАСЕ S690QL

При пројектовању заварених конструкција константно је присутан захтев за што мањим утрошцима енергије по јединици производа. У случају заварених конструкција, међу којима доминирају челичне, тај захтев условљава и увођење материјала знатно бољих својстава. Будући да се још увек при пројектовању конструкција узима у обзир јачина материјала, то значи да се увођењем челика повишене јачине добило на економичности конструкције у смислу коришћења мањих пресека што директно количину утрошеног материјала за израду конструкције. Међутим, све те предности су условне кад је у питању заваривање, будући да су ти челици добијени различитим термомеханичким процесима, при излагању термичким и деформационим циклусима услед заваривања нарушава се равнотежно стање материјала и структура постаје хетерогена што је непожељна појава. Због тога ови челици захтевају пажљиво одабране параметре заваривања и њихову доследну примену при заваривању. Познавање процеса простирања топлоте и формирања температурског поља могу дати одговоре на питање каква се структура може остварити на основу изабраних параметара, и обрнуто, изабрати параметре у циљу добијања пожељне структуре.

Из свега горе наведеног произлази да успешно заваривање разматраног челика, са становишта добијања поузданог споја и очувања повољних механичких особина, није нимало једноставно. Постоји низ фактора који условљавају успешност процеса заваривања при чему је један од најбитнијих технологија заваривања. Правилно изабрана, технологија заваривања умногоме утиче на успешност извођења заваривања и на карактеристике добијеног споја. Главни проблем при заваривању челика из ове класе јесте њихова склоност ка образовању хладних - водоничних прелина. Углавном се ти проблеми могу решити предгревањем, коришћењем аустенитних електрода, контролисаним уносом топлоте и у посебним условима накнадном термичком обрадом. При томе се подразумева коришћење нисководоничних додатних материјала.

Постоји још један чинилац који је стално присутан а то је продуктивност заваривања. Продуктивност заваривања се односи на брзину заваривања при чему она не сме бити таква да угрози успешност процеса. Дакле, избором технологије, поступка, додатног материјала и др., тежи се да се изабере најповољнија технологија из аспекта успешности процеса, односно поузданости споја али и из аспекта продуктивности.

4.1 Технолошки параметри заваривања

4.1.1 Основни материјал

Основни подаци о ОМ - челику S690QL су приказани у таблицама 4.1 до 4.4.

Таблица 4.1 Анализирани хемијски састав челика S690QL

Ознака	Захтев	Садржај хемијских елемената, %														
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	B	Cu	Ti	N	Nb
S690QL	Прописани max	0.12	1.35	0.36	0.011	0.010	0.17	0.22	0.16	0.06	0.081	0.00147	0.04	-	-	0.0569

Таблица 4.2 Механичке особине основног материјала и микроструктура

Ознака	Дебљина, <i>mm</i>	R_m , <i>MPa</i>	R_p , <i>MPa</i>	A_5 , %	Тврдоћа, HBW	Микроструктура
S690QL	4.0-53.0	770-940	700	14	260-310	Међуфазна структура побољшања
	53.1-100	770-940	650	14	260-310	
	100.1-130	710-900	630	14	240-290	

Вањањем добијене плоче се секу гасним пламеном или ласерским и плазма поступцима уз предгревање за плоче већих дебљина. Повећање напона течења хладном деформацијом је могуће али деформацијом на топло никако јер би услед поновног загревања дошло до нарушавања особина постигнутих процесом добијања челика. Строго је забрањено загревање челика на температуру већу од 580°C. Заварљивост је релативно добра.

Таблица 4.3 Способности S690QL

Ознака	Радна температура	Обрада на хладно	Обрада на топло	Заваривање	Сечење	Бољи у односу на угљенични челик	Ударна жилавост
S690QL	Собна	A	Ц	A	ПВЛГ	1.5 ÷ 2	Веома висока

A = Моруће; Ц = Немогуће; П = Плазма; В = Вода (Water jet); Л = Ласер; Г = Гас

Таблица 4.4 Упоредна ознака у стандардима

EN	DIN (Немачка)	AFNOR (Француска)	SS (Шведска)
S690QL	TstE690V	E690T	2625

Таблица 4.5 Енергија удара на сниженим температурама

Ознака	Температура, °C	Енергија удара, <i>J</i>
S690QL	20	40
	0	30-40
	-20	27-35
	-40	27-30
	-60	max 27

На заварљивост овог челика детаљно је указано у тачки 3.5.

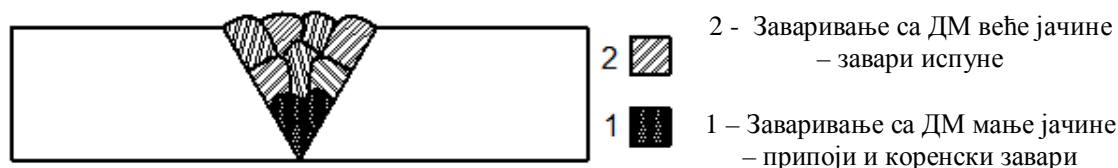
4.1.2 Додатни материјал

За заваривање челика S690QL треба примењивати базичне сушене електроде тј. електроде које гарантују да садржај водоника у металу шава неће надмашити количину од 5 ml/100 g метала шава. За заваривање челика S690QL могу се употребити нисколегирани и високолегирани додатни материјали. Применом додатних материјала

мање јачине од основног постиже се већа жилавост споја, већа отпорност на водоничне прслине и нижи заостали напони у завареном споју, посебно у ЗУТ-у.

Код вишепролазних завара нарочито је корисно заваривање са додатним материјалима различитих јачина (сл. 4.1). Припојни шавови и први пролаз се изводе са додатним материјалом мање јачине, а затим се остали пролази изводе са додатним материјалом веће јачине. Ова се техника примењује када се у техничким условима траже приближно иста својства отпорности у свим деловима завареног споја.

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



Слика 4.1 Вишеслојно заваривање различитим додатним материјалима

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

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

Што се тиче електрода, оне се могу бирати и према препорученим таблицама као што је таблица 4.6.

Таблица 4.6 Парцијални садржај водоника у додатном материјалу (метод живе)

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

4.1.2.1 Додатни материјал од нерђајућег челика

Додатни материјали од нерђајућег челика могу бити употребљивани за заваривање скоро свих конструкционих челика. Они омогућавају заваривање на собној температури без предгревања. Препоручују се првенствено додатни материјали типа AWS 307 или AWS 309. Код ових, нерђајућих додатних материјала, водоник не утиче на перформансе у толикој мери као код нелегираних и нисколегираних додатних материјала.

Таблица 4.7 Препоручени додатни материјал при заваривању различитих основних материјала технологијом РЕЛ/МАГ

(I) Заваривање S690QL + S690QL				
Поступак	РЕЛ		МИГ/МАГ	
Врста електроде	-обложене електроде-		-пуна жица-	
Коренски завари Међуслојни завари	AWS A5.4	(≈ E 307-15)	AWS A5.9	(≈ ER 307)
	INOX B 18/8/6* R _{p0.2} = 350 MPa		MIG 18/8/6 R _{p0.2} = 380 MPa	
Завари испуне Покривни завари	EVB 80 R _{p0.2} = 690 MPa		MIG 75 R _{p0.2} = 690 MPa	
(II) Заваривање S690QL + S 350 JR				
Исти додатни материјали као при заваривању S690QL + S690QL варијанта I				
(III) Заваривање S 350 JR + S 350 JR				
Коренски завари + завари испуне	МИГ/МАГ		REL	
	AWS A5.18	AWS A5.1	AWS A5.1	E 7018
	VAC 60 R _{p0.2} > 410 MPa		EVB 50 R _{p0.2} > 440 MPa	

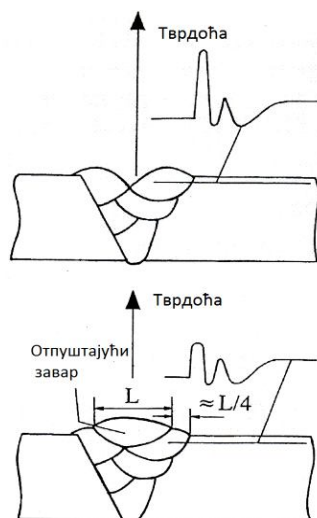
*) Комерцијална ознака ДМ – произвођач: Електроде Јесенице, Словенија.

Затамњена поља у табели 4.7 представљају комбинацију поступака и додатних материјала чинећи тако технологију заваривања описану у оквиру тачке 4.2.

Смањење напона у завареним спојевима

Нижи напон течења додатног материјала у односу на основни, доводи до мањег напона у завареним деловима него при заваривању са додатним материјалима веће јачине, јер по правилу, материјал мање јачине даје дуктилнији спој него додатни материјал веће јачине. Ниво заосталих напона у завару се повећава са порастом степена укрућења (ометеног ширења или скупљања). Ако је термичко скупљање заваара ометено у свим правцима настаје вишеосно напонско стање. Ово стање повећава ниво заосталих напона. Концентрација напона настаје на местима локалне промене геометрије или структурне нехомогености (металуршки фактор). Пример су места са променом попречног пресека површине и ивице угаоних шавова.

Најпростији начин да се делује на расподелу заосталих напона јесте да се примене додатни материјали мање јачине од јачине завариваних делова. Ако се спој мора извести тако да има равномерну тврдоћу на површини, завари попуне се изводе са додатним материјалом мање јачине, а покривни завар са додатним материјалом веће јачине. Покривни завар сучеоног споја се не наноси по целој ширини отвора жлеба, већ се на крајевима оставља непопуњено око ¼ те ширине, према скици са слике 4.2. На тај начин наносење последњег слоја делује отпуштајуће на већ изведене заваре. После хлађења споја надвишење шавова се најчешће бруси до нивоа основног материјала. Коренски завари се изводе легуром INOX B 18/8/6 која има напон течења око 350 MPa. Својство те легуре је да добро апсорбује вибрације које спој у експлоатацији трпи и да неутралише постојеће напоне. То позитивно утиче на цео шав док се проблем тврдоће решава, као што је већ речено, наносењем покривног заваара веће тврдоће.



Слика 4.2 Смањење поврине тврдоће ЗУТ-а техником отпуштајућег завара

4.1.3 Предгревање и међупролазна температура

Правилно предгревање и међупролазна (interpass) температура спадају у основне параметре које треба правилно прописати и добијене температуре одржавати у прописаним границама.

Предгревање је мера која је при заваривању челика класе S690QL неопходна јер предгревање уклања водоник из завареног споја и тако смањује опасност од настанка хладних прслина. Будући да је концентрација водоника највећа у металу шави, предгревање омогућава бржу миграцију дифузног водоника у околна подручја и атмосферу. Водоник интерстицијски, преко зоне утицаја топлоте прелази у основни материјал али тада већ не представља опасност јер ће га растворити већа запремина метала од оне у заваривачком купатилу. Брзина дифузије водоника зависи од температуре. Понекад се висока температура предгревања надомештава већим уносом топлоте јер и повећан унос топлоте доприноси дифузији водоника.

Дакле, прописана оптимална температура предгревања (T_p) мора бити у границама $150 \div 200^\circ\text{C}$ док је минимална испод које предгревање не би имало ефекта 125°C . Делови се загревају електричним или гасним грејачима и температура се одржава за време трајања заваривања.



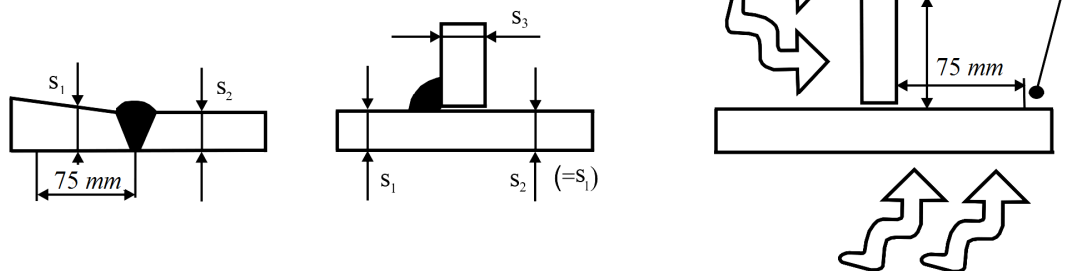
Слика 4.3 Постизање и одржавање температуре предгревања електричним грејачима

Постоје услови и препоруке за примену прописаног опсега температуре предгревања и то:

- температура предгревања се прописује у односу на најдебљу плочу у склопу,
- минимална температура предгревања важи само у случају када је унос топлоте – погонска енергија заваривања већа од 17 kJ/cm ,
- ако неки материјал склопа захтева другачију температуру предгревања размотрити могућност кориговања температурског опсега,
- T_p мерити на удаљености од 75 mm од споја.

Плоче комбиноване дебљине

s_1 - дебљина плоче на удаљености 75 mm од места заваривања



Слика 4.4 Место мерења температуре предгревања

Прописана међупролазна температура ($T_{interpass}$) треба да буде у границама од $200 \div 225^\circ\text{C}$ док максимална interpass температура може бити 300°C . s_1 -

Повећане радне температуре треба избегавати јер оне отежавају рад заваривачу и помоћном особљу. Потреба за повећањем радне температуре се може смањити помоћу мера наведених у тексту који следи. Све од наведених мера су повезане, како међусобно тако и са температуром предгревања па се на тај начин могу смањити и радне температуре. Број примењених мера, као и варијације у комбиновању истих зависе од комплексности заваривања датог материјала. Понекада је довољно применити само неку од њих али неретко, нарочито при заваривању челика повишене јачине, то мора бити комбинација више њих.

4.1.3.1 Накнадно загревање

Алтернативна допуна вишој радној температури јесте накнадно загревање завара које убрзава дифузију водоника из шави и ЗУТ-а. Нарочито је велики ризик од настајања водоничних прлина чим температура падне испод 150 до 100°C , па и на собној температури после 48 сати од заваривања. Због тога не треба дозволити да температура падне испод 150°C , већ је треба подићи на 200°C и на њој држати најмање 1 h на сваких 10 mm дебљине. Тачније, што је дуже време накнадног загревања ефективност је већа. За S690QL температура накнадног загревања не треба да надмаши 200°C , јер нарушава механичке особине а и економски није оправдано. Не треба повећавати брзину хлађења, нпр. прскањем воде на завар јер ће то спречити термичку дифузију атомног водоника у околни ваздух.

4.1.3.2 Завршна обрада завареног споја пре настајања прлина

Као што је напред споменуто, водоничне (хладне) прлине су феномен зависан од температуре (испод $100 \div 150^\circ\text{C}$) и времена. Ове прлине могу настати за време од 48 h од заваривања, али је највећа вероватноћа за њихову појаву у року од неколико сати од

завршетка процеса заваривања. Са даљим протоком времена, када се приближава рок од 48 сати, вероватноћа за њихову појаву опада.

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

4.1.3.3 Повећан (висок) унос топлоте

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

4.1.3.4 Примена аустенитних додатних материјала

Аустенитни (нерђајући) депозит шава је материјал у коме се водоник раствара у великим количинама па се тако веома смањује штетан утицај дифузног водоника у ЗУТ-у. Поред тога, аустенитни додатни материјали дају веома жилав и истегљив (дуктилан) метал шава са ниским напоном течења. Стога се ризик од водоничних прлина знатно умањује, јер се контракција завариваних делова при хлађењу смањује истезањем дуктилног¹ метала аустенитног шава, што умањује ниво заосталих напона у ЗУТ-у. Даље, коренски завари делују као амортизери за заваре испуне чија је јачина већа. Нпр, заваривачке радионице оклопних возила користе аустенитне додатне материјале јер не практикују предгревање због могућег пада тврдоће. То су тзв. панцирни челици који по заварљивости одговарају челицима класе HARDOX 500. Аустенитни додатни материјали се могу наћи у виду базичних електрода за РЕЛ заваривање и пуне или пуњене жице за МАГ и МИГ поступке заваривања.

4.1.4 Унос топлоте

Челици класе S690QL се заварују уносом топлоте који варира у уским границама да би се добиле добре механичке особине завареног споја. Тај унос топлоте се израчунава по формули:

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

где су: U – радни напон у V,

I – јачина струје у A,

v_z – брзина заваривања у cm/s и

η – степен искоришћења топлоте.

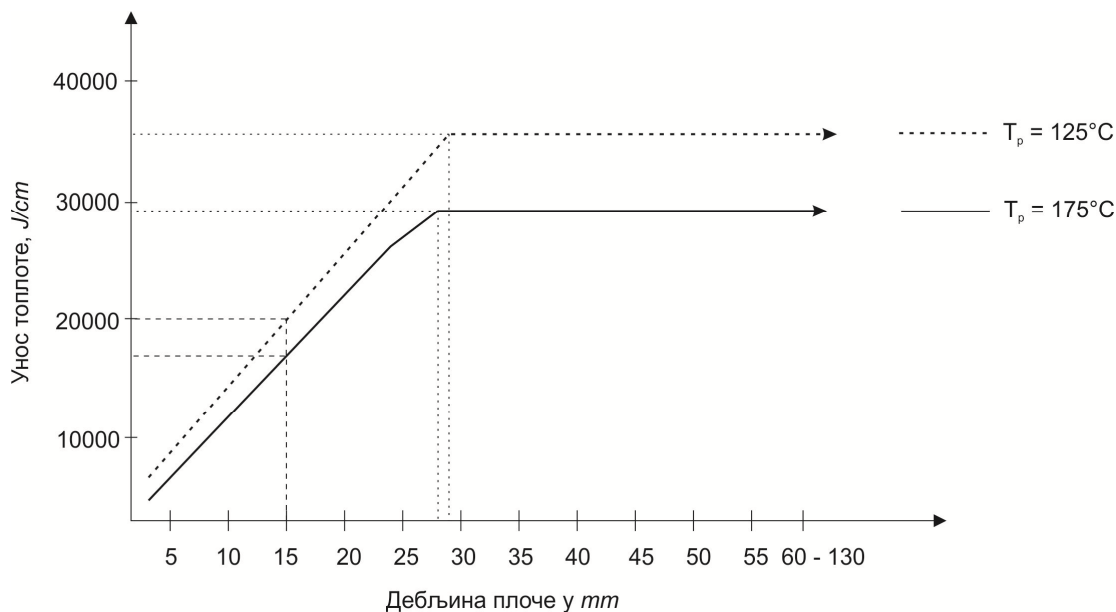
Укратко, мањи или већи унос топлоте утиче на:

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

¹ Дуктилан – истегљив, жилав.

Све горе наведено проистиче из повезаности уноса топлоте (q_l) и времена хлађења између 800 и 500°C ($t_{8/5}$), које дефинише структурне промене у критичној зони ЗУТ-а. За конструкциони челик класе S690QL, проблеми заварљивости се углавном сведе на спречавање настанка водоничних прслина и постизање минималне вредности жилавости ЗУТ-а од 40 J на собној и 27 J на температури од -40°C. Посебну пажњу треба обратити на извођење вишепролазних заварених спојева, код којих се може повећати радна температура, односно повећати унос топлоте. Зато се препоручује прецизна контрола међупрелазне температуре која се регулише дужином завара попуње. Краћи завари повећавају унос топлоте у односу на рачунску вредност (q_l).

Максималан унос топлоте треба одредити на основу температуре предгревања и жељених излазних механичких особина завареног споја. Уколико се смањи T_p мора се повећати унос топлоте како би се разлика надокнадила. Максималан унос топлоте за S690QL, прописан од стране произвођача, приказан је на слици 4.5.



Слика 4.5 Препоручен унос топлоте за температуре предгревања од 125°C и 175°C

4.1.5 Време хлађења у температурском интервалу од 800 до 500°C (време $t_{8/5}$)

Температурски циклуси који се јављају услед заваривања се могу описати преко времена хлађења зоне утицаја топлоте у интервалу температура од 800 до 500°C. Тај параметар се назива и време хлађења $t_{8/5}$. Време хлађења $t_{8/5}$ се може одредити рачунски помоћу одговарајућих израза или мерењем што представља компликованију варијанту. Са становишта очекиваних структурних промена при заваривању челика, корисно је одредити брзину хлађења у области најмање стабилности аустенита, тј. у интервалу температура од 800 до 500°C. При заваривању није довољно само познавати састав основног материјала и његове могуће структурне промене при загревању и хлађењу, максималне постигнуте температуре и одговарајуће брзине хлађења како би предвидели коначну структуру. Утицај и значај $t_{8/5}$ је много већи и у циљу добијања што меродавнијих резултата конструишу се одговарајући КН (KNZ) дијаграми у условима заваривања. Уколико постојећа брзина даје структуре каљења, мартензитне и бејнитне трансформације, што је углавном неповољно, предузимају се одређене мере

да се она смањи, односно да се време $t_{8/5}$ повећа како би се дало времена структурним променама да се одвију. Брзина хлађења може да се смањи повећавањем почетне температуре тела (T_0), тј. предгревањем, или повећањем линијске енергије заваривања (q_l).

У литератури постоји мноштво израза за прорачун времена хлађења у критичној температурској области али железара SSAB, произвођач челика S690QL, препоручује следећи израз:

$$t_{8/5} = (4300 - 4.3T_0) \cdot 10^5 \cdot \frac{q_l^2}{s^2} \cdot \left[\left(\frac{1}{500 - T_0} \right)^2 - \left(\frac{1}{800 - T_0} \right)^2 \right] \cdot K_2, \quad (4.2)$$

где је: s – дебљина плоче у mm ,

q_l – линијска енергија заваривања у kJ/mm ,

T_0 – почетна температура плоче и

K_2 – коефицијент зависан од врсте заваривања. $K_2 = 0.9$ за сучеоно вишеслојно заваривање.

Израз 4.2 важи за сучеоно спојеве, односно спојеве са два правца одвођења топлоте. Препоручена вредност за $t_{8/5}$, од стране произвођача челика је $5 \div 25$ s. Време хлађења у тим границама гарантује ударну жилавост од $27 J$ на $-40^\circ C$.

4.1.6 Заштитни гас

Заштитни гас у заваривању има веома важну улогу да заштити метално купатило од кисеоника, азота и водоника из ваздуха и тако побољша квалитет завареног споја. Та његова важност се нарочито запажа при МАГ/МИГ заваривању. Улога заштитног гаса је и да:

- олакша успостављање лука и стабилизује га током заваривања,
- повећа продуктивност и
- обезбеди жељену дубину уваривања.

Као заштитни гасови се најчешће користе: аргон (Ar), хелијум (He), угљен-диоксид (CO_2) и њихове мешавине (смеше). За припоје и коренске заваре се препоручује мешавина састава: Ar + $1 \div 3$ % O_2 или Ar + 2.5% CO_2 , а за заваре испуне и покривне заваре мешавина инертног и активног гаса: 82% Ar + 18% CO_2 .

МАГ поступак заваривања се најчешће изводи у заштити CO_2 или у мешавини CO_2 + Ar најчешће у односу 82% Ar + 18% CO_2^2 (за дебље пресеке). Употреба чистог угљен-диоксида је оправдана при заваривању пуњеним жицама јер оне састојцима у себи доприносе заштити металног купатила. Пренос растопљених капљица метала зависи од јачине струје и напона.

Инертни гасови: Од инертних гасова код нас се углавном користи аргон и његове мешавине, док се хелијум више користи у Америци и у Европи. Аргон као заштитни гас мора бити чист односно без примеса јер оне погоршавају квалитет шави. Оне потичу из добијања а најчешће су то кисеоник, угљен-диоксид и вода. Код нас се примењује аргон Ц квалитета, чистоће 99.96%, испоручује се у челичним боцама означене жутом бојом, запремине 40 l и притиска $150 \div 200$ bara. Аргон је једноатоман гас, инертан и нерастворљив у течном металу, и око 38% тежи од ваздуха што је посебно повољно за заваривање у хоризонталном положају.

² Ова смеша гасова се још означава и као M21 или Ar + 18% CO_2 .

Предности инертних гасова су:

- лакше успостављање електричног лука,
- мање прштање,
- не дозвољавају оксидацију и
- ефикасније штите метално купатило.

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

Предности активног гаса су:

- даје стабилнији лук,
- смањује порозност шави и
- повећава уваривање.

Код свих метода заваривања у заштитном гасу, његов проток зависи од врсте споја и дебљине основног материјала, и креће се у границама $15 \div 20 \text{ l/min}$.

Постоји извесна разлика у облику добијеног шави у зависности од врсте заштитног гаса. Та разлика је илустративно приказана на слици 4.6.



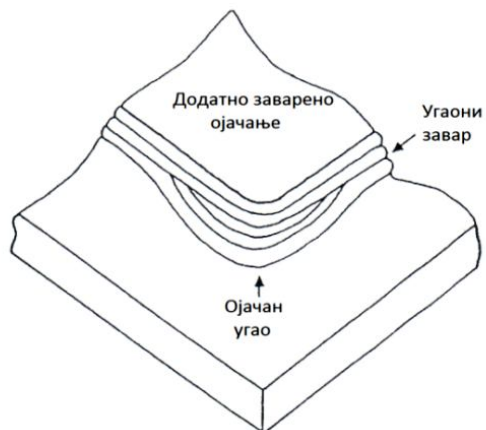
Слика 4.6 Разлика у облику шави у зависности од заштитног гаса

4.1.7 Редослед заваривања, величина зазора и позиционирање споја

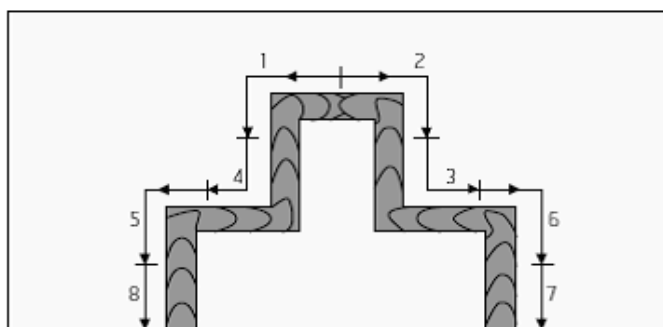
Појава хладних прслина се може умањити и практичним методама при заваривању као што су:

- код елемената за повећање крутости конструкција, препоручује се и полагање додатних зава на угловима (сл. 4.7);
- почетак и крај заваривања не изводити у угловима. Уколико је могуће, почетак и крај шави мора бити најмање $50 \div 100 \text{ mm}$ удаљен од угла. Разлог за то је појављивање гасних мехурова и укључака троске на почетку, и кратера и прслина на крају, што су недозвољене грешке у зони концентрације напона (сл. 4.8);
- конструкциона решења заварених спојева бирати према препорукама али увек, када је то могуће, избегавати заваривање на местима са променом попречног пресека;

- када се радни предмети не смеју заваривати укљештени, заваривати их под одређеним углом тако да напони који се јављају услед заваривања могу да компензују закривљење (сл. 4.9);
- заваривање не почињати од краја плоче (сл. 4.10).



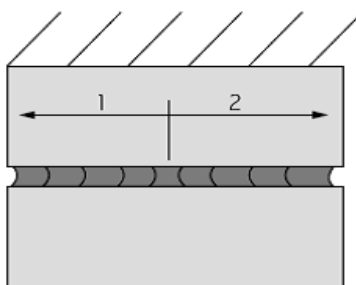
Слика 4.7 Пример ојачаног угла



Слика 4.8 Пример добро изабраног редоследа заваривања: 1 – заваривање увек изводити од средине према слободним крајевима, 2 – почетак и крај заваривања никада не позиционирати на угловима



Слика 4.9 Ефекат само-исправљања услед индукованих напона



Слика 4.10 Препорука за почетак извођења заваривања

4.1.8 Накнадна термичка обрада

Заостали унутрашњи напони (термички и структурни) по завршетку заваривања теже да деформишу сам спој и његову околину и тако ослабе део конструкције на којој је спој остварен. Будући да је то непожељно, изводи се термичка обрада отпуштања у циљу смањења нивоа заосталих напона. Накнадној термичкој обради може бити подвргнут цео склоп или само неки његови делови. Отпуштањем се повећава и граница замора завареног споја, односно постиже се равномернија расподела напона између шави и плоче а тиме се смањује и концентрација напона. Као што је већ напоменуто, температура отпуштања не би требало да буде већа од 580°C и време од $1 \div 6 \text{ h}$ јер би дошло до деградације механичких особина челика.

4.2 Технологија РЕЛ/МАГ

Прописивање технологије заваривање обухвата дефинисање мноштва параметара чије испуњавање доводи до успешног спајања два радна предмета. У случају ове технологије, РЕЛ поступку припада извођење коренских пролаза а МАГ поступку заваара попуне али је подједнако важно прописати оптималне параметре за оба поступка како би спој имао најбоља могућа својства из аспекта јачине и жилавости.

4.2.1 Технолошки поступак РЕЛ заваривања

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

РЕЛ заваривање започиње успостављањем електричног лука између врха електроде и основног материјала. Лук топи ивице основног материјала и электроду и ствара метално купатило које од ваздуха штити слој троске и гасова који потичу из облоге. Лук се прекида када се електрода потроши и остане око 50 mm у клештима (држачу електроде). Троска се обија и заваривање наставља новом електродом.

4.2.1.1 Прорачун технолошких параметара РЕЛ заваривања

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

Пречник електроде се бира према дебљини завариваног материјала, облику и димензијама жлеба и положају завареног споја. Обично се за коренски завар узима електрода мањег, а за остале заваре попуне већег пречника. Када је реч о електродама треба споменути и то да постоје различити типови електрода. Могу бити: киселе (оксид гвожђа), кисело-рутилне, базичне, целулозне, оксидне, рутилне (средња или дебела облога) и др. Пречник електроде (d) зависи од дебљине завариваних делова (s) и од врсте споја [3]. За сучеони спој пречник електроде се бира из табеле 4.8 док ће о врсти жлебова бити речи касније.

Таблица 4.8 Избор пречника електроде за сучеони спој

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

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

Јачина струје заваривања бира се на основу пречника електроде и типа облоге. Усваја се максимална и минимална вредност при чему је, испод минималне вредности, лук нестабилан а изнад максималне облога се прегрева и круни па се жица може оголити. За хоризонталан положај заваривања усвајају се максималне вредности јачине, за вертикалан средње и изнад главе минималне. Приближно се јачина струје може одредити помоћу израза [3]:

$$\begin{aligned} I &= (20 \div 25) \cdot d && \text{за } d < 4 \text{ mm} \\ I &= (35 \div 50) \cdot d && \text{за } d = 4.0 \text{ и } 5.0 \text{ mm} \\ I &= (15 + 6 \cdot d) \cdot d && \text{за } d > 5 \text{ mm} \end{aligned} \quad (4.3)$$

где су: I – јачина струје у A и
 d – пречник електроде у mm .

Напон заваривања (радни напон) се може израчунати помоћу израза [3]:

$$U = 20 + 0.04 \cdot I, \text{ V или} \quad (4.4)$$

$$U = 12 + \frac{l \cdot d}{10} \cdot \frac{I}{A}, \text{ V,} \quad (4.5)$$

где су: I – јачина струје у A ,
 $l = 3 \div 6$ – дужина лука у mm ($l \approx d$ – за рутилне и $l \approx d/2$ за базичне електроде),
 $j = I/A$ – густина струје у A/mm^2 и
 A – површина попречног пресека језгра електроде у mm^2 .

Константа топљења се израчунава према изразу [3]:

$$D = \frac{m_d}{I \cdot t}, \frac{g}{A \cdot \min}, \quad (4.6)$$

где је: m_d – део масе шава добијен топљењем електроде (језгро + облога) у g ,
 I – средња препоручена јачина струје заваривања у A ,
 t – време топљења у мин.

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

Брзина заваривања дефинише степен истопљености страница, односно при великој брзини заваривања добија се уска гусеница и недовољно стапање ивица основног материјала што даље узрокује добијање порозних шавова јер се метално купатило брзо хлади па растворени гасови остају заробљени унутар споја (шава, ЗУТ-а). Мала брзина заваривања доводи до прегревања материјала и преливања троске испред металног купатила што може узроковати укључке троске у металу шава. Брзина заваривања се израчунава према изразу [3]:

$$v_z = \frac{D \cdot I}{100 \cdot \rho \cdot A_n}, \frac{m}{h}. \quad (4.7)$$

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

I – јачина струје заваривања у A ,

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

A_n – површина попречног пресека завара у cm^2 .

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

$$q_l = 580 \cdot A_n \cdot \frac{J}{cm}, \quad (4.8)$$

односно:

$$\frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta = 580 \cdot A_n, \quad (4.9)$$

одакле се добија:

$$v_z = \frac{U \cdot I}{580 \cdot A_n} \cdot \eta, \quad \frac{cm}{s}. \quad (4.10)$$

При вишеслојном заваривању потребно је одредити укупан број пролаза, полазећи од површине попречног пресека жлеба и пресека одговарајућих завара. Ако се узме у обзир и надвишење шави, потребан број пролаза за попуњавање жлеба (n) се може одредити помоћу израза [3]:

$$n = \frac{A - A_1}{A_n} + 1. \quad (4.11)$$

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

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

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

d – пречник електроде (језгра) у mm .

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

$$q_l = \frac{U \cdot I}{v_z} \cdot \eta, \quad \frac{J}{cm}, \quad (4.12)$$

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

Дубина уваривања је директно повезана са линијском енергијом заваривања и одређује се по следећим изразима:

$$\delta = (0.3 \div 0.5) \cdot r_1, \quad cm, \quad (4.13)$$

$$r_1 = 0.00537 \cdot \sqrt{q_l}, \quad cm, \quad (4.14)$$

при чему је q_l у J/cm .

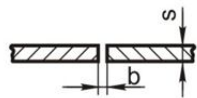
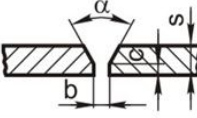
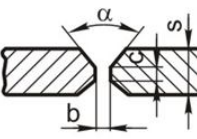
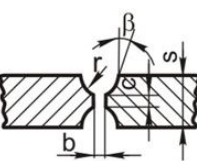
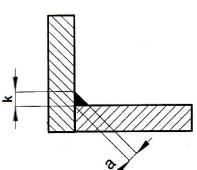
Прорачун може дати и вредност теоријске масе завара и то као:

$$M = 1.1 \cdot A \cdot l \cdot \rho . \tag{4.15}$$

где је: l – дужина жлеба – 100 *cm* и
 ρ – густина челика – 7.85 *g/cm³*.

Врста жлеба се бира из таблице 4.9 и може бити: I, V, X, U, 2U, угаони жлеб итд.

Таблица 4.9 Основне врсте жлебова за РЕЛ заваривање

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

4.2.2 Технолошки поступак МАГ заваривања

МАГ (Метал Активан Гас) или CO_2 – поступак заваривања спада у електролучне поступке заваривања топљењем који одликује, пре свега, велика брзина заваривања и могућност аутоматизације процеса. Опсег коришћених пречника електродних жица је 0.8 ÷ 2.5 *mm*. CO_2 је активан гас јер се у току заваривања, на високој температури

($T > 1600^{\circ}\text{C}$) разлаже на CO и O₂. МАГ поступак се користи за заваривање нискоугљеничних и нисколегираних челика најчешће дебљине 0.8 ÷ 30 mm.

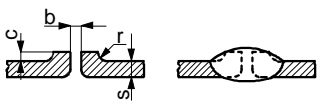
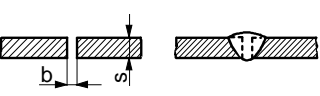
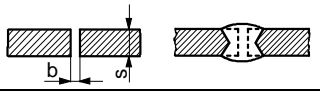
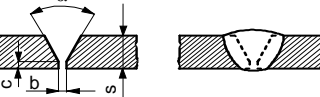
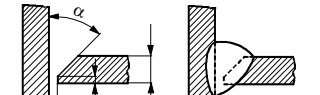
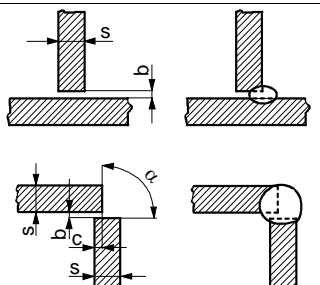
Основне карактеристике МАГ поступка су [15]:

- заваривање је могуће у свим положајима;
- струја заваривања је у опсегу: $I = 40 \div 500 \text{ A}$;
- напон заваривања је у опсегу: $U = 16 \div 35 \text{ V}$;
- брзина заваривања од $v_z = 16 \div 60 \text{ m/h}$;
- спољна карактеристика извора: равна (пад 2 V на 100 A), $U \approx \text{конст.}$
- струја заваривања: једносмерна обрнутог поларитета (E+).

4.2.2.1 Прорачун технолошких параметара МАГ заваривања

При извођењу сучеоних спојева у хоризонталном положају и угаоних спојева у коритастом и хоризонталном положају, параметри МАГ заваривања се могу приближно израчунати на основу полазних података као што су врста споја, пречник електродне жице и облик шавва. Најпре се, у зависности од дебљине делова и врсте споја, бирају облик и димензије жлеба према подацима датим у табlici 4.10.

Таблица 4.10 Припрема страница за заваривање у заштити активног гаса (CO₂)

Врста шавва	Попречни пресек жлеба и шавва	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 ÷ 50	-	≤ 2	1.5 ÷ 2.5	-
½ V - шав		3 ÷ 16	-	≤ 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 таблице 4.11 усваја попречни пресек појединих завара и одређује укупан прој пролаза. При томе се полази од препорука о пречницима електродне жице зависно од дебљине делова у сучеоном споју (таб. 4.12) односно од дебљине шавва код угаоних спојева (таб. 4.13).

Таблица 4.11 Гранични пресеци појединих завара

Врста споја	Врста завара	Допуштени пресек завара у mm^2			
		Положај „а“ за пречник жице			
		d = 1.2 mm		d = 1.6 mm	
Сучеони	Коренски завар	11.0		11.0	
	Завар испуне	6.25-64.0		15.0-64.0	
	Покривни завар	15.0-64.0		15.0-64.0	
Угаони	Покривни завар Завари попуње	Положај „б“		Положај „ц“	
		d = 1.2 mm	d = 1.6 mm	d = 1.2 mm	d = 1.6 mm
		6.25-64.0	15.0-36.0	6.25-36.0	15.0-36.0
		15.0-64.0	15.0-64.0	15.0-36.0	15.0-36.0
Према SRPS С.НЗ. 011/82 разликују се положаји:					
а) хоризонталан		б) коритагаст		в) хоризонтално - вертикалан	

Таблица 4.12 Избор пречника електродне жице – сучеони спој

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

Таблица 4.13 Избор пречника електродне жице – угаони спој

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

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

Избор жлеба и граничне површине пресека завара. Стандард SRPS С.ТЗ.001 детаљније дефинише типове спојева и врсте шавова, а облици и димензије жлебова за

заваривање челика топљењем дефинише стандард SRPS С.ТЗ.030. За МАГ/МИГ заваривање не постоје посебни стандарди али треба знати да код дебљих пресека жлебови треба да имају мањи размак, мање затупљење и мањи угао отвора жлеба него за остале поступке заваривања топљењем.

Припрема страница жлеба се може извести механички, термички или комбиновано. Механичким поступцима, странице се закошавају скидањем струготине (тестерисање, рендисање, брушење и тсл.), уз напомену да обрада уз виши квалитет обрађене површине повећава трошкове. Такође, могуће је и термичко закошење страница гасним сечењем у смеси ацетилена и кисеоника или резање плазмом.

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

Маса завара (M) на дужини од 1 cm се може израчунати на основу усвојеног пресека завара, као маса која је потребна за попуњавање дела жлеба дужине $L = 1 \text{ cm}$:

$$M = \rho \cdot V = \rho \cdot A_z \cdot L, g, \quad (4.13)$$

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

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

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

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

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

$$m_{1.2} = 0.64 + 0.11 \cdot M + 0.14 \cdot M^2, \frac{g}{s}, \quad \text{за жицу пречника } 1.2 \text{ mm} \text{ и} \quad (4.14)$$

$$m_{1.6} = 0.64 + 0.55 \cdot M + 0.055 \cdot M^2, \frac{g}{s}, \quad \text{за жицу пречника } 1.6 \text{ mm}. \quad (4.15)$$

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

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

Брзина заваривања (v_z) се рачуна по изразу:

$$v_z = \frac{m \cdot 6000}{A_z \cdot \rho}, \frac{\text{cm}}{\text{min}}, \quad (4.16)$$

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

A_z – површина завара у mm^2 и

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

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

$$v_t = \frac{0.012732 \cdot A_z \cdot v_z}{d^2}, \text{ cm/min}. \quad (4.17)$$

Број пролаза (n) се може одредити на два начина:

- према подацима за различите дебљине лима (таб. 4.14):

Таблица 4.14 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

- или на основу површине попречног пресека жлеба A и завара A_z :

$$n = \frac{A}{A_z}, \quad (4.18)$$

где је: $A_z = 0.0625 \div 0.64 \text{ cm}^2$ зависно од пречника жице, врсте жлеба и тсл. (таб. 4.11).

Најзад се израчунавају енергетски параметри заваривања у заштити гаса CO_2 :

- Јачина струје за електроодну жицу пречника 1.2 mm;
- Јачина струје за електроодну жицу пречника 1.6 mm;
- Радни напон.

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

$$I_{1.2} = 308 \cdot \log v_t - 17, \text{ A и} \quad (4.19)$$

$$I_{1.6} = 378 \cdot \log v_t + 26, \text{ A.} \quad (4.20)$$

Напон заваривања (радни напон):

$$U = 14 + 0.05 \cdot I, \text{ V.} \quad (4.21)$$

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

Напомене и препоруке у вези прорачуна технолошких параметара МАГ заваривања:

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

Прорачунати параметри заваривања служе као полазни подаци за избор режима заваривања у заштити CO_2 . Такође, врши се и њихова корекција уколико је то неопходно. После изведених спојева на пробним узорцима усвајају се параметри заваривања који дају најбоље резултате.

У таблицама 4.15 и 4.16 су дате препоруке за избор режима полуаутоматског и аутоматског МАГ заваривања нискоугљеничних и нисколегираних конструкционих челика.

Таблица 4.15 Режији полуаутоматског и аутоматског заваривања у заштитном гасу CO₂

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

Таблица 4.16 Режији полуаутоматског и аутоматског заваривања угаоних шавова у заштитном гасу CO₂

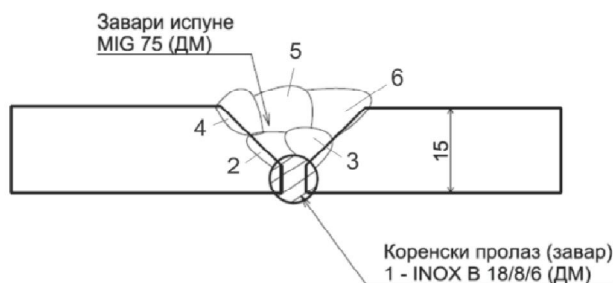
Дебљина материјала	Пречник електродне жице	Катета шавва	Број пролаза	Струја заваривања	Напон	Брзина заваривања	Слободни део ел. жице	Проток гаса
<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	-	<i>A</i>	<i>V</i>	<i>m/h</i>	<i>mm</i>	<i>l/min</i>
1.0-1.3	0.5	1.0-1.2	1	50-60	18-20	18-20	8-10	5-6
1.0-1.3	0.6	1.2-2.0	1	60-70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

4.2.3 Технологија и параметри РЕЛ /МАГ заваривања

4.2.3.1 Сучеони спојеви

Сучеони спој приказан на слици 4.11 урађен је технологијом заваривања која подразумева полагање коренског завара РЕЛ поступком, додатним материјалом мање јачине (мека легура) и наношења завара испуне МАГ поступком, са додатним материјалом веће јачине. То омогућава споју да поседује потребну јачину а истовремено и повећану жилавост, како на собним тако и на сниженим температурама. Међуслој има улогу да побољша заварљивост, неутралише деформације и да „покупи“ заостале напоне у споју. Завариване су плоче дебљине 15 *mm*.

За међуслојну електроду изабрана је легура INOX В 18/8/6 састава: 19% Cr, 9% Ni, 7% Mn и C < 0.12%. Њена јачина је 590 ÷ 690 MPa док је напон течења 350 MPa. Завари испуне се наносе електродом MIG 75 јачине 770 ÷ 940 MPa и напона течења 690 MPa. Детаљан хемијски састав наведених електрода дат је у табели 4.17.



Слика 4.11 Сучеои спој изведен технологијом РЕЛ/МАГ

Таблица 4.17 Хемијски састав и механичке особине електрода

Тип жице	Хемијски састав, %						Механичке особине чистог метала			
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	R _m MPa	R _p MPa	A ₅ %	KV J
INOX В 18/8/6* (EN 1600)	0.12	0.8	7	19	9	-	590-690	> 350	> 40	> 80 (+20°C)
MIG 75** (EN 12534)	0.6	0.6	1.7	0.25	1.5	0.5	770-940	> 690	> 17	> 47 (-40°C)
* INOX В 18/8/6	Примењује се као међуслојна електрода за наношење коренских завара у циљу смањења нивоа заосталих напона, повећања пластичности и жилавости споја као и за заваривање ситнозрних челика повишене јачине напона течења до 690 MPa.									
** MIG 75	За заваривање ситнозрних челика повишене јачине напона течења до 690 MPa.									

Треба истаћи и то да се коренски завар полаже РЕЛ заваривањем а завари испуне и покривни завари МАГ технологијом због веће продуктивности МАГ-а у односу на РЕЛ. Поред тога, РЕЛ поступком се остварује боља заштита корена од гасова из ваздуха. На крају се коренски пролаз изглеби и накнадно наноси (понекад и у заштити аргона) како би квалитет споја био што бољи.

ТЕРМИЧКА ОБРАДА:

Предгревање	T _p = 150 ÷ 200°C (нижа за 12 mm, виша за 50 mm)
Међуслојна температура	T _{interpass} = 200 ÷ 225°C (max)
Отпуштање	T _{отп} = 150 ÷ 200°C (нижа за 12 mm, виша за 50 mm)
Време прогревања	2 - 5 min/mm дебљине зида (споро загревање и хлађење)
Спојеве после заваривања и загревања прекрити изолационим материјалом у циљу што споријег хлађења. Спроводити мерење температуре и одржавати је у задатим границама.	

КОРЕНСКИ ПРОЛАЗИ – РЕЛ ЗАВАРИВАЊЕ:

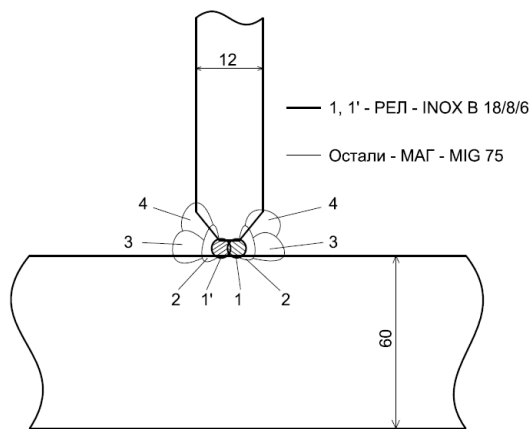
Додатни материјал	INOX В 18/8/6; пречник електроде $\varnothing 3.25 \text{ mm}$ Тип електроде: базична (сушење $350^{\circ}\text{C}/2\text{h}$)
Струја заваривања, I_{z1}	$\approx 120 \text{ A}$
Радни напон, U_1	$\approx 24.5 \text{ V}$
Брзина заваривања, v_{z1}	$\approx 0.2 \text{ cm/s}$
Погонска енергија, q_{11}	$\approx 12000 \text{ J/cm} = 12 \text{ kJ/cm}$
Дубина уваривања, δ_1	1.7 mm (мин.)

ОСТАЛИ ПРОЛАЗИ (ИСПУНА) – МАГ ЗАВАРИВАЊЕ:

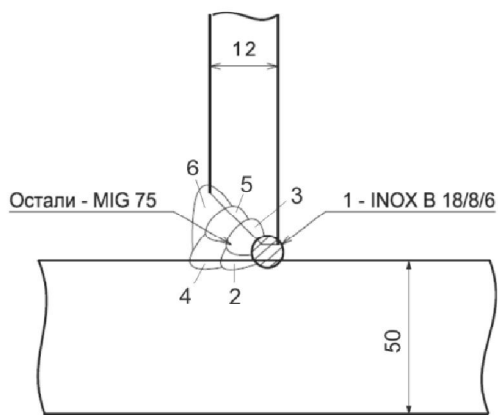
Додатни материјал	MIG 75; пречник електродне жице $\varnothing 1.2 \text{ mm}$
Струја заваривања, $I_{z2, 3, 4, \dots}$	$\approx 240 \div 250 \text{ A}$
Радни напон, $U_{2, 3, 4, \dots}$	$\approx 25 \text{ V}$
Брзина додавања жице	8 m/min.
Брзина заваривања, $v_{z2, 3, 4, \dots}$	$\approx 0.35 \text{ cm/s}$
Погонска енергија, $q_{12, 3, 4, \dots}$	$\approx 14885 \text{ J/cm} \approx 15 \text{ kJ/cm}$
Дубина уваривања, $\delta_{2, 3, 4, \dots}$	$\approx 2 \text{ mm}$
Заштитни гас	Смеша гасова (M21): 82% Ar + 18% CO ₂
Проток заштитног гаса	14 l/min

4.2.3.2 Угаони спојеви

Технологија заваривања угаоних спојева је идентична као код сучеоних с тим што се код угаоних спојева заварују делови различитих дебљина (нпр 12 за 50 mm, 12 за 60 mm, и тсл). Спој на слици 4.12 представља угаони спој са К – жлебом.



Слика 4.12 Угаони спој – К жлеб



Слика 4.13 Угаони спој – 1/2 V жлеб

У случајевима када се овакав спој не може извести због неприступачности, тада се заваривање изводи у $1/2 V$ – жлебу (сл. 4.13) (нпр. заваривање већег броја ребара на малој удаљености у циљу повећавања крутости конструкције). При извођењу угаоних спојева изводи се закошавање у циљу веће динамичке издржљивости и могућности извођења контроле без разарања (поготово ултразвучном методом).

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

ТЕРМИЧКА ОБРАДА:

Предгревање	$T_p = 150 \div 200^\circ\text{C}$ (нижа за 12 mm, виша за 50 mm)
Међуслојна температура	$T_{\text{interpass}} = 200 \div 225^\circ\text{C}$ (max)
Отпуштање	$T_{\text{отр}} = 150 \div 200^\circ\text{C}$ (нижа за 12 mm, виша за 50 mm)
Време прогревања	2 - 5 min/mm дебљине зида (споро загревање и хлађење)
Спојеве после заваривања и загревања прекрити изолационим материјалом у циљу што споријег хлађења. Спровести мерење температуре и одржавати је у задатим границама.	

КОРЕНСКИ ПРОЛАЗИ – РЕЛ ЗАВАРИВАЊЕ:

Додатни материјал	INOX В 18/8/6; пречник електроде $\varnothing 3.25$ mm Тип електроде: базична (сушење $350^\circ\text{C}/2\text{h}$)
Струја заваривања, I_{z1}	≈ 120 A
Радни напон, U_1	≈ 24.5 V
Брзина заваривања, v_{z1}	≈ 0.2 cm/s
Погонска енергија, q_{11}	≈ 12000 J/cm = 12 kJ/cm
Дубина уваривања, δ_1	1.7 mm (мин.)

ОСТАЛИ ПРОЛАЗИ – МАГ ЗАВАРИВАЊЕ:

Додатни материјал	MIG 75; пречник електродне жице $\varnothing 1.2$ mm
Струја заваривања, $I_{z2, 3, 4, \dots}$	$\approx 240 \div 250$ A
Радни напон, $U_{2, 3, 4, \dots}$	≈ 25 V
Брзина додавања жице	8 m/min.
Брзина заваривања, $v_{z2, 3, 4, \dots}$	≈ 0.35 cm/s
Погонска енергија, $q_{12, 3, 4, \dots}$	≈ 14885 J/cm = 15 kJ/cm
Дубина уваривања, $\delta_{2, 3, 4, \dots}$	≈ 2 mm
Заштитни гас	Смеша гасова (M21): 82% Ar + 18% CO ₂
Проток заштитног гаса	14 l/min

ТЕХНОЛОШКИ ЛИСТ ЗА РЕЛ/МАГ ЗАВАРИВАЊЕ				
1.	Назив производа		Узорак за експеримент	НАПОМЕНА: 4. ОБЛИК ЖЛЕБА (SRPS СТ3.011) BW – сучеони спој FW – угаони спој S – сечење маказама G – гасно сечење P – сечење плазмом ARC-AIR-поступак M – машинско сечење. 5. ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛ Nm – без ДМ. Wm – са ДМ (SRPS, DIN, ISO, фабр.озн..)
	Назив/врста дела		Заварена плоча	
	Број цртежа		// 04.2013	
2.	Број шавва		a	
3.	Основни материјал (ОМ)		S690QL S690QL	
4.	Тип споја (дебљина у mm)		BW V15 BW V15	
	Начин припреме		M M	
5.	Ознака материјала		INOX B 18/8/6 MIG 75	
	Пречник у mm		Ø 3.25 Ø 1.2	
	Темп.(°C)/време сушења (h)		350°C/2h -	
	Врста гаса - праха		- 82 Ar/18 CO ₂	
6.	Темп. предгревања T _p у °C		140-150 140-150	
	Међупролазна температура T _{interpass} у °C		200 200	
	Температура одржавања		- -	
	Поступак мерења		LM LM	
	Уређај за грејање		GG GG	
7.	Поступак заваривања		111 135	
	Положај заваривања		PA PA	
	Јачина струје у А		130-150 180-200	
	Напон лука у V		22-24 18-21	
	Брзина додавања жице у m/min		- 7-11	
	Брзина заваривања у cm/s		0.2 0.25-0.35	
	Проток заштитног гаса у l/min		- 12-16	
	Број пролаза		1 2-7	
Уређај за заваривање		LCH375 K400/K4000		
8.	Оспособљеност заваривача		SRPS EN 287-1:2012	
9.	Термичка обрада	Врста	- -	
		Темп. (°C)/време (h)	- -	
10.	Контрола (врста, %)		V – 100% V – 100%	
			- Uz – 100%	

6. ПРЕДГРЕВАЊЕ
 GG – гасни грејач
 EG – електрични грејач
 PT – пећ за термичку обраду
 TS – термо креде
 CT – контактни термометар
 TE – термо пар

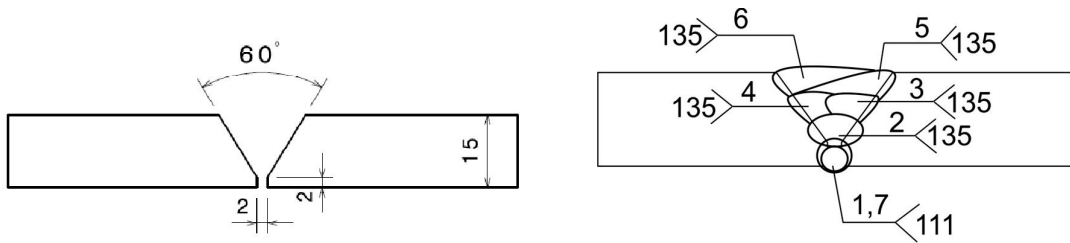
6.1 Поступак мерења температуре
 LM – ласерски мерач

7. ПАРАМЕТРИ ЗАВАРИВАЊА
 111 – REL 141 - TIG
 131 – MIG 311 - G
 135 – MAG 12 - EPP
 136 – MAG (пуњена жица)

7.1 Положаји заваривања
 PA – положен
 PE – надглавни
 PF – вертикални на горе
 PG – вертикални на доле

10. КОНТРОЛА
 V – визуелна
 Rø – радиографска
 Uz – ултразвучна
 MF – магнетофлуks
 PT – пенетранти
 TP – тест притиском.

Скица шавва, подсклопа или склопа са редоследом заваривања.



4.3 Технологија МИГ/МАГ

Друга прописана технологија заваривања подразумевала је полагање коренског завара МИГ поступком такође, уз коришћење додатних материјала мање јачине и у облику пуњене жице за заваривање, и наношење покривних завара МАГ поступком са додатним материјалом веће јачине. Иако је главна предност ове технологије брзина заваривања, односно продуктивност, то не сме имати великог утицаја на избор технологије из разлога што поузданост и сигурност споја одређују квалитет изабране технологије и добијене механичке особине а не брзина заваривања.

4.3.1 Технолошки поступак МИГ заваривања

МИГ (Метал Инертан Гас) поступак је сличан МАГ-у, с тим што се користи други заштитни гас – аргон и нешто другачији пиштољ. Највише се примењује за заваривање легираних челика и нежелезних метала дебљине до 20 mm, помоћу електродне жице пречника $1 \div 2.5 \text{ mm}$.

Основне карактеристике овог поступка су [15]:

- заваривање је могуће у свим положајима;
- струја заваривања је у опсегу: $I = 150 \div 500 \text{ A}$;
- напон заваривања је у опсегу: $U = 20 \div 30 \text{ V}$;
- брзина заваривања од $6 \div 90 \text{ m/h}$;
- проток аргона: $Q = 20 \text{ l/min}$, струјање ламинарно;
- спољна карактеристика извора: равна (пад 2 V на 100 A), $U \approx \text{конст.}$
- струја заваривања: једносмерна обрнутог поларитета (E+).

С обзиром да се као заштитни гас користи аргон, заштита металног купатила је потпунија него са угљен-диоксидом, једини проблем је виша цена али се то компензује добијањем повољних механичких карактеристика које обезбеђује МИГ поступак.

4.2.1.1 Прорачун технолошких параметара МИГ заваривања

Дакле, као што је напред наведено, најбитнији параметри МИГ поступка заваривања су радни напон и јачина струје, брзина додавања електродне жице и проток заштитног гаса, у овом случају аргона. Јачина струје и напона зависе од пречника жице и могу се израчунати према следећим изразима:

Јачина струје заваривања ($I_{1.2}$ и $I_{1.6}$) за пречнике жице $d = 1.2$ и $d = 1.6 \text{ mm}$ рачуна се према следећим изразима [3]:

$$I_{1.2} = 308 \cdot \log v_t - 17, \text{ A} \quad (4.22)$$

$$I_{1.6} = 378 \cdot \log v_t - 26, \text{ A} \quad (4.23)$$

Напон заваривања (радни напон) [3]:

$$U = 14 + 0.05 \cdot I, \text{ V} \quad (4.24)$$

Брзина топљења електродне жице директно зависи од брзине заваривања, површине жлеба али и њеног пречника. Довођење жице мора бити континуално како би се метално купатило равномерно и непрестано снабдевало додатним материјалом.

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

$$v_t = \frac{0.012732 \cdot A_z \cdot v_z}{d^2}, \text{ cm/min.} \quad (4.25)$$

Док се **количина претопљене електродне жице у јединици времена** (брзина топљења у g/s) израчунава се према изразима [3]:

$$m_{1.2} = 0.64 + 0.11 \cdot M + 0.14 \cdot M^2, \frac{g}{s}, \quad \text{за жицу пречника 1.2 mm и} \quad (4.26)$$

$$m_{1.6} = 0.64 + 0.55 \cdot M + 0.055 \cdot M^2, \frac{g}{s}, \quad \text{за жицу пречника 1.6 mm.} \quad (4.27)$$

Маса завара (М) за дужину од 1 cm се може израчунати на основу усвојеног пресека завара, као маса која је потребна за попуњавање дела жлеба дужине $L = 1 \text{ cm}$:

$$M = \rho \cdot V = A_z \cdot L, \text{ g}, \quad (4.28)$$

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

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

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

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

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

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

Брзина заваривања (v_z) се рачуна по изразу [3]:

$$v_z = \frac{m \cdot 6000}{A_z \cdot \rho}, \frac{\text{cm}}{\text{min}}, \quad (4.29)$$

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

A_z – површина завара у mm^2 и

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

Број пролаза (n) се може одредити на два начина [3]:

Према подацима за различите дебљине лима приказаним у ранијем тексту (тачка 4.2.2.1 - таблица 4.9) или на основу површине попречног пресека жлеба A и завара A_z :

$$n = \frac{A}{A_z}, \quad (4.30)$$

где је: $A_z = 0.0625 \div 0.64 \text{ cm}^2$ зависно од пречника жице, врсте жлеба и тсл. (таб. 4.11).

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

4.3.2 Технолошки поступак МАГ заваривања

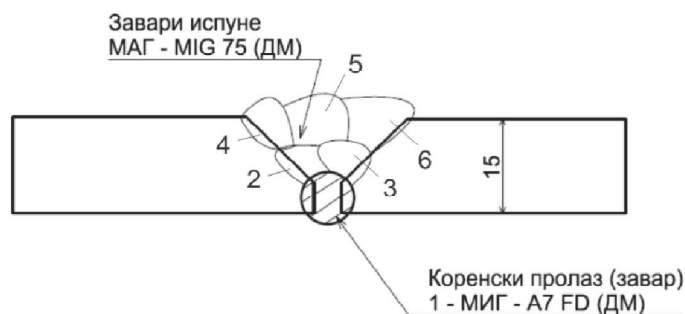
При избору жлебова, дебљине електродне жице и параметара заваривања са полуаутоматским и аутоматским режимима могу се искористити препоруке дате у таблицама од 4.10 до 4.16 у оквиру тачке 4.2.2, па се због тога овде неће помињати.

4.3.3 Технологија и параметри МИГ/МАГ заваривања

4.3.3.1 Сучеони спојев

Сучеони спој приказан на слици 4.14 урађен је технологијом заваривања која подразумева полагање коренског завара МИГ поступком, додатним материјалом мање јачине (мека легура) и наношења завара испуне МАГ поступком, са додатним материјалом веће јачине. То омогућава споју да поседује потребну јачину а истовремено и повољну жилавост, како на собним тако и на сниженим температурама. Међуслој има улогу да неутралише деформације и да „покупи“ заостале напоне у споју. Завариване су плоче дебљине 15 mm.

За међуслојну електроду узета је легура Böhler A7 FD хемијског састава датог у табlici 4.18.



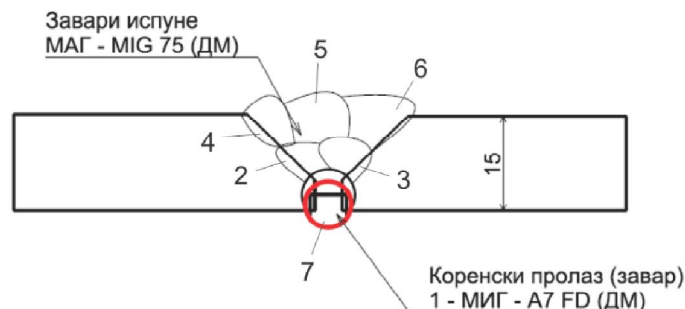
Слика 4.14 Сучеони спој изведен технологијом МИГ/МАГ

Таблица 4.18 Хемијски састав и механичке особине електрода

Тип жице	Хемијски састав, %						Механичке особине чистог метала			
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	R _m MPa	R _p MPa	A ₅ %	KV J
Böhler A7 FD*	0.1	0.8	6.8	19	9	-	600-630	> 400	> 35	> 60 (+20°C)
MIG 75** (EN 12534)	0.6	0.6	1.7	0.25	1.5	0.5	770-940	> 690	> 17	> 47 (-40°C)
* Böhler A7 FD	Рутилна, високопродуктивна, пуњена електродна жица за наношење коренских завара у циљу повећања пластичности завареног споја.									
** MIG 75	За заваривање ситнозрних челика повишене јачине напона течења до 690 MPa.									

За извођење покривних завара се користи МАГ поступак због веће економичности у погледу заштитног гаса.

Као последњи корак прописан технологијом, као и код РЕЛ/МАГ технологије, изводи се жлебљење коренског пролаза (сл. 4.15, пролаз 7) и затим поновно заваривање уз непрестано удубавање аргона. То се ради како би се смањило ниво заосталих напона и како би се смањило присуство нечистоћа, примеса и оксида насталих у току полагања првог слоја, када не постоји заштита са доње стране жлеба.



Слика 4.15 Сучеоно спој са изжлебљеним кореном

ТЕРМИЧКА ОБРАДА:

Предгревање	$T_p = 150 \div 200^\circ\text{C}$ (нижа за 12 mm, виша за 50 mm)
Међуслојна температура	$T_{\text{interpass}} = 200 \div 225^\circ\text{C}$ (max)
Отпуштање	$T_{\text{отп}} = 150 \div 200^\circ\text{C}$ (нижа за 12 mm, виша за 50 mm)
Време прогревања	2 - 5 min/mm дебљине зида (споро загревање и хлађење)
Спојеве после заваривања и загревања прекрити изолационим материјалом у циљу што споријег хлађења. Спроводити мерење температуре и одржавати је у задатим границама.	

КОРЕНСКИ ПРОЛАЗИ – МИГ ЗАВАРИВАЊЕ:

Додатни материјал	Böhler A7 FD; пречник ел. жице $\varnothing 1.2 \text{ mm}$ Тип електроде: рутилна
Струја заваривања, I_{z1}	$\approx 190 \text{ A}$
Радни напон, U_1	$\approx 22 \text{ V}$
Брзина додавања жице	8 m/min
Проток заштитног гаса	14 l/min
Брзина заваривања, v_{z1}	$\approx 0.3 \text{ cm/s}$
Погонска енергија, q_{11}	$\approx 11200 \text{ J/cm} = 11.2 \text{ kJ/cm}$
Дубина уваривања, δ_1	1.7 mm (мин.)
Заштитни гас	Смеша гасова: Ar + 2.5% CO ₂

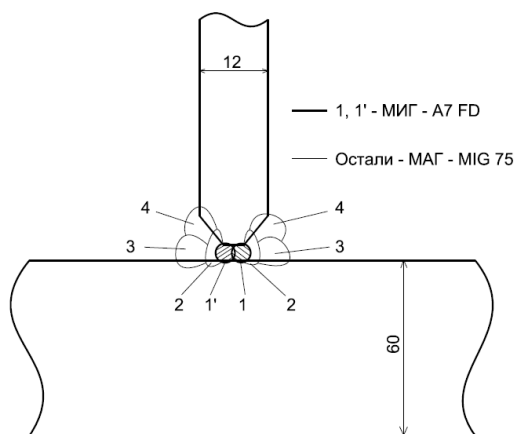
ОСТАЛИ ПРОЛАЗИ – МАГ ЗАВАРИВАЊЕ:

Додатни материјал	MIG 75; пречник електродне жице $\varnothing 1.2 \text{ mm}$
Струја заваривања, $I_{z2, 3, 4, \dots}$	$\approx 240 \div 250 \text{ A}$
Радни напон, $U_{2, 3, 4, \dots}$	$\approx 25 \text{ V}$
Брзина додавања жице	8 m/min
Проток заштитног гаса	14 l/min
Брзина заваривања, $v_{z2, 3, 4, \dots}$	$\approx 0.35 \text{ cm/s}$
Погонска енергија, $q_{12, 3, 4, \dots}$	$\approx 14885 \text{ J/cm} \approx 15 \text{ kJ/cm}$
Дубина уваривања, $\delta_{2, 3, 4, \dots}$	$\approx 2 \text{ mm}$
Заштитни гас	Смеша гасова (M21): 82% Ar + 18% CO ₂

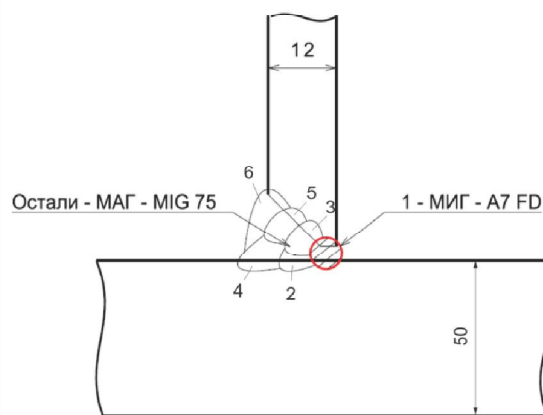
4.2.3.2 Угаони спојеви

Технологија заваривања угаоних спојева је идентична као код сучеоних уз разлику што се код угаоних спојева заварују делови различитих дебљина (нпр. 12 за 50 *mm*, 12 за 60 *mm* и тсл). Спој на слици 4.16 представља угаони спој са К – жлебом изведен технологијом МИГ/МАГ.

У случајевима када се овакав спој не може извести због неприступачности, тада се заваривање изводи у 1/2 V – жлебу (сл. 4.17) (нпр. заваривање већег броја ребара на малој међусобној удаљености у циљу повећавања крутости конструкције). При извођењу угаоних спојева изводи се закошавање у цињу веће динамичке издржљивости и могућности извођења контроле без разарања (потогово ултразвучном методом).



Слика 4.16 Угаони спој – К жлеб



Слика 4.17 Угаони спој – 1/2 V жлеб

Технологија заваривања оваквих - угаоних спојева је иста као технологија сучеоних – коренски завар се изводи МИГ поступком, пуњеном електродном жицом Böhler A7 FD, а остали слојеви (покривни) МАГ-ом, електродном жицом MIG 75. У наредном тексту су приказани термичка обрада, параметри заваривања и технолошки лист са свим неопходним подацима за извођење процеса заваривања.

ТЕРМИЧКА ОБРАДА:

Предгревање	$T_p = 150 \div 200^\circ\text{C}$ (нижа за 12 mm, виша за 50 mm)
Међуслојна температура	$T_{\text{interpass}} = 200 \div 225^\circ\text{C}$ (max)
Отпуштање	$T_{\text{отп}} = 150 \div 200^\circ\text{C}$ (нижа за 12 mm, виша за 50 mm)
Време прогревања	2 - 5 min/mm дебљине зида (споро загревање и хлађење)
Спојеве после заваривања и загревања прекрити изолационим материјалом у циљу што споријег хлађења. Спроводити мерење температуре и одржавати је у задатим границама.	

КОРЕНСКИ ПРОЛАЗИ – МИГ ЗАВАРИВАЊЕ:

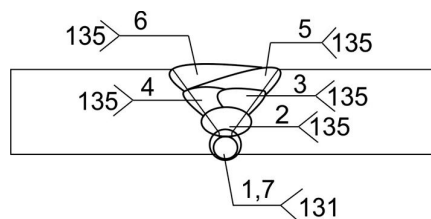
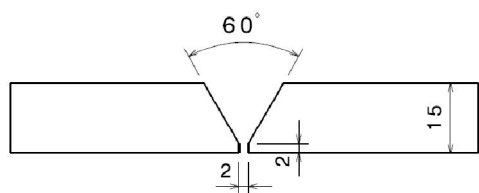
Додатни материјал	Böhler A7 FD; пречник ел. жице $\varnothing 1.2\text{ mm}$ Тип електроде: рутилна
Струја заваривања, I_{z1}	$\approx 190\text{ A}$
Радни напон, U_1	$\approx 22\text{ V}$
Брзина додавања жице	8 m/min.
Проток гаса	14 l/min
Брзина заваривања, v_{z1}	$\approx 0.3\text{ cm/s}$
Погонска енергија, q_{11}	$\approx 11200\text{ J/cm} = 11.2\text{ kJ/cm}$
Дубина уваривања, δ_1	1.7 mm (мин.)
Заштитни гас	Смеша гасова: Ar + 2.5% CO ₂

ОСТАЛИ ПРОЛАЗИ – МАГ ЗАВАРИВАЊЕ:

Додатни материјал	MIG 75; пречник електродне жице $\varnothing 1.2\text{ mm}$
Струја заваривања, $I_{z2, 3, 4, \dots}$	$\approx 240 \div 250\text{ A}$
Радни напон, $U_{2, 3, 4, \dots}$	$\approx 25\text{ V}$
Брзина додавања жице	8 m/min.
Проток гаса	14 l/min
Брзина заваривања, $v_{z2, 3, 4, \dots}$	$\approx 0.35\text{ cm/s}$
Погонска енергија, $q_{12, 3, 4, \dots}$	$\approx 14885\text{ J/cm} \approx 15\text{ kJ/cm}$
Дубина уваривања, $\delta_{2, 3, 4, \dots}$	$\approx 2\text{ mm}$
Заштитни гас	Смеша гасова (M21): 82% Ar + 18% CO ₂

ТЕХНОЛОШКИ ЛИСТ ЗА МИГ/МАГ ЗАВАРИВАЊЕ					
1.	Назив производа		Узорак за експеримент		<p>НАПОМЕНА:</p> <p>4. ОБЛИК ЖЛЕБА (SRPS СТ3.011) BW – сучеои спој FW – угаони спој S – сечење маказама G – гасно сечење P – сечење плазмом ARC-AIR-поступак M – машинско сечење.</p> <p>5. ДОДАТНИ МАТЕРИЈАЛ Nm – без ДМ. Wm – са ДМ (SRPS, DIN, ISO, фабр.озн..)</p> <p>6. ПРЕДГРЕВАЊЕ GG – гасни грејач EG – електрични грејач PT – пећ за термичку обраду TS – термо креде CT – контактни термометар TE – термо пар</p> <p>6.1 Поступак мерења температуре LM – ласерски мерач</p> <p>7. ПАРАМЕТРИ ЗАВАРИВАЊА 111 – REL 141 - TIG 131 – MIG 311 - G 135 – MAG 12 - EPP 136 – MAG (пуњена жица)</p> <p>7.1 Положаји заваривања PA – положен PE – надглавни PF – вертикални на горе PG – вертикални на доле</p> <p>10. КОНТРОЛА V – визуелна Rø – радиографска Uz – ултразвучна MF – магнетофлукс PT – пенетранти TP – тест притиском.</p>
	Назив/врста дела		Заварена плоча		
	Број цртежа		// 04.2013		
2.	Број шави		а		
3.	Основни материјал (ОМ)	S690QL	S690QL		
4.	Тип споја (дебљина у mm)	BW V15	BW V15		
	Начин припреме	M	M		
5.	Ознака материјала	A7 FD	MIG 75		
	Пречник у mm	Ø 1.2	Ø 1.2		
	Темп.(°C)/време сушења (h)	-	-		
	Врста гаса - праха	Ar + 2.5% CO ₂	82 Ar/18 CO ₂		
6.	Темп. предгревања T _p у °C	140-150	140-150		
	Међупролазна температура T _{interpass} у °C	200	200		
	Температура одржавања	-	-		
	Поступак мерења	LM	LM		
	Уређај за грејање	GG	GG		
7.	Поступак заваривања		131	135	
	Положај заваривања		PA	PA	
	Јачина струје у А		180-200	180-200	
	Напон лука у V		21-23	21-23	
	Брзина додавања жице у m/min		7-9	7-9	
	Брзина заваривања у m/min		0.25-0.35	0.25-0.35	
	Проток гаса у l/min		12-16	12-16	
	Број пролаза		1,7	2-6	
Уређај за заваривање		K400/K4000	K400/K4000		
8.	Оспособљеност заваривача		SRPS EN287-1:2012		
9.	Термичка обрада	Врста	-	-	
		Темп. (°C)/време (h)	-	-	
10.	Контрола (врста, %)		V – 100%	V – 100%	
				Uz – 100%	

Скица жлеба, подскопа или скопа са редоследом заваривања



5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА ЗАВАРЕНИХ УЗОРАКА

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

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

Свака заварена конструкција се састоји од великог броја спојева како сучеоних тако и угаоних. Иако на угаоне спојеве отпада и до 80% свих спојева, сучеони заварени спојеви су подједнако важни. Такође, и експериментална испитивања су углавном базирана на испитивању сучеоних спојева јер се сматра да уколико је прописана технологија дала повољне резултате на сучеоним спојевима да ће тако бити и при извођењу угаоних.

Дакле, заварени спој може бити изведен као угаони или као сучеони зависно од конструкције склопова али као главни циљ поставља се тежња да метал шава, ЗУТ-а и основни материјал буду приближних механичких особина. Одабраном комбинацијом додатних материјала, поступака и усвојеним параметрима заваривања изведено је више проба на карактеристичним угаоним и сучеоним спојевима. На тим узорцима су извршена и металографска испитивања. Најпре је изведено мерење најважнијих геометријских величина (дубина уваривања, дебљина шава, надвишење и тсл.), а затим су измерене вредности тврдоће појединих зона споја и прочитана микроструктура тих зона. Поред тврдоће и металографије, урађени су и тестови затезања и мерења ударне жилавости. Добијени резултати треба да покажу која је технологија повољнија при заваривању реалних конструкција.

5.1 Испитивање затезањем

5.1.1 Уводне напомене

Испитивање затезањем спада у методе испитивања материјала са разарањем и њиме се одређује отпорност завареног споја на дејство спољашњих затезућих сила. Испитивањем затезањем одређујемо јачину на кидане (R_m , МПа), напон течења ($R_{p0.2}$, МПа) издужење (A_5 , A_{11} , %) и сужење (Z , %). Пробе се изводе у циљу одређивања ових параметара како основног материјала тако и самог заваара. Мерна дужина незаваареног узорка треба да буде $L_0 = 5 \cdot d_0$, где је $d_0 = 11.3 \cdot \sqrt{A}$. Остале димензије узорка, у mm, су дате у табlici 5.1.

Таблица 5.1 Димензије узорка

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

Циљ испитивања затезањем је да се одреде следеће карактеристике материјала:

- **Затезна чврстоћа (јачина):**

$$R_m = \frac{F_m}{A_0} , \text{ МПа} , \quad (5.1)$$

- **Релативно процентуално издужење:**

$$A_5 = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 , \text{ \%} , \quad (5.2)$$

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

$$R_p = \frac{F_p}{S_0} \text{ или } R_{p0.2} = \frac{F_{p0.2}}{S_0} , \text{ МПа} , \quad (5.3)$$

где је: F_m – максимална сила у N ,

S_0 – површина почетног попречног пресека узорка у mm^2 ,

Δl – издужење прекинуте епрувете у mm ,

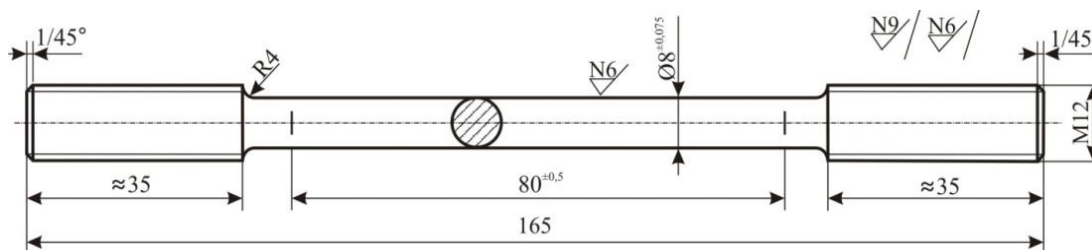
F_p ($F_{0.2}$) – сила на граници течења у N и

l_0 – почетна дужина пробе у mm .

Испитивање затезањем може показати квалитет изведеног завареног споја. Уколико се лом епрувете деси у зони споја (МШ, ЗУТ) можемо закључити да је заварени спој најслабија карика у систему и обрнуто, уколико се лом деси ван зоне завареног споја – на основном материјалу, то представља најповољнији случај и говори нам да је примењена технологија заваривања оптимална. Посао инжењера заваривања јесте обезбеђивање добијања управо таквог завареног споја – споја који неће бити најкритичније место на конструкцији и место највероватније појаве лома.

5.1.2 Експериментална испитивања

На слици 5.1 је приказана епрувета за испитивање основног материјала. Епрувете за испитивање заварених спојева се не разликују од епрувете на слици 5.1 осим што на њеној средини постоји заварени спој, односно она је израђена – исечена из заварене плоче тако да садржи заварени спој. Припремљене су 4 епрувете за испитивање затезањем из заварене плоче дебљине 15 mm .



Слика 5.1 Епрувета за испитивање затезањем основног материјала

Затезање је извођено у акредитованој лабораторији на кидалици мерног опсега $1 \div 100 \text{ kN}$. Брзина деформисања износила је 10 mm/min .



Епрувета за испитивање затезањем - ОМ



Епрувета после испитивања затезањем - ОМ



Епрувета за испитивање затезањем - ЗС



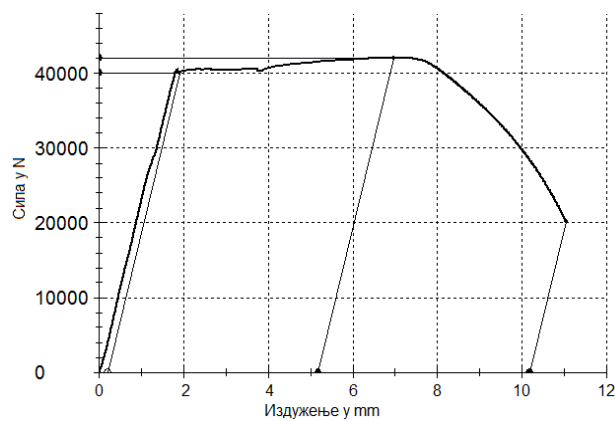
Епрувета после испитивања затезањем - ЗС

Слика 5.2 Изглед епрувета за испитивање затезањем (ОМ и заварени спој)

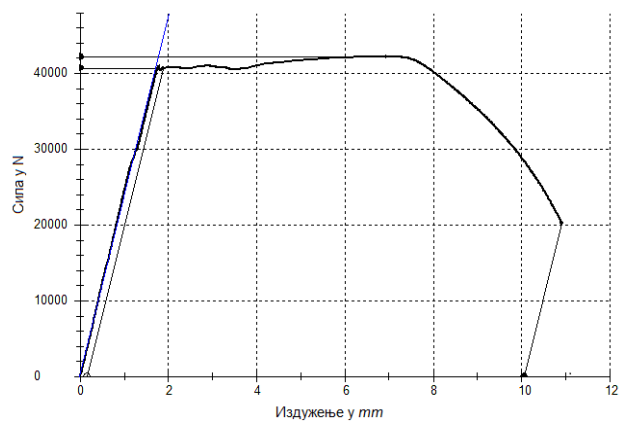
Добијени резултати су приказани у табlici 5.2. Дијаграми затезања за ОМ, плочу 1 (РЕЛ/МАГ) и плочу 2 (МИГ/МАГ) су приказани на сликама 5.3, 5.4 и 5.5.

Таблица 5.2 Експериментални резултати испитивања затезањем – ОМ (S690QL)

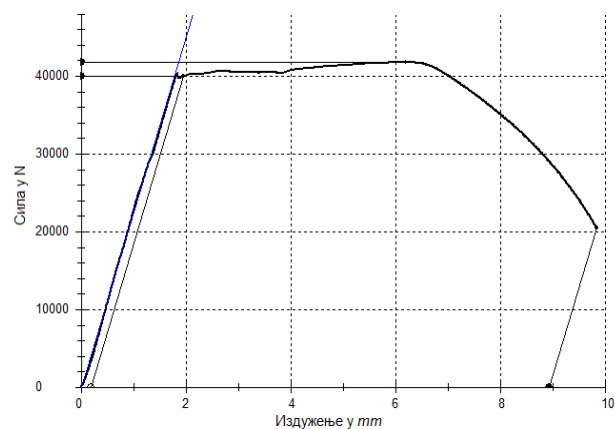
Број епрувете	$l_0, \text{ mm}$	$S_0, \text{ mm}^2$	$R_{p0.2}, \text{ MPa}$	$R_m, \text{ MPa}$	$A_{11.3}, \%$
1	89.28	50.27	781.94	797.81	14.19
2	89.28	50.27	809.40	839.92	11.30
3	88.42	50.01	800.41	835.52	9.98
4	88.29	50.27	811.95	842.45	10.92



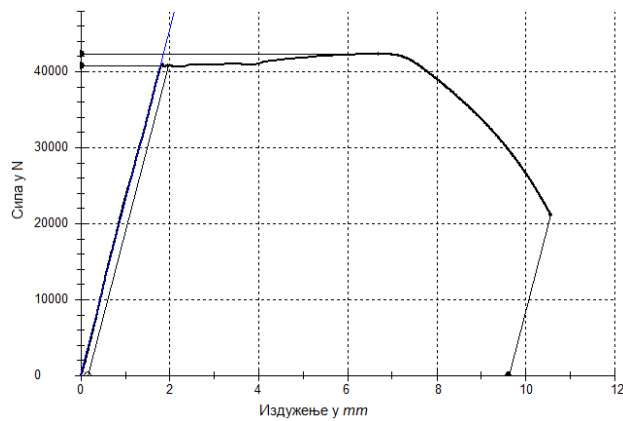
Узорак 1



Узорак 2



Узорак 3

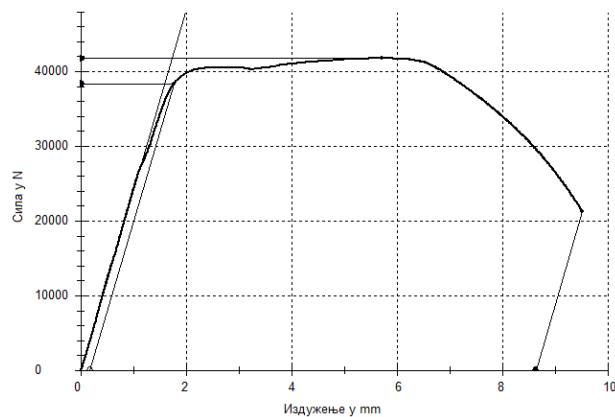


Узорак 4

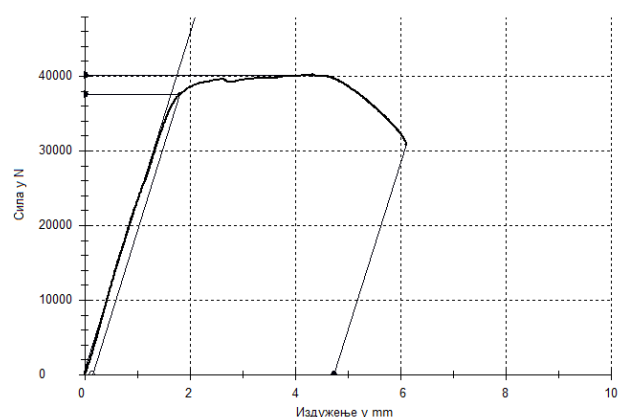
Слика 5.3 Дијаграми татезања за 4 епрувете – ОМ (S690QL)

Таблица 5.3 Експериментални резултати испитивања татезањем – ЗС - плоча 1 (РЕЛ/МАГ)

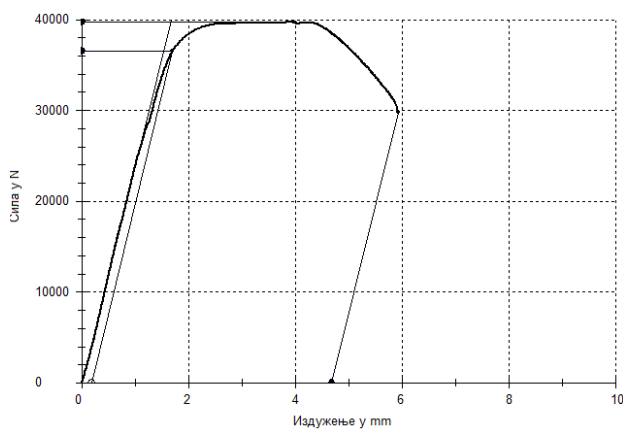
Број епрувете	l_0, mm	S_0, mm^2	$R_{p0.2}, MPa$	R_m, MPa	$A_{11.3}, \%$
1	89.28	50.27	809.40	839.92	11.30
2	88.42	50.27	763.52	831.08	9.77
3	86.96	49.39	760.36	812.00	5.49
4	86.96	49.39	739.68	804.47	5.38



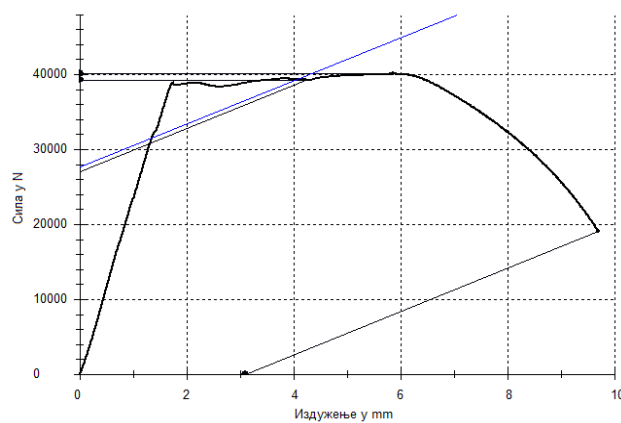
Узорак 1



Узорак 2



Узорак 3

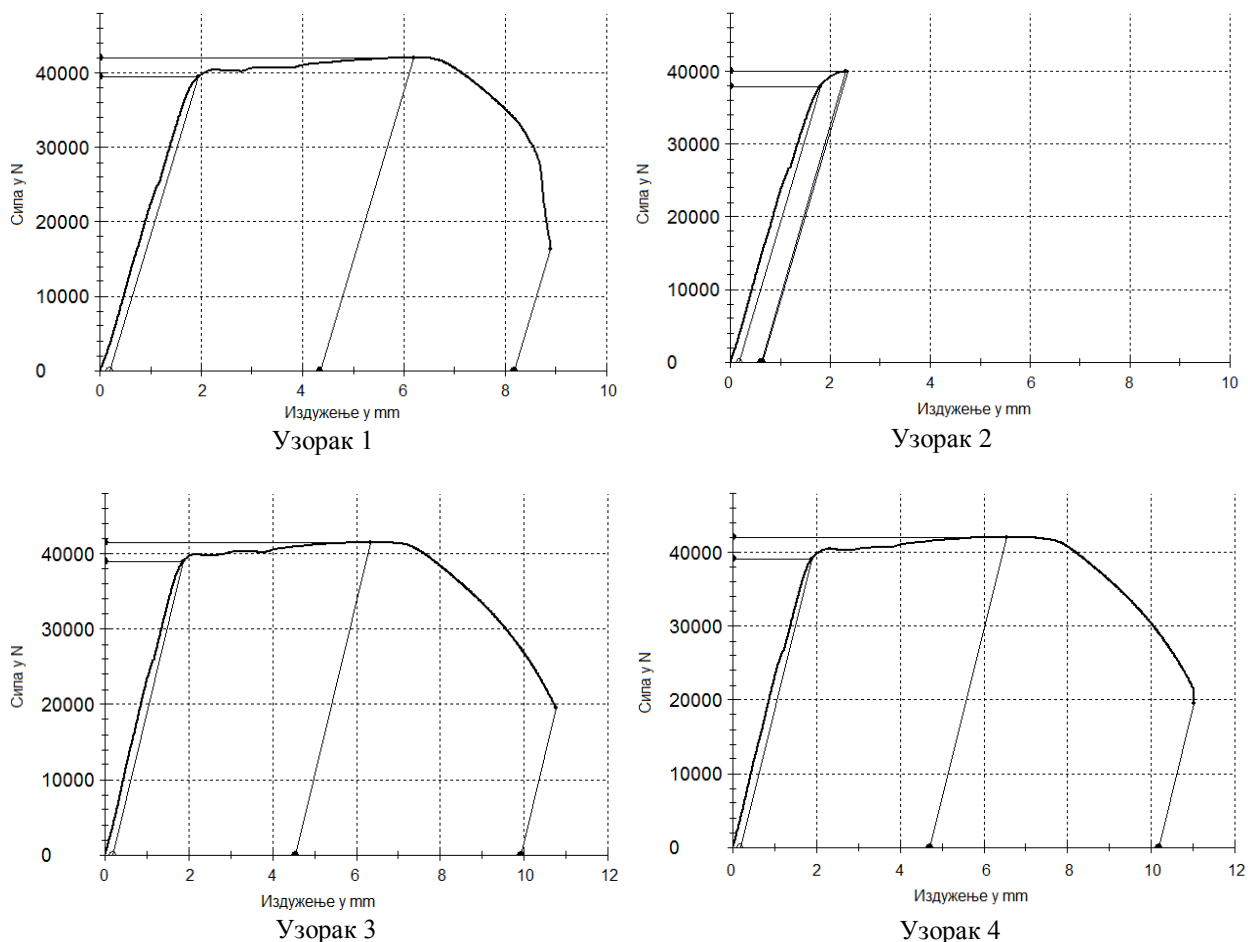


Узорак 4

Слика 5.4 Дијаграми затезања за 4 епрувете – заварени спој – плоча 1 (РЕЛ/МАГ)

Таблица 5.4 Експериментални резултати испитивања затезањем – ЗС - плоча 2 (МИГ/МАГ)

Број епрувете	l_0, mm	S_0, mm^2	$R_{p0.2}, MPa$	R_m, MPa	$A_{11.3}, \%$
1	87.63	50.39	794.10	834.36	11.59
2	89.26	50.01	759.19	800.00	0.72
3	89.49	50.39	783.96	834.30	9.12
4	90.92	49.89	782.24	832.90	10.92
5	88.75	50.27	778.61	837.26	11.48



Слика 5.5 Дијаграми затезања за 4 епрувета – заварени спој – плоча 2 (МИГ/МАГ)

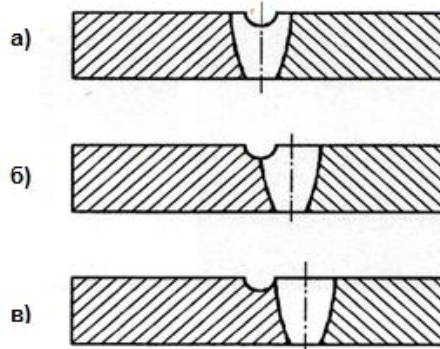
Битно је да се нагласи да се у највећем броју случајева лом епрувета дешавао ван зоне завареног споја. Иако добијени резултати указују на правилно одабрану технологију заваривања и додатни материјал, за поузданији закључак потребна су допунска испитивања на већем броју епрувета.

5.2 Испитивање ударне жилавости

5.2.1 Уводне напомене

Испитивање ударне жилавости представља такође метод контроле заварених спојева са разарањем, при чему се добијају резултати који презентују жилавост материјала односно, способност материјала да се одупре настајању прлина које доводе до лома конструкције. Повољна жилавост материјала може обезбедити конструкцију од настајања иницијалних прлина при чему те прлине могу бити већ присутне на микро нивоу или да настану услед замора у току експлоатације. Материјал веће жилавости ће се на бољи начин одупрети ширењу прлина а уколико до лома и дође, он неће бити крт и изненадан. Стога је циљ инжењера, да при прописивању технологије заваривања, обезбеди добијање

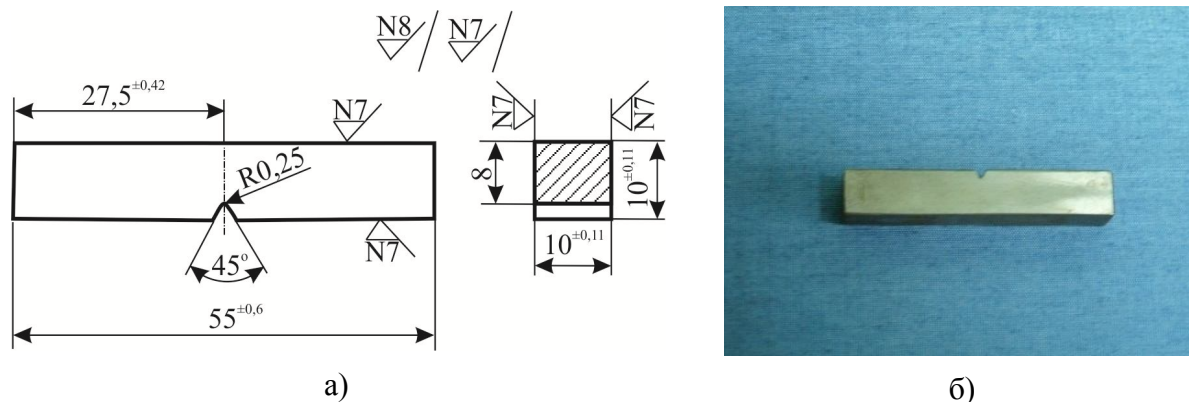
споја оптималних особина у погледу жилавости али не драстично на уштрб јачине материјала. Зоне завареног споја треба да буду што хомогеније. Хомогенизација зона завареног споја се може извести и накнадном термичком обрадом али се мора водити рачуна да притом не дође до пада особина материјала постигнутих сложеним термо-механичким поступцима прераде челика. Дакле, циљ овог испитивања је да се одреди отпорност материјала на дејство ударних динамичких сила. Испитивање се изводи на Шарпијевом клатну на коме се рачунају расположиви рад A_1 и неутрошени рад A_2 и затим се рачуна утрошени рад A_0 као разлика претходна два. Утрошени рад за лом епрувете представља мерило жилавости и исказује се у J . Испитују се сучеоно спојеви дебљине преко дебљине преко 10 mm , при чему се одређује жилавост метала шава, зоне стапања и зоне утицаја топлоте (сл. 5.6 а, б, в) [4, 6].



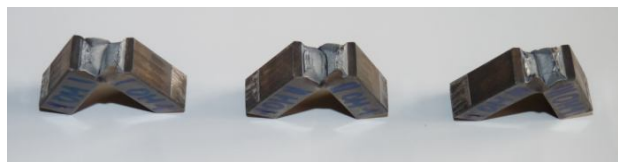
Слика 5.6 Испитивање ударне жилавости

5.2.2 Експериментална испитивања

Слично као и при испитивању затезањем припремљене су епрувете из основног материјала и завареног споја које су испитиване на Шарпијевом клатну у акредитованој лабораторији, према стандарду SRPS C.A4.025 (55x10x10). Технички цртеж епрувете за испитивање ударне жилавости је приказан на слици 5.7. Епрувете су израђене према стандарду EN 10045-1 (површина попречног пресека је $80\ mm^2$). Резултати испитивања ударне жилавости основног материјала на собној и сниженим температурама дати су у таблицама 5.5 – 5.12. Поред табеларног приказа резултата, сликама – дијаграмима су илустроване криве промене силе са временом и криве промене (пораста) ударне жилавости са временом, за 4 карактеристичне зоне завареног споја. Као репрезентативан узорак узет је узорак 1 из плоче 1 заварене технологијом РЕЛ/МАГ. Такође, на сликама је приказан и изглед епрувета после разарања.



Слика 5.7 Технички цртеж (а) и изглед (б) епрувете за одређивање ударне жилавости – основни материјал



ОМ – плоча 1 – T = 20°C



ОМ – плоча 2 – T = 20°C

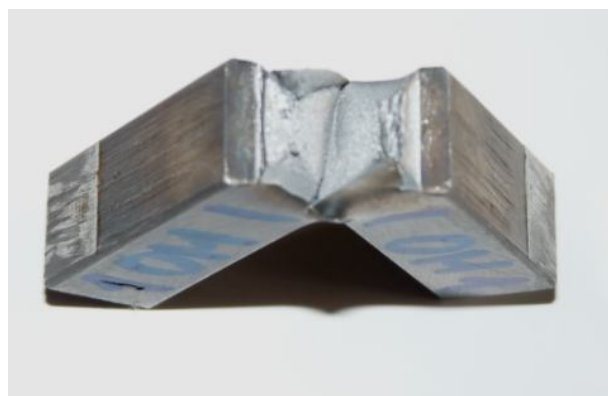


ОМ – плоча 1 – T = -40°C



ОМ – плоча 2 – T = -40°C

Слика 5.8 Изглед епрувета после прелома - ОМ (S690QL)



Слика 5.9 Изглед места прелома - ОМ - узорак 1 – плоча 1 (РЕЛ/МАГ)



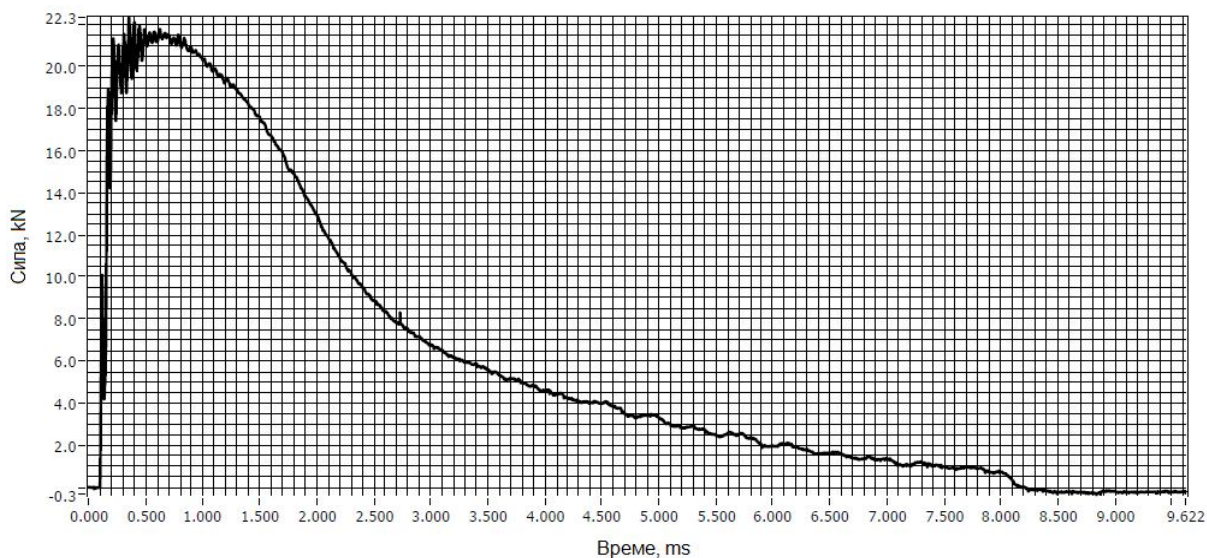
Слика 5.10 Изглед места прелома - ОМ - узорак 1 – плоча 2 (МИГ/МАГ)

Таблица 5.5 Вредности утрошене енергије лома и ударне жилавости ОМ на собној и сниженим температурама

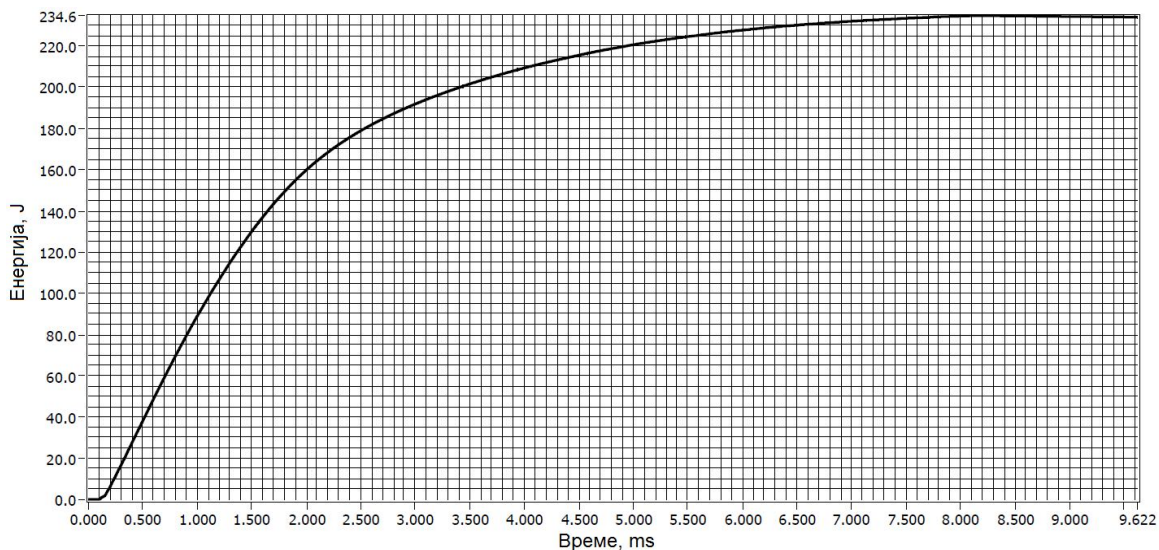
Врста материјала	Температура, °C	Број узорка	Енергија лома, J		Ударна жилавост, J/cm ²	
			Плоча 1 РЕЛ/МАГ	Плоча 2 МИГ/МАГ	Плоча 1 РЕЛ/МАГ	Плоча 2 МИГ/МАГ
S690QL	+ 20	1	235.17	242.02	293.96	302.52
		2	222.44	226.19	278.05	282.74
		3	234.68	250.89	293.34	313.61
	- 40	1	219.59	238.10	274.49	297.62
		2	179.78	210.84	224.73	263.55
		3	206.08	221.39	257.60	276.74

Таблица 5.6 Процент жилавог лома ОМ на +20 и -40°C

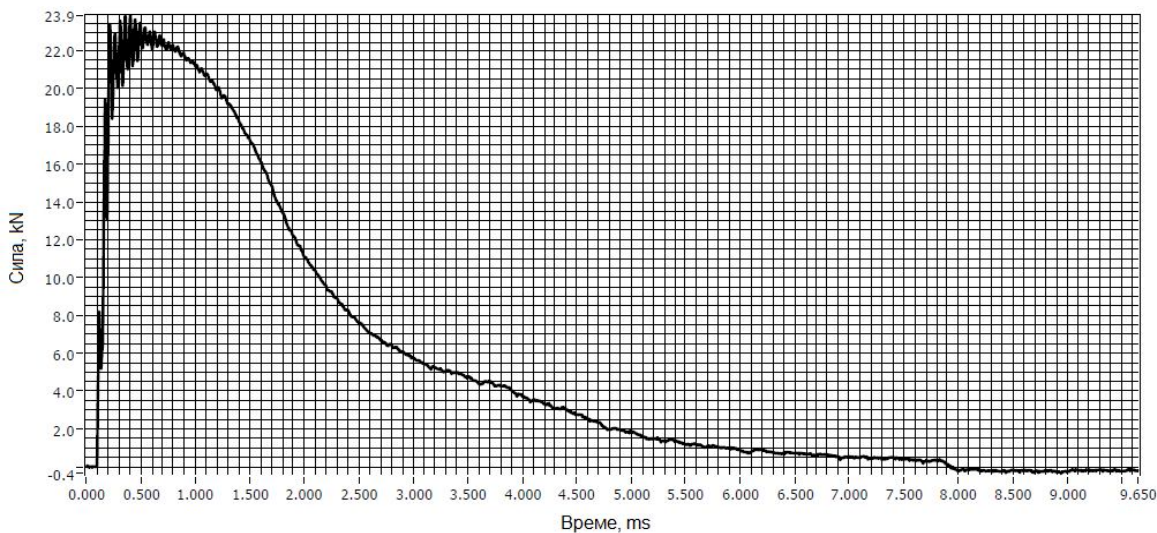
Број узорка	Плоча 1 – РЕЈ/МАГ		Плоча 2 – МИГ/МАГ	
	+20	-40	+20	-40
1	91.1	89.1	91.8	93
2	93.5	78.5	92.8	95.3
3	96.0	80.6	94.8	95.7



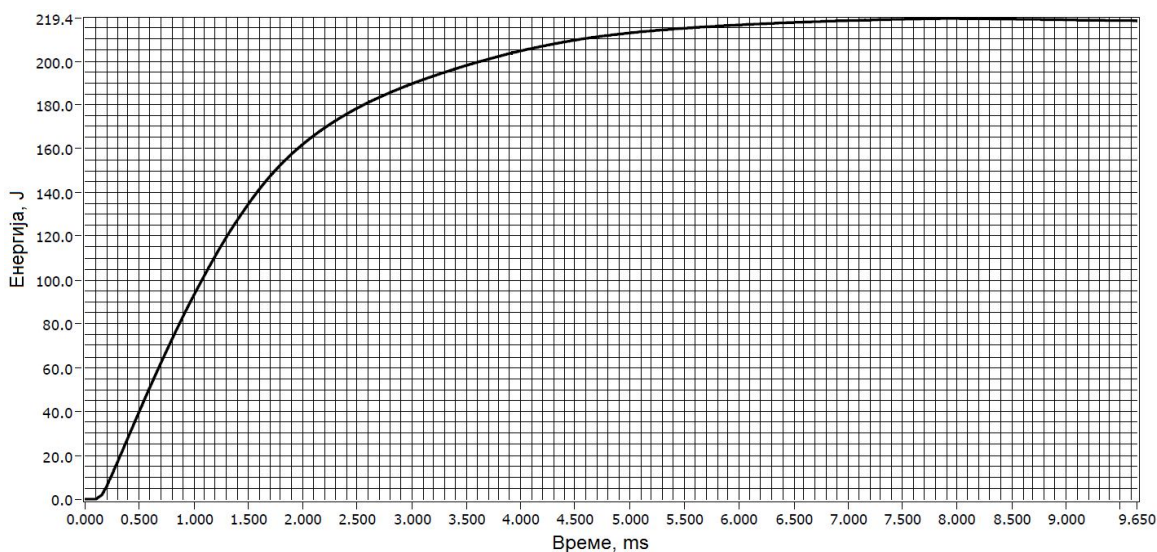
Слика 5.11 Дијаграм сила – време – ОМ – плоча 1 – узорак 1 (+20°C)



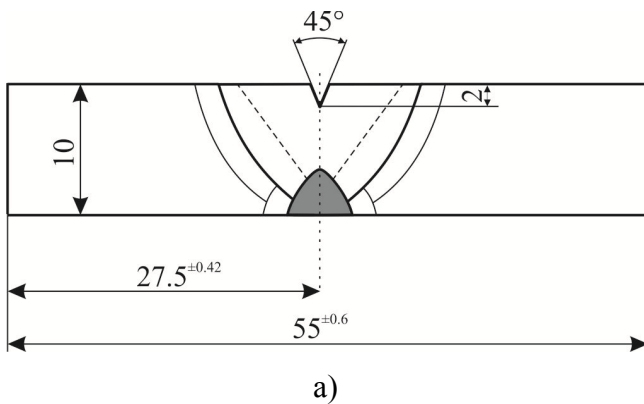
Слика 5.12 Дијаграм енергија удара – време – ОМ – плоча 1 – узорак 1 (+20°C)



Слика 5.13 Дијаграм сила – време – ОМ – плоча 1 – узорак 1 (-40°C)



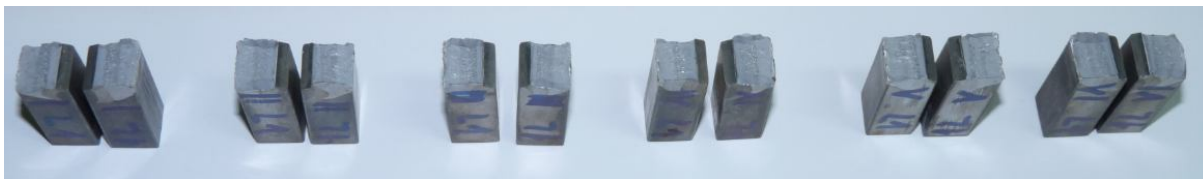
Слика 5.14 Дијаграм енергија удара – време – ОМ – плоча 1 – узорак 1 (-40°C)



а)

б)

Слика 5.15 Скица (а) и изглед (б) епрувете за одређивање ударне жилавости – лице шава



а) плоча 1



б) плоча 2

Слика 5.16 Изглед епрувета после лома – заварен спој - лице шави - $T = 20^{\circ}\text{C}$



Слика 5.17 Изглед места прелома: лице шави
плоча 1 – узорак 1



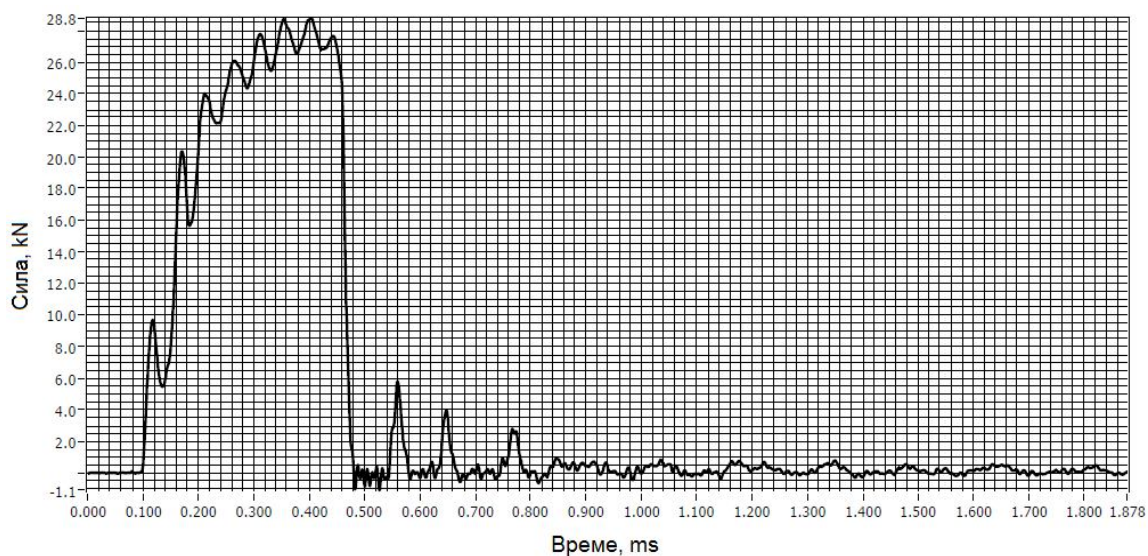
Слика 5.18 Изглед места прелома: лице шави
плоча 2 – узорак 1

Таблица 5.7 Вредности ударне жилавости лица шави на собној температури

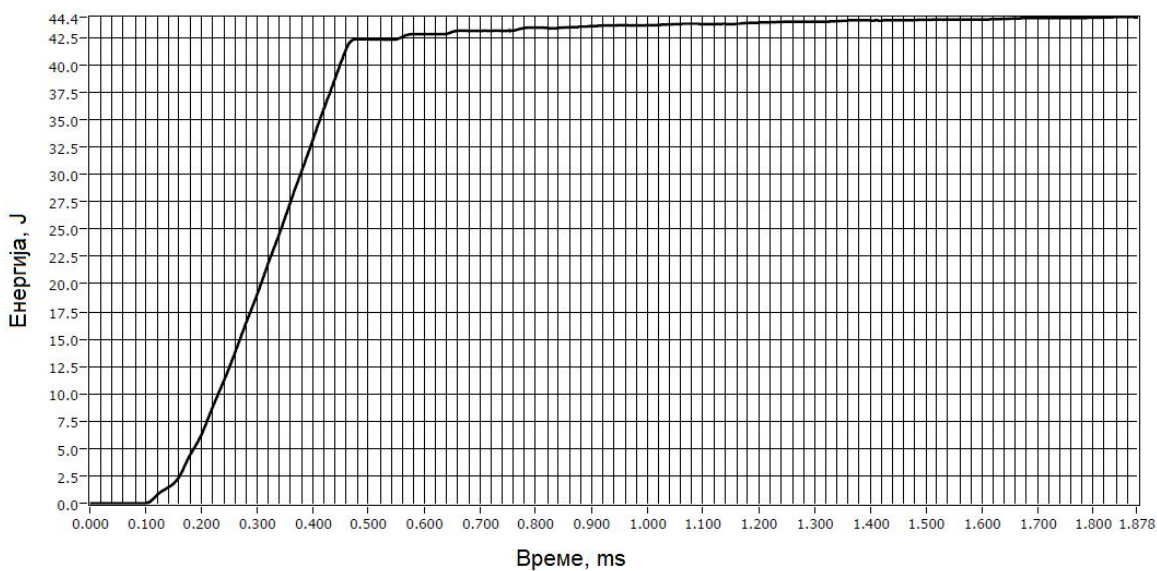
Врста материјала	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Број узорка	Енергија лома, J		Ударна жилавост, J/cm^2	
			Плоча 1 РЕЛ/МАГ	Плоча 2 МИГ/МАГ	Плоча 1 РЕЛ/МАГ	Плоча 2 МИГ/МАГ
S690QL	+ 20	1	44.54	25.27	55.68	31.58
		2	52.05	30.23	65.07	37.78
		3	47.31	24.84	59.14	31.05
		4	49.21	26.29	61.52	32.87
		5	35.95	35.30	44.94	44.13

Таблица 5.8 Процент жилавог лома лица шави на +20°C

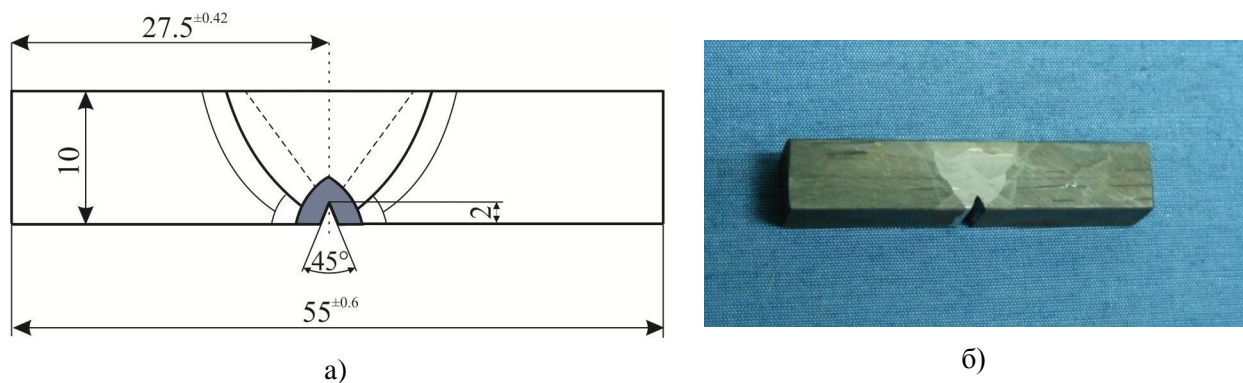
Број узорка	Плоча 1 – РЕЈ/МАГ	Плоча 2 – МИГ/МАГ
	+20	+20
1	1.8	7.0
2	13.6	10.9
3	8.2	2.9
4	6.2	8.8
5	1.1	10.9
6	5.7	-



Слика 5.19 Дијаграм силе – време – лице шави – плоча 1 – узорак 1 (+20°C)



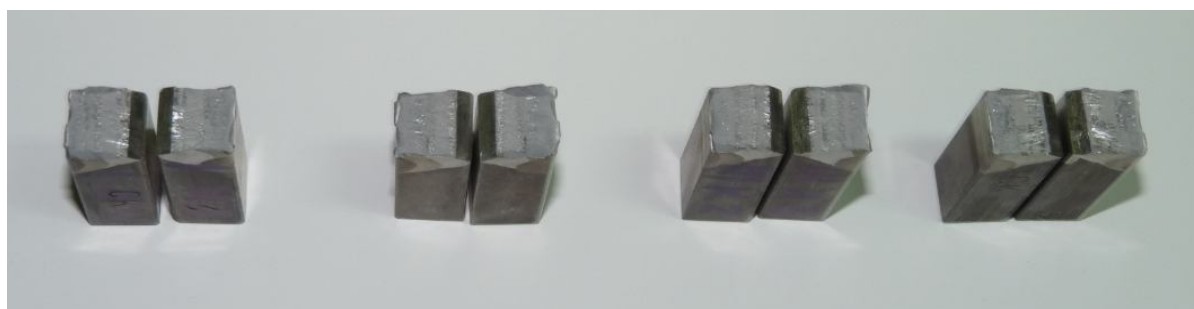
Слика 5.20 Дијаграм енергија удара – време – лице шави – плоча 1 – узорак 1 (+20°C)



Слика 5.21 Скица (а) и изглед (б) епрувете за одређивање ударне жилавости – корен шави

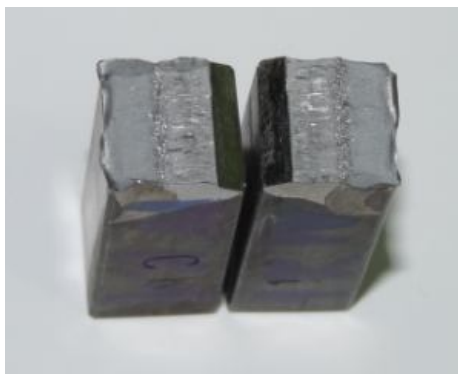


а) плоча 1



б) плоча 2

Слика 5.22 Изглед епрувета после лома – заварен спој - корен шави - $T = 20^{\circ}\text{C}$



Слика 5.23 Изглед места прелома: корен шави – плоча 1 – узорак 1



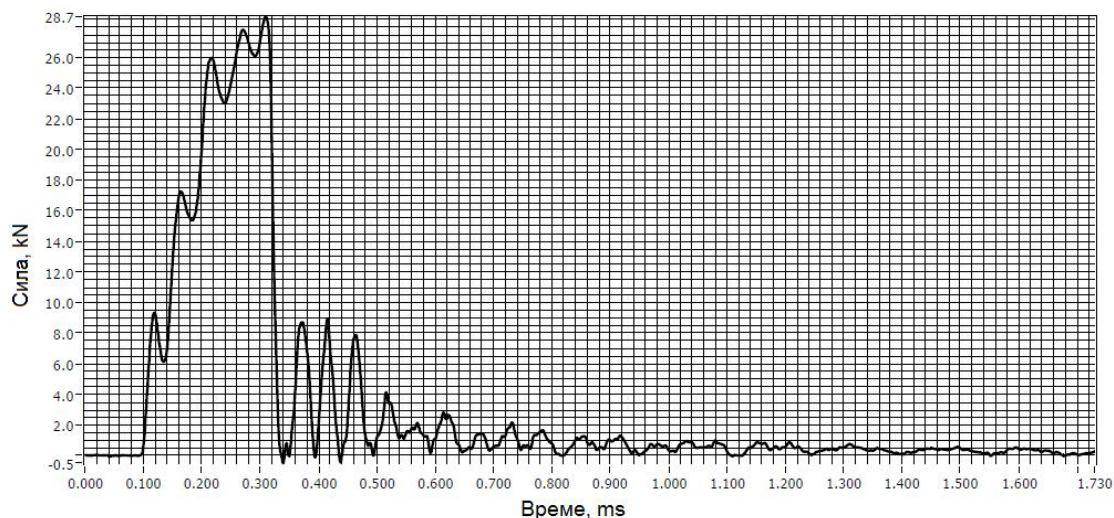
Слика 5.24 Изглед места прелома: корен шави – плоча 2 – узорак 1

Таблица 5.9 Вредности енергије лома и ударне жилавости корена шави на собној температури

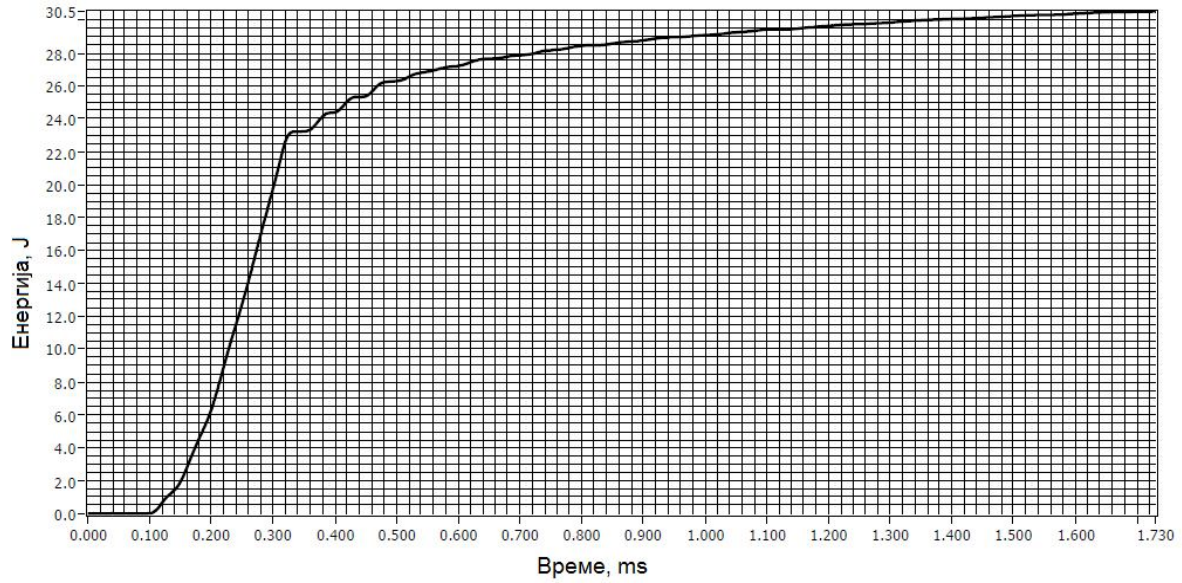
Врста материјала	Температура, °C	Број узорка	Енергија лома, J		Ударна жилавост, J/cm ²	
			Плоча 1 РЕЛ/МАГ	Плоча 2 МИГ/МАГ	Плоча 1 РЕЛ/МАГ	Плоча 2 МИГ/МАГ
S690QL	+ 20	1	30.67	16.94	38.34	21.18
		2	27.33	20.36	34.16	25.45
		3	45.03	17.65	56.29	22.06
		4	26.12	15.32	32.65	19.15

Таблица 5.10 Процент жилавог лома корена на +20°C

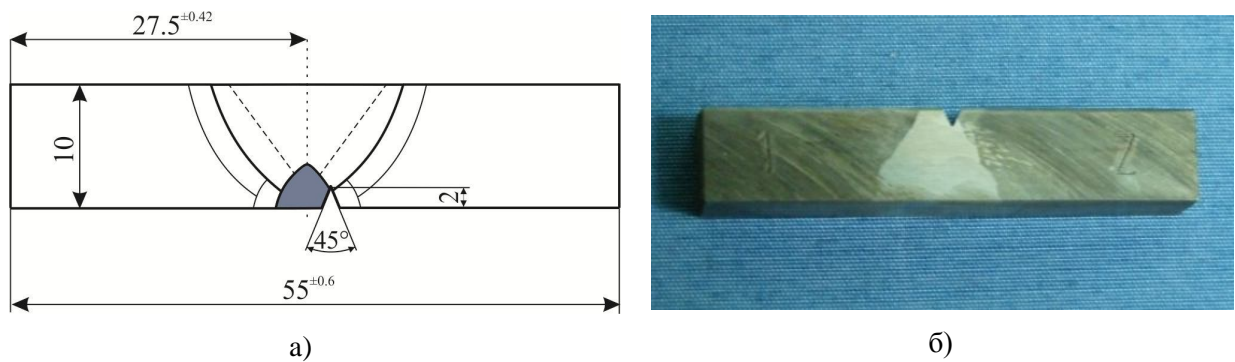
Број узорка	Плоча 1 – РЕЛ/МАГ	Плоча 2 – МИГ/МАГ
1	0.6	7.6
2	0.9	13.6
3	27.6	3.4
4	4.9	0.6



Слика 5.25 Дијаграм сила – време – корен шави – плоча 1 – узорак 1 (+20°C)



Слика 5.26 Дијаграм енергија удара – време – корен шави – плоча 1 – узорак 1 (+20°C)



Слика 5.27 Скица (а) и изглед (б) епрувете за одређивање ударне жилавости – корен – зона стапања



а) плоча 1



б) плоча 2

Слика 5.28 Изглед епрувета после лома заварен спој – корен – зона стапања – $T = 20^{\circ}\text{C}$



Слика 5.29 Изглед места прелома: корен зона стапања – плоча 1 – узорак 1



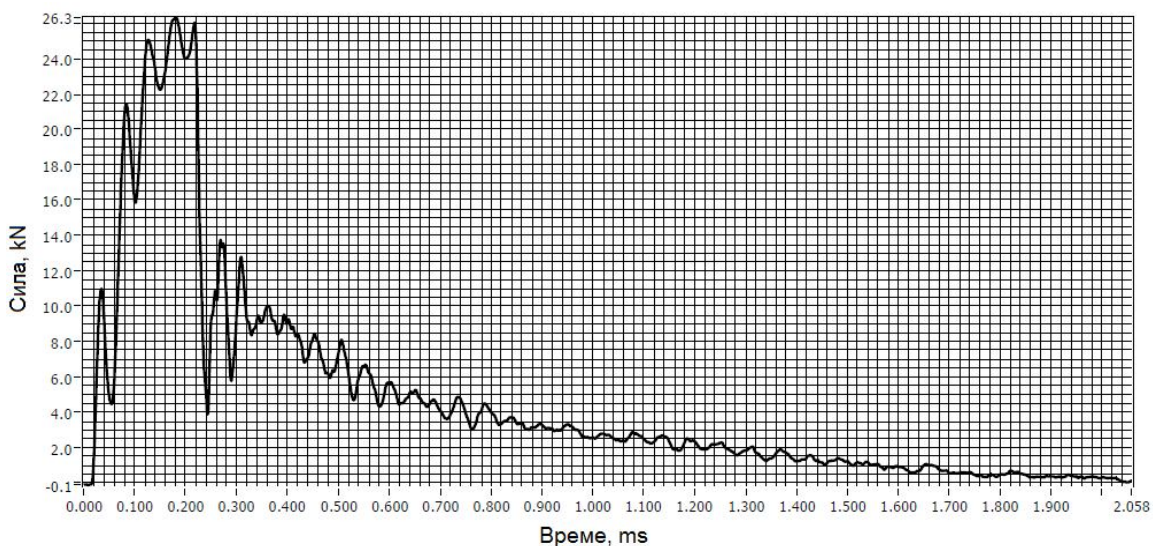
Слика 5.30 Изглед места прелома: корен зона стапања – плоча 2 – узорак 1

Таблица 5.11 Вредности енергије лома и ударне жилавости корен – зона стапања на собној температури

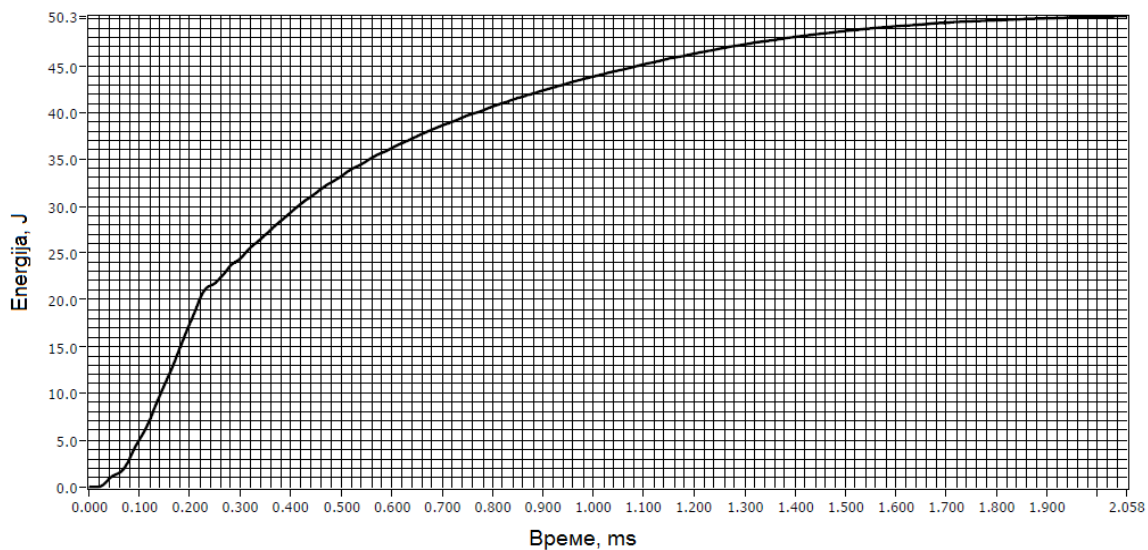
Врста материјала	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Број узорка	Енергија лома, J		Ударна жилавост, J/cm^2	
			Плоча 1 РЕЛ/МАГ	Плоча 2 МИГ/МАГ	Плоча 1 РЕЛ/МАГ	Плоча 2 МИГ/МАГ
S690QL	+ 20	1	50.53	18.44	63.16	23.05
		2	28.29	25.95	35.36	32.44
		3	34.84	18.52	43.55	23.15
		4	34.66	24.50	43.32	30.63
		5	34.93	29.78	43.67	37.23

Таблица 5.12 Процент жилавог лома корена – зона стапања на +20°C

Број узорка	Плоча 1 – РЕЛ/МАГ	Плоча 2 – МИГ/МАГ
	+20	+20
1	15.4	5.4
2	13.0	10.3
3	2.4	6.2
4	21.7	21.8
5	2.3	18.3



Слика 5.31 Дијаграм сила – време – корен шави – плоча 1 – узорак 1 (+20°C)



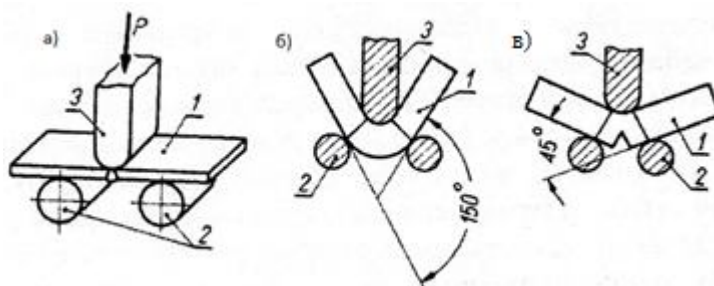
Слика 5.32 Дијаграм енергија удара – време – корен шави – плоча 1 – узорак 1 (+20°C)

Добијени резултати показују пад жилавости зоне завареног споја у односу на ОМ. Такав случај је неповољан из аспекта хомогености и сигурности завареног споја, јер се јављају зоне ниске ударне жилавости у којима може доћи до концентрације напона и појаве микропрлина које узрокују лом конструкције. Такође, тај пад жилавости је израженији код плоче 2 (технологија МИГ/МАГ), што даје благу предност РЕЛ/МАГ технологији, али је пре доношења коначног закључка неопходно спровести додатно упоређивање особина затезање/жилавог/тврдоћа. Веома битан показатељ жилавости материјала је и однос удела жилавог и кртог лома. Тако се из резултата приказаних у таблицама може видети процентуални удео жилавог лома епрувете. Што је удео жилавог лома мањи то је и кртост материјала већа, односно већа је могућност за појаву кртог лома и обрнуто. Што се тиче основног материјала, његове карактеристике жилавости су изузетно повољне будући да се проценат жилавог лома на собној температури креће у опсегу од $91 \div 96\%$ а сличан тренд се задржава и на сниженим температурама, тачније на -40°C је у границама од $78.5 \div 95.7\%$. Међутим, удео жилавог лома у целокупном лому епрувете се смањује у зонама завареног споја. Па тако на појединим узорцима готово да и није било жилавог лома ($< 1\%$), што треба додатно анализирати и узети у обзир при избору технологије и димензионисању конструкције.

5.3 Испитивање савијањем

5.3.1 Уводне напомене

Испитивање савијањем није извођено у оквиру испитивања и верификације прописане технологије заваривања али се у пракси често користи па ће овде бити изнете неке опште напомене везане за то. Резултати добијени савијањем служе да се одреди пластичност споја. Заварени узорци се после одговарајуће примене подвргавају дејству силе савијања (сл. 5.33а). Ако се за време пробе постигне најмања тражена вредност угла савијања, без појаве прлина, сматра се да је резултат испитивања позитиван (сл. 5.33б). Ако се у току испитивања уоче мале прлине у шаву резултат је негативан под условом да је угао савијања мањи од траженог (сл. 5.33в).



Слика 5.33 Испитивање савијањем: 1 – заварени узорак, 2 – ослони ваљци, 3 – притискивач

Испитивање савијањем има за циљ да се одреди деформациона способност шави и зоне утицаја топлоте. Изводи се према стандардизованим условима и то две пробе, једна са лицем шави у зони затезања, а друга са кореном шави у зони затезања. Испитују се непрекидним савијањем брзином од око 2 mm/s , све до појаве прлине веће од 2 mm . Мера пластичности је угао савијања при појави прлине [4, 6, 9].

Испитивање савијањем није извођено експериментално.

5.4 Мерење тврдоће и испитивање микроструктуре

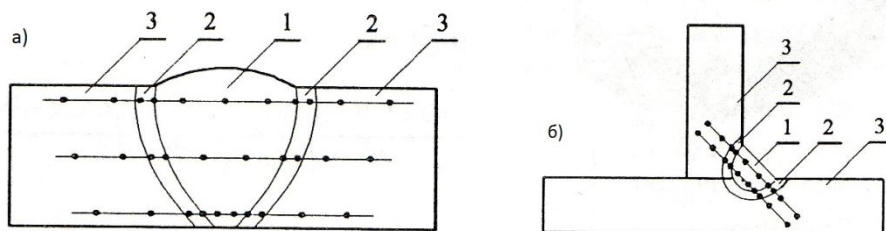
5.4.1 Уводне напомене

5.4.1.1 Мерење тврдоће

Тврдоћа представља механичку особину материјала да се одупре продирању тела у њега. Тврдоћа директно зависи од структуре материјала (мартензит и доњи бејнит одликује висока тврдоћа). У појединим областима машинства висока тврдоћа је примарно захтевана особина челика, међутим када је реч о динамички оптерећеним конструкцијама висока тврдоћа је непожељна. Разлог за то је пропорционално повећање опасности од настанка прслина и кртог лома са порастом тврдоће. Постоји и констатација да су тврдоћа и жилавост материјала у директној вези. Међутим, за ту тврдњу је доказано да није потпуно тачна али да постоји висок степен корелације те две механичке особине челика. Свакако се може рећи да са порастом тврдоће долази до пада ударне жилавости и обрнуто. Тврдоћа челика у свим зонама треба да буде што једнороднија, тј. да одступања у вредностима која се јављају, а која су изазвана, најчешће, уносом топлоте при заваривању, тј. неравномерним загревањем и хлађењем, и односе се на ЗУТ, треба да буду што мања. Ниска тврдоћа коренских пролаза при заваривању S690QL прописаном технологијом је планирана, стога је и електрода која то обезбеђује наменски одабрана како би се побољшала заварљивост датог челика. Резултати тврдоће приказани у оквиру тачке 5.4 показују да се скок тврдоће дешава у ЗУТ-у и да је он дозвољен до границе 350 HV, јер се та вредност сматра границом повољне заварљивости челика.

Главни разлог због којег се тврдоћа ограничава јесте да се спрече хладне прслине. Зато се за челике са $CE > 0.40\%$ мора смањити брзина хлађења и снизити садржај водоника у металу шави. Брзина хлађења се смањује предгревањем делова, повећањем погонске енергије (уноса топлоте) и повећањем пречника електроде док се садржај водоника смањује сушењем електрода, чишћењем страница завариваних делова од рђе, боје, масти и тсл. Када се водоник нађе у шаву, и зона стапања презасити њиме, долази до његове дифузије у хладније делове завариваног материјала. Водоник прелази у ЗУТ, али не излази из те зоне. У току даљег хлађења водоник дифундује до места дисконтинуитета, јер је гранична растворљивост водоника на 100 g метала шави око 1 cm^3 , при собној температури. На прекидним местима – гасним мехуровима, слојевима међузрна, итд. атомни водоник прелази у молекуларни што је праћено екстремно високим локалним притисцима. Истовременим деловањем ових, термичких и структурних напона, може се надмашити јачина материјала и доћи до појаве прслина што је честа појава код кртих структура чија је тврдоћа већа од 350 HV.

Тврдоћа се мери у више праваца и на више места јер тврдоћа измерена на једном месту не може да буде у потпуности меродавна. Број праваца зависи од дебљине завариваних делова док се мерна места обично бирају тако да обухвате све карактеристичне зоне са по најмање 3 мерне тачке (сл. 5.34). На сучеоним спојевима дебљине веће од 15 mm тврдоћа се мери у три нивоа: у близини лица, у средини и у близини корена шави. За спојеве дебљине 5 ÷ 15 mm мерење се изводи у два нивоа и за лимове тање од 5 mm тврдоћа се мери само по средњој линији. Већи број тачака значи и меродавније и поузданије резултате.

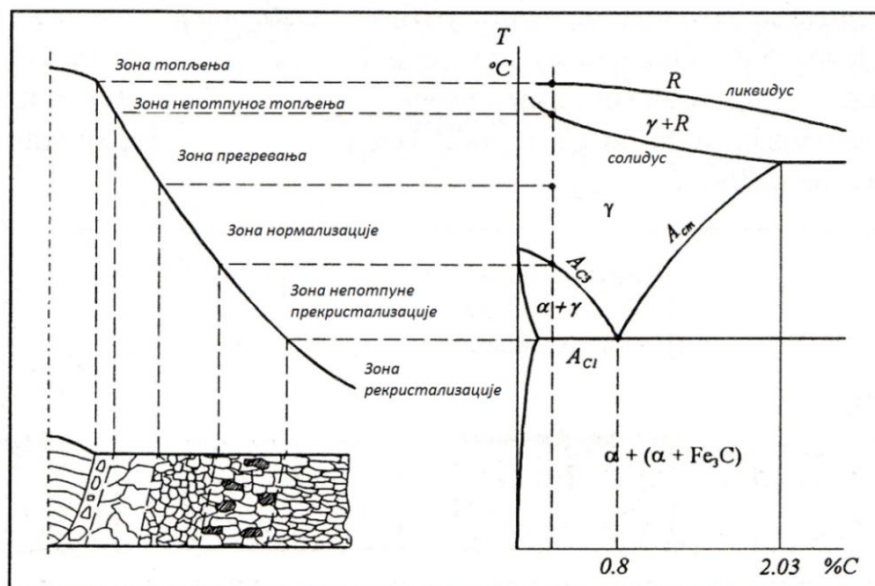


Слика 5.34 Мерење тврдоће: а) сучеони спој дедљи од 15 мм, б) угаони шав "Т" споја

5.4.2 Испитивање микроструктуре

Одређивање (процена) микроструктуре материјала се изводи на основу металографских испитивања. Металографска испитивања заварених спојева имају за циљ одређивање и анализирање микроструктуре карактеристичних зона споја – метала шав, зоне утицаја топлоте и основног материјала. У зависности од тога колико пута се увећава снимак узорка разликујемо *макроскопска* и *микроскопска* металографска испитивања [4, 6].

- Макроскопска испитивања се изводе голим оком или при увећању до 20 пута малог узорка исеченог из завареног споја. Притом се контролишу шав, ЗУТ и основни материјал. Површине се брусе и полирају а после и нагризају специјалним хемијским средством што омогућава да се уоче метал шав, ЗУТ и основни материјал. На основу ових испитивања утврђују се линија стапања, регуларност ЗУТ-а, недовољно или превелико уваривање, порозност, укључци треске, хладни спојеви и др. Утврђују се и структура шав, ЗУТ-а и основног материјала (сл. 5.35), ширина ЗУТ-а као и микроструктура свих зона.



Слика 5.35 Структурне промене при заваривању нискоугљеничног челика

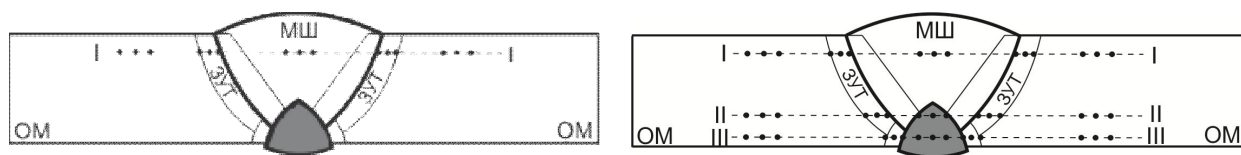
- Микроскопска испитивања се заснивају на анализирању припремљених узорака са увећањем од 200 ÷ 500 пута (па и више). Изводе се на металографским

микроскопима. Посматра се: средиште шави, зона стапања, зона непотпуног топљења, зона прегревања, зона нормализације, зона рекристализације, као и непромењен основни материјал.

5.4.2 Експериментална испитивања

За мерење тврдоће појединих зона заварених спојева, припремљени су металграфски шлифови на којима је мерена тврдоћа и прочитана микроструктура карактеристичних зона заварених спојева изведених вишепролазним (вишеслојним) заваривањем.

Мерење тврдоће узорака је изведено по методи Викерс силом утискивања од 10 daN, односно 100 N (метода HV10), према стандарду: SRPS EN 1043-1:2007¹. Као и за затезање и ударну жилавост, и за мерење тврдоће су припремљена 4 узорка. Мерена је тврдоћа основног материјала, ЗУТ-а и метала шави по правој линији попречно на заварени спој (сл. 5.36). По једној линији треба да постоји најмање три мерна места за сваку од карактеристичних зона: метал шави, ЗУТ (обе стране) и ОМ (обе стране). Први отисак у ЗУТ-у треба да буде што ближи зони стапања (граница МШ - ЗУТ). То се такође односи и на корен. Добијени резултати показују незнатна одступања у вредностима за хомогене зоне (ОМ, МШ), али су та одступања нешто већа у зони утицаја топлоте, као и на границама стапања. У тексту који следи, табеларно и графички су приказани добијени резултати мерења тврдоће и прочитане микроструктуре.



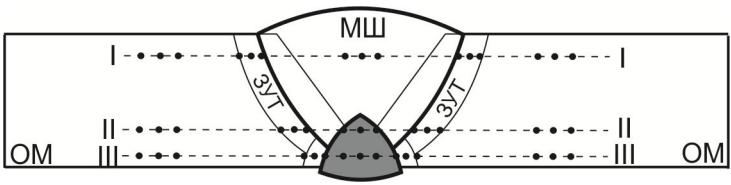
Слика 5.36 Правци мерења тврдоће за вишепролазни сучеоно спој

Из приказаних резултата се уочава да вредности измерених тврдоћа углавном, осим на појединим местима, не надмашују граничну вредност од 350 HV (критеријум настанка хладних прелина). То је посебно битно јер из аспекта заварљивости тврдоћа игра веома значајну улогу. Наиме, сматра се да је челик заварљив ако његова коначна тврдоћа у ЗУТ-у није већа од 350 HV, јер се сматра да за те вредности тврдоће долази до настанка мартензита. У циљу обезбеђивања хомогености заварених спојева, препоручује се да максимална вредност тврдоће у ЗУТ-у не надмаши 20 – 30% тврдоћу основног материјала. У случају челика S690QL та вредност је углавном у опсегу 370 ÷ 380 HV, односно 6 ÷ 8% више од ОМ. У циљу процењивања коначне микроструктуре неопходно је спровести додатна микрографска испитивања.

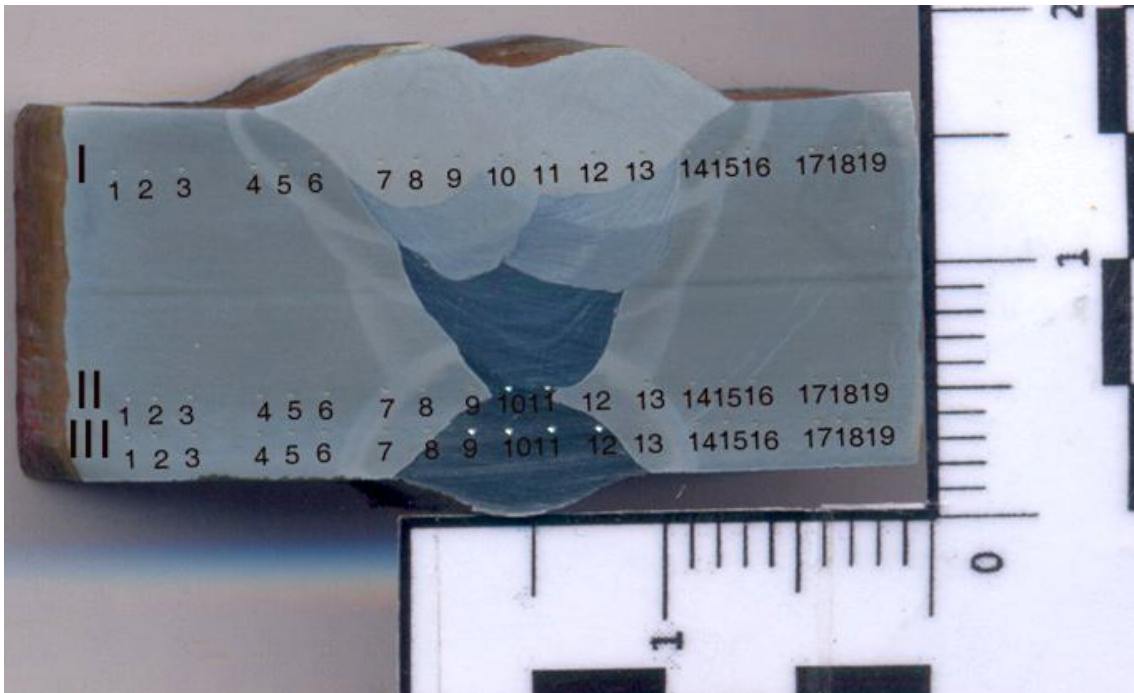
У табелици 5.13 су приказане вредности тврдоће узорака измерене методом Викерс са силом утискивања од 10 daN.

¹ Испитивање разарањем заварених спојева на металним материјалима – Испитивање тврдоће – Део 1: Испитивање тврдоће електролучно заварених спојева.

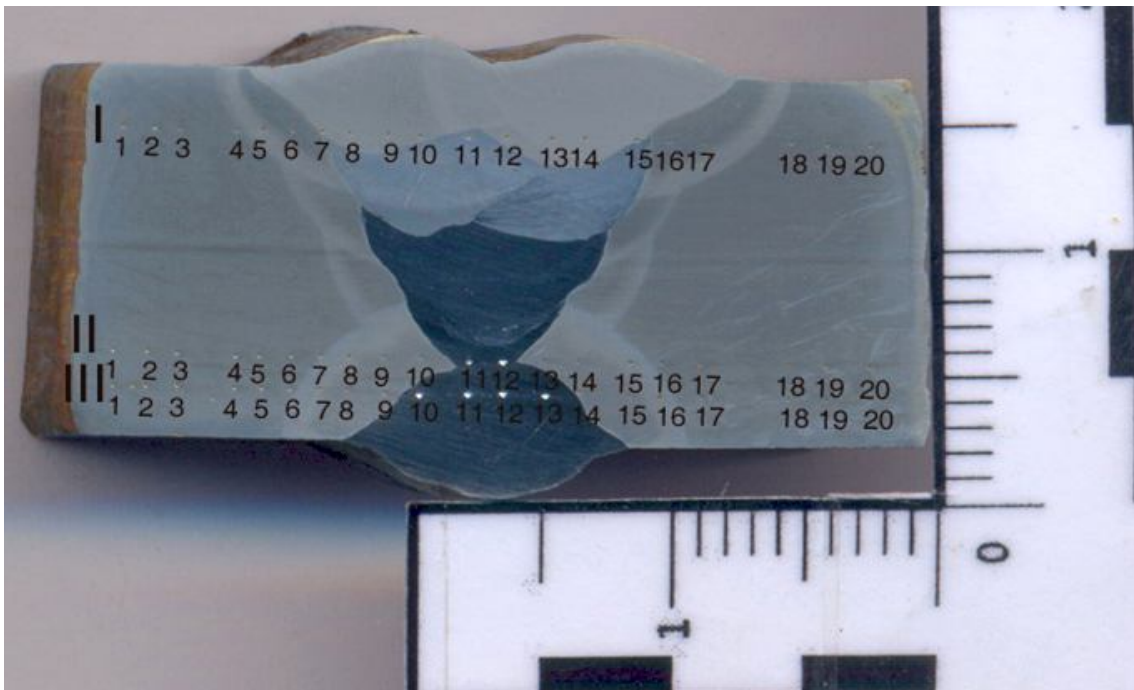
Таблица 5.13 Вредности тврдоће узорака измерене методом Викерс (HV10)

												
Број мерне тачке	Број узорка/Број плоче											
	ПЛОЧА 1 (РЕЛ/МАГ)						ПЛОЧА 2 (МИГ/МАГ)					
	Узорак 1			Узорак 2			Узорак 3			Узорак 4		
	I-I	II-II	III-III	I-I	II-II	III-III	I-I	II-II	III-III	I-I	II-II	III-III
1	260	279	276	281	279	279	287	279	279	276	281	279
2	260	279	276	274	276	279	279	279	279	279	281	279
3	260	279	276	279	279	279	279	279	279	279	281	276
4	245	281	270	254	276	279	274	279	276	276	279	276
5	333	276	270	251	276	279	336	279	279	279	279	276
6	333	276	270	342	276	279	376	279	279	376	279	274
7	281	251	336	289	254	266	302	270	283	363	253	383
8	281	314	348	287	256	262	292	319	380	370	327	376
9	281	327	191	281	339	336	354	387	274	370	396	171
10	314	210	193	276	317	336	363	215	182	387	281	179
11	299	327	166	390	319	198	317	180	182	405	185	173
12	270	348	186	299	191	183	319	366	180	405	228	194
13	272	243	376	268	333	186	330	354	396	401	236	387
14	333	262	279	266	325	197	336	274	302	380	287	268
15	339	276	276	294	236	336	351	281	285	376	276	289
16	242	276	276	325	258	342	360	274	283	380	279	283
17	279	276	276	351	281	245	264	281	276	287	279	289
18	279	276	274	276	276	281	279	281	276	292	279	283
19	279	276	276	279	276	279	279	287	279	276	279	283
20	-	-	-	279	270	279	279	279	279	279	279	281

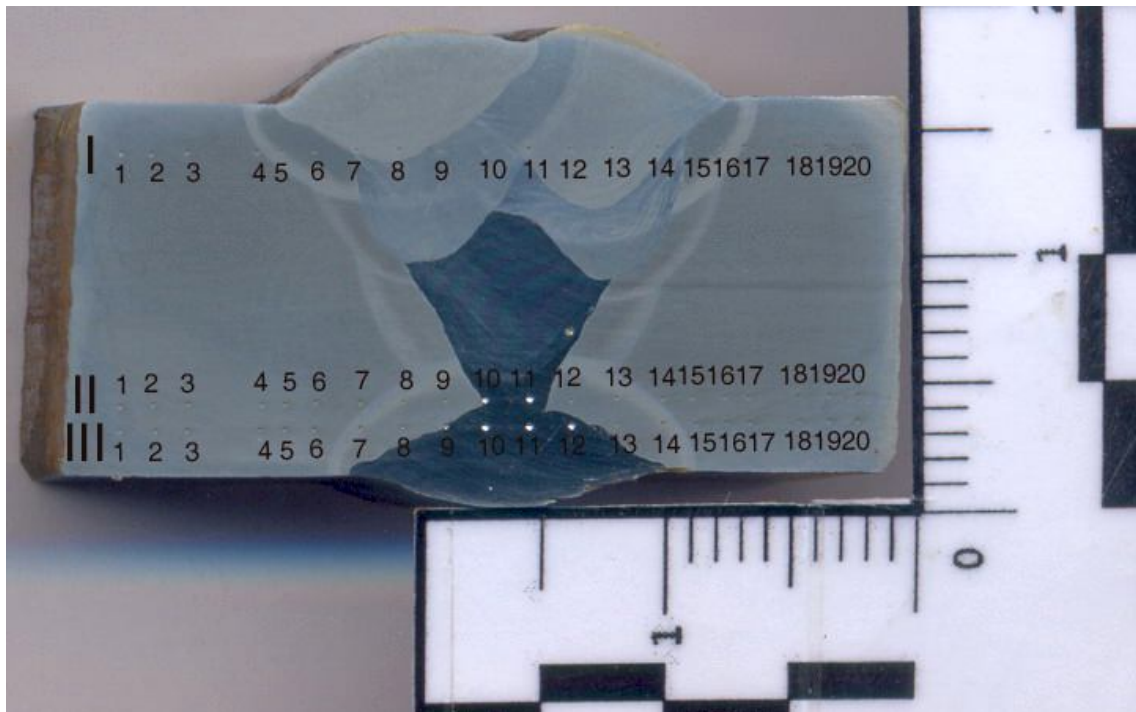
У наставку овог рада биће приказани припремљени металографски узорци (шлифови) за металографска испитивања. Добијени резултати и микроструктура карактеристичних зона су представљени графички. По два узорка су узета из две плоче заварене технологијама РЕЛ/МАГ (плоча 1 – сл. 5.37 и 5.38) и МИГ/МАГ (плоча 2 – сл. 5.39 и 5.40). Пре испитивања узорци су нагрижени раствором нитала (5% HNO_3 у денатурираном алкохолу) у циљу постизања боље видљивости.



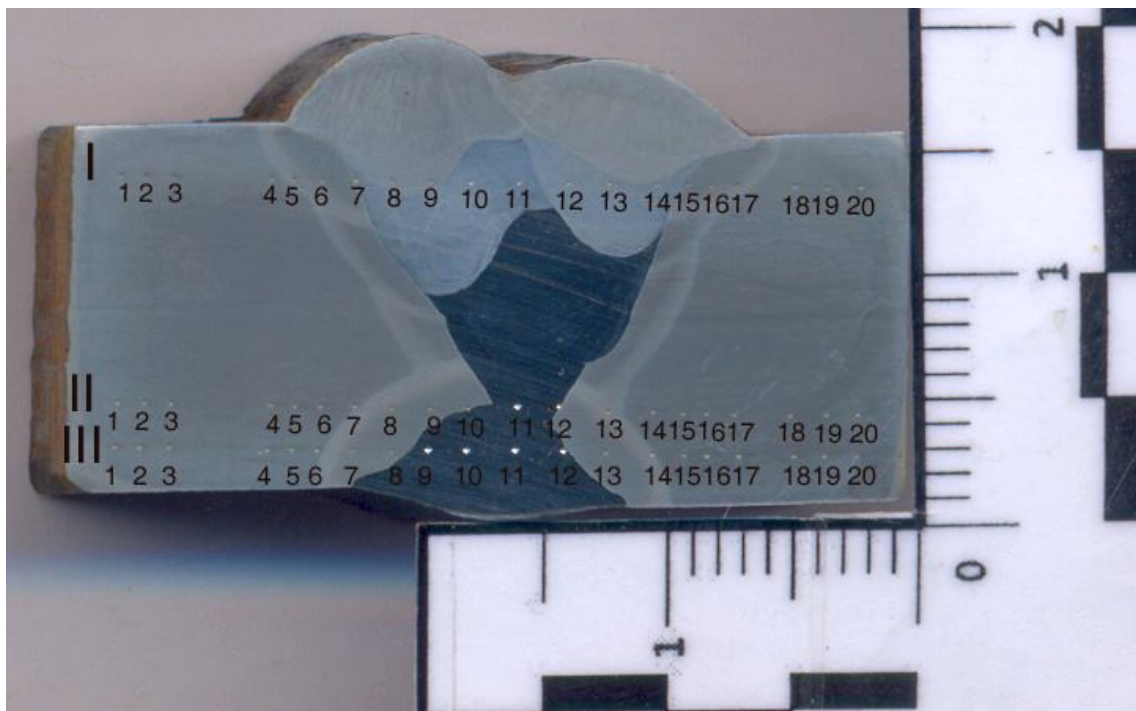
Слика 5.37 Металографски узорак 1 – плоча 1 (РЕЛ/МАГ): мерење тврдоће у 3 правца



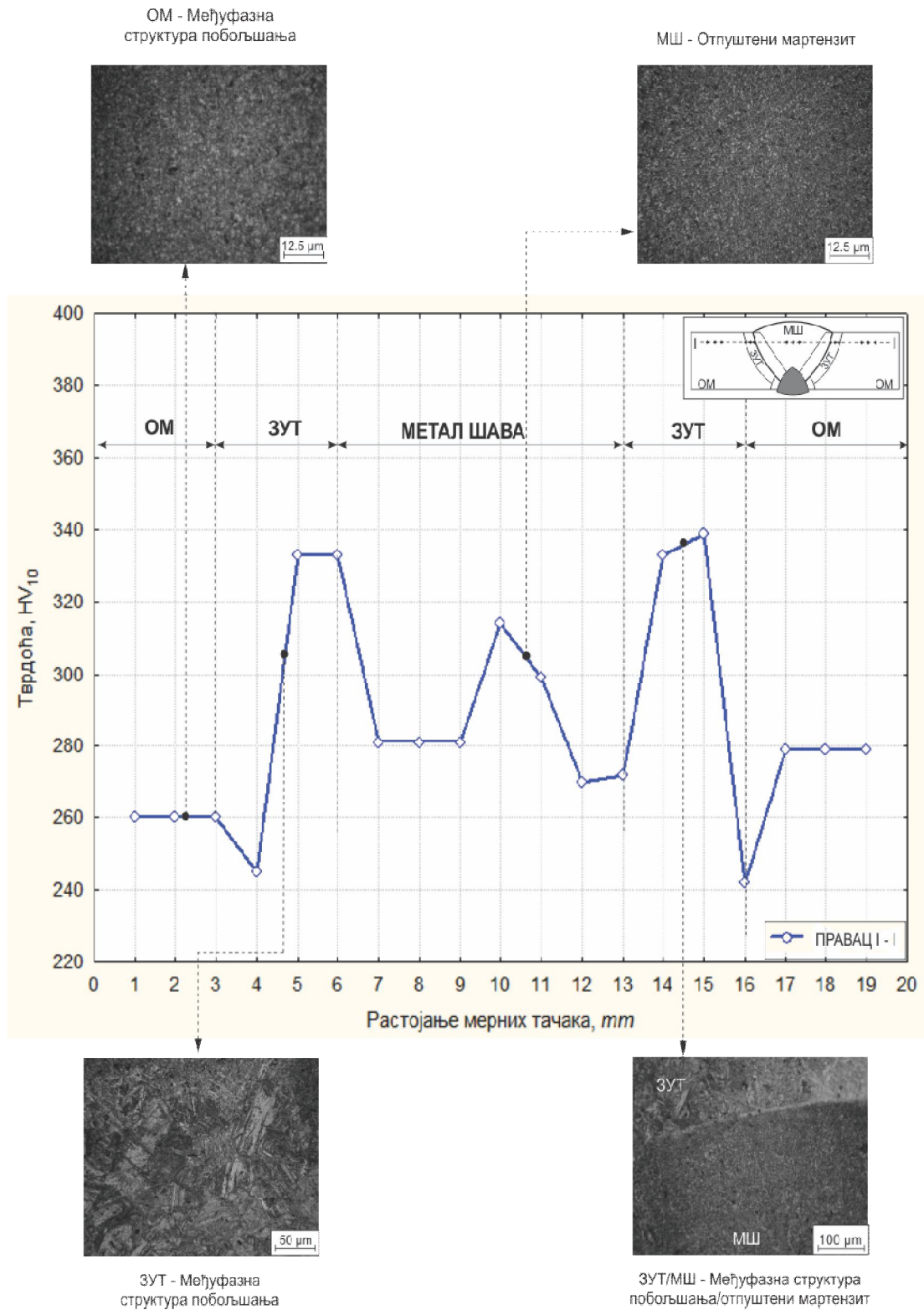
Слика 5.38 Металографски узорак 1 – плоча 1 (РЕЛ/МАГ): мерење тврдоће у 3 правца



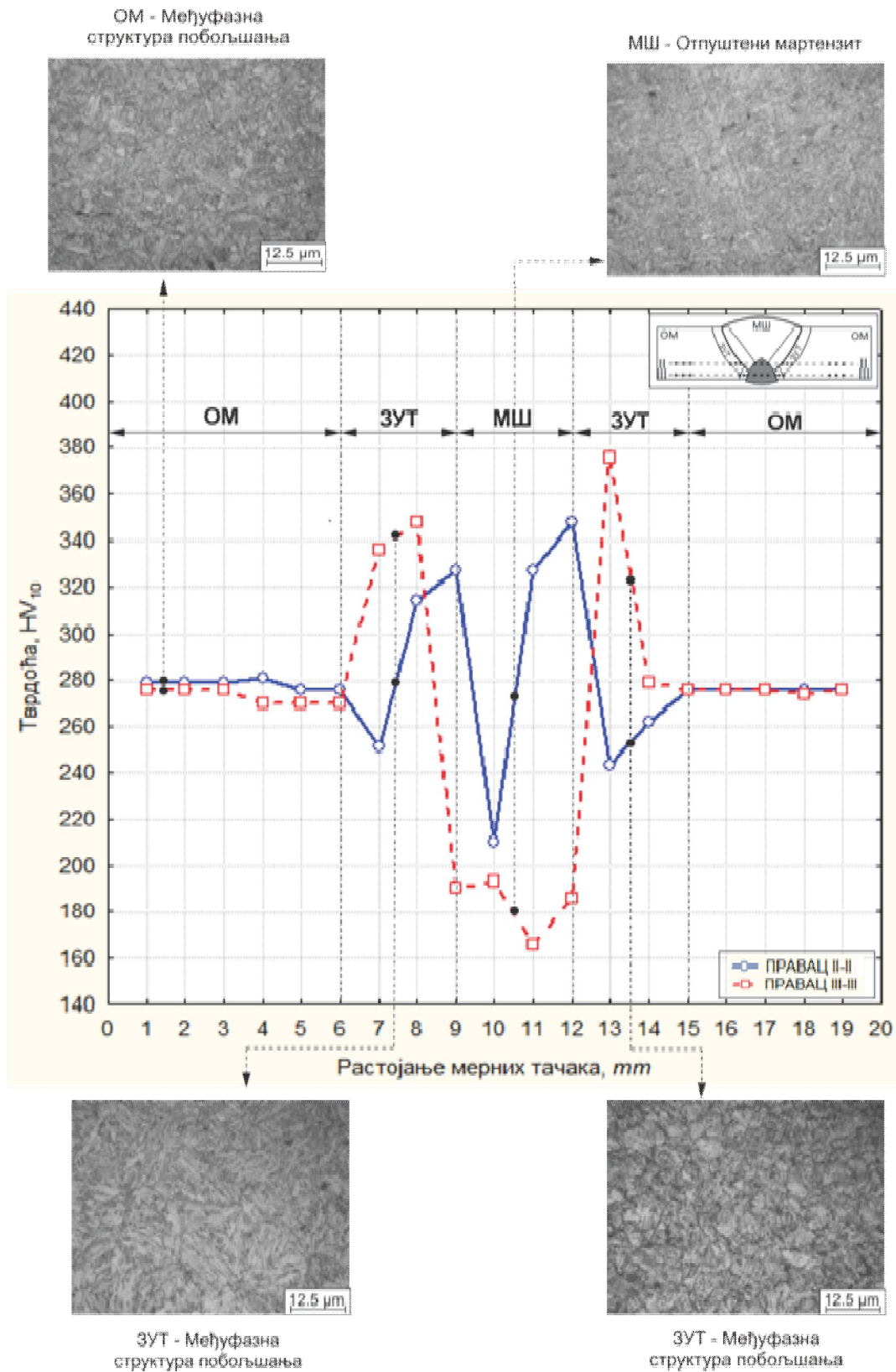
Слика 5.39 Металографски узорак 3 – плоча 2 (МИГ/МАГ): мерење тврдоће у 3 правца



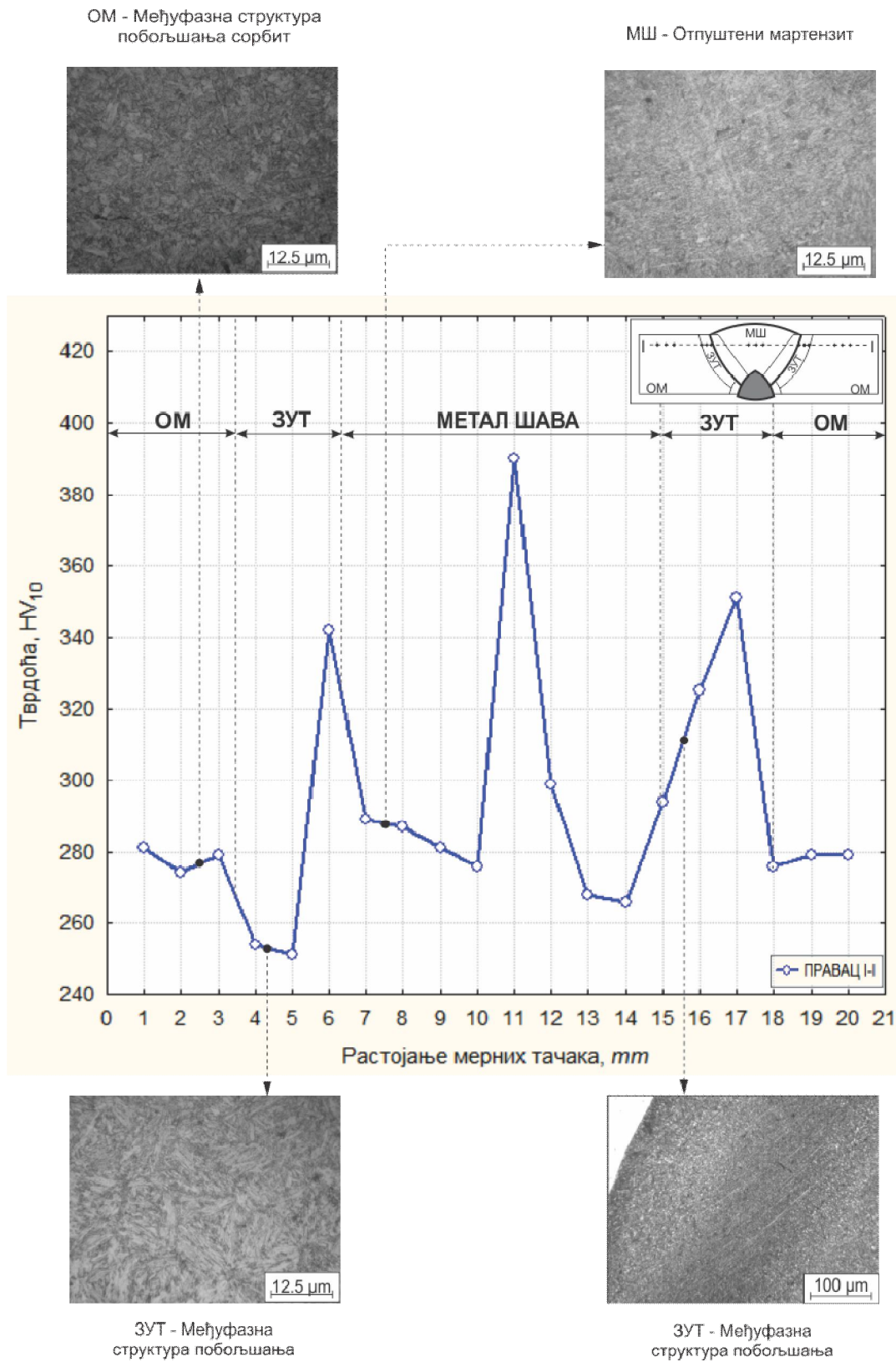
Слика 5.40 Металографски узорак 4 – плоча 2 (МИГ/МАГ): мерење тврдоће у 3 правца



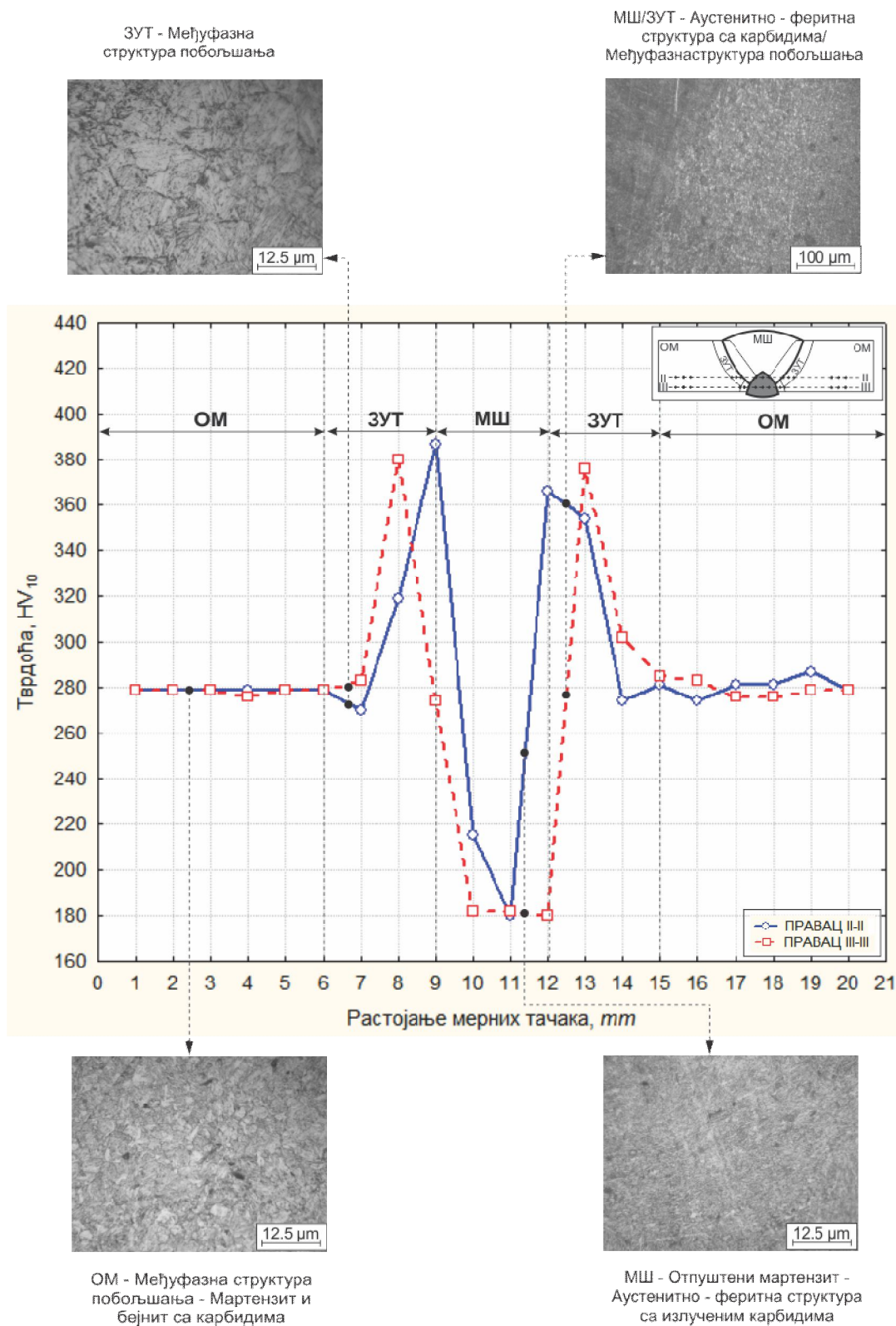
Слика 5.41 Узорак 1 – плоча 1: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона - правац I – I



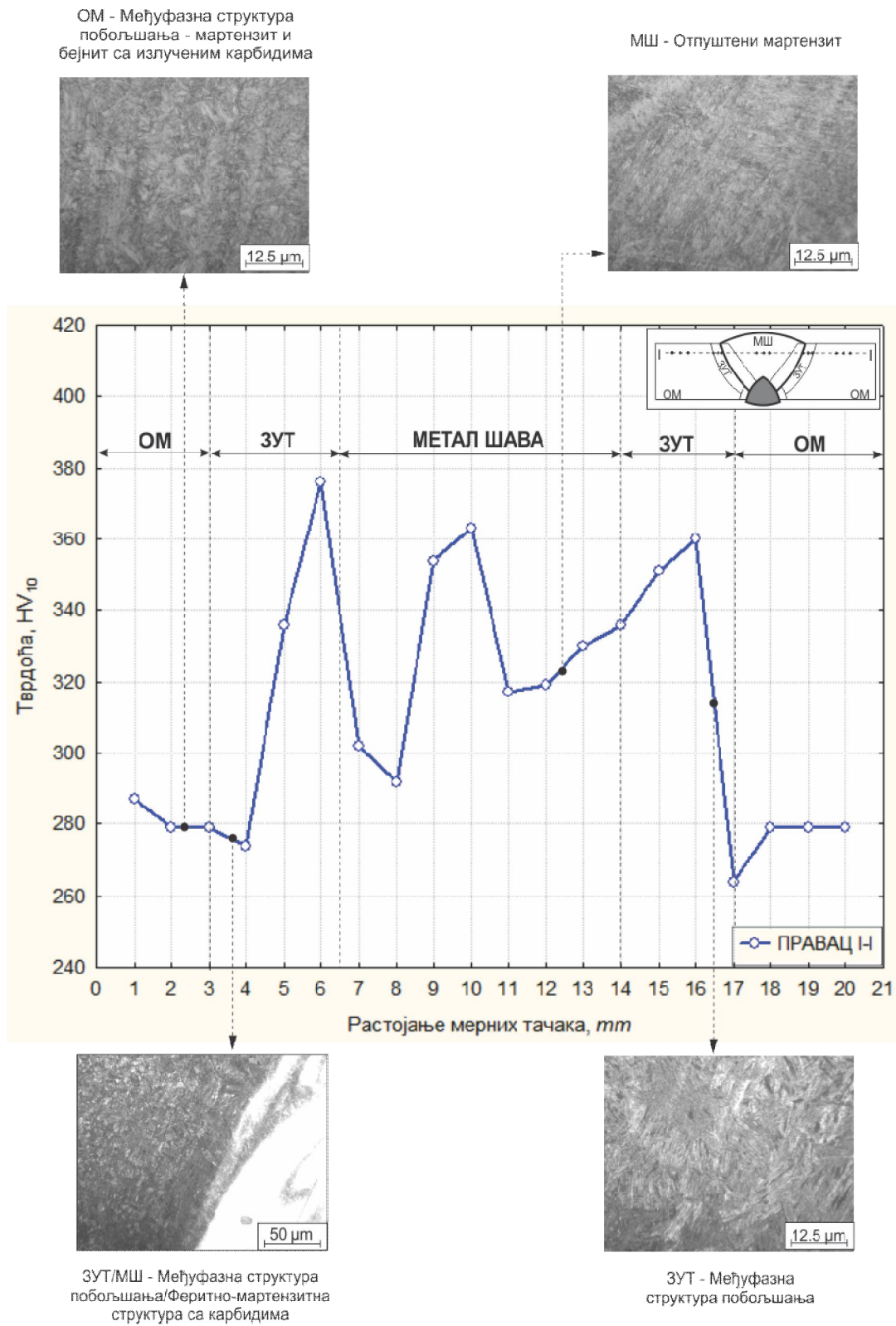
Слика 5.42 Узорак 1 – плоча 1: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона - правац II – II и правац III - III



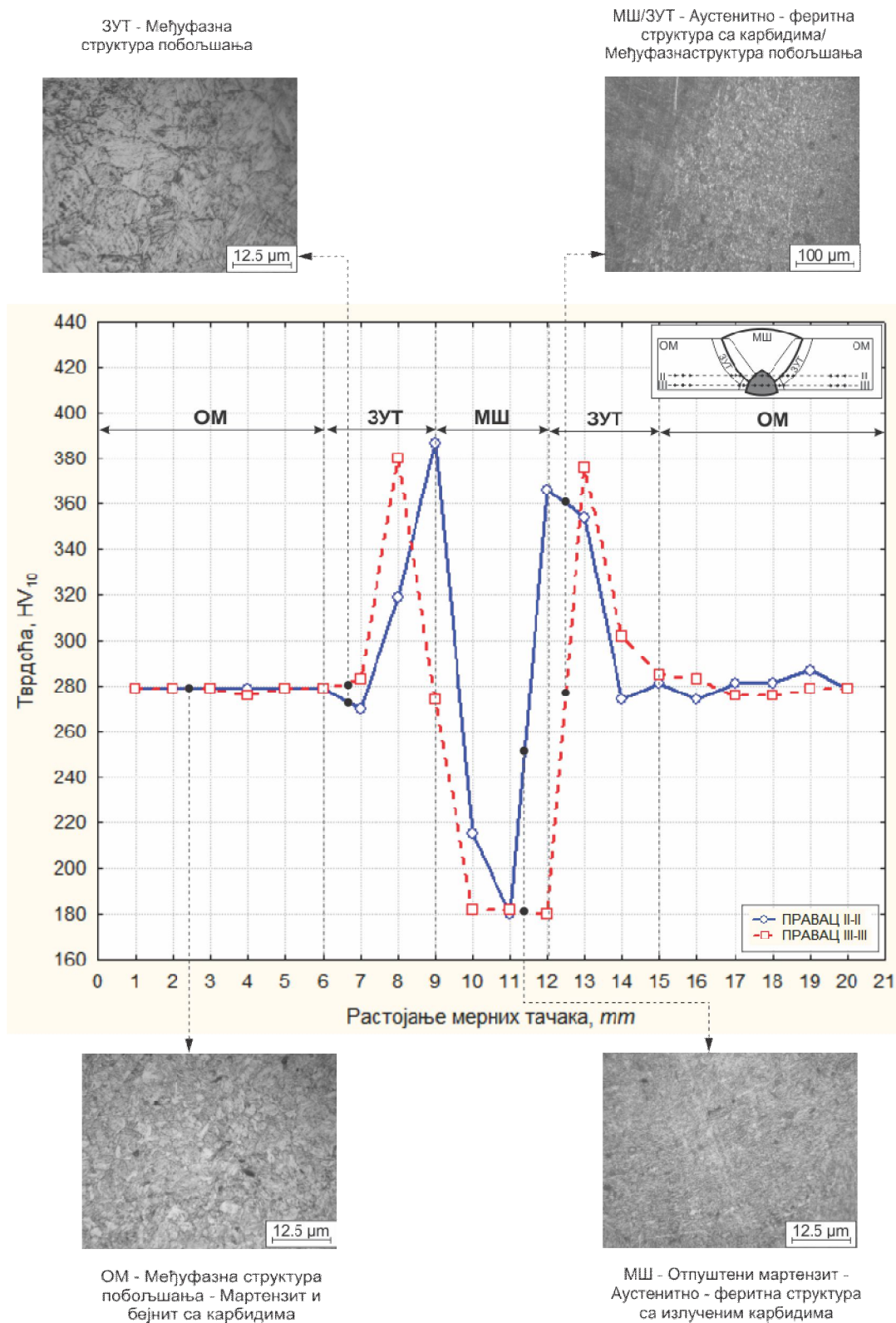
Слика 5.43 Узорак 2 – плоча 1: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона - правац I – I



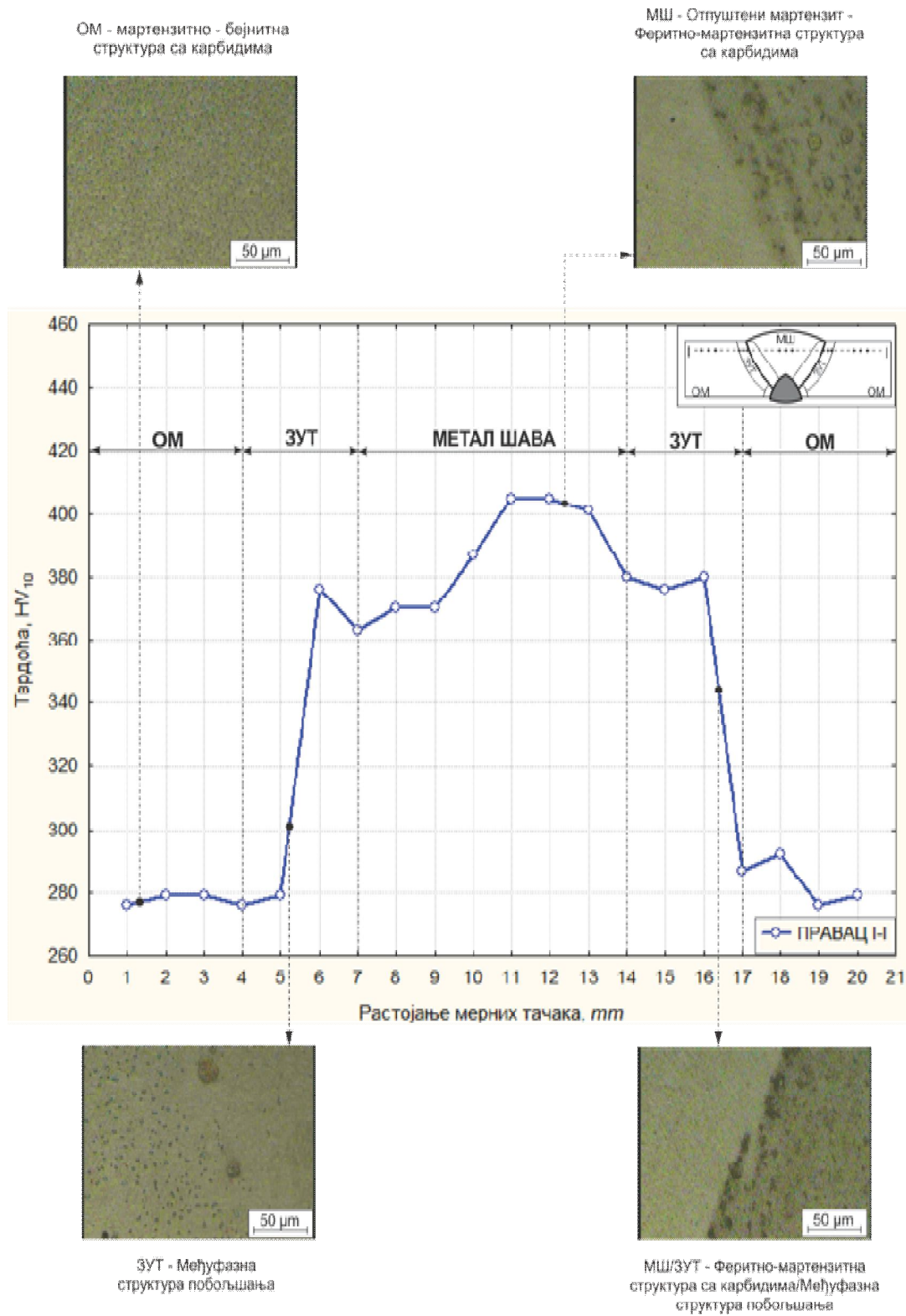
Слика 5.44 Узорак 2 – плоча 1: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона - правац II – II и правац III - III



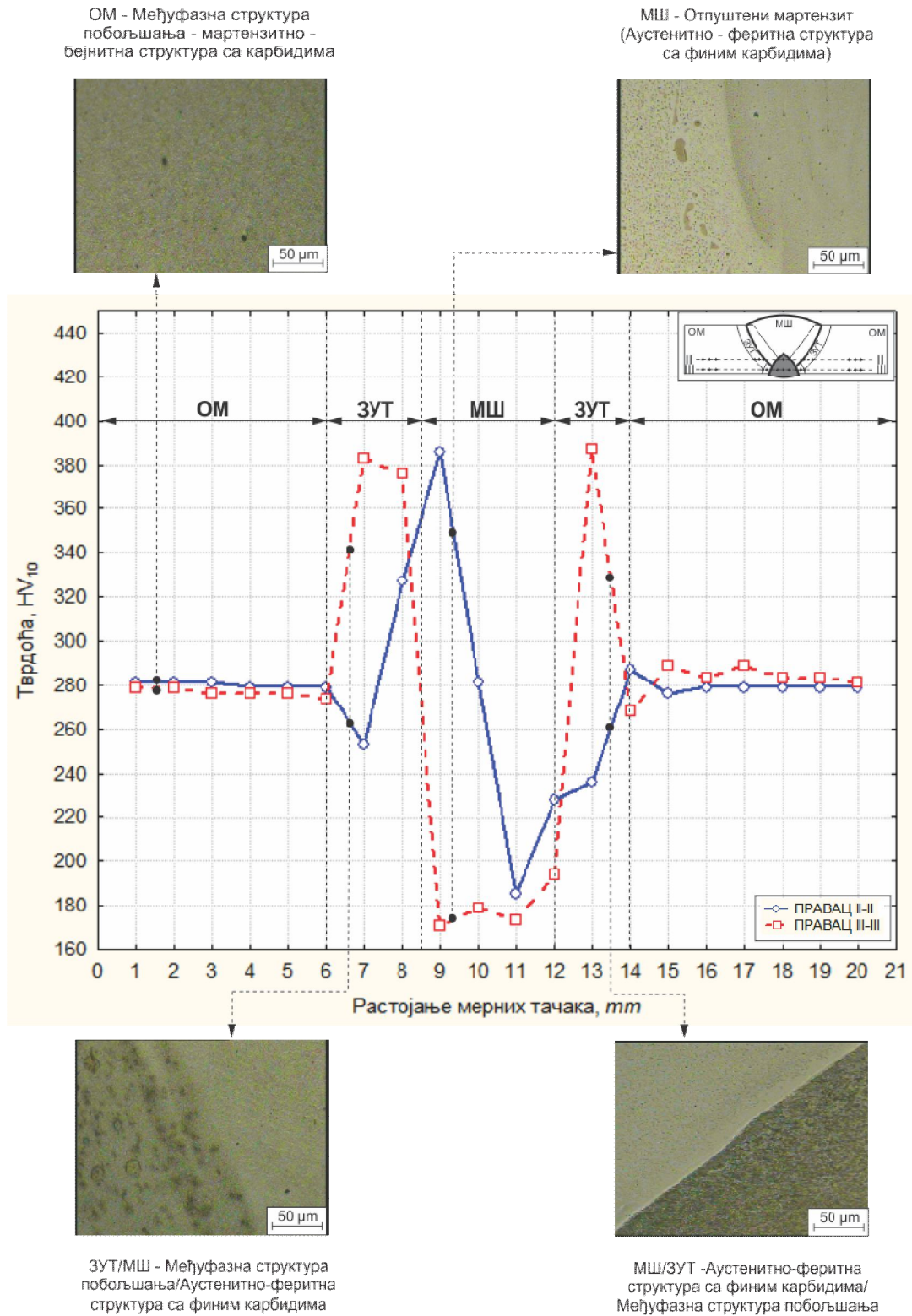
Слика 5.45 Узорак 3 – плоча 2: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона - правац I – I



Слика 5.46 Узорак 3 – плоча 2: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона – правац II – II и правац III - III



Слика 5.47 Узорак 4 – плоча 2: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона - правац I – I



Слика 5.48 Узорак 4 – плоча 2: дијаграм расподеле тврдоће и микроструктура карактеристичних зона - правац II – II и правац III - III

Из дефиниције идеалне заварљивости произлази да сви делови завареног споја (МШ, ЗУТ и ОМ) треба да буду сличних механичких карактеристика. Како добијање идеалног завареног споја није могуће, тежи се да та међусобна разлика не буде велика и пресудна за настанак прлина или кртог лома. Због тога се расподела тврдоће прати на дијаграмима који графички најбоље могу да прикажу својства делова завареног споја из аспекта тврдоће.

На дијаграмима расподеле тврдоће се може уочити да је она у пределу ЗУТ-а и метала шава веома различита за разлику од основног материјала где је тренд кретања кривих уједначен. Пораст тврдоће и јачине у ЗУТ-у се може објаснити неравномерним процесима загревања и хлађења појединих зона споја, који одступају од температурских циклуса приликом добијања челика. Неравномерност механичких особина у различитим зонама завареног споја је последица неравномерног температурског поља и неповољних термичких циклуса. У зависности од количине унете топлоте, настаје неповратно нарушавање стања термо-механичке обраде, снижавања жилавости у ЗУТ-у и пада или пораста тврдоће у ЗУТ-у. Подручја смањене јачине и жилавости су критична места за настанак прлина и каснијег лома конструкције. Решавање тих проблема лежи у прописивању оптималног уноса топлоте и у правилно прописаној накнадној термичкој обради.

На испитиним узорцима је дошло до евидентног пораста тврдоће у ЗУТ-у при чему се он ограничава на вредности које се сматрају граничним али дозвољеним из аспекта сигурности споја (350 – 370 HV10 за S690QL). У случају већих вредности тврдоће неопходно је применити накнадну термичку обраду у циљу уједначавања структуре и смањења опасности од појаве прлина.

Треба приметити и ниску тврдоћу метала шава коренских пролаза. Тако ниска тврдоћа је директно повезана са јачином додатног материјала чија је сврха да повећа пластичност споја и неутралише заостале напоне док се јачина споја постиже заварима попуне. Тако изабрани додатни материјали доприносе побољшању заварљивости.

5.4.3 Оцена заварљивости челика S690QL на основу модификованог КНЗ дијаграма

Процена могуће тврдоће у ЗУТ-у се може извршити и на основу КН дијаграма за дати челик али ће добијени резултати бити меродавнији уколико се теоријски добијени резултати поткрепе експерименталним. Суштина оваквог повезивања времена хлађења између 800 и 500°C и КН дијаграма јесте да се изврши провера резултата добијених теоријски и стварно на реалним узорцима.

Време $t_{8/5}$ се може израчунати према формули Јапанских аутора (*Ito-Bessyo*):

$$t_{8/5} = \frac{k \cdot q_l^n}{\beta \cdot (T_{sr} - T_0)^2 \cdot \left[1 + \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left(\frac{s - s_0}{\alpha} \right) \right]} \cdot s \quad (5.4)$$

где је: q_l – погонска енергија заваривања у J/cm (тачка 4.2.3.1 и 4.3.3.1),

T_0 – почетна температура завариваних предмета у °C ($T_p = 150^\circ C$),

$\pi = 180^\circ$.

Остали подаци се усвајају из таблице 5.14.

Таблица 5.14 Параметри неопходни за израчунавање $t_{8/5}$ према изразу 5.4

Метод заваривања	k	n	s_0	α	T_{sr}	β	
	-	-	mm	-	°C	Сучеонони спој	Угаони спој
РЕЛ	1.35	1.5	14.6	6	600	1	2
МАГ/МИГ	0.345	1.7	13	3.5	600	1	1.7

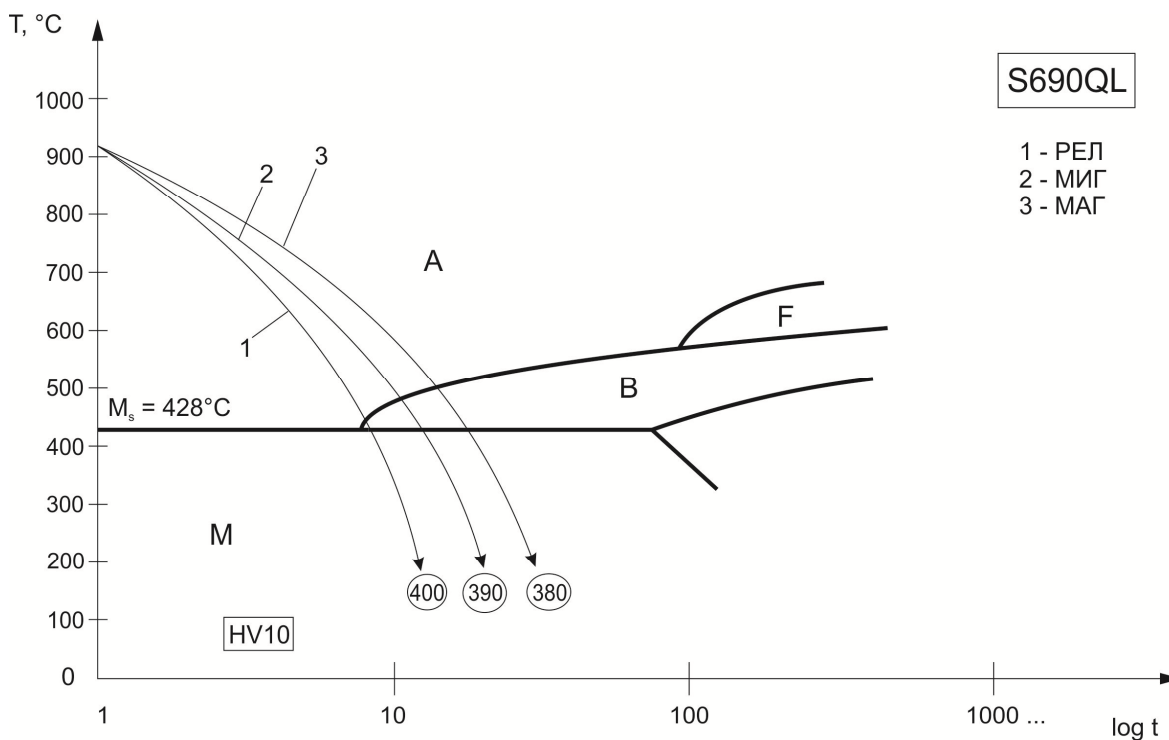
Добијене вредности за време хлађења $t_{8/5}$ су приказане у таблицу 5.15.

Таблица 5.15 Прорачунате вредности времена $t_{8/5}$ према изразу 5.4

Поступак заваривања	$t_{8/5}, s$	Тврдоћа ЗУТ-а очитана са КНЗ дијаграма, HV10	Структура
РЕЛ	8.4	400	М + Б
МАГ	15.9	380	М + Б
МИГ	9.8	390	М + Б

Када се добијене вредности унесу у КНЗ дијаграм челика S690QL, добијају се криве хлађења које показују очекивану тврдоћу за одређено време хлађења а може се извршити и читавање микроструктуре ЗУТ-а. На слици 5.49 приказан је КНЗ дијаграм са три криве хлађења које означавају коришћене поступке заваривања а чији је положај дефинисан временом хлађења $t_{8/5}$. Дуже време хлађења споја обезбеђује мању тврдоћу а уједно и нижи ниво заосталих напона.

Овако добијени резултати се у великој мери поклапају са експерименталним приказаним на дијаграмима на сликама 5.41 до 5.48, што се може сматрати за један од видова верификације прописане технологије заваривања.



Слика 5.49 KHZ дијаграм са очекиваним тврдоћама за три коришћена поступка

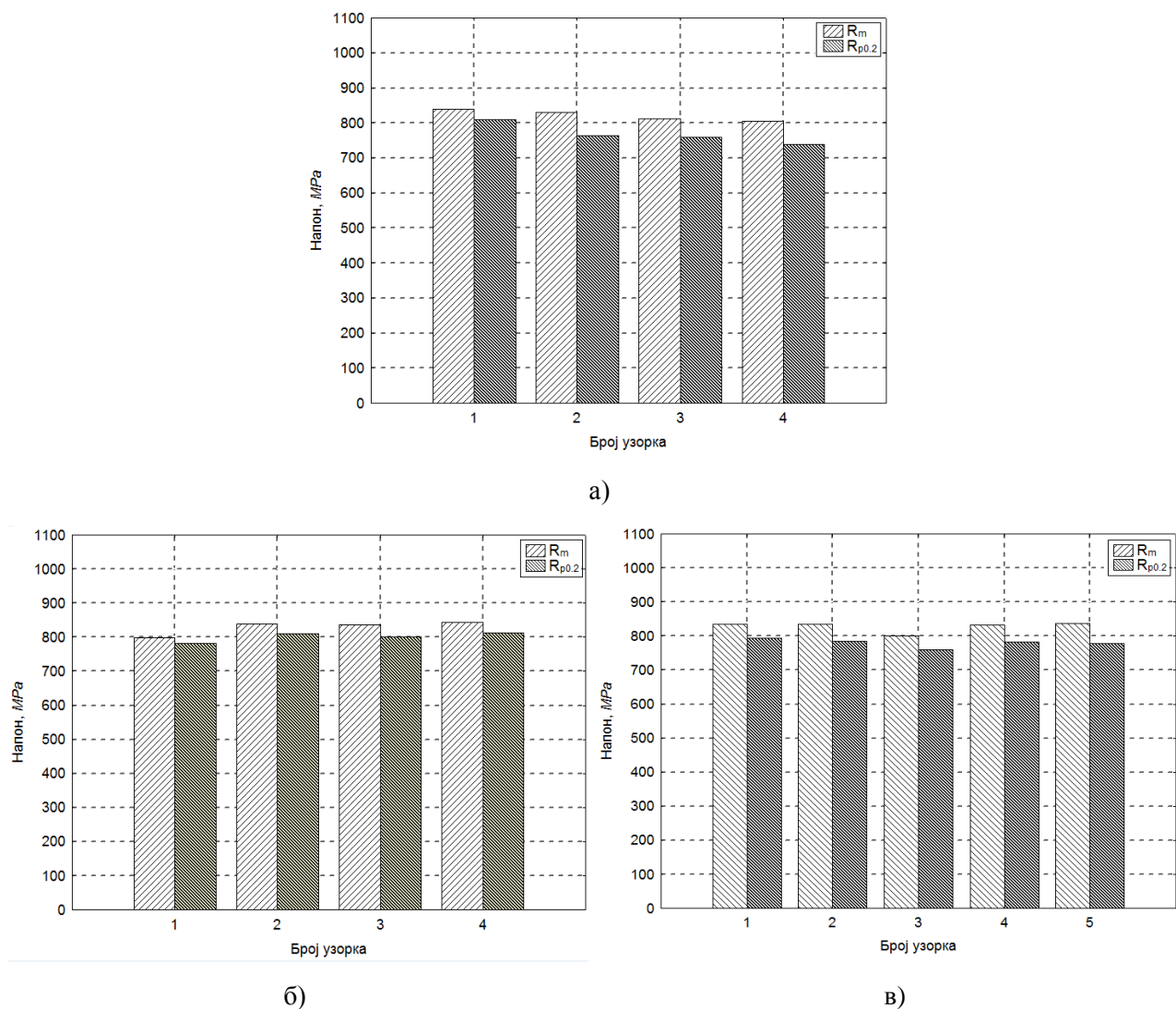
Време хлађења између 800 и 500°C се може одредити и на основу граничне дебљине лима али изрази за такво израчунавање $t_{8/5}$ се деле, у зависности од дебљине лима, на изразе за танке и изразе за дебеле лимове, затим узимају у обзир поједине факторе облика споја који нису у потпуности дефинисани што за последицу има велика одступања у добијеним резултатима. То се нарочито односи на заваривање делова у V – жлебу. Анализа добијених резултата прорачуном по формулама јапанских научника и према граничној дебљини лима уочавају се недопустиве разлике и за сучеоне и за угаоне спојеве, поготово код тањих лимова.

Међутим, према резултатима добијених од стране појединих аутора [9], установљено је да за CO_2 поступак најбоље одговара, горе наведена, формула јапанских аутора. Истраживање је било базирано на експерименталном и нумерички израчунавом времену $t_{8/5}$ и затим његовом упоређивању. Наиме, формула јапанских аутора је повољнија из разлога што не користи арбитрарне променљиве које се понекад бирају и према личној процени што доста утиче на резултат прорачуна. Даље њена предност је што не одваја танке и дебеле лимове па се прорачун поједностављује. Ипак за друге поступке и режиме заваривања неопходно је спровести додатна истраживања како би се добили поузданији резултати.

5.5 Избор најповољније технологије заваривања на основу добијених резултата

Коначна одлука о најповољнијој технологији заваривања се мора донети на основу експерименталних резултата.

На основу резултата добијених затезањем, повољнија технологија није могла бити изабрана. Разлог за то су веома слични резултати добијени затезањем епрувета (сл. 5.50) из плоча заварених двама технологијама као и положај места лома епрувете који се у оба случаја, углавном, дешавао ван зоне завареног споја.

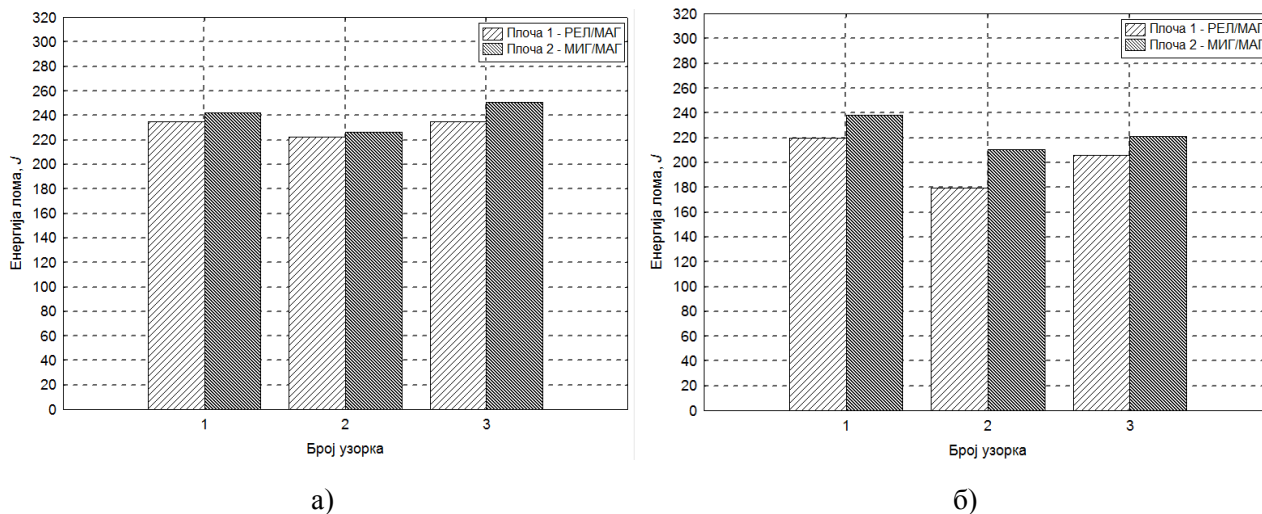


Слика 5.50 Упоредни приказ вредности затезне јачине и напона течења ($T = 20^\circ\text{C}$):
 а) ОМ, б) заварен спој – плоча 1 (РЕЛ/МАГ) и в) заварен спој – плоча 2 (МИГ/МАГ)

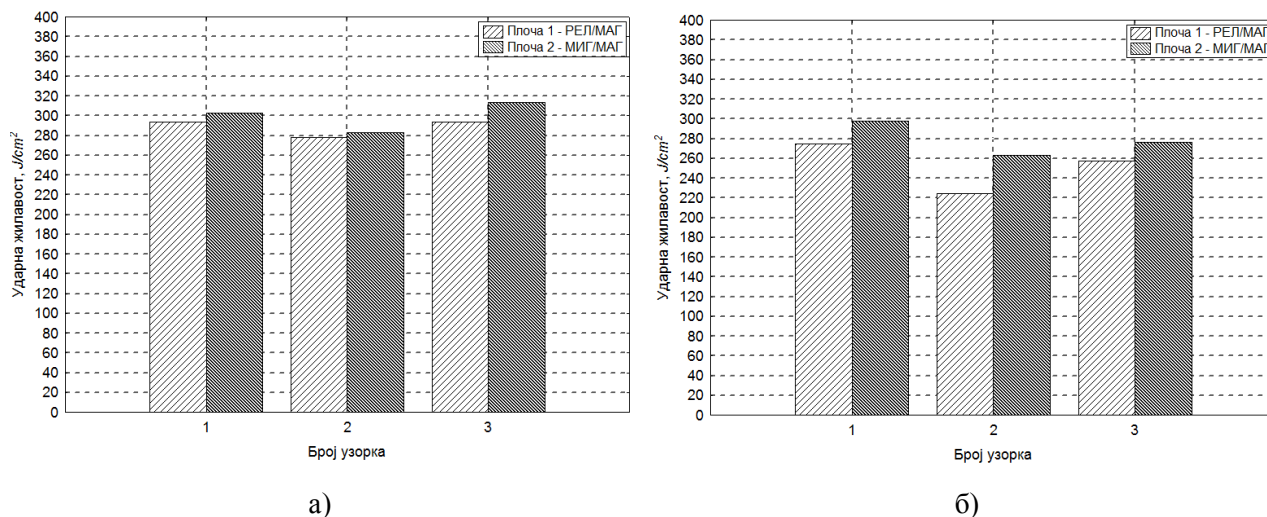
Испитивање тврдоће такође није могло да помогне у избору повољније технологије јер је расподела тврдоће дуж заварених спојева слична за оба случаја, што је илустровано дијаграмима у оквиру тачке 5.4. Може се рећи да су у случају технологије РЕЛ/МАГ добијене нешто ниже вредности тврдоће али је та разлика незнатна да би се на основу ње нека од технологија издвојила као повољнија.

Пресудну одлуку на избор повољније технологије имало је испитивање ударне жилавости. У оквиру испитивања ударне жилавости методом Шарпи, на више епрувета и са више варијација по питању положаја V – жлеба (МШ, корен и корен – зона стапања),

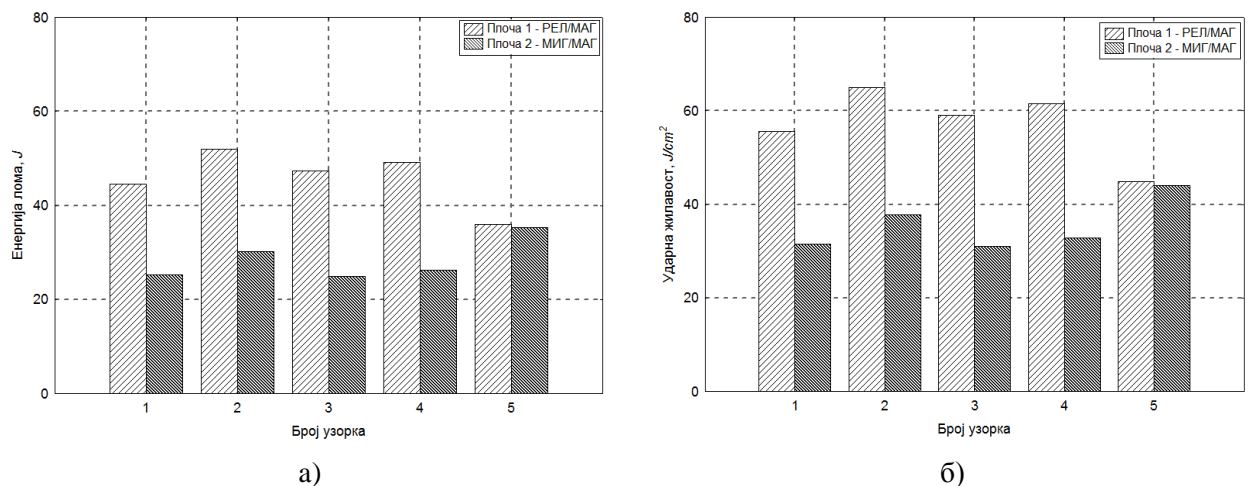
дошло се до резултата који као повољнију истичу технологију РЕЛ/МАГ. Сагледавањем резултата се уочава драстичан пад ударне жилавости зоне завареног споја у односу на основни материјал али је тај пад израженији код узорака заварених технологијом МИГ/МАГ. Будући да се од одговорних заварених конструкција, поред велике јачине, захтева и што већа могућа жилавост, треба рећи да је технологија РЕЛ/МАГ повољнија за заваривање челика повишене јачине класе S690QL. У даљем тексту ће бити приказан упоредни приказ добијених резултата.



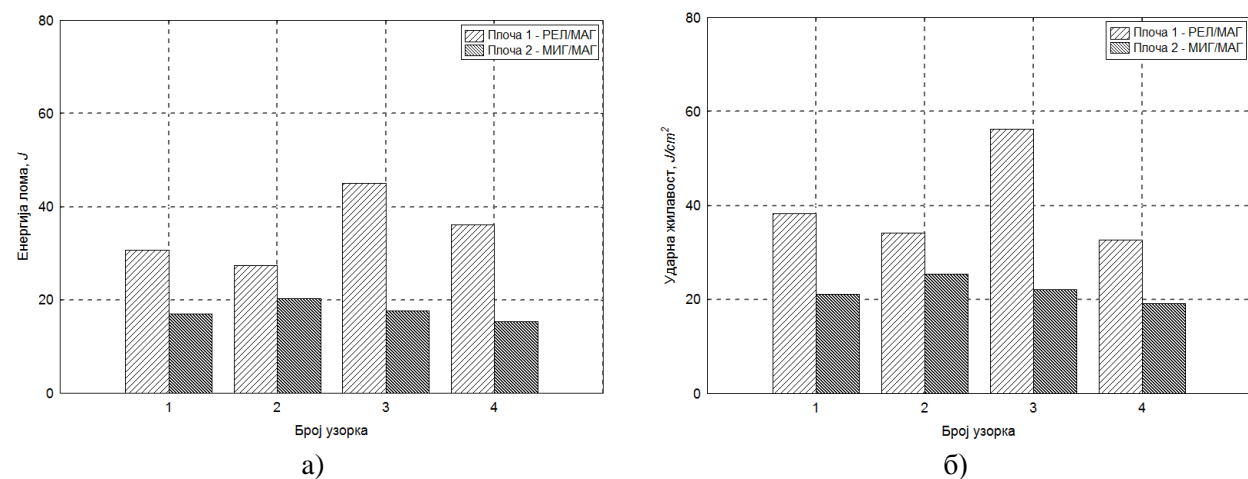
Слика 5.51 Упоредни приказ вредности енергије лома - ОМ: а) $T = 20^{\circ}\text{C}$ и б) $T = -40^{\circ}\text{C}$



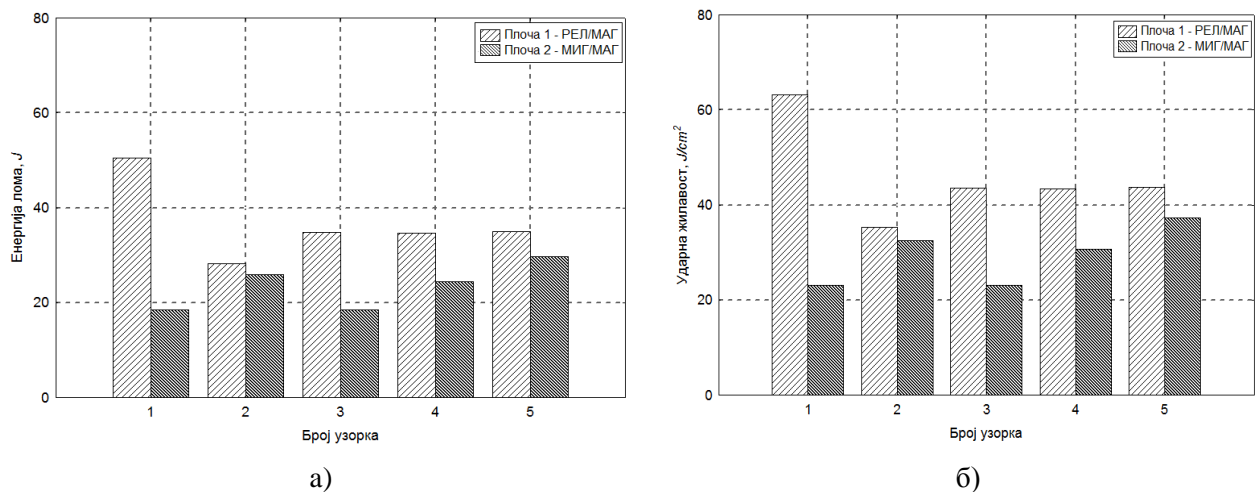
Слика 5.52 Упоредни приказ вредности ударне жилавости – ОМ: а) $T = 20^{\circ}\text{C}$ и б) $T = -40^{\circ}\text{C}$



Слика 5.53 Упоредни приказ вредности – лице шави ($T = 20^{\circ}\text{C}$): а) енергија лома и б) ударна жилавост



Слика 5.54 Упоредни приказ вредности – корен шави ($T = 20^{\circ}\text{C}$): а) енергија лома и б) ударна жилавост



Слика 5.55 Упоредни приказ вредности – корен шави – зона стапања ($T = 20^{\circ}\text{C}$): а) енергија лома и б) ударна жилавост

6. КОНТРОЛА ЗАВАРЕНИХ СПОЈЕВА

6.1 Уводне напомене

Када се изврши заваривање конструкције, како би се утврдило стање заварених спојева и њихов квалитет спроводи се контрола без разарања. Контрола заварених спојева игра веома значајну улогу у процесу производње заварених конструкција јер се на основу ње процењује стање конструкције и њена радна способност. Имајући то у виду, контролу можемо поделити у три класе, које уједно представљају и ниво захтева које конструкција мора да испуни. Према стандарду SRPS EN ISO 5817:2008 постоје три класе квалитета заварених спојева:

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

Дакле, при изради заварених конструкција, у завареним спојевима се појављују мање или веће грешке, па је задатак контроле да утврди облик, распоред, врсту и величину грешака и то како оне утичу на сигурност конструкције. Све се то веома прецизно дефинише горе поменути класама квалитета. Овде треба напоменути и то да контрола појединих заварених конструкција може надмашити и цену израде те конструкције.

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

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

Класа D обухвата мање одговорне заварене конструкције типа малих резервоара и ниско-пропусних цевовода, металне ограде, нискооптерећене конструкције, предмете декоративне природе и тсл.

Поред наведене поделе, контрола у зависности од времена њеног спровођења, може бити:

- претходна,
- текућа и
- завршна контрола.

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

Текућа (процесна) контрола утврђује да ли се произвођач придржава предвиђене технологије и режима заваривања, каква је исправност опреме и инструмената као и мере заштите на раду.

Завршна контрола обухвата контролу димензија и спољашњег изгледа шава, контролу унутрашњих грешака и структуре као и контролу механичких својстава (тврдоћа, жилавост, јачина на кидање).

Будући да су споменуте могуће грешке у завареном споју, у табlici 6.1 дат је њихов кратак преглед. У стандарду SRPS С.Т3.030 је дат детаљан преглед могућих грешака.

Таблица 6.1 Преглед могућих грешака у завареном споју

Тип грешке	Схема и приказ	Тип грешке	Схема и приказ
Лоптасти мехурови		Подужне прелине	
Подужни мехурови		Попречне прелине	
Ланчести мехурови		Зракасте прелине	
Троска		Прокапљине	
Тракаста троска		Неравно лице	
Метални укључци		Заједи	
Налепљивање		Непровар	

Код веома одговорних конструкција, као што су конструкције израђене од разматраног челика класе S690QL, не дозвољава се присуство никакве врсте грешака. Разлог је висок степен оптерећења конструкције у току експлоатације, када чак и најмања присутна грешка може изазвати хаварију и довести до губитка људских живота и високе материјалне штете.

Као што је раније споменуто, контрола заварених спојева се може поделити и на контролу са разарањем и контролу без разарања у зависности од тога да ли се испитивани узорак током контроле разара или не. О контроли са разарањем било је више речи у глави 5 овог рада па она овде неће бити спомињана.

6.2 Испитивања без разарања

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

6.2.1 Визуелна контрола

Иако је шав лепог изгледа не мора да значи да нема грешака па се с обзиром на то контрола без разарања започиње очним прегледом готовог споја. Визуелно испитивање је најстарија, и најчешћа метода за испитивање материјала без разарања. По свом извођењу је врло једноставна, лако и брзо се изводи, и јефтина је. Чак и ако се изводи нека друга метода испитивања, пожељно је да се прво изврши визуелни преглед. На

овај начин се могу открити већа оштећења на површини материјала, што аутоматски смањује обим других врста испитивања која захтевају више времена и много су скупља.

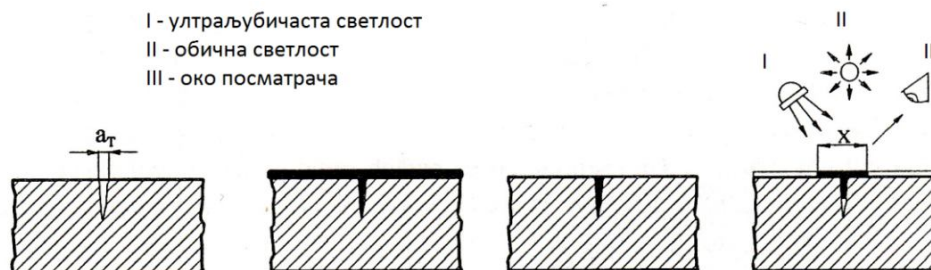
Визуелни преглед, као основна метода контроле без разарања, уз примену различитих уређаја, најчешће оптичких, нашла је своје место у откривању спољних грешака. Ови уређаји имају веома високу прецизност, а са друге стране су једноставани за употребу. У ове уређаје спадају огледала, лупе, призме, бороскопи и различита мерила и мерни инструменти. Савремени уређаји који се користе су CCD камере у комплекту са видео рекордером и микропроцесором. Визуелна испитивања се најчешће примењује за коване производе, одливке и заварене спојеве. Основне карактеристике предмета контроле које утичу на визуелни преглед су: чистоћа површине, боја светлости на површини објекта који се испитује, облик испитиваног објекта, температура објекта, атмосфера. За све горе наведене услове за добар рад контролор мора да има добре психофизичке способности. Неадекватно осветљење проузрокује замор очију. Позиција објекта зависи од удаљености и посматрања као што је предвиђено у стандарду. Препоручена максимална удаљеност објекта за визуелну контролу је 600 mm , Угао посматрања не сме бити мањи од 30° (EN 970 - стандард).

6.2.2 Испитивање пенетрантима (капиларна дефектоскопија)

Пенетранти су течности мале вискозности које имају способност да продиру у површинске дисконтинуитете на материјалу. Када се са површине узорка уклони вишак пенетраната који је изашао из дисконтинуитета (тај процес додатно подстиче супстанца која се зове развијач) на местима дисконтинуитета ће остати боја. Избијање пенетранта на површину узорка се зове пенетрантска индикација и она представља стварни недостатак у материјалу. Сврха контроле материјала са течним пенетрантом је да открије области отворених оштећења као што су прслине и порозност. Пенетрантска контрола се може обављати на различитим материјалима као што су алуминијум, све врсте челика, бабра, титанијум, као и керамике и пластике.

Карактеристика пенетраната је да се веома лако шири преко површине узорка због доброг квашења, што је пожељна особина пенетраната. Величина грешке која може да се открије зависи од тога како је квашење пенетранта у материјалу, и од капиларног ефекта подизања који извлачи пенетрант из пукотине. Улазећи и продирујући у пукотину он изазива капиларни ефекат.

Пенетрант је у ствари течност црвене боје и мале вискозности или течности са додатком флуоресцентних материја. Испитивана површина се накваси пенетрантом и на местима прслина се појављују изразито црвени зарези чија ширина указује на дубину прслине. Ово је најстарији начин контроле заварених спојева.



Слика 6.1 Схема капиларне дефектоскопије

Пенетрантски систем у свом комплету садржи више компоненти: средство за чишћење површине, пенетрант, одстрањивач пенетранта (који може бити исти као и за чишћење) и развијач. Врсте пенетранта и развијача дефинишу технике пенетрантске контроле. Технике контроле зависе од типа или боје пенетраната, начина одстрањивања, нивоа осетљивости пенетранта и агрегатног стања развијача.

Пенетрантне течности се могу поделити према више критеријума и то:

- Према боји:
 - пенетранти у боји (боја-контраст),
 - флуоресцентни пенетранти (веома осетљиви) и
 - пенетранти са продирањем у "дуал" моду.
- Према врсти одстрањивача:
 - пенетранти који се одстрањују водом,
 - пенетранти који се одстрањују чистачем и
 - пост - емулгујући пенетранти (липофилни и хидрофилни) - веома осетљиви.
- Према осетљивости:
 - ултра ниске,
 - ниске,
 - нормалне,
 - високе и
 - ултра високе осетљивости.

Као што се пенетранти могу поделити по различитим критеријумима, тако се и развијачи могу поделити према агрегатном стању и то на:

- суви развијачи у праху - развијач растворљив у води,
- суспензија развијача у течности,
- неводени развијачи,
- развијачи за специфичне намене.

6.2.3 Испитивање заптивности (непропустљивости)

Контрола заптивности - цурења (Liquid Test) се користи да одреди да ли течност или гас продире са унутрашње на спољашњу страну система (компоненте), као резултат разлике притиска између те две области. LT се класификују према притиску и течности у систему. Обично се примењују методе:

- акустична детекција рупа,
- контрола мехурићима,
- детекција протока,
- специјални детектори гаса и
- одређивање величине губитака.

LT се реализује стварањем вакуума или притиска у деловима (систему), и коришћење индикатора, који се користи за детекцију положаја и величине отвора. Главни фактори који одређују избор LT методе су физичке карактеристике система,

индикатор течности, величина предвиђене рупе и разлог за контролу, било да се открије или пронађе рупа, или да се мери количина грешака. LT се могу користити у различитим системима, али најчешће за системе као што су: размењивачи топлоте, парне машине, судови под притиском, итд. Ако рупа проводи течности са једне на другу страну, LT метода детектује ту течност у одређеном притиску и открива да пролази на другу страну.

Ако је у испитној посуди течност под притиском који је знатно већи од атмосферског, тада говоримо о *методи са притиском*. Ако је испитна посуда празна и доведе се подпритисак који је мањи од атмосферског, онда се ради о вакуум методи.

Понекад није могуће извести вакуум методу због неповољних околности, као што су положај или величина система. У таквим случајевима, метода са притиском постаје примарна метода.

Метода са притиском може се поделити у три групе:

1. Метода притиска,
2. Метода са мехурићима и
3. Ултразвучна провера заптивности (пропуштања).

Пробе херметичности се још изводе и помоћу нафте, креде, воденог притиска или компримованог ваздуха.

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

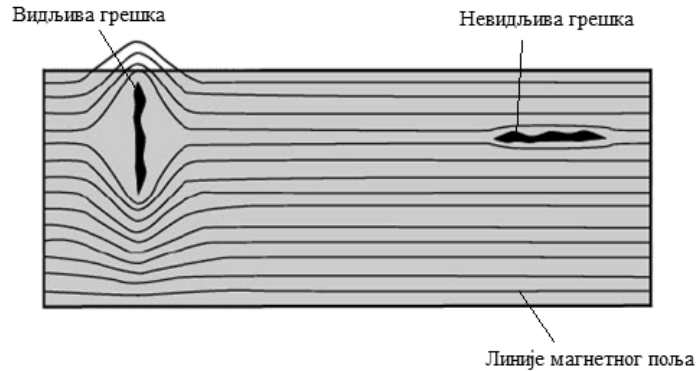
Проба херметичности помоћу **воденог притиска** се састоје из пуњења посуде водом и посматрања са спољашње стране. Цурење или влажење указују на грешке у завареном споју.

По сличном принципу се изводи и проба херметичности компримованим ваздухом.

6.2.4 Магнетна испитивања

Овај метод контроле се користи за откривање неправилности на површини или испод површине на дубини до 6 mm само код феромагнетних материјала. Наношењем феромагнетних честица и успостављањем магнетног поља, честице имају тенденцију да се акумулирају на местима где је дошло до расипања магнетног поља, при чему се формира видљива магнетна индикација. Метода се заснива на принципу да када се феромагнетни материјал намагнетише, грешке које се налазе попречно на правац магнетног поља индукују преоријентацију линија поља око дисконтинуитета. Када феромагнетне честице распршимо на површину узорка који је намагнетисан, честице се распоређују дуж линије магнетног поља. Свако одступање од правца одмах се појављује као неправилност у скупу честица (сл. 6.2). На овај начин се добија положај, облик и величина грешке. За већу осетљивост и уочљивост се користе флуоресцентне честице. Веома је важно да се правац магнетног поља усмери управно на грешку јер уколико се правац магнетног поља поклопи са правцем грешке она неће бити детектована. Како у пракси не знамо положај могућих грешака испитивање се најчешће изводи у два међусобно управна правца.

На овај начин смо добили положај, облик и величину грешке. За већу осетљивост се користе флуоресцентне честице.



Слика 6.2 Магнетна дефектоскопија

Код широких површинских оштећења неће се приказати грешка индикације, ако честице не могу да премосте грешку. Код мањих и оштрих неправилности које су заробљене испод површине узорка, као што су неметални укључци, индикација је врло јасна.

Постоје два метода магнетне дефектоскопије и то:

1. континуирани и
2. резидуални.

Континуални метод подразумева да при контроли магнетним честицама које су распоређене на површини узорка при чему се магнетни флуks (ток) успостави а потом прекине. На тај начин ће доћи до нагомилавања честица око дисконтинуитета на материјалу. Континуирани метод се користи за нискоугљеничне челике или метале са слабом магнетизацијом.

Резидуални метод функционише по принципу заосталог магнетизма. Резидуална метода може да се користи само на материјалима који су довољно добро магнетични. Обично су тежи материјали више магнетични.

Уређаји за магнетну дефектоскопију се обично користе у комбинацији са наизменичном струјом, што обезбеђује добру мобилност честица. Такви уређаји имају широку примену. Најчешће се користи магнетни јарам, који користи импулсну струју у комбинацији са сувим прахом. Највећа мана преносивих уређаја је у ограниченом флуксу. Дакле, за грешке које су дубље испод површине, користимо опрему са јачим флуksom (магнетним током) на излазу.

Магнетне честице могу бити у два облика: сувих (у праху) и суспензија (керозин, лако уље). Мобилност честица је боља у суспензији, али се мокри метод не користи за контролу корозионо осетљивих зона, нити за рад на високим температурама. Оптималан облик честица је сферни, и он представља компромис између мобилности и привлачне силе. Најбољу мобилност имају округле честице, лако се привлаче дуге, танке и велике честице.

Треба поменути и хладне (водоничне) прслине које најчешће настају у периоду до 48 сати после заваривања а које представљају један од највећих проблема у заваривању. После истека овог времена садржај водоника се толико смањи да опасност од њиховог настајања више не постоји. Прекидне прслине које излазе на површину се могу уочити и голим оком ако су довољно велике али је ипак много боље испитивања базирати на испитивања без разарања: пенетранте, магнетни флуks, ултразвук и радиографију.

Уколико до појаве водоничних прслина ипак дође, препорука је да се завар пребриси и изглеби до краја и репарира шав. Код динамички оптерећених конструкција прслине се могу ширити и на крају довести до разарања конструкције. Будући да су челици класе S690QL веома дуктилни, заморни лом неће настати код тањих плоча. Такође, утицај прслина на отпорност конструкције може се проценити применом *Механике лома*. С обзиром на то да су та сазнања теоријске природе, закључујемо да је репаратурно заваривање најбоља и најсигурнија мера коју треба предузети. Мале прслине у некритичним зонама конструкције, чији лом неће изазвати озбиљне последице, се могу прихватити.

6.2.5 Радиографска испитивања

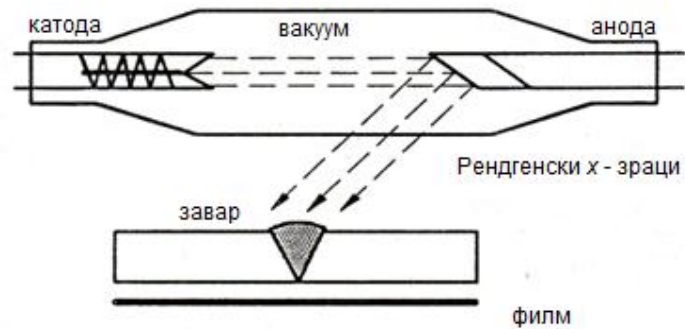
За откривање унутрашњих грешака у завареном споју највише се примењују рендгенски зраци (*Röntgen - x-зраци, 1895. год.*) и γ -зраци. Контрола се заснива на особини јонизујућег зрачења да пролази кроз материјале који су непропустљиви за обичну и видљиву светлост.

Ово је најраспрострањенија метода за испитивање без разарања, за откривање унутрашњих дефеката у материјалу, као што су порозност и шупљине. Коришћењем правилне оријентације радиографског зрака могу се открити раванске грешаке. Такође, се користи за откривање промена у саставу материјала, мерење дебљине, и за лоцирање нежељених компоненти производа. Главна предност коришћења јонизујућих зрачења у испитивању без разарања је широка област примене, од микро електронских делова до великих објеката као што су бродови. Још једна од предности радиографије је што може да се користи за све врсте метала, од алуминијума, берилијума, магнезијум, преко челика, никла, до тешких елемената. Испитивање обухвата одливке, заварене спојеве, композитне материјале и везивне елементе.

Рендгенски (x) зраци (вештачки) се стварају у вакуумској цеви која садржи аноду и катоду напонске разлике $100 \div 400 \text{ kV}$ (сл. 6.3). Катода загрејана мрежицом емитује електроне који услед напонске разлике ударају у аноду (волфрамски диск у бакарном блоку) и своју кинетичку енергију претварају у топлоту и x -зраке. Колика је то енергија зависи од тога каква је атомска структура аноде. Ако електрон при удару у аноду уђе између атома, без удара у његове електроне, што се дешава у 99% случајева, проузрокује осцилације кристалне решетке и стварање топлоте. У случају да атомски електрон удари у структуру атома - избије неки електрон из електронске структуре атома - сва кинетичка енергија се претвара у енергију електромагнетних таласа (рендгенског зрачења). У рендгенској техници се употребљавају x -зраци са таласним дужинама у распону од $0,1$ до $0,005 \text{ nm}$. Повећањем напона, ако је неопходно постиже се промена наизменичног електричног напона.

Радиографија је врста испитивања, при којој се показују разлике на фотографском филму приликом проласка зрака кроз материјал. При класичној радиографији, испитивани објекат прозрачујемо са x или γ -зрацима. Део зрачења апсорбује објекат, а остатком се прозрачи филм. При прозрачавању са рендгенским зрацима, јавља се у фотографској емулзији филма, који се састоји од желатина и молекула AgBr , јонизација при којој долази до попуштања везе између сребра и брома. Тада се ради о латентној слици. Тек када се експонирани филм урони у раствор хемикалија (развијач), редукује се јон сребра из молекула AgBr до метала сребра. Подручије на филму, на који је пала већа количина зрака, због велике количине метала сребра, је тамно (негативно). Такав фотографски снимак називамо радиограм. На основу такве слике – радиограма – могу се уочити места грешака у завару нпр.: непровар, мехурови, поре,

неметални укључци и др. јер таква места лакше пропуштају рендгенске зраке и радиограм постаје више осветљен.



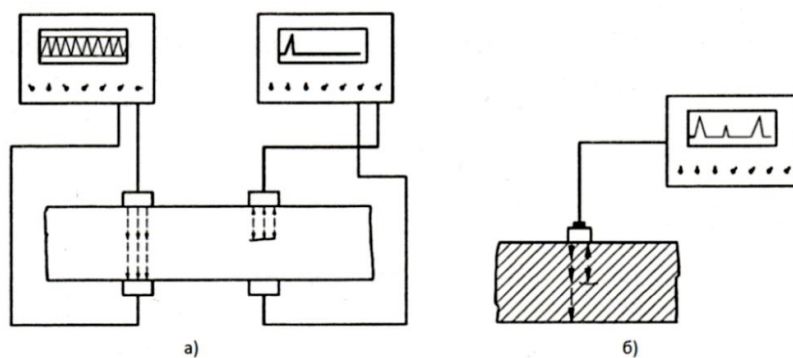
Слика 6.3 Схема испитивања х-зрацима

Поред испитивања х-зрацима постоји и испитивање γ -зрацима (природни) помоћу специјалних радиоактивних изотопа кобалта, цезијума, талијума или иридијума али се х-зрацима добијају радиограми веће резолуције па је самим тим рендгенска метода знатно поузданија и више у употреби [4, 6].

6.2.6 Ултразвучна испитивања

Ултразвучно испитивање материјала је просторна метода контроле унутрашње хомогености материјала и објеката на дубини од 1 до 2000 *mm*. Припада методама испитивања без разарања у коме се високофреквентни ултразвучни таласи уводе у материјал са циљем откривања унутрашњих грешака у материјалу. При проласку кроз материјал, звучни таласи се одбијају од граничних површина, при чему губе енергију. Одбијени сноп звучних таласа се детектује, а затим анализира у циљу утврђивања присуства грешака. Звучни таласи се у потпуности рефлектују од граничне површине метал - гас, али само делимично од граничних површина метал - течност и метал - чврсто тело. Грешке, као што су пукотине, рупе, налепљивање, поре и грешке у везивању, понашају се као што је подручије метал - гас и релативно се лако откривају. Укључке и друге нехомогености у материјалу откривамо са делимичном рефлексijом звучних таласа али и од распршених ултразвучних таласа (ехо). Ултразвучно испитивање се интензивно користи код заварених спојева, мерења дебљине материјала, одређивања корозионих утицаја, одређивања физичких карактеристика, микроструктуре, величине зрна у еластичним деловима. При томе се користе фреквенције од 1 – 25 MHz (најчешће 1 - 6 MHz). Ултразвучни таласи на основу тога како осцилују честице у медију кроз који пролазе могу поделити на: уздужне (лонгитудиналне), попречне (трансверзалне) и површинске.

Ултразвучни таласи се генеришу од стране пиезоелектричног сензора, који претвара електричне сигнале високе фреквенције у механичке вибрације, и који се специјалним сондама преносе на претходно уљем премазану површину испитиваног споја. Постоје две методе ове контроле: метод пригушења (сл. 6.4а) и ехо-метод (сл. 6.4б). Код метода пригушења, давач и пријемник таласа се постављају са супротних страна узорка. На местима дефекта сигнал незнатно слаби (пригушује се), а од веће сигнал се одбија.



Слика 6.4 Ултразвучна контрола: а) метод пригушења, б) ехо-метод

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

Методама ултразвучне контроле могу се открити све унутрашње грешке у завареним спојевима као и разлиставање (ламеларно цепање) дебелих лимова. Овако се откривају дефекти мањих димензија него другим методама али је потребан висок ниво специјализације радника за правилно читање слике на екрану [4, 6].

6.3 Примери изведене контроле заварених спојева

Како би се предложена технологија заваривања проверила и завршно верификовала, заварени узорци се подвргавају и испитивању без разарања. У оквиру испитивања без разарања коришћене су методе визуелног прегледа, пенетрантним течностима (сл. 6.5 и 6.6) и ултразвучна контрола (сл. 6.7). На појединим - најкритичнијим местима склопова је извршено и прозрачивање x -зрацима.



а)



б)

Слика 6.5 Пример санације уочене грешке: а) уочена грешка и б) санирана грешка



Слика 6.6 Пример пенетрантне контроле на реалним деловима



Слика 6.7 Пример извођења ултразвучне контроле на реалним деловима

7. ЗАКЉУЧАК

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

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

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

S690QL класа челика је намењена за израду конструкција изложених великим статичким и динамичким (ударним) оптерећењима и због тога мора да задржи добре механичке особине у што ширем дијапазону радних температура, пре свих тврдоћу, јачину, дуктилност и жилавост на собним и сниженим температурама. Поред свих тих услова јавља се и проблем заварљивости самог челика. С обзиром на то да се челици повишене јачине добијају додавањем различитих микролегирајућих елемената и посебним поступцима термомеханичке прераде, при заваривању се мора водити рачуна да услед загревања и хлађења појединих зона не дође до нарушавања повољних својстава основног материјала добијених примарном прерадом.

Дакле, после детаљне анализе најважнијих својстава основног материјала и процене његове заварљивости, избора најповољније комбинације додатних материјала, поступка и

технологије и спроведених испитивања, утврђена је најповољнија технологија заваривања и "пренета" је на реалну конструкцију. Конструкција заварена предложеном технологијом је подвргнута веома ригорозним тестовима и показала се веома поузданом.

Пресудан утицај на избор оптималне технологије заваривања дали су резултати испитивања ударне жилавости, јер се на основу осталих параметара испитивања спојеви изведени РЕЛ/МАГ и МИГ/МАГ технологијама нису много разликовали. Дакле, повољнију ударну жилавост има спој изведен РЕЛ/МАГ технологијом и с обзиром на то она представља знатно поузданију технологију заваривања челика повишене јачине класе S690QL. Иако је стално присутан захтев за повећањем продуктивности тј. брзине заваривања, у случају заваривања челика S690QL, од ког се израђују високоодговорне конструкције, технологија заваривања се мора изабрати на основу експерименталних резултата који на описују механичке карактеристике које конструкција поседује. Примарни захтев приликом конструисања је поузданост, стога продуктивност при изради конструкције, као утицајни фактор, не сме имати предност при избору оптималне технологије заваривања.

На крају треба нагласити да је у циљу добијања добрих својстава завареног споја, приближних својствима основног материјала, поред свега наведеног, неопходно придржавати се и препорука произвођача челика, као и сазнања других истраживача из ове области. Овај рад је скроман допринос том циљу.

8. ЛИТЕРАТУРА

- 1) **Јовановић М., Лазих В.:** *Упутство за заваривање челика повишене јачине*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
- 2) **Ђорђевић Д.:** *Оцена технолошко – металуршке заварљивости челика повишене јачине – специјалистички рад*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
- 3) **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.:** *Технологија заваривања – приручник*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 1996.
- 4) **Арсих Д.:** *Оцена заварљивости челика повишене јачине класе S690QL – завршни рад*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- 5) **Јовановић М., Лазих В., Александровић С., Милосављевић Д., Маринковић П., Недељковић Б.:** *Оцена заварљивости и избор најповољнијег поступка и технологије заваривања челика повишене јачине WELDOX 700*, Саветовање са међународним учешћем ЗАВАРИВАЊЕ 2010, Тара. Рад усмено изложен, објављен у целости на ЦД-у (ред. бр. 55) и у Зборнику резимеа радова, стр. 82.
- 6) **Јовановић М., Лазих В.:** *Технологија ливења и заваривања – скрипта*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2010.
- 7) **Јовановић М., Лазих В.:** *Рукопис предавања – Машински материјали*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, школска 2012/2013.
- 8) **Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В., Ратковић Н.:** *Машински материјали*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2003.
- 9) **Ђорђевић В., Вукићевић М.:** *Машински материјали – практикум за вежбе први део*, Машински факултет универзитета у Београду, Београд, 1998.
- 10) *Стандарди: JUS, SRPS, EN, DIN, ASTM.*
- 11) *Каталог додатних материјала и електрода*, Железарне Јесенице, Словенија.
- 12) **Радаковић З.:** *Предавања и вежбе*, Машински факултет у Београду, Београд – www.mas.bg.ac.rs, Мај 2013.
- 13) <http://www.ssab.com/en/Products-Services/Service--support/Technical-handbooks-Welding-Handbook/>
- 14) **Јовановић М., Лазих В.:** *Практикум ручног-електролучног (РЕЛ) и МАГ/МИГ заваривања*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.