

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: 447/2017

Милош М. Бакић

**Оцена заварљивости и избор
најповољније технологије заваривања
панцирних челика
Мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. Проф. др Вукић Лазић - ментор
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

- наведе и опише врсте челика повишене јачине као и њихов развој, примену и поступак производње
- укаже на заварљивост челика повишене јачине, и да на одређеном примеру, челику класе ARMOX 500T, експериментално и теоријски одреди његову заварљивост и предложи поступак, додатни материјал и оптималну технологију заваривања

Препоручена литература:

[1] Јовановић М., Лазих В.: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.

[2] Јовановић М., Адамовић Д., Лазих В.: *Технологија заваривања - приручник*, друго издање, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.

[3] Јовановић М., Лазих В., Арсић Д.: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.

Крагујевац, март 2021.

Ментор:

Проф. др Вукић Лазих

Резиме:

У овом раду приказана је проблематика заваривања посебне групе висококвалитетних челика повишене јачине под називом панцирни челици, са посебним освртом на класу ARMOX 500T који се одликују веома повољним механичким особинама, нарочито у погледу затезне јачине и захтеване (прописане) жилавости. У исто време, као њихова мана истиче се ограничена и отежана заварљивост, тј. заварљиви су само уз примену посебних мера везаних за контролисани унос топлоте. Све повољне особине које поседује овај челик постижу се применом поступака термомеханичке обраде и додатком микролегирајућих елемената. Сви проблеми и други разлози везани за заварљивост, решавају се правилним прописивањем технологије заваривања, оверене експериментима у лабораторијским и реалним условима. Циљ овог рада је да укаже на могућности примене овог челика за одговорне заварене конструкције које су оптерећене на повремене ударе пројектила. Поред тога, треба истаћи чињеницу да особине челика које декларише произвођач (хемијски састав, механичке особине итд.) нису увек поуздане и могу се разликовати од серије до серије.

Кључне речи: челици повишене јачине, панцирни челици, ARMOX 500T, технологија заваривања.

Abstract:

In this paper are considered weldability of a special class high strength steels, which can be classified into the group of armor steels, with special review of ARMOX 500T. They have exceptional mechanical properties, especially tensile strength and toughness. At the same time, the limited and difficult weldability is emphasized as their weak points. In other words, some of those steels are weldable only with the application of special measures related to the controlled heat input. Those favorable properties are being achieved by application of special procedures of thermomechanical processing and simultaneous alloying with adequate elements. The above mentioned as well as other problems can be successfully solved by the proper selection of the technology of welding, verified by the experiments conducted in the laboratory or real operating conditions. The aim of this paper is to point to the possibility of application of these steels for manufacturing of the responsible welded structures, and simultaneously to point to the fact that the properties of steels as declared by manufacturer (chemical composition, mechanical properties etc.) are not always reliable and that they can vary depending on the batch.

Key words: high strength steels, armor steels, ARMOX 500T, welding technology.

Садржај:

1. УВОД	6
2. ДОБИЈАЊЕ И ПОДЕЛА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	3
2.1. С-Мп челици повишене јачине	5
2.2. Микролегирани (финозрни) челици повишене јачине	6
2.3. Нисколегирани челици повишене јачине	7
2.3.1. Бејнитни челици повишене јачине	7
2.3.2. Нискоелегирани побољшани челици повишене јачине	7
3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ	9
3.1. Појам и дефиниција заварљивости	9
3.2. Проблеми заварљивости С-Мп челика	12
3.3. Проблеми заварљивости микролегираних челика	14
3.4. Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине	14
3.4.1. Бејнитни челици	14
3.4.2. Нисколегирани побољшани челици	15
3.5. Параметарске једначине за оцену склоности челика ка хладним прелинама	15
4. ПАНЦИРНИ ЧЕЛИЦИ	19
4.1. Утицај легирајућих елемената	24
4.2. Опште напомене о заварљивости панцирних челика	26
4.3. Заваривање панцирних челика	27
4.4. Механичке особине и анализа микроструктуре	29
4.4.1. Тврдоћа	29
4.4.2. Затезне карактеристике	30
4.4.3 Микроструктура и ширина ЗУТ-а завареног споја панцирног челика	31
5. ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА ПАНЦИРНИХ ЧЕЛИКА (ARMOX 500 T)	32
5.1. Препоруке за заваривање и мере за спречавање хладних прелина при заваривању	33
5.2. Параметри и технологија МАГ/МИГ заваривања	37
5.2.1. Најутицајнији параметри МАГ/МИГ заваривања	42
5.2.2. Технолошки параметри МАГ/МИГ заваривања	51
5.3. Прегревање и међупролазна температура	54
5.4. Преглед додатних материјала	55
5.5. Препоручени параметри заваривања	56
6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА	61

6.1. Стандарди балистичке заштите	61
6.2. Балистичка својства	62
6.3. Испитивање механике лома заварених спојева	65
6.3.1. Механике лома у основном материјалу	67
6.3.2. Механика лома у метал шаву и ЗУТ-у	68
6.4. Добијени резултати тестирања	71
7. ЗАКЉУЧАК	79
8. ЛИТЕРАТУРА	80

1. УВОД

Из тежње за повећање ефикасности тенкова и могућности њиховог опстанка на бојном пољу настала су борбена возила за пешадију. Искуства су показала да су тенкови доста ефикаснији и да много боље дејствују уз подршку пешадије и артиљерије него без њих па се дошло на идеју да се део пешадије, који ће непосредно да судејствује са тенковима, транспортује возилима која би била у могућности да им пруже одређену оклопну заштиту уз покретљивост на нивоу тенкова, или чак и већу. Тако је настало прво борбено возило које је добило назив оклопни транспортер. Убрзо се увидело да би оклопни транспортери били далеко ефикаснији уколико би поред транспорта пешадије, уз оклопну заштиту и заштиту од оружја за масовно уништење, и одговарајуће формацијско наоружање и покретљивост били у могућности да у одређеним борбеним ситуацијама самостално решавају борбене задатке. На основу те идеје дефинисано је борбено возило пешадије, које је развијено на основу подсистема лаких тенкова, из разлога да се што пре израде, јер би развој подсистема специјално за ова возила трајао предуго и захтевао висока материјална улагања.

Анализе су показале да примењени концепт није могао опстати због одређених недостатака, као што су:

- велики број чланова десанта,
- велики губици у људству у случају директног поготка десантног одељења,
- велики габарити и маса,
- релативно слаба оклопна заштита,
- висока цена и др.

Убрзо почиње развој концепција заснованих на подсистемима који би били специјално намењени за овај тип возила. Први проблем био је развити оклоп који ће спречити продор пројектила стрелачке и противоклопне муниције у возило, а у исто време остварити што боље тактичко-техничке и борбено-експлоатационе карактеристике. Ти захтеви доводе до развоја посебне групе челика, од већ постојећих челика повишене јачине, под називом панцирни челици, који се од тада непрестано развијају. У почетку био је првенствено челик, данас се користе легуре алуминијума, керамика, стакло, пластика, композити, реактивни и активни оклопи или њихове комбинације.

Супериорност челика у погледу односа захтева квалитета и цене за коју се тај квалитет добија представља његову доминантну улогу у изради борбених возила.

Поред тога, индустрија челика селективно и успешно се суочава са развојем материјала за специјалне намене и израду заварених конструкција за веома строге услове, уз паралелни развој додатних материјала. Та кооперативна истраживања у области нових врста челика и додатних материјала, заједно са усавршавањем технологије заваривања, која представља главни начин спајања при изради борбених возила, имају велику улогу у повећању сигурности заварених конструкција из аспекта отпорности ка кртом лому, замору, корозији, хабању, пузању и тсл.

Шведска компанија SSAB Oxelösund у свом производном програму има челике повишене јачине, а посебно се издваја група панцирних челика под комерцијалном ознаком ARMOX који се производе по строго дефинисаним поступцима производње. Њихове одличне особине произлазе из начина њихове производње. Имају веома мали садржај угљеника што повољно утиче на заварљивост, а јачина се постиже применом термомеханичке обраде (ТМО). Ови челици се на светском тржишту високо рангирају што довољно говори о њиховом квалитету. У овом раду дат је преглед свих ARMOX челика, док је посебно размотрен ARMOX 500T који тренутно представља најтраженији панцирни челик на тржишту.

Заварени спојеви на борбеним возилима израђеним од овог или неког другог панцирног челика, представљају најрањивије место целе конструкције. Разлог је тај да се при заваривању панцирних челика морају применити додатни материјали који дају метал шава знатно мање јачине у односу на основни материјал, у супротном дошло би до појаве хладних прслина јер су панцирни челици веома закаљиви.

Поред тога, овај челик спада у условно заварљиве челике, што значи да се морају применити и одговарајуће мере при заваривању. Једна од најбитнијих је контролисани унос топлоте што SSAB јасно излаже у спецификацијама овог челика и ограничава унос топлоте на 200°C, јер на већим температурама долази до прекомерног отпуштања и губитка свих повољних особина добијених помоћу ТМО.

У овом раду су дате препоруке које је неопходно испоштовати у циљу добијања што квалитетнијих заварених спојева, као и препоручене технологије заваривања, све на основу препорука произвођача, као и стручњака који су се бавили овим проблемима.

Експериментални део овог рада заснива се на испитивању заварених спојева на балистичка оптерећења, за које су израђени посебни узорци. Препоручена технологија, пренета је на моделе који ће бити подвргнути балистичким испитивањима. Израђено је девет узорака од којих су три у сучеоном споју, три у угаоном и три у угаоно-рубном споју. Код угаоно-рубног споја, са унутрашње стране постављене су плочице, такође од истог челика, које би требале да служе као ојачање у случају потпуне перфорације пројектила кроз метал шава и његову околину.

Код контрукција овог типа, овако отворена зона метала шава се избегава, већ се у већини случајева покушава сакрити, тако да се сучеони спој углавном не примењује, а у овом случају израђен је у циљу што јаснијих резултата експеримента.

Циљ експеримента је да се утврде последице које пројектил може проузроковати на металу шава (МШ), зони утицаја топлоте (ЗУТ) и основном материјалу (ОМ).

2. ДОБИЈАЊЕ И ПОДЕЛА ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

Тежња усмерена ка смањењу масе конструкције довела је до развоја ове групе челика који су у суштини угљенични са минималним садржајем легирајућих елемената (највише 0.50%). То су ситнозрни челици, са величином феритног зрна ≤ 6 (одређено методом према EU 103). Њихову производњу омогућила је технологија микролегирања која повећава напон течења, јачину на кидање и тврдоћу.

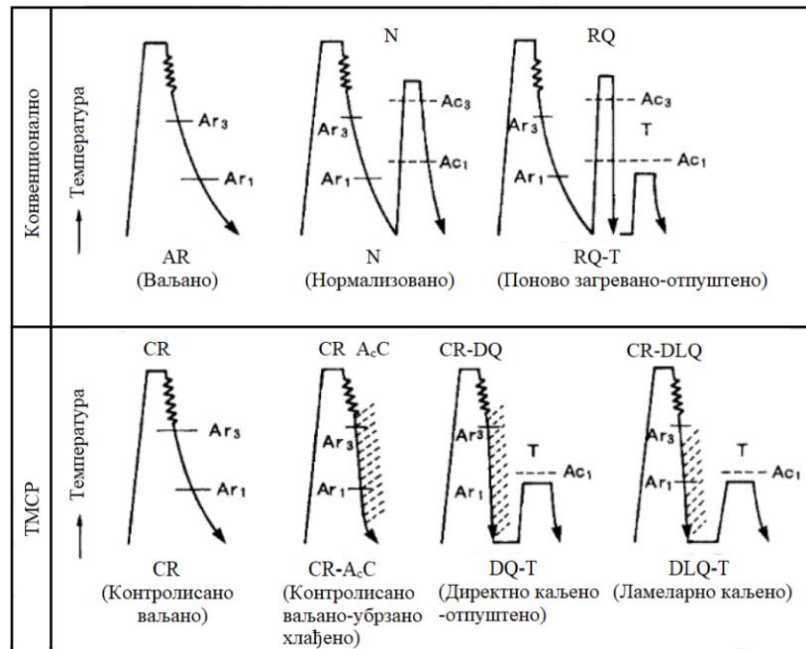
Напон течења (R_{eH}) код ових челика већи је од 360 МПа и у почетку њихове производње испоручивани су само у облику лимова, док се данас испоручују у свим стандардним ваљаним профилима, као што су: лимови, траке, плоче, профилисани носачи, шипке и специјални профили.

Анизотропија механичких особина према правцу ваљања код ових челика доводи до варирања обрадивости деформисањем и јачине у зависности од правца. Напон течења може се повећати порастом % С што неповољно утиче на заварљивост, због чега су развијени челици повишене јачине са % С < 0.20. Смањен садржај угљеника и легирајућих елемената (микролегирање и нисколегирање), висок степен чистоће (низак % Р и S) заједничке су особине свих ситнозрних челика које су омогућиле високу јачину и жилавост.

Микролегирајући елементи V, Ti, Nb, Al и B, са угљеником и азотом образују стабилне нитриде и карбонитриде, који дисперзно растворени повољно утичу на формирање ситнозрне структуре.

Уситњавање зрна постиже се на више начина:

- Конвенционалним поступцима термичке обраде: нормализацијом, каљењем и отпуштањем и
- Термомеханичком обрадом која се састоји из ваљања и убрзаног хлађења у одређеним температурским интервалима.



Слика 2.1 Термичка обрада процеса топлог ваљања лимова

Процес контролисаног ваљања, који је праћен убрзаним хлађењем на истој линији, први пут се примењује у производњи лимова (1980. год.). Касније су се многи типови и облици челика, укључујући профиле и нерђајуће челике, производили уз помоћ ТМО. Убрзано хлађење доводи до ојачања челика и смањења употребе легирајућих елемената који се користе у циљу ојачања, што резултира смањењу склоности ка отврдњавању, а самим тим долази и до побољшања заварљивости, али и осетљивости на неке типове термичке обраде. Структура ТМО челика веома је рафинисана у поређењу са конвенционалним челицима, због чега у односу на њих имају знатно повећану жилавост.

Проблеми који се јављају при заваривању ових челика су: пораст зрна у ЗУТ-у, повећање тврдоће, омекшавање ЗУТ-а, појава хладних прслина и смањење жилавости, што је неопходно да се све то избегне током заваривања. Према томе, битно је да количина унете топлоте буде у строго контролисаним границама. Склоност ка појави хладних прслина може се умањити предгревањем, али на ту температуру утиче велики број фактора као што су: еквивалент угљеника (обухвата садржај угљеника и других елемената), дебелина делова који се заварују, садржај водоника, интензитет кртости споја итд. Многе методе које су предложене за одређивање температуре предгревања праћене су различитим проблемима при њиховој примени у заваривачкој пракси. Фазна трансформација аустенита у ферит у ЗУТ-у, на вишим је температурама у односу на метал шав. Из тог разлога дифузија водоника из метала шав у ЗУТ је смањена, те је смањено и растварање водоника у ЗУТ. Према томе, већа је могућност појаве прслина у металу шав, због чега је код одређивања примене предгревања као и температуре предгревања правилније узети у обзир еквивалент угљеника метала шав него основног материјала.

ТМО челици су побољшани, не само по питању заварљивости, већ и по особинама основног материјала. Побољшање не долази само из аспекта технологије процеса, већ и због контроле топлог ваљања и хлађења, као и контроле производње челика, преко прецизне

контроле додавања микролегирајућих елемената. ТМО челици су у принципу врло чисти, а тврдоћа је ограничена да не буде већа од 400 HV.

2.1. С-Мн челици повишене јачине

Користе се углавном за компоненте конструкција од којих се захтевају побољшане механичке особине. Захтев за високу жилавост може испунити челик са смањеним садржајем угљеника, али то доводи до смањења јачине због чега се повећава пресек конструкције, а самим тим долази и до повећања њене масе. Тај проблем превазиђен је развојем ове врсте челика са додатком мангана. Манган има двојаку улогу: утицај на ојачање, као и на контролу сумпорних укључака.

Интензитет растварајућег ојачања зависи од врсте легирајућег елемента, односно да ли додати елемент ствара супституцијски или интерстицијски чврсти раствор. Мн је у Fe растворен супституцијски, и ефекат ојачања пре свега зависи од разлике у величини атома. Како су Мн и Fe суседни елементи у периодном систему, сам ефекат ојачања није толико значајан и примаран. Присуство Мн је уобичајено 1.5-1.7% и ефекат ојачања услед Мн се може лако одредити.

Код ових перлитно-феритних челика до повећања својстава отпорности долази услед пораста удела ферита у структури, ојачања ферита манганом који улази у чврст раствор α -гвожђа и уситњавањем металних зрна.

Манган се додаје због више позитивних утицаја:

- У комбинацији са сумпором образује манган сулфид (MnS) у виду укључака. Наиме, сумпор је обично присутан у гвожђу у виду сулфида гвожђа (FeS), који на високим температурама образује са гвожђем течни еутектикум који има ниску тачку топљења ($\sim 880^{\circ}C$). Тај еутектикум се простира по границама металних зрна док је још увек у течном стању, и током хлађења очврсћује у крти филм. Из тог разлога челик са течним филмом на границама зрна не може се прерађивати на високим температурама, јер постаје крт када се охлади. Манган се лакше једини са сумпором образујући сулфид високе тачке топљења ($\sim 1620^{\circ}C$), који је у чврстом стању при преради челика на топло због чега има незнатан утицај на жилавост коначног производа, јер је равномерније распоређен у челику.

- Повећава чврстоћу челика образујући супституцијски чврсти раствор са гвожђем.
- Успорава промену аустенита у ферит или перлит, због чега се у плочама веће дебљине, које се хладе брже на површини него у унутрашњости, могу постићи повољније и уједначеније особине по дебљини, а да се за дату брзину хлађења постигне већа чврстоћа.

Могу се испоручивати у облику лимова, шипки, профила, а намењени су пре свега за мостogradњу, хидроградњу, грађевинарство, резервоаре итд. Главна предност С-Мн челика је ниска цена, као и могућност масовне производње. У ову групу челика спадају тзв. меки челици напона течења од 230 МПа и затезне јачине од 400 МПа, који се користе за израду опреме која ради под високим притиском и температурама до $350^{\circ}C$ изнад којих њихова јачина опада. Јачина се може побољшати нормализацијом, контролисаним ваљањем, као и

побољшањем. Контролисаним ваљањем може се постићи напон течења преко 500 МПа, док се побољшањем могу постићи још веће вредности чврстоће.

2.2. Микролегирани (финозрни) челици повишене јачине

Масовна употреба и развој ове врсте челика почиње почетком 60-их година XX века. Главни мотив за њихов развој произашао је из тежње за значајним повећањем јачине, а тиме и повећањем носивости уз смањење масе контрукције, различитим могућностима ТМО, као и због потребе светског тржишта за заварљивим челицима повишене јачине који би се употребљавали за цевоводе. У тим случајевима није било могуће применити класични метод за повећање јачине повећањем садржаја угљеника и легирајућих елемената.

Користе се углавном за судове под притиском, цевоводе високог притиска, за делове друмских возила, железничких вагона, цистерни за превоз течног нафтног гаса, као и за решеткасте носаче мостова и индустријских хала. Садржај угљеника се ограничава на 0.20% тако да се одликују добром заварљивошћу. Поред угљеника садрже и микролегирајуће елементе V, Ni, Ti и Nb чији збирни садржај не прелази 0.20% и који у челику образују карбиде и карбонитриде, а они на повећање јачине делују двојачко: уситњавањем зрна и таложењем и ојачањем чврстог раствора. Доминација неког од наведених легирајућих елемената зависи од цене и погодности за ТМО. Уситњавање зрна се постиже нормализационим жарењем или контролисаним ваљањем и хлађењем полуфабриката (Термомеханички ваљани челици - ТМ челици дебљине од 10 mm). Структура је ситнозрнаста феритно-перлитна и на собним температурама. После пластичног обликовања на топло, структура је ситнозрнаста која се састоји од феритних зрна мале величине, хомогених по облику.

Поред тога, присутна је и мала количина цементита, као и фино дисперговане честице карбонитрида, које се могу идентификовати само испитивањем електронским микроскопом. Због прераде на повишеним температурама присутни су и процеси обнављања деформисане структуре, опорављање и рекристализација. У току рекристализације деформисана структура долази у првобитни, тј. недеформисани облик, а последица тога је смањење густине дислокација. Механизам спречавања рекристализације јесте смањење брзине настанка клица и/или покретљивости граница зрна и субзрна, услед присуства растворених атома у чврстом раствору (континуално ваљање – кратке паузе, нема таложења; доминантна улога Nb) или честица талога (реверзивно ваљање – дуге паузе; доминантно издвајање карбонитрида).

Најпогоднија дефиниција која описује микролегиране челике је та да су то челици код којих мали додатак легирајућих елемената доводи до интензивног смањења зрна и/или таложног ојачања, услед издвајања стабилних честица карбида, нитрида или карбонитрида.

2.3. Нисколегирани челици повишене јачине

2.3.1. Бејнитни челици повишене јачине

Развијени су у Енглеској после финозрних челика под називом *Fortyweld* и испоручују се у нормализованом или нормализованом и отпуштеном стању. Садрже највише 0.10% C, уз нешто повећан садржај Mn и Si, са додатком Mo до 0.50% и V до 0.009%. Типичан хемијски састав једног челика ове класе је: 0.10% C; 0.96% Mn; 0.41% Si; 0.58% Cr; 0.61% Ni; 0.33% Mo; 0.10% V; 0.009% B; 0.018% P; 0.016% S и 0.017% Al.

Додатак елемената као што су Mn, Cr, Mo и V у малим количинама и у одређеном односу усмерава трансформацију ка лакшем стварању бејнита, пре него мартензита или ферита и перлита. Одвијањем бејнитне промене при нижој температури, нпр. око 300°C, постиже се ситнозрнаста структура и боља дисперзија карбидних честица, што утиче на повећање својстава отпорности (R_{eH}) са 400 на 600 MPa, равномерно по целом пресеку делова дебљине 100 mm. Снижавање температуре бејнитне промене са 600 на 300°C постиже се додацима Mn и Cr, док комбинација 0.50% Mo + 0.003% B даје бејнитну структуру и при веома спором хлађењу (чак и на ваздуху).

Бејнитна структура је релативно високе јачине на собној температури, али је не губи чак и на високим температурама. Користи се у нормализованом и отпуштеном стању, а избором погодне температуре отпуштања добија се висока жилавост. Поред тога, при ниској температури отпуштања жилавост је ниска, што значи да температура отпуштања мора бити прецизно одређена. Легирајући елементи у овим челицима додају се у циљу добијања структура високе јачине трансформацијом при нормалним брзинама хлађења, као и због ојачавања ферита њиховим присуством у чврстом раствору. Ограничење које се поставља за ове класе челика је да се не препоручују за рад на ниским температурама, а у односу на C-Mn челике имају бољу жилавост и заварљивост.

Имају широку примену за израду различитих челичних конструкција као што су: дизалице, железничке платформе, транспортне цистерне, грађевинске машине и тсл.

2.3.2. Нискоелегирани побољшани челици повишене јачине

Каљењем и отпуштањем челика са 0.16% C; 0.90% Mn; 0.87% Ni; 0.50% Cr; 0.45% Mo; 0.06% V и 0.003% B, добија се челик повишене јачине са највећим својствима отпорности (R_{eH} = 400-800 MPa). Великој јачини, којом се одликује ова класа челика, највише доприноси бор (B) који уситњава примарна аустенитна зрна, дезоксидише и денитрира растоп и повећава прокаљивост. Бор у износу од 0.0015÷0.003% успешно може заменити 1.0-1.25% Ni; 0.1-0.25% Mo; 0.3-0.35% Cr; 0.2-0.7% Mn; 0.12% V и 1.6% Si.

У веома сложенем процесу производње ових челика за ваљање, каљење и отпуштање користи се специјална технолошка опрема која је веома скупа, тако да их производе само поједине индустријске земље (Русија, Пољска, Чешка, Немачка и Шведска). Познати су под ознаком ТМО (термомеханички обрађени) челици и достижу вредности затезне чврстоће (R_m) од 2500-3000 MPa.

Каљење се изводи хлађењем млазевима воде са температуре од око 900°C , до температуре око 300°C одмах после ваљања на топло. Накнадно отпуштање обавља се у проточним пећима при температурама $500\text{--}700^{\circ}\text{C}$ око 1 h и затим хлађењем на ваздуху. При температури отпуштања од око 700°C постиже се тврдоћа од 350 HV, напон течења од $R_{eH} = 490 \text{ MPa}$ и жилавост од 3.5 J. На нижој температури отпуштања од око 500°C , добијају се нешто ниже вредности тврдоће 350 HV и горњег напона течења $R_{eH} = 320 \text{ MPa}$, док је жилавост повећана на око 11 J.

Побољшани челици примењују се за веома оптерећене заварене конструкције са напоном течења; 400-460 MPa (S460), 440-500 MPa (S500), 490-550 MPa (S550), 560-620 MPa (S620), 630-690 MPa (S690), 830-890 MPa (S890) и 960 MPa (S960). Ознака S односи се на заварене челичне конструкције, а уколико уз њу стоји и Q то се односи на поступак побољшања (каљење + отпуштање). Заваривање ових челика подразумева строге мере које се морају испоштовати, пре свега због опасности од појаве хладних прслина. Напон течења преко 690 MPa условљава избор додатног материјала мање јачине у односу на основни материјал, уз обавезно предгревање.

У индустрији се нешто више примењују нормализовани челици са напоном течења: 275 MPa (S275N); 355 MPa (S355N); 420 MPa (S420N) и 460 MPa (S460). Гарантована ударна жилавост је до -20°C , односно до -50°C уколико постоји додатна ознака L иза ознаке N. Са ознаком M и ML, у истим класама јачине и ударне жилавости на ниским температурама, производе се и термомеханички обрађени челици.

Поред горенаведених побољшаних челика широку примену имају и: амерички T1 челик, као и шведски Weldox, Hardox, Armoх, Domex, ...

3. ОЦЕНА ЗАВАРЉИВОСТИ ЧЕЛИКА ПОВИШЕНЕ ЈАЧИНЕ

3.1. Појам и дефиниција заварљивости

Појам заварљивости представља комплексну технолошку карактеристику материјала којом се пре свега изражава утицај процеса заваривања на заварени спој и његово понашање у топлотном и деформационом смислу у току и после заваривања. Према томе, може се рећи да заварљивост одређује релативну способност материјала да ствара заварене спојеве одабраном технологијом заваривања, а да при томе изведени спојеви одговарају свим захтевима који се од њих траже у различитим радним условима. Ти захтеви се односе на то да испуњавају техничке услове, који се односе на механичке, структурне и хемијске особине метала шавова и зоне око шавова, као и споја у целини.

Најраспрострањенија дефиниција заварљивости Међународног института за заваривање (IIW) гласи:

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

С обзиром на то да је заварљивост комплексан појам, у циљу олакшавања проучавања и оцене погодности материјала за одређене заварене конструкције неопходна је подела заварљивости на уже појмове. Према тој подели посебно се разматрају:

- Металуршка,
- Конструкциона и
- Технолошка заварљивост.

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

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

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

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

Као “добро заварљиви” материјали, из оперативног аспекта који се односи на понашање неких материјала у току процеса заваривања или наваривања, оцењују се само они код којих се добија шав који је чист и хомоген, тј. када се основни и додатни материјал стапају у хомогену легуру без тешкоћа, претераног прскања, појаве прслина, гасних мехурова и других грешака. На оперативну заварљивост утичу и нечистоће на страницама жлеба и у околини, као што су прљавштине, масти и уља, коварина и тсл., због чега је неопходно одстранити све наведено из зоне топљења у току припреме за заваривање.

Општа заварљивост представља глобалну оцену појединачно објашњених компонената заварљивости, при чему се за глобалну оцену процењује већи број фактора, нпр.: основни и додатни материјал, вештина заваривача, врста напрезања у шавовима и у близини концентратора напона. При процени склоности завареног споја ка кртом лому, веома је битно утврдити да ли је спој способан да све сопствене велике напоне поништи или смањи пластичним деформисањем, односно да еластичне деформације претвори у пластичне.

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

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

Само неке промене које настају у горенаведеним зонама могу се непосредно запазити, док се о већини закључује на основу резултата добијених испитивањима на већ изведеним пробним спојевима. На основу тих резултата оцењује се склоност материјала ка образовању прслина, склоност према кртом лому, старење и тсл. Према томе, може се закључити да је при заваривању одређеног материјала неопходно утврдити следеће:

- како се материјал понаша за време заваривања усвојеним технолошким поступком и
- како се материјал понаша у тешким условима заваривања.

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

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

Општи смисао сваке дефиниције заварљивости јесте да су непотпуне и неподобне за праксу што наводи на даља истраживања заварљивости, посебно из аспекта поузданости, јер је заварљивост комплексан појам који зависи од материјала и његовог понашања у току и после заваривања, од технолошког поступка заваривања, као и од врсте заварене конструкције. За оцену заварљивости треба увек узети у обзир узајамну везу конструкције (крутост, дебљина, врста споја), материјала (способност заваривања) и технологије (могућност заваривања). Због повезаности ових чинилаца немогуће је заварљивост оценити само једном врстом практичних проба заварљивости, те се за челике уводе допунски показатељи који се односе на:

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

Два најзаступљенија приступа оцене заварљивости у пракси су:

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

Практичним пробама могу се одредити поједини видови заварљивости којима се оцењује подобност испитиваног материјала и одабране технологије.

Најважнији критеријум за оцену заварљивости представља одржавање металног континуитета, тј. целовитости завареног споја, што може бити нарушено кад год се појаве прслине одређене величине и распореда.

Прслине могу бити:

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

Поред критеријума целовитости, битне су и граничне механичке особине:

- тврдоћа завареног споја (укључујући МШ, ЗУТ и ОМ),
- својства отпорности и
- ударна жилавост (укључујући МШ, ЗУТ и ОМ).

3.2. Проблеми заварљивости С-Мн челика

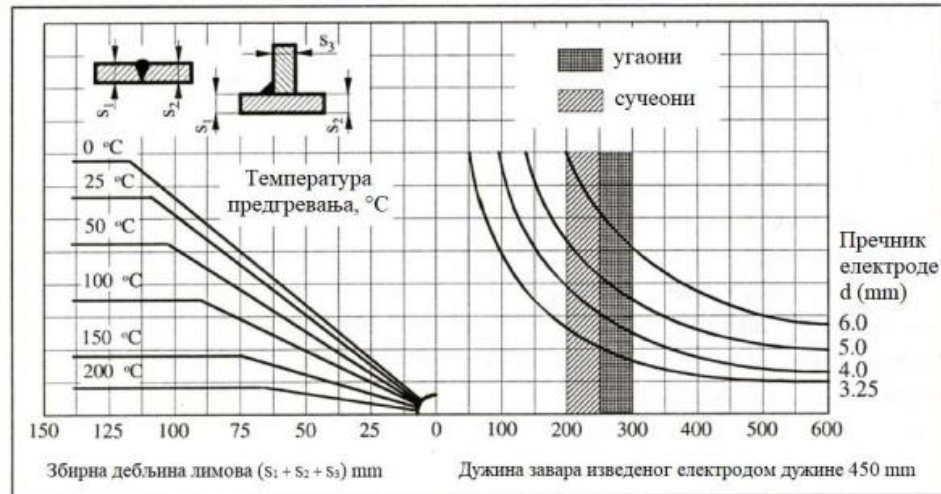
Као добро заварљиви С-Мн челици, без предгревања, сматрају се челици са еквивалентним угљеником $CE < 0.45\%$, дебљине $s < 25 \text{ mm}$. Веће дебљине, као и заваривање на сниженим температурама захтевају предгревање и заваривање кратким заварима. Еквивалентни угљеник може се израчунати према следећем изразу:

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

Могућност појаве хладних прслина представља главни проблем при заваривању ових челика, јер се перлит изнад A_{C1} температуре трансформише у аустенит, а он се при брзом хлађењу ЗУТ-а трансформише у мартензит.

Из тог разлога неходно је предгревање (потпуно или локално) уз заваривање са што већим уносом топлоте и мањим садржајем дифундованог водоника (РЕЛ метод са базичним сушеним електродама).

Температура предгревања углавном се одређује методом Сеферијана, помоћу дијаграма приказаног на слици 3.1, као и према препорукама произвођача челика.



Слика 3.1 Дијаграм за избор температуре предгревања C-Mn челика, РЕЛ методом, базичним електродама

Температура предгревања за условно заварљиве челике према Сеферијану израчунава се преко следећег израза:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{[C] - 0,25}, ^\circ\text{C},$$

где је $[C]$ укупни еквивалентни угљеник који је Сеферијан увео зато што дебљина завариваних делова утиче на брзину хлађења, а тиме и на појаву прслина. Укупни еквивалентни угљеник израчунава се према:

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

а $[C]_h$ према:

$$[C]_h = C + \frac{Mn + Cr}{9} + \frac{Ni}{18} + \frac{7 \cdot Mo}{90},$$

где је s - дебљина основног материјала у mm .

Уколико се за одређивање температуре предгревања користи дијаграм приказан на слици 3.1 полазни подаци су тип споја, дебљине плоча и одговарајући пречник базичне електроде.

На основу технолошких параметара заваривања потребно је усвојити или израчунати дужину заваре l . Та дужина израчунава се по формули:

$$l = 0.04 \cdot \frac{N_3^2 + k_2 + q^2}{s^2 \cdot v_z \cdot (T_w \cdot T_o)^2}, cm,$$

где је: K_2 - коефицијент непрекидности лука, ($K_2 \text{ REL} = 0.6 \div 0.8$),

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

N_3 - фактор облика споја, (за сучеоне спојеве $N_3 = 0.8$), $q = U \cdot I \cdot \eta$, J/s – ефективна моћ лука.

Како би се избегло рачунање, у пракси се углавном користе препоруке, тако да се код сучеоних спојева препоручује дужина зава $l = 200 \div 250 \text{ mm}$, а код угаоних $l = 250 \div 300 \text{ mm}$.

Израчунавање времена хлађења између 800 и 500°C ($t_{8/5}$) и његово уношење у дијаграм континуалног хлађења (KNZ) за дати челик, изводи се у циљу провере да ли усвојени технолошки параметри заваривања дају потребну структуру и механичке особине (оптимална жилавост и одговарајућа тврдоћа).

3.3. Проблеми заварљивости микролегираних челика

Заварљивост микролегираних челика зависи од склоности ка појави хладних прелина, која се процењује на основу еквивалентног угљеника, дебљине и типа споја. Појава хладних прелина спречава се предгревањем које утиче на образовање најповољније структуре у ЗУТ-у, смањење заосталих напона и количине дифундованог водоника из шави у ЗУТ. Температура предгревања, која је повезана са најмањом вредношћу међуслојне (међупролазне) температуре одређује се према дијаграму на слици 3.1 или помоћу познатих параметарских једначина.

Дужина зава која се уноси у дијаграм (сл. 3.1) одређује се према истој једначини као и за С-Мп челике, где је $T_w = 60 \div 200^\circ\text{C}$ температура највероватније појаве хладних прелина.

Заварљивост микролегираних челика са садржајем $0.1\text{--}0.18\%$ С; $1.0\text{--}1.6\%$ Мп; $0.025\text{--}0.095\%$ Nb може се проценити на основу формуле за еквивалентни угљеник:

$$CE = C + \frac{Mn}{10} + 3 \cdot N_b, \%$$

За микролегиране челике са додатком ванадијума и азота заварљивост се може проценити према:

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

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

3.4. Проблеми заварљивости нисколегираних челика повишене јачине

3.4.1. Бејнитни челици

Проблеми при заваривању ових челика произлазе из њихове склоности ка хладним прелинама и паду жилавости у ЗУТ-у. То се решава смањењем брзине хлађења после заваривања што се постиже предгревањем или повећањем уноса топлоте.

3.4.2. Нисколегирани побољшани челици

Повољне механичке особине нисколегираних побољшаних челика постижу се оптималном термичком обрадом, тако да је јасно да ће се те особине мењати услед дејства температурских циклуса при заваривању. Према томе, за избор термичког режима заваривања није довољно узети у обзир само хемијски састав, већ се мора размотрити и чињеница да су корисне особине ових челика постигнуте и термичком обрадом побољшања.

Због тога се за сваки челик ове класе мора дефинисати опсег варирања брзине хлађења, одакле произлазе граничне вредности уноса топлоте и време задржавања ЗУТ-а изнад A_{C3} температуре.

Код побољшаних челика, за разлику од од других челика повишене јачине, бољи резултати постижу се применом метода заваривања са мањим уносом топлоте, нпр. РЕЛ метод и заваривање у заштити гасова.

Ограничење минималне погонске енергије примењује се у циљу спречавања хладних прслина, док се максимална погонска енергија као и време задржавања изнад A_{C3} ограничава како би се пад јачине, тј. тврдоће у делу ЗУТ-а свео на најмању могућу меру. Гранична препоруке за погонску енергију при РЕЛ заваривању је $8 \div 12 \text{ kJ/cm}$, док је за ЕПП метод $13 \div 30 \text{ kJ/cm}$.

3.5. Параметарске једначине за оцену склоности челика ка хладним прслинама

С обзиром на то да су челици повишене јачине при заваривању склони појави хладних прслина корисно је дати једначине које се примењују за оцену њихове склоности ка хладним прслинама.

Склоност ка хладним прслинама С-Мн челика, као и нисколегираних и микрелегираних челика са напоном течења $272 \div 870 \text{ МПа}$ оцењује се помоћу једначина које у обзир узимају хемијски састав основног материјала, садржај дифундованог водоника и крутост или дебљину завареног споја.

Према чешким ауторима дају се следеће једначине:

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

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

$$P_{CM} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn+Cu+Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Mo+V}{15} + 5 \cdot B,$$

где је:

$K = 70 \cdot s$ - фактор крутости сучеоних спојева,

s - дебљина завариваног материјала у mm и

H - садржај дифундованог водоника у металу шава у $cm^3/100 g$.

Уколико се добије $P_{hp} \leq 0.24$ заварени спој се може сматрати отпорним према хладним прслинама, а за вредности $P_{hp} > 0.24$ неопходно је предгревање на температури која се израчунава преко следећег израза:

$$T_p = 1600 \cdot P_{hp} - 308, ^\circ C.$$

Допуштена максимална брзина хлађења зависи од хемијског састава и дебљине завариваног челика, као и од садржаја водоника у растопљеном металу. Према јапанским ауторима, по аналогiji са формулом еквивалентног угљеника предложен је показатељ склоности нисколегираних челика ка појави хладних прслина:

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

где је: P_{CM} - показатељ којим се узима у обзир утицај хемијског састава челика и који се израчунава у зависности од процентуалног садржаја легирајућих елемената по формули:

$$P_{CM} = C + \frac{V}{10} + \frac{M_o}{15} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Ni}{60} + 5B, \%$$

s - дебљина челика у mm ,

H – количина дифундованог водоника у $cm^3/100 g$.

При заваривању челика повишене јачине дијапазон промене P_{CM} је у границама $0.25 \div 0.50$, тако да се одговарајућа температура предгревања у зависности од P_{CM} са довољном тачношћу може описати једначином:

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

Одсуство хладних прслина није увек и довољан услов за добијање заварених спојева високог квалитета. Веома је битно задржати и механичке особине завареног споја у целини.

При заваривању челика повишене јачине треба познавати минималну и максималну допуштену брзину хлађења (v_{hmin} и v_{hmax}) метала око зоне шава, полазећи од величине жилавости, која се нормативно прописује за одговарајући тип споја. Познавањем ових брзина хлађења могуће је одредити оптималан режим заваривања у погледу отпорности према хладним прслинама, као и очувања механичких особина изведених спојева (HV, KCV). Тако, за нисколегиране челике ($0.19 < P_{CM} < 0.31$), та брзина износи $v_{hmin} = 0.8 \div 3.5 ^\circ C/s$, која расте са повећањем степена легирања челика. За корелацију између брзине v_{hmin} при којој се гарантује ударна жилавост при $-40^\circ C$ на нивоу захтева за основни метал и показатеља P_{CM} установљен је следећи израз:

$$v_{hmin} = -3.1 + 19.2 \cdot P_{CM}, ^\circ C/s.$$

Поред ове једначине која не садржи директно брзину хлађења која је битан фактор за појаву хладних прслина, Мајнер (Maunier) је извео израз за критичну брзину хлађења на $300^\circ C$ (v_{kr}):

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

где је:

$$k = 3.38 - \text{за дебеле лимове } (s \geq s_{gr});$$

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

Поређењем критичне брзине хлађења (v_{kr}) са стварном брзином хлађења при 300°C (v_{300}) може се закључити која ће се структура образовати у завареном споју. Тако ће се за $v_{300} > v_{kr}$ образовати мартензитна структура, а за $v_{300} < v_{kr}$ мешовита мартензитно-бејнитна или чисто бејнитна структура.

Стварна брзина хлађења при 300°C одређује се према следећем изразу:

$$v_{300} = \left(\frac{122 \cdot q_l}{10^6 \cdot N} + 0.05 \right)^2, ^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1},$$

где је:

q_l - погонска енергија заваривања у J/cm ,

$q_l = \frac{8 \cdot s}{25.4}$ - за сучеони (двотермални) спој,

$q_l = \frac{12 \cdot s}{25.4}$ - за угаони (тротермални) спој,

s - дебљина лима у mm .

На основу односа v_{300}/v_{kr} , садржаја дифундованог водоника и крутости завареног споја произлази следећа параметарска једначина:

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

где је:

H - садржај дифундованог водоника, $\text{cm}^3/100 \text{ g}$,

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

s - дебљина завариваних делова (обично $s = 5 \div 50 \text{ mm}$)

За $P_s < -0.5$ прслине се неће појавити, док је за $P_s = 0.3$ вероватноћа њихове појаве 50% и за $P_s > 1.0$ прслине увек настају.

Уколико 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 неће појавити хладне прслине. Ако се даље повеже ова брзина са изразима $v_{300} = f(q_l, T_0, H)$, може се одредити оптимална погонска енергија, а тиме и параметри заваривања.

Температура предгревања која је одређена на неки од претходно описаних, или других начина, за челике повишене јачине не би требала да буде виша од температуре почетка разлагања потхлађеног аустенита ($T_p \leq M_s$).

У супротном, могле би се појавити вруће (ликвационе) прслине. Ако се за основни материјал располаже дијаграмом континуалног хлађења (КН, КНЗ), температура предгревања за челике повишене јачине може се израчунати преко следећег израза:

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

Ако је прорачунска температура виша од 300°C или виша од M_s температуре за дати челик, дати спој и усвојену технологију заваривања морају извести технолошке пробе за оцену склоности ка хладним прслинама.

4. ПАНЦИРНИ ЧЕЛИЦИ

Примењују се за израду заварених оклопних конструкција које су оптерећене на повремене ударе пројектила као што су борбена возила, средства наоружања и остала војна опрема. Савремена борбена возила и средства наоружања морају имати изванредне тактичко-техничке и борбено-експлоатационе карактеристике у свим условима употребе, а то су: висока покретљивост и носивост, захтевана ефикасност дејства, сигурност и поузданост, мала маса и дуг век трајања.

Панцирни челици су једни од материјала који се у војној индустрији користе јер се њиховом применом могу остварити захтеване карактеристике. Спадају у групу нисколегираних побољшаних челика повишене јачине и одликују их: висока пластичност, жилавост, тврдоћа, отпорност према лому у статичким и динамичким условима, корозивна постојаност и отпорност према корозионом замору, напонској корозији и интеркристалној корозији. Поред тога, ови челици морају имати што је могуће мању масу и да су технолошки погодни за обликовање и заваривање. Јасно је да наведени скуп међусобно противуречних својстава није могуће постићи применом једног материјала, па се морају користити метали и легуре, као и одговарајуће технологије којима се постиже оптимална комбинација својстава погодна за различите намене.

Добијена својства су последица структуре, док је она последица, како хемијског састава, тако и производног процеса ових челика. Добра заварљивост произлази из тога што су развијени тако да имају низак садржај угљеника, али без губитка наведених повољних особина захваљујући термомеханичкој обради (ТМО).

Мобилност и заштита одувек су постављали одређене захтеве за оклоп. Наиме, мобилност захтева што је могуће лакши оклоп, док се заштита повећава са повећањем масе оклопа смањујући мобилност борбеног возила. Поред тога, напредак у развоју противоклопних средстава и њихових перформанси пробојности такође је захтевао дебљи оклоп, али стални развој у домену материјала и њихових заштитних својстава поново доводи до смањења масе оклопа.

Релативна ефикасност оклопне заштите може се оценити методом која се заснива на упоређивању површинске масе (маса/јединична површина) челичног оклопа одређеног нивоа заштите од дејства изабраног пројектила са површинском масом одређеног типа оклопа истог нивоа заштите. Тај однос назива се масена ефективност (МЕ). Сва претходно наведена проблематика подстиче иновативност и креативност металурга из ове области у циљу сталног развоја ових челика и њихових заштитних својстава.

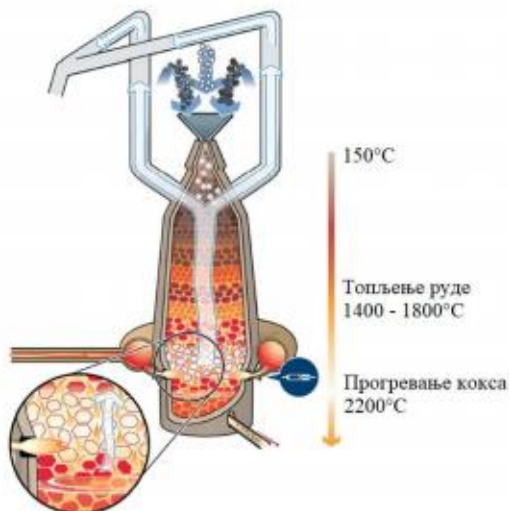
Истраживања и развој у области оклопних челика, нераздвојни су део процеса развоја будућих система борбених возила од којих ће се захтевати све боље перформансе.

Како изгледа комплетан процес производње челика повишене јачине може се видети на слици 4.1 која је приказана у наставку.



Слика 4.1 Схематски приказ процеса производње челика повишене јачине

Панцирни челици повишене јачине добијају се строго дефинисаним металуршким процесима из руде гвожђа, која се у високој пећи (сл. 4.2) топи и ослобађа од кисеоника како би се произвело сирово гвожђе. Ослобађање кисеоника из руде гвожђа постиже се загревањем руде и кречњака (CaCO_3), деловањем редукционог агенса, тј. супстанце која се везује за ослобођени кисеоник, као и додавањем одређених адитива за поспешивање процеса. Као средство за загревање високе пећи користи се углавном кокс.



Слика 4.2 Упростићени приказ високе пећи

Када се руда гвожђа растопи и редукује, течно сирово гвожђе пада на дно пећи где се скупља и излази кроз отвор који се налази на самом дну пећи. На сваких 4-5 h из високе пећи се излије по 400-500 t сировог гвожђа које садржи: 4-5% C; 1.5% Si; 1.0% Mn; 0.60% P; 0.10% S и остало Fe.

На сваку тону произведеног сировог гвожђа добија се и тона споредног производа-шљаке (згура састава SiO_2 , CaO , Al_2O_3 и др.). Шљака настаје тако што се кречњак, који делује као топитељ, помеша са гвозденим рудом, веже за јаловину (земља и различити минерали који су садржани у руди) и снижава температуру топљења везаних нечистоћа, што омогућава да нечистоће испливају изнад течног метала.

Течно сирово гвожђе се по изливању из пећи торпедо вагонима великом брзином превози до LD конвертора (сл. 4.3) у коме се пречишћава и снижава садржај угљеника са 4-5% на 1.7-1.5%.



Слика 4.3 Упроишћени приказ LD конвертора

У LD конвертору кроз цев са његове горње стране удувава се кисеоник под притиском директно у течно сирово гвожђе, чиме се температура подиже на 1600°C те кисеоник реагује са угљеником, силицијумом и другим елементима. Поред тога, додаје се кречњак (топитељ) који се везује са силицијумом и другим елементима и ствара шљаку, као и 30% челичног отпада.

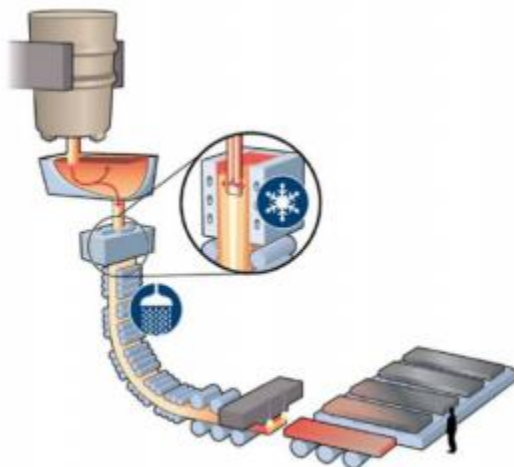
После одређеног времена додају се легирајући елементи и обавља брза хемијска анализа, како би се добио челик траженог хемијског састава. Овај процес се назива базни кисеонички процес или LD-поступак који се све више примењује у челичанама због високе продуктивности уз ниску цену постројења. По завршетку LD поступка течно сирово гвожђе се пребацује у ливачки лонац (сл. 4.4) у коме се у условима строго контролисане температуре и са високом прецизношћу додају легирајући елементи и адитиви.

Да би се постигла одговарајућа чистоћа челика, цео процес се одвија у вакуумској атмосфери, нарочито због водоника који неповољно утиче на својства челика.



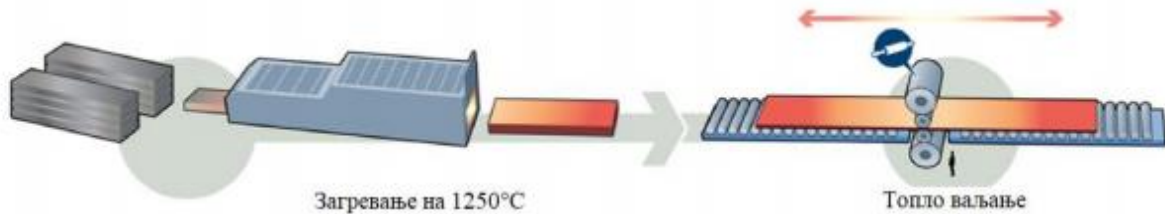
Слика 4.4 Схематски приказ ливачког лонца

Следећа фаза у производњи ове групе челика је континуално ливење (сл. 4.5) које се обавља тако што се при температури од 1600°C растопљени метал лије у посуду, из које се даље лије у отворени калуп који се хлади водом која протиче кроз његове зидове. На тај начин долази до отврдњавања површинског слоја плоче при температури ливења од 1540°C после чега следи непрекидно хлађење водом све док се не окали. После гасног сечења плоча добијених ливењем добијају се полупроизводи, тзв. инготи који су и даље ужарени али су у чврстом стању при 1000°C .



Слика 4.5 Схематски приказ континуалног ливења, хлађења и гасног сечења

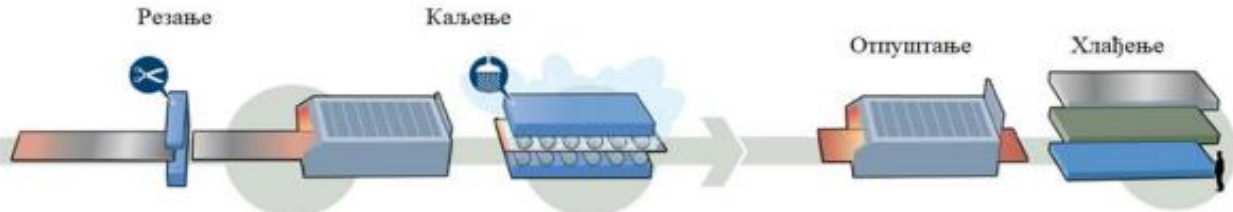
После хлађења ингота на мирном ваздуху и чишћења њихових површина, у циљу добијања жељених механичких својстава обавља се термомеханичка обрада. Термомеханичка обрада подразумева прво топло деформисање ваљањем на температури од 1250°C помоћу железарских ваљака (сл. 4.6).



Слика 4.6 Схематски приказ поступка топлог ваљања челика

Одмах после ваљања на топло, следи резање на димензије које ће после термичке обраде дати захтеване димензије за испоруку (сл. 4.7). Термичка обрада под називом побољшање укључује каљење и високо отпуштање ради добијања најповољнијег односа тврдоће и жилавости, које су у многим случајевима у супротности (висока тврдоћа, мала жилавост и обрнуто).

У овом случају, каљење се обавља хлађењем из аустенитног подручја брзинама од 1000°C/s , млазом воде под притиском, после чега следи накнадно отпуштање на температурама $200\text{--}500^{\circ}\text{C}$ са хлађењем на ваздуху (сл. 4.7). Површинска заштита премазима представља завршну операцију пре испоруке (сл. 4.8).



Слика 4.7 Схематски приказ поступка резања, каљења и отпуштања челика



Слика 4.8 Површинска заштита челика

Будући да су оклопни челици осетљиви на концентраторе напона (оштри прелазни, неметални и метални укључци), при производњи је неопходно пазити на чистоћу челика.

4.1. Утицај легирајућих елемената

Панцирни челици спадају у групу легираних челика који поред компоненти Fe, C и примеса, садрже и намерно додате хемијске елементе, који да би се сматрали легирајућим, тј. да имају утицај на својства челика, морају имати масени удео у хемијском саставу приказан у табlici 4.1.

Таблица 4.1. Граница између примесе и легирајућег елемента за поједине хемијске елементе

Легирајући елементи	Mn	Si	Ni	V	Cr	W	Mo	Ti	Al	Co	Cu	Zr, Nb, B, N, Pb
% > од	0.80	0.60	0.30	0.01	0.30	0.10	0.08	0.05	0.10	0.10	0.04	Нема података

Већина елемената, наведених у горњој табlici, са гвожђем образују супституцијске чврсте растворе (Ni, Si, Mn, Cr, V, W, Ti, Nb, Al), док се бор (B) и азот (N) интерстицијски растварају у гвожђу, а Cu и Pb у челику остају у елементарном облику.

Челици са само једним легирајућим елементом зову се једноструко легирани, а уколико имају више легирајућих елемената називају се вишеструко легирани челици. Челици који садрже до 5% легирајућих елемената зову се нисколегирани, а са више од 5% зову се високолегирани.

Микроструктура и особине нисколегираних панцирних челика, у које спада челик ARMOX 500T који ће се у овом раду посебно разматрати, последица су, како производног процеса, тако и хемијског састава. Различити легирајући елементи додају се челику у циљу остваривања различитих својстава.

Процес легирања веома је комплексан, јер легирајући елемент може побољшавајући једно, да погорша друго својство. Због тога, потребно је одабрати састав који даје оптималну комбинацију својстава за одређену намену. Поред тога, у обзир је неопходно узети и цену, а избор челика треба усмерити на најјефтиније решење са одговарајућим својствима.

Типични хемијски елементи из хемијског састава ове групе челика и њихови утицаји на својства челика су следећи:

- **Угљеник (C)** има највећи утицај на структуру челика, а тиме и на механичке и технолошке особине (уједно је компонента у челику). Са порастом садржаја угљеника повећава се јачина на кидање, напон течења и прокаљивост, а смањује се жилавост и погоршава заварљивост, док се структура у челику мења од феритне, феритно-перлитне, перлитне до перлитно-цементитне. Његов масени удео у челику креће се од неколико стотих делова % до 2.11%.

• **Сумпор (S) и фосфор (P)** се у челику налазе као штетне примесе које потичу из руда гвожђа и из железарског или ливачког кокса. Повишен садржај сумпора погоршава жилавост, ковност, заварљивост, отежава дисперзију преципитата што се може умањити повећаним садржајем мангана који везује сумпор у MnS , температуре топљења $T_t = 1620^\circ C$, те један део овог сулфида као лакши испливава на површину растопа, а преостали део се задржава у челику у виду ситних укључака. Фосфор доспева у челик из руде гвожђа и у њему погоршава жилавост, повећава прелазну температуру и изазива прслине при собној температури. Због његове склоности ка сегрегацији неповољно утиче на заварљивост.

• **Силицијум (Si)** повећава тврдоћу, напон течења и јачину на кидање, а смањује истегљивост и жилавост. Има велики афинитет према кисеонику због чега се употребљава као дезоксидатор. Подиже критичне преображајне тачке челика те повећава прокаљивост, смањује критичну брзину хлађења и отежава дифузију угљеника при цементацији.

• **Манган (Mn)** се супституцијски раствара у фериту, тако што замењује атоме Fe у елементарној решетки гвожђа чиме се повећава напон течења и јачина на кидање. Поред тога, повећава тврдоћу и жилавост, а смањује еластичност. Стална је примеса у челику и до 1.5% не утиче битно на наведена својства. Због великог афинитета према кисеонику користи се као дезоксидатор. Додаје се челицима од којих се захтевају посебна физичка и хемијска својства, као и челицима од којих се захтева висока отпорност на хабање. Због снижавања температуре преображајних тачака, повећава осетљивост перлитних челика на брзину хлађења. Челици који у свом саставу имају висок садржај мангана осетљиви су на прегревање због брзог раста зрна при високим температурама. Помаже стварање сложених карбида.

• **Хром (Cr)** је карбидотворни елемент који учествује у стварању специјалних карбида. Са порастом садржаја Cr расте прокаљивост, а погоршава се заварљивост. Повећава ватропостојаност аустенитних челика у оксидационим условима (CO , H_2O , SO_2 , CO_2), али је мање ефикасан од Mo и V. Подиже температуру A_{C1} што успорава растварање Cr-карбида у аутениту, па је за каљење ових челика потребна виша температура и дуже прогревање него код угљеничних челика како би се добио хомогени аустенит.

• **Никл (Ni)** растворен у фериту повећава јачину, а задржава добру жилавост и истегљивост. Делује као графитизатор (разлаже Fe_3C) па се челици који у свом саставу имају повећан садржај никла производе са мање угљеника. Снижава критичну брзину хлађења и тиме повећава прокаљивост челика. Из тог разлога никлови челици су погодни за израду великих делова, који се термички обрађују побољшањем. Никл је погодан код челика који су намењени за рад на хладно (криогена техника), јер омогућава поуздан рад и на температурама до $-200^\circ C$.

• **Молибден (Mo)** представља један од најјачих карбидотворних елемената. У конструкционим челицима 0.20-0.50% Mo доприноси уситњавању металних зрна што доводи до повећања жилавости и прокаљивости, тврдоће, напона течења и јачине на кидање.

• **Бор (B)** је карбидотворни елемент који знатно повећава прокаљивост челика, чак и при веома малом садржају (0.003%). Челику се додаје у веома малим количинама (0.0005-0.003%), јер у већим количинама узрокује пад жилавости. Смањује затезну јачину и повећава пластичност челика код прераде на топло. Повећава отпорност на старење,

нарочито аустенитних челика. Помера температуре преображајних тачака ка нижим вредностима. Спада у легирајуће елементе који проширују γ -област, те у аустенитним челицима повећава термостојаност тако што ојачава границе зрна.

4.2. Опште напомене о заварљивости панцирних челика

Заваривање и заварљивост панцирних челика представљају главни проблем при њиховој употреби. Заваривање ових челика је сложен процес при коме се мора обратити пажња на више утицајних фактора који су често у комплексној међусобној релацији, пре свега због начина производње, легирајућих елемената, као и механизма ојачања који се у њима јављају. При заваривању конструкција од овог челика потребно је строго пратити упутства произвођача и стручњака из ове области. Будући да су прилично осетљиви на појаву хладних прслина, неопходно је предгревање делова који су намењени за заваривање уз специјално прописану технологију заваривања.

Главни узрок настанка хладних прслина представља дифундовани водоник који у метал шава доспева из облоге електроде, заштитног гаса, заштитног праха и из нечистоћа као што су влага, корозија, масноћа и тсл. Тај проблем решава се предгревањем спајаних делова или избором додатног материјала којим се смањује садржај дифундованог водоника у металу шава.

Осим балистичких својстава, која представљају главни критеријум при одабиру материјала за сврхе у којима се користе панцирни челици, у обзир се узимају још два фактора: микроструктура ЗУТ-а и оптимална механичка својства метала шава. У току заваривања у ЗУТ-у се мења микроструктура услед уноса топлоте. Наиме, у непосредној близини растопљеног метала шава загревање основног материјала је велико, изнад A_3 температуре, а у том температурском подручју долази до раста зрна што доводи до повећања кртости. Даље од ЗУТ-а температура је нижа, а уколико је већа од A_1 долази до пада тврдоће.

Превелики унос топлоте при заваривању доводи до таложења карбида, карбонитрида, а у исто време и до додатног жарења основног материјала коме због тога опада тврдоћа, као и до повећања ЗУТ-а. Уколико је количина топлоте мања од оптималне постоји опасност од недовољног стапања метала шава у основни материјал. Унос топлоте произлази из параметара заваривања (јачина струје I , напон U , брзина додавања жице/брзина заваривања v_z) који се бирају у зависности од дебљине или врсте основног материјала.

Правилан избор параметара представља основу пројектовања оптималне технологије заваривања. Из процеса производње панцирних челика и њиховог балансираног хемијског састава произлази структура коју је немогуће добити у завареном споју. Из тог разлога, за заваривање панцирних челика користе се додатни материјали који имају већи садржај легирајућих елемената у односу на основни материјал, јер у металу шава постоје само два механизма ојачања: ојачање таложењем и ојачање очвршћавањем растопа метала шава. Да би метал шава имао одговарајућа својства, неопходно је узети у обзир хемијски састав и степен мешања основног и додатног материјала, као и брзину хлађења.

Произвођачи додатних материјала развијају њихов хемијски састав и одговарајућим испитивањима одређују механичка својства за чист метал шава која су прописана

стандардима за додатне материјале, тако да својства завара добијена овим испитивањима нису упоредива са стварним својствима завара.

Наиме, у стварним условима заваривања, заварени спој се добија мешањем основног и додатног материјала после чега се због њихове различитости, испитују механичка својства добијеног завареног споја, а ти резултати представљају главни показатељ квалитета завара. Стога се јасно може закључити да се механичка својства завареног споја знатно разликују од оних које произвођач додатних материјала декларише. Према томе, потребно је посебну пажњу обратити на степен мешања који зависи од одабране методе заваривања, као и њених параметара (I, U, v_z).

4.3. Заваривање панцирних челика

Захтеви за заварене спојеве панцирних челика, прописани према стандардима MIL-A46100 и SD-X12140, могу се сврстати у три групе: квалитет завареног споја, захтев механичких особина као и експлоатационим особинама.

Код процеса заваривања панцирног челика неопходно је строго поштовање прописане процедуре. Највећа опасност је од прслина изазваних водоником које настају уз линију стапања основног и додатног материјала. Услед уноса топлоте дешава се пад тврдоће у ЗУТ-у, и појава порозности у зони метала шава. Да ли ће се прслина изазвана водоником појавити зависиће од различитих фактора као што је тврдоћа основног материјала, од врсте и величине заосталих оптерећења, затим од брзине дифузије водоника кроз метал шава као и од количине водоника који улази у метал шава.

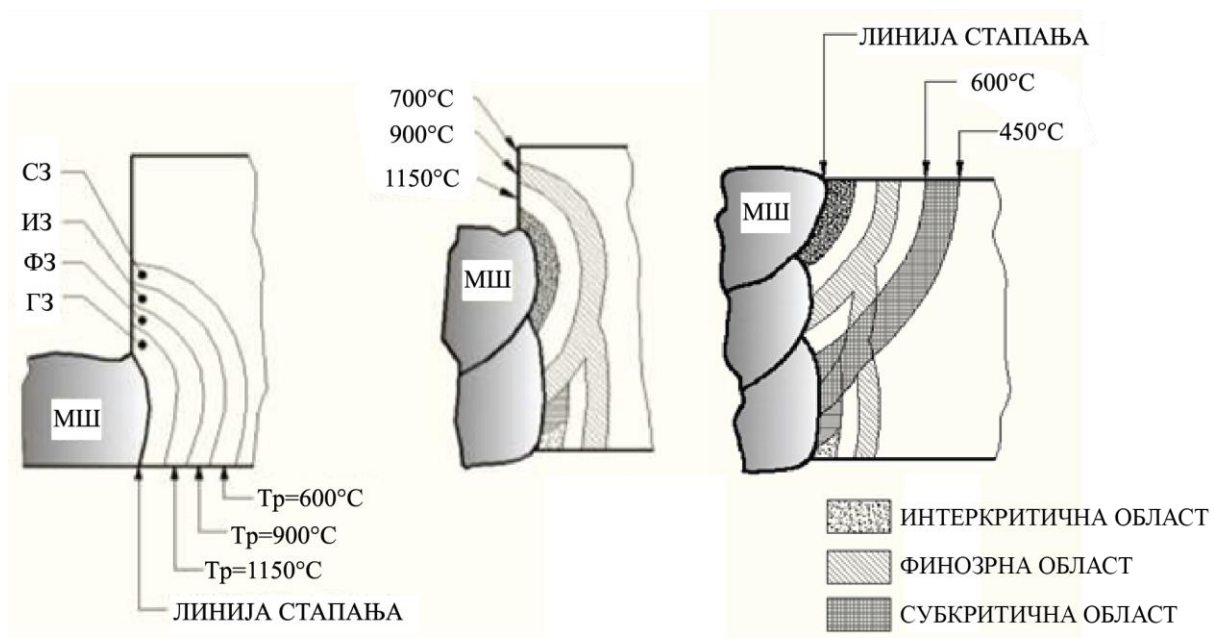
Најчешће су у употреби панцирне плоче дебљине веће од 6 mm. Код ових дебљина примењује се вишепролазно заваривање. Сваки следећи пролаз проузрокује нови унос и предају топлоте на додатни материјал претходног пролаза што утиче на промену структуре и особине ЗУТ-а. Као резултат уноса топлоте у току процеса заваривања настају различите структурне промене, што има за последицу хетерогеност механичких и металуршких особина у ЗУТ-у и у металу шава. Сваки топлотни циклус одликује се максималном температуром загревања и временом хлађења у температурном интервалу, који је код панцирног челика од 600 до 200°C, ($\Delta t_{6/2}$). Поједине зоне основног материјала су интензивније изложене променама структуре услед поновљеног уноса топлоте.

Грубозрна област ЗУТ-а је најкритичнија код конструкционих челика. Познавање промена тврдоће и микроструктуре код вишепролазног заваривања у грубозрној области је важно из угла сигурности конструкције. Грубозрна област код другог и осталих пролаза се може поделити на више под зона:

- Непромењена грубозрна зона,
- Зона са максималном температуром изнад A_{C3} а испод 1200°C,
- Зона са максималном температуром између A_{C1} и A_{C3} – интеркритична зона,
- Зона са максималном температуром испод A_{C1} – субкритична зона.

Грубозрна област и његове промене под дејством различитих нивоа температурних циклуса, приказани су на слици 4.9.

- Када се грубозрна област поново загреје на температурама изнад 1200 до 1420°C, после хлађења у овој области ће остати грубозрно. Ова зона се зове непромењена грубозрна област.
- У зонама загрејаним на температурама од 900 до 1200°C, долази до нормализације. Грубозрно ће у овим зонама топлотних деловања, трансформисати се у финозрно.
- У зони загрејаној интеркритички, доћи ће до делимичне трансформације $\alpha \rightarrow \gamma$. Аустенит настаје дуж граница примарног аустенитног зрна или унутар пакета бејнита. Аустенитна острва су обogaћена угљеником, али нема времена за дифузију растворених елемената, те се при хлађењу стварају честице секундарне фазе.
- Грубозрна област загрејана температуром испод A_{C1} се практично не мења.



Слика 4.9 Схеми микроструктуре зоне утицаја топлоте код: а) једнопролазно, б) двопролазно, в) четворопролазног заваривања

СЗ- субкритична зона

ИЗ- интеркритична зона

ФЗ- финозрна зона

ГЗ- грубозрна зона

Финозна, интеркритична и субкритична област, загрејана интеркритичном температуром.

- У поменутих областима долази до интензивног издвајања карбида и карбонитрида зато што се раније није могло десити због брзог хлађења. Међутим, загревањем на високу температуру и брзим хлађењем се ствара метастабилно стање које повољно делује на процес издвајања при поновном загревању.

Финозна, интеркритична и субкритична област, загрејана субкритичном температуром.

- У зони које је загрејано на температуру испод A_{C1} не одвијају се структурне трансформације, нема ни модификације зрна. У зависности од тога да ли је максимална температура загревања ближа или даља од A_{C1} може доћи до смањења тврдоће услед отпуштања.

Омекшавање ЗУТ-а је неповољно и смањује отпорност на продирање зрна, међутим можемо очекивати побољшање жилавости ове зоне. Жилавост је важна особина услед ударних дејства која се одвијају код саобраћања војних оклопних возила.

Да би се смањио ризик од стварања прслине изазване водоником, а с обзиром да се КН дијаграм од панцирног до панцирног челика разликује, неопходно је наћи оптималне параметре процеса заваривања за дати панцирни челик. Осим задатка да се добије заварени спој без прслина неопходно је постићи најмањи пад тврдоће у ЗУТ-у.

Мартензитни челици су раније заваривани конвенционалним електролучним поступком, пре свега због веће пенетрације и мешања са основним материјалом. Постоје неколико техника заваривања панцирног челика који се уобичајено користе:

- РЕЛ,
- МИГ и
- Хибридни ласер - МИГ поступак.

4.4. Механичке особине и анализа микроструктуре

Микроструктурне и механичке особине панцирног челика у било којој области ЗУТ-а су у функцији историје загревања и хлађења у датој тачки.

Технологија заваривања треба да буде тако прописана да су особине ЗУТ-а, сличне особинама основног материјала, да би се гарантовао интегритет конструкције и балистичка отпорност.

4.4.1. Тврдоћа

Тврдоћа у завареном споју панцирног челика је директно повезана са микроструктуром. Метал шава има нижу тврдоћу у односу на ЗУТ и основни материјал, због аустенитне микроструктуре. Тврдоћа у завареном споју панцирног челика није једнолика

већ се повећава постепено од локација близу линије стапања према основном материјалу. Након максимума у грубозрној области ЗУТ-а тврдоћа се смањује према основном материјалу. Смањење тврдоће се може објаснити деловањем температурског циклуса што резултује додатно отпуштање области која је већ окаљена и отпуштена.

Смањење тврдоће је мање код поступка заваривања који има нижи унос топлоте него код заварених спојева са већим уносом топлоте, као резултат разлике температурних циклуса. Контролисање нивоа тврдоће у ЗУТ-у, је важан аспект када се процењује ризик водоничне крости. Са већим присуством водоника и већом тврдоћом у ЗУТ-у, већа је и вероватноћа појаве водоничне крости.

Када се развија технологија заваривања, максимална тврдоћа добијена у ЗУТ-у је кључна за квалитет процедуре заваривања и избегавање водоничне крости. Такође постоји веза између тврдоће и жилавости завареног споја, због тога је потребно изабрати одговарајуће параметре заваривања, као и прилагођени хемијски састав додатног материјала према основном материјалу, да би се постигао најбољи компромис између ове две особине. Аустенитни додатни материјал заварен МИГ поступком има тврдоћу 261 HV, док феритни додатни материјал заварен истим поступком има већу тврдоћу која износи 311 HV. У већини истраживања феритни додатни материјал има тврдоћу од $\sim 320 \pm 20$ HV, док је тврдоћа аустенитног додатног материјала у износу од 220 ± 20 HV.

Висока тврдоћа челика је први и незаобилазни сегмент заштите оклопних војних возила и посаде. Разлог је спречавање уласка пројектила у унутрашњост возила. На основу клаузуле стандарда било који део површине на растојању од 15,9 mm према основном материјалу, мерено од средине метал шава, не сме да има тврдоћу мању од 477 HV (509 HV).

Ако тврдоћа пређе извесну границу, која зависи од садржаја дифундованог водоника, појавиће се прслине. Да би се избегле прслине у ЗУТ-у и металу шава, уведена је вредност граничне тврдоће, као веза између количине дифундованог водоника и дозвољене тврдоће. Гранична тврдоћа се може повећати са падом количине дифундованог водоника H_2 : (20 ml/100 g)→350 HV, (10÷20 ml/100 g)→375 HV, (5÷10 ml/100 g)→400 HV, (1÷5 ml/100 g)→450 HV. У зависности од услова заваривања, тврдоћа у грубозрној области може се достићи и вредности изнад 600 HV.

4.4.2. Затезне карактеристике

Затезна чврстоћа и напон течења код феритног додатног материјала износе ~ 850 MPa и ~ 830 MPa. Заварен спој феритног добијен РЕЛ поступком има већу затезну чврстоћу у односу на МИГ технолошки поступак.

Заварени спој аустенитног додатног материјала има ниже вредности затезних карактеристика у односу на заварени спој феритног додатног материјала, при чему је потребно нагласити да постоје разлике у затезној чврстоћи у зависности од технолошког поступка заваривања. Код завареног споја панцирног челика, оствареног МИГ технолошким поступком и аустенитним додатним материјалом су могуће ниске вредности затезне чврстоће од 571 до 600 MPa. Међутим у неким случајевима затезна чврстоћа са овом

комбинацијом технолошког поступка и додатним материјалом E312-16 износи и до 765 MPa.

Заварени спој панцирног челика остварен РЕЛ технолошким поступком и аустенитним додатним материјалом има затезну чврстоћу од 650 до 735 MPa. Затезна чврстоћа завареног споја се мења и различита је по областима ЗУТ-а, потом од врсте додатног материјала, конфигурације споја, димензија, садржаја угљеника и угљеничног еквивалента челика. Код каљених и отпуштених челика, максимална јачина и тврдоћа је на линији стапања, а минимална у финозрној области ЗУТ-а. У грубозрној области ЗУТ-а, је најмања дуктилност, затим она расте и максимална вредност дуктилности је у финозрној области ЗУТ-а, пре тога дуктилност полако опада до дела основног материјала.

Циљ испитивања јесте провера да ли заварени спој задовољава захтеве прописане стандардом за заварене спојеве панцирног челика. Према наведеном стандарду за феритни додатни материјал напон течења не сме имати вредност мању од 550 MPa, док је за аустенитни додатни материјал минимална затезна јачина 550 MPa.

4.4.3 Микроструктура и ширина ЗУТ-а завареног споја панцирног челика

ЗУТ област завареног споја панцирног челика се састоји од отпуштеног мартензита. Међутим, финоћа зависи од технолошког поступка заваривања и од врсте додатног материјала. Феритни додатни материјал има грубљу микроструктуру са отпуштеним мартензитом у односу на аустенитни додатни материјал.

Ширина интеркритична и субкритична област ЗУТ-а се добија са међупролазном и температуром предгревања од 200 и 25°C у односу на међупролазну и температуру предгревања од 120 и 80°C. Резултати металографије су показали да грубозрно подручје ЗУТ-а, има знатно већу количину мекших фаза (горњег и доњег бејнита) са међупролазном и температуром предгревања од 200 и 25°C, у односу на међупролазну и температуру предгревања од 120 и 80°C.

Са уносом топлоте од 0,86 kJ/mm, код плоча предгрејаних на 80°C, у грубозрној области ЗУТ-а, се може очекивати учешће горњег и доњег бејнита и плочица мартензита. Ферит је исто присутан у форми веома финих феритних плочица горњег бејнита. Ако је температура панцирне плоче 20°C и користи се исти унос топлоте, ферит ће нестати из грубозрне области ЗУТ-а.

Смањивање температуре предгревања утиче на формирање веће количине тврђих фаза док микроструктура постаје финија. Са смањивањем температуре предгревања количина мартензита се повећава на рачун бејнита.

5. ИЗБОР НАЈПОВОЉНИЈЕ ТЕХНОЛОГИЈЕ ЗАВАРИВАЊА ПАНЦИРНИХ ЧЕЛИКА (ARMOX 500 T)

Под технологијом заваривања подразумева се скуп операција које је потребно спровести да би се добио заварени спој који из техничко-технолошког аспекта испуњава све захтеве који су испред њега постављени. У те операције спада: избор основног и додатног материјала, припрема основног материјала, избор метода и параметара заваривања, и по потреби одређивање температуре предгревања основног материјала и начина накнадне термичке обраде завареног споја. Мана овог челика у погледу заваривања је ограничена и отежана заварљивост и заварљив је само уз примену посебних мера везаних за контролисани унос топлоте. Један од главних узрока великог броја грешака у завареним спојевима је неправилно прописана технологија заваривања.

Главни проблем који се односи на заварљивост овог челика, нарочито код делова веће дебљине, јесте могућност појаве хладних прслина. Тај проблем решава се контролисаним уносом топлоте, предгревањем, поштовањем прописане међупролазне температуре, догревањем и по потреби накнадном термичком обрадом, а у случају РЕЛ заваривања неопходно је применити базичне сушене електроде, или уопштено речено применити методе заваривања који гарантују да садржај водоника буде $\leq 5 \text{ ml}/100 \text{ g}$ метала шава.

При избору методе заваривања у обзир се узимају следећи фактори:

- технички (ОМ, дебљина и дужина шавова, положај при заваривању, распоред заварених спојева и тсл.) и
- економски (расположивост потребном заваривачко-техничком опремом и капацитетима, што нижи трошкови и тсл.).

Челици класе ARMOX 500T, у суштини могу се заваривати свим електролучним методима. МАГ/МИГ и ЕПП метод у односу на РЕЛ имају предност због једноставнијег управљања процесом контролисања количине унете топлоте преко брзине заваривања и брзине додавања електродне жице као и веће продуктивности.

Међутим, ЕПП поступак је ограничен само на хоризонталан положај заваривања, те се за заваривање овог челика највише примењује МАГ/МИГ метод.

Технолошка решења за заваривање усмерена су на:

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

Технолошка решења зависе од:

- врсте челика, примењеног поступка ваљања, хемијског састава (укључујући и микролегирање), примењеног поступка хлађења и отпуштања по завршетку ваљања;
- механичко-технолошких особина челика и захтева за механичко-технолошке особине ЗУТ-а.

При одређивању параметара заваривања, поред услова за правилно формирање завара, треба узети у обзир и утицај температурских циклуса на структуру ЗУТ-а. Наиме, при заваривању овог челика, у ЗУТ-у, у зависности од количине унете топлоте (превелика погонска енергија заваривања) настаје неповратно нарушавање стања постигнутог термомеханичком обрадом за финоћу зрна, пад жилавости и у широј зони омекшавање услед нарушавања температурског циклуса убрзаног хлађења или таложног отврдњавања. Из тог разлога неопходно је ограничити количину унете топлоте, време хлађења у области температуре најмање стабилности аустенита ($800 \div 500^{\circ}\text{C}, t_{8/5}$) и време прогревања (t_p) изнад одређене температуре јер су то величине које имају одлучујући утицај на структуру и особине ЗУТ-а.

С обзиром на то да се ради о одговорним завареним спојевима потребно је спровести претходну, текућу (процесну) и завршну контролу. Претходна контрола укључује проверу основног и додатног материјала, оцену стања заваривачке опреме, потврду оспособљености заваривача, као и проверу правилности свих жлебова. Текућом контролом се проверава да ли се правилно употребљавају предвиђене електроде по врсти и по пречнику, као и режиму сушења, да ли су правилно подешени јачина и поларитет струје, да ли се поштује редослед полагања појединих завара и да ли се доследно чисти троска после сваког завара.

Када су делови заварени на ред долази и завршна контрола, која обухвата визуелну контролу (и са лупом по потреби), пенетрантне течности, магнетни флуks, ултразвучну дефектоскопију, а ако то технички услови захтевају може се применити и радиографија. Завршну контролу је најбоље обавити после 48 h, јер се сматра да је то довољно време за настанак хладних прслина, уколико има услова за њихову појаву.

Све претходно наведено указује на то да се челик ARMOX 500T успешно може заваривати само уз строго придржавање специјално прописане технологије заваривања, која се прописује на основу упутства произвођача овог челика и знања и искуства стручњака из ове области. Заваривање морају изводити само одговарајуће квалификовани заваривачи.

5.1. Препоруке за заваривање и мере за спречавање хладних прслина при заваривању

Пре почетка пројектовања технологије заваривања пожељно је упознати се са препорукама које треба поштовати у циљу повећања квалитета заварене конструкције, као и са мерама чија је примена обавезна у циљу спречавања хладних прслина. Тек када се ове препоруке схвате озбиљно, може се правилно прописати оптимална технологија заваривања, и ако се доследно испоштују успех заварене конструкције можда неће изостати. Њиховим занемаривањем неуспех је сигуран, и зато је њихово место на самом почетку прописивања оптималне технологије заваривања оправдано.

При заваривању оклопног челика класе ARMOX 500T придржавати се следећих препорука:

1. Припојне шавове треба пажљиво извести истим поступком као и коренски пролаз (РЕЛ-ом или МАГ/МИГ-ом);

2. Ако се процесном контролом у припојима уоче прслине, припоје треба пребрусити и установити узрок настајања прслина;
3. За назначене спојеве (код неких склопова) мора се извести предгревање на препоручену температуру предгревања ($T_p = 100 \div 150^\circ\text{C}$);
4. Појас предгревања мора износити око 150 mm од осе симетрије жлеба;
5. За предгревање су најповољнији електроотпорски грејачи, али се могу користити и други извори топлоте, као што су пропански или окси-ацетиленски грејачи;
6. Контролу температуре предгревања изводити помоћу термокреда или дигиталних контактних или бесконтактних давача;
7. Створити (обезбедити) услове за несметано извођење прописане термичке обраде (назначених склопова и спојева): предгревања, догревања и прогревања (помоћу електроотпорских или индукционих грејача или пропанских горионика или окси-ацетиленског пламена), као и средство за поуздану контролу температуре;
8. Вишепролазно заваривање извести тако да се почетак и завршетак гусенице у горњем пролазу/слоју не поклопи са почетком и крајем гусенице у доњем слоју/пролазу;
9. Сваки завар или слој, пре полагања наредног, треба детаљно и пажљиво очистити од троске и оксидисаног метала; ако се запазе веће неравнине треба их пребрусити;
10. Заваривање се изводи без прекида (сем за замену електроде), по утврђеном редоследу;
11. У току самог заваривања треба стално одржавати температуру предгревања (радну) на ширини појаса $2 \times 150\text{ mm}$;
12. У току самог заваривања треба одржавати и контролисати препоручену међуслојну (interpass) температуру;
13. У случају нестанка струје, део се мора накнадно предгревати и поново споро хладити, као и при завршетку шава;
14. Забрањује се успостављање ("паљење") лука на основном материјалу - ван споја, осим при извођењу припојних и коренских завара;
15. Надвишење лица шава треба да буде $\approx 3\text{ mm}$; прелаз мора бити постепен и благ према основном материјалу;
16. Ради спречавања настанка гасних мехурова у металу шава, неопходно је базичне електроде просушити према предвиђеном режиму и употребљавати их само загрејане до температуре изнад 70°C ; кад се охладе поново апсорбују влагу;
17. При настављању гусенице лук треба успоставити на око 5 mm уназад од почетка краја претходног завара;
18. Оптимална брзина заваривања утврђује се пробним заваривањем, у циљу остваривања траженог уноса топлоте и међупролазне (interpass) температуре;
19. Прекорачење оптималне брзине заваривања препознаје се по троски која није компактна, већ у облику љуспи;

20. Пре сваког успостављања лука треба детаљно обити-очистити троску; она се не уклања одједном са целе гусенице, већ најпре са дела близу кратера (места успостављања лука). На тај начин се елиминише порозност шава на месту поновног паљења/успостављања лука;

21. Треба имати у виду да се троска базичне електроде уклања нешто теже него код највише коришћених рутилних и киселих електрода, нарочито при повећаној брзини заваривања која даје танку троску која чврсто пријања на метал;

22. Један од доказаних начина спречавања порозности кратера (при завршетку заваара или замени електроде) јесте повлачење електроде уназад 15-25 *mm* од почетне тачке (5 *mm* уназад од прекидне тачке);

23. Заварени спојеви изложени променљивом оптерећењу имају знатно мању динамичку издржљивост него основни материјал. То је последица структурне нехомогености и геометријског облика; тај је утицај више изражен код челика повишене и високе јачине него код нискоугљеничних челика;

24. Сви дефекти и ефекти зареза, као нпр. заједи, непровар у корену жлеба, унутрашње грешке, укључују троске, ваздушни мехурови, микропрслине доводе до знатног пада заморне издржљивости;

25. Коефицијент дејства зареза виши је за спојеве које карактерише прекидан ток линија сила, те се стога увек за динамички оптерећене делове препоручује механичка обрада споја-надвишење шава;

26. У овом случају то значи да се механички мора обрадити лице изведеног сучеоног споја ради отклањања надвишења;

27. Овај вид механичке обраде неопходан је за делове који преносе затежуће силе, као и за делове изложене савијању;

28. Завршна механичка обрада изводи се помоћу брусница са еластичним ваљком на коме је намотан брусни папир;

29. Треба имати у виду да су додатне мере при заваривању независне од основних параметара заваривања;

На квалитет завареног споја делују и следећи веома утицајни фактори:

- Квалификација заваривача и персонала стручног надзора; заваривање обавезно изводе атестирани заваривачи уз сталну контролу и надзор специјалиста и технолога заваривања;

- Опремљеност радионице осталим неопходним условима (изоловано радно место без варирања напона у електричној мрежи, као и промаје, вибрација, буке, прашине, ниских температура, превелике влажности, итд.);

- Опремљеност радионице одговарајућом заваривачком опремом: потребан број апарата за заваривање - РЕЛ (најмање 2 инвертора) и МАГ/МИГ (најмање 2 апарата новије генерације), опрема за гасно-пламено заваривање (најмање 1 гарнитура), потребна пећ за сушење електрода, уређаји за мерење температуре - стално и повремено (термопарови и

термокреде), остала помоћна опрема (заштитне маске и кациге, заштитна одела и кецеље, помоћни машински и ручни алати, челичне четке и чекићи, итд.);

- Квалитет и стање додатног материјала (чисте и незамашћене жице, нове обложене електроде са очуваном облогом, итд.);

- Стање, врста и квалитет заштитног гаса;
- Прецизна контрола облика и димензија жлебова и спојева;
- Доследна примена прописане технологије.

Осим правилног предгревања и међупролазне температуре постоје још неке важне препоруке којих се треба придржавати при заваривању челика ове класе у циљу спречавања водоничних (хладних) прелина:

1. Снизити садржај водоника у споју ($H < 5 \text{ ml}/100 \text{ g}$ метала шави);
2. Применити нисководоничне електроде (обавезно чување и сушење електрода према препорукама произвођача);
3. Одстранити све нечистоће из зоне заваривања (влагу из електродне жице, влагу или рђу из жлеба и околних површина, влагу из масти и емулзија садржаних у жлебу), заваривати при малој влажности ваздуха и заштитног гаса;
4. Предузети све мере за смањење заосталих напона у завареном споју;
5. Не користити додатне материјале веће јачине од потребне и прописане;
6. Одабрати најповољнији редослед заваривања који умањује заостале напоне и деформације;
7. Усвојити правилан зазор у жлебу (највише 3 mm и код сучеоног и угаоног жлеба);
8. Без обзира да ли је прописано предгревање, гасним гориоником пажљиво загрејати непосредну зону споја и његову околину, водећи рачуна да се делови не загреју изнад препоручене температуре предгревања/отпуштања (од 150 до 200°C);
9. Одржавати максималну међупролазну (interpass) температуру у границама $\approx 150\div 170^\circ\text{C}$, зависно од крутости/дебљине завариваних делова;
10. Ако је спољашња влажност повишена или је температура испод 5°C , најнижа препоручена температура предгревања мора бити повећана за 25°C . Ово доприноси јачини припојних шавова који се изводе са уносом топлоте око $10 \text{ kJ}/\text{cm}$;
11. Усвојене температуре предгревања и interpass температуре не важе за случај да је унос топлоте већи од $17 \text{ kJ}/\text{cm}$ (заваривање релативно малом брзином);
12. Усвојена је претпоставка да се заварени спој хлади на ваздуху собне температуре ($23\pm 5^\circ\text{C}$);
13. Захтеване температуре предгревања и interpass-а 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 монитороване помоћу контактнoг (или бесконтактнoг) термометра;

14. Време прогревања износи 2 min/mm дебљине (па чак до 5 min/mm према препорукама произвођача челика). Делови се притом споро загревају и споро хладе;

15. Ако је дебљина плоче 25 mm температура се мери 2 min после загревања. Ако је плоча дебела 12.5 mm, температура се мери после 1 min. Interpass температура може бити измерена на металу шава или на основном материјалу у непосредној близини шава;

16. Пре заваривања у околини зоне споја (не и у самој зони споја) нанети заштитни спреј за лакше скидање капљица метала (које знатно прште на основни материјал, посебно при МАГ/МИГ заваривању);

17. Припојне заваре извести према технолошкој документацији (за први завар), зависно од врсте споја и дебљине плоча, а дужина припоја треба да се креће у границама 40-50 mm. Препоручује се да додатни материјал припоја буде исти као и материјал коренског завара;

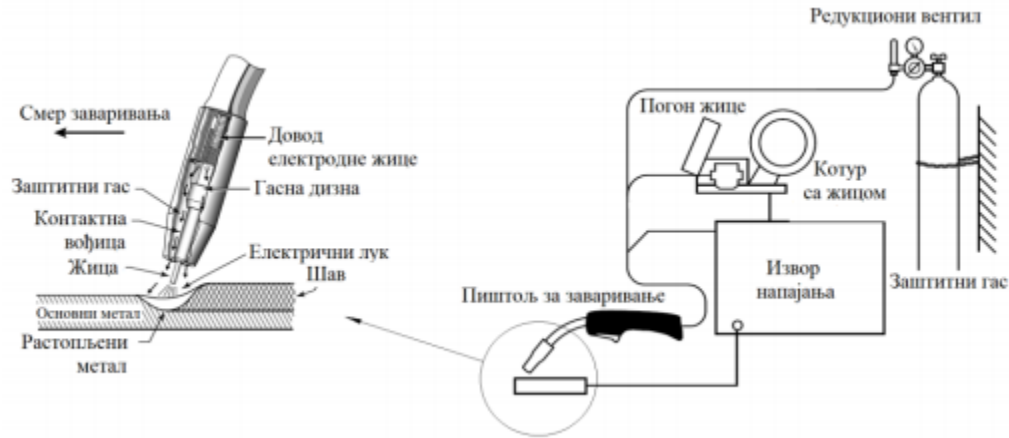
18. После наношења сваког завара детаљно очистити/обити површину завара од треске.

5.2. Параметри и технологија МАГ/МИГ заваривања

Електролучно заваривање топљивом електродном жицом у заштити гаса представља поступак спајања метала топљењем, мешањем и очвршћавањем дела основног материјала и додатног материјала (електродне жице).

Опрема која се користи за МАГ и МИГ заваривање је у принципу иста, једина разлика је у заштитном гасу и додатном материјалу. За заштиту металног купатила, капљице додатног материјала и завара од штетног деловања гасова из спољашње атмосфере користе се инертни и активни гасови, као и њихове смеше.

МАГ метод (скр. од Metal Active Gas), за заштиту металног купатила користи CO₂ или мешавину гасова која се понаша као активни гас, док МИГ метод (скр. од Metal Inert Gas) користи Ar или He, као и мешавину гасова која се понаша као инертан гас. Схематски приказ МАГ/МИГ заваривања приказан је на слици 5.1.



Слика 5.1 Упростио схематски приказ МАГ/МИГ заваривања

Основне карактеристике МАГ методе заваривања су:

- Најчешће се примењује за заваривање нискоугљеничних и нисколегираних челика дебљине $0.8 \div 30 \text{ mm}$,
- Заваривање је могуће у свим положајима,
- Оријентациони параметри заваривања: $I = 40 \div 500 \text{ A}$; $U = 16 \div 35 \text{ V}$; $v_z = 15 \div 60 \text{ m/h}$,
- Спољна карактеристика извора: равна (пад 2 V на 100 A) (извор константног напона),
- Струја заваривања: једносмерна обрнутог поларитета (електрода на позитивном полу).

Основне карактеристике МИГ методе заваривања су:

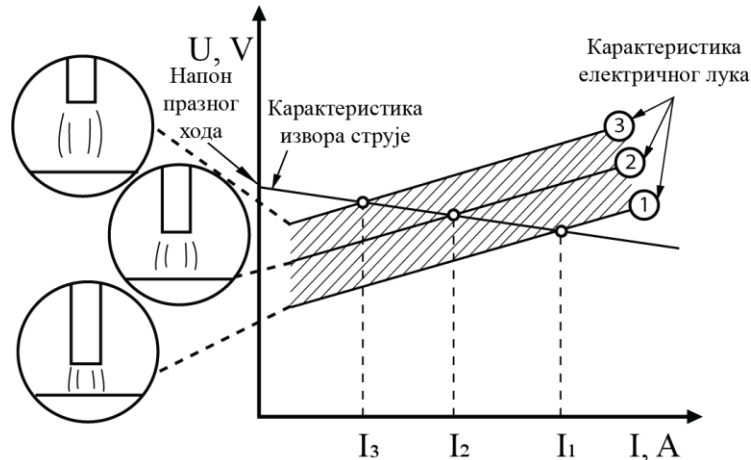
- Најчешће се примењује за заваривање легираних челика и обојених метала и њихових легура метала дебљине до 20 mm ,
- Заваривање је могуће у свим положајима,
- Оријентациони параметри заваривања: $I = 150 \div 500 \text{ A}$; $U = 20 \div 30 \text{ V}$; $v_z = 6 \div 90 \text{ m/h}$,
- Проток аргона: $Q = 20 \text{ l/min}$, струјање - ламинарно,
- Спољна карактеристика извора: равна (пад 2 V на 100 A) (извор константног напона),
- Струја заваривања: једносмерна обрнутог поларитета (електрода на позитивном полу).

За МАГ/МИГ заваривање извори струје су са равном или благопадајућом спољном статичком карактеристиком како би се искористио ефекат саморегулације дужине лука као што је приказано на слици 5.2. Наиме, уколико се при заваривању случајно повећа дужина лука тако да се карактеристике мењају од 1 до 3 према слици 5.2, долази до знатног смањења вредности јачине струје што је на слици 5.2 означено са I_1 до I_3 .

Смањењем јачине струје, тренутно се смањује брзина топљења електродне жице што дужину лука враћа на номиналну тј почетну вредност.

Супротно томе, уколико се случајно скрати дужина лука (нпр. при наилажењу врха жице на припојне шавове у жлебу), јачина струје знатно расте, те ће се врх жице брже топити, а лук ће се вратити на номиналну вредност.

Према томе, дужина лука се враћа на почетну вредност без обзира да ли се претходно повећала или смањила, што се назива ефекат саморегулације.



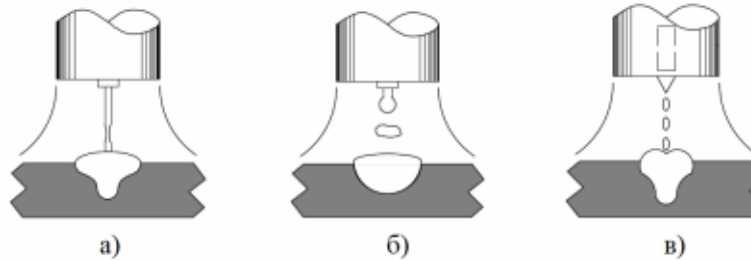
Слика 5.2 Благопадајућа струјно-напонска карактеристика МАГ/МИГ извора са ефектом саморегулације

За овај метод заваривања по правилу се користи једносмерна струја обрнутог поларитета јер се тако добија стабилан лук, равномеран пренос додатног материјала са малим губицима услед распрскивања и добре карактеристике споја у широком опсегу јачине струје.

Пренос додатног материјала у метално купатило зависи од врсте и величине сила које делују на врху растопљене електродне жице тако да се капљица може формирати у различитим величинама и облицима. На пренос додатног материјала највећи утицај имају јачина струје, карактеристика извора напајања, заштитни гас, састав додатног материјала и слободна дужина електродне жице.

Основни начини преноса додатног материјала који се могу уочити при заваривању МАГ/МИГ методима су:

- Краткоспојени пренос (сл. 5.3а),
- Крупнокапљичасти пренос (сл. 5.3б) и
- Млазни пренос (сл. 5.3в)



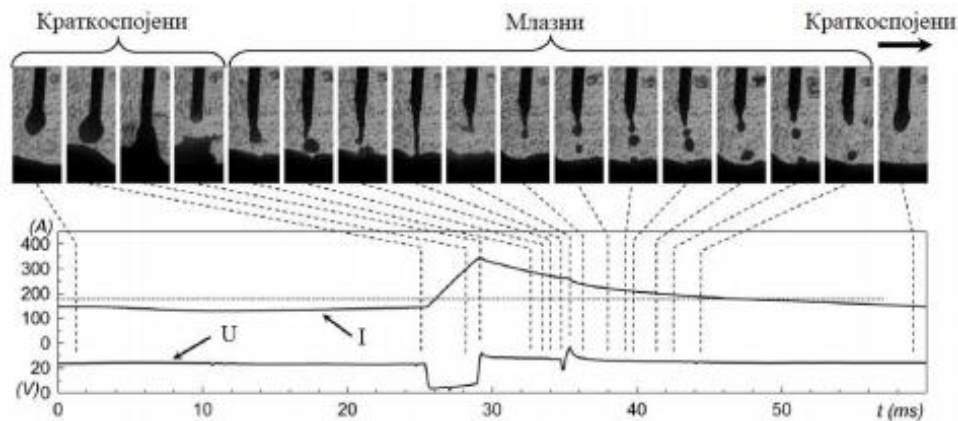
Слика 5.3 Краткоспојени (а), крупнокапљичасти (б) и млазни (в) пренос додатног материјала

Краткоспојени пренос јавља се у режимима са релативно малим вредностима напона и јачине струје у луку. Одликује се тренутним или сталним контактом између истопљеног врха електродне жице (капљице) и површине металног купатила. Наиме, при релативно малој дужини електричног лука, нарастајућа растопљена каљица на врху електродне жице при контакту са основним материјалом изазива кратак спој и гаси електрични лук што резултује наглим порастом јачине струје. Притом електромагнетне силе и силе површинског напона заједнички делују, одвајају капљицу и усмеравају је ка металном купатилу. Када се капљица одвоји од електродне жице прекида се струјно коло, што доводи до стварања услова за поновно успостављање лука и започињање новог циклуса преноса. Контакт жице и основног материјала се понавља 90-200 пута у секунди. Због ниског напона и ниске количине уноса топлоте овај облик преноса додатног материјала идеалан је за заваривање танких материјала до 6 mm дебљине електродном жицом пречника 0.6-1.2 mm. Овај тип преноса настаје углавном при МАГ заваривању кратким луком.

Крупнокапљичасти пренос започиње формирањем капљице и њеним брзим порастом до пречника који је већи у односу на пречник електродне жице. Притом се, дејством силе Земљине теже ($G = mg$), капљица одваја од врха електродне жице и упада у металну купку. Образовање, као и пренос капљица одваја се веома споро, те се у зони електричног лука може налазити само једна капљица. Код МАГ методе овај облик може настати само при заваривању у коритастом положају. У принудном положају заваривања изнад главе, где је гравитациона сила већа од осталих сила крупна капљица не може прећи у металну купку.

Млазни пренос је карактеристичан што се жица не топи само на врху, већ и на боковима што доводи до изоштравања врха електроде. Растопљени додатни материјал одваја се од врха жице у веома ситним капљицама које великом брзином прелећу кроз стуб лука до купке. Млазни пренос се одвија при јакој струји и високом напону. Код МАГ методе јавља се само у случају високоаргонске заштитне смеше.

Испитивањима је утврђено да се зависно од методе и параметара заваривања мења, како облик преноса, тако и количина додатног материјала пренетог у купку. Код исте методе заваривања, али са различитим параметрима, може се запазити прелазак са једног облика преноса на други (сл. 5.4). Тај прелазак одвија се у уском распону јачина струје-критичној области у којој је пренос мешовит, тј. крупнокапљичаст, краткоспојени и мешовит. Познавање начина преноса и услова који дефинишу његов облик, поред теоријског, има и практичан значај.



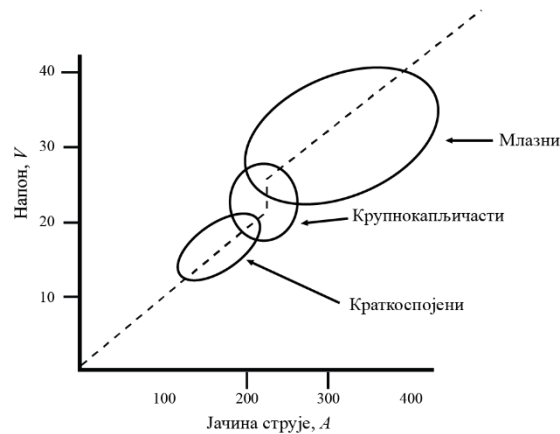
Слика 5.4 Промена преноса додатног материјала од краткоспојеног до млазног, при заваривању у заштити инертног гаса ($Ar + 5\% O_2$) са параметрима: $I = 170 A$, $U = 23.5 V$, брзина додавања жице $6.3 m/min$, растојање контактне вођице од радног комада $18 mm$

На ту критичну област у којој се јавља мешовит пренос утиче и дужина слободног краја електродне жице (сл. 5.5).



Слика 5.5 Слободни крај електродне жице

Како би се добио неки од три наведена начина преноса материјала, параметре је потребно подесити према дијаграму приказаном на слици 5.6. Уколико су параметри изван три круга услови заваривања биће неконтролисани. Унија пресека елипси одговара мешовитом преносу (краткоспојени-крупнокапљичасти, крупнокапљичасти-млазни).



Слика 5.6 Утицај технолошких параметара МАГ/МИГ-а на облик преноса додатног материјала у купку

5.2.1. Најутицајнији параметри МАГ/МИГ заваривања

На квалитет оствареног споја од пресудног су значаја правилно одређени и у раду одржавани параметри заваривања. Они зависе од низа утицајних променљивих, као што су: врста споја, врста и пречник електродне жице, облик жлеба, дебљина и врста основног материјала, положај заваривања, као и посебни захтеви везани за непропустљивост, отпорност на корозију и др. Постоје бројни начини за одређивање параметара заваривања, најчешће се они бирају на основу рачунских и искуствених препорука произвођача опреме и додатног материјала. Усвојени параметри служе као полазна основа за избор режима заваривања који се проверавају на пробним узорцима. После контроле заварених спојева, могу се коначно усвојити параметри заваривања од којих се очекује да у датим условима дају најбоље резултате.

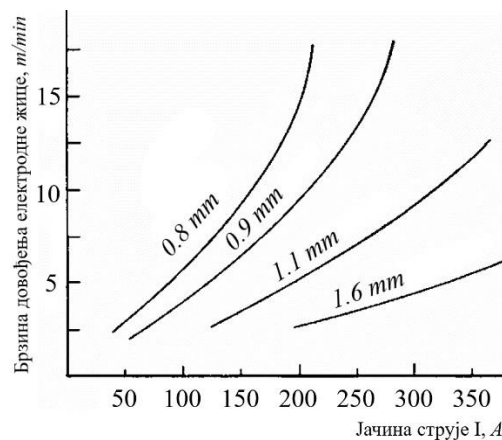
Најутицајнији параметри МАГ/МИГ заваривања су:

- Јачина струје заваривања (посредно се регулише брзином довођења жице),
- Напон електричног лука (радни напон),
- Врста и пречник електродне жице,
- Брзина заваривања,
- Врста заштитног гаса и његова потрошња,
- Поларитет жичане електроде,
- Величина додатног индуктивитета,
- Дужина слободног краја електродне жице,
- Удаљеност млазнице заштитног гаса од радног предмета,

- Положај пиштоља за заваривање у односу на радни предмет и смер заваривања итд.

Јачина струје заваривања

Врста и јачина струје знатно утичу на димензије шав. При осталим константним параметрима, зависност брзине топљења електродне жице и јачине струје је линеарна за мање вредности јачине струје, а при већим вредностима јачине струје, посебно код мањих пречника жице, зависност постаје нелинеарна (сл. 5.7). Разлог за то је загревање слободног краја жице електричним отпором, те за константну брзину довођења жице већег пречника захтева се већа вредност јачине струје, с тим да је код МАГ/МИГ метода нелинеарност те зависности израженија у односу на РЕЛ метод заваривања.



Слика 5.7 Зависност брзине довођења електродне жице и јачине струје заваривања

На избор јачине струје утиче и захтевани облик преноса додатног материјала у електричном луку, као и врста заштитног гаса.

Са већом густином струје постиже се боље уваривање и ужи шав што произлази из пораста специфичног топлотног флукса. Ту постоји граница, јер би преоптерећење електродне жице великим јачинама струје довело до поремећаја процесних параметара заваривања.

Напон електричног лука

Напон лука има значајан утицај на квалитет завареног споја, јер променом његових вредности утиче се на облик преноса додатног материјала, дубину уваривања и у мањој мери на димензије шав (ширину и надвишење). У физичком смислу, напон је условљен дужином лука – мања дужина лука даје нижи напон и обрнуто.

Напон лука се бира на извору напајања помоћу одговарајућег прекидача. Низак напон доводи до формирања ужег завара и веће дубине уваривања, а превисок напон до повећања ширине завара и релативно мале дубине уваривања, а поред тога и до распрскивања истопљеног метала чиме се погоршавају хемијски састав и услови за формирање шав.

Када су напон, јачина струје и пречник електродне жице правилно одабрани лук је миран и стабилан, распрскивање капљица метала је веома мало уз шав најбољег изгледа.

Врста и пречник електродне жице

Пречник електродне жице бира се према дебљини основног материјала, а на основу пречника електродне жице бира се јачина струје. У случају недовољне јачине струје, односно превеликог пречника електродне жице њено топљење је недовољно, а супротно томе долази до великог распрскивања, порозности и неправилне геометрије шавва. Стандардизовани пречници електродних жица су 0.6; 0.8; 1.0; 1.2; 1.6; 2.0 и 2.4 mm.

Уколико је потребно постићи већу дубину уваривања, а мању ширину шавва примењују се мањи пречници (већа густина струје). Према томе, густина струје дефинисана је као количник јачине струје и пречника електродне жице. Највише се примењују жице пречника 1.2 и 1.6 mm, за које је углавном разрађен прорачун параметара заваривања.

Препоручене вредности јачине струје и напона у зависности од пречника електродне жице дате су у табели 5.1.

Таблица 5.1. Препоручене вредности јачине струје и напона лука

Пречник жице, mm	Јачина струје, A	Напон лука, V
0.8	50-200	16-25
1.0	80-230	18-25
1.2	100-380	18-35
1.6	150-450	22-35
2.4	380-650	26-38

У случају заваривања челика електродна жица треба да има повећан садржај Si и Mn у циљу дезоксидације метала шавва и надокнаде сагорелих елемената у основном материјалу. У циљу спречавања настанка порозности у металу шавва и закаљења, садржај угљеника ограничен је на 0.12%.

При избору додатног материјала треба узети у обзир хемијски састав и механичка својства основног материјала, стање и чистоћу основног материјала, положај заваривања и облик преноса додатног материјала.

За заваривање краткоспојеним преносом користе се жице пречника 0.8-1.2 mm, за млазни пренос узимају се жице пречника 1.2 mm, а за пренос у млазу жице пречника 1.2-1.6 mm.

Брзина заваривања

Брзина заваривања се односи на брзину кретања електричног лука дуж линије спајања. Од правилно изабране брзине заваривања зависи геометрија споја и смањење могућности појаве грешака за облик шавва. Мала брзина заваривања доводи до веће количине истопљеног метала који „бежи“ испод и испред лука на хладан материјал при чему долази до грешака облика шавва, налепљивања, порозности и тсл.

Превелика брзина заваривања доводи до мањег уваривања, уже гусенице зава, великог надвишења и лошег изгледа шава. Најповољнију брзину заваривања треба изабрати на основу дебљине основног материјала, типа споја, положаја заваривања и тсл.

Врста заштитног гаса и његова потрошња

Врста заштитног гаса бира се у зависности од основног и додатног материјала. Проток гаса зависи од типа споја, облика и димензија жлеба, јачине струје, напона лука, брзине заваривања, места заваривања, типа пиштоља за заваривање и тсл.

Да би заштитни гас могао да обави функцију за коју је намењен неопходно је да буде потребне чистоће и да је присутан у одговарајућој количини. Недовољна количина заштитног гаса може проузроковати порозност метала шава, док с друге стране, превелика количина гаса појачава струјање, тј. турбуленцију заштитног гаса на излазу из млазнице што погоршава учинак заштите.

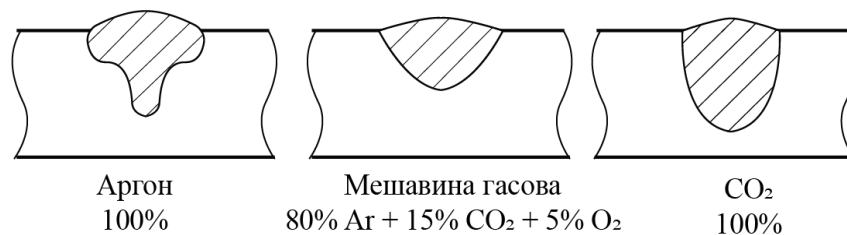
Потрошња заштитног гаса оријентационо се креће у границама, за сучеоне спојеве 500÷600 l/h, а за угаоне спојеве 300-400 l/h.

Као заштитни гасови користе се:

- Инертни гасови (Ar и He),
- Хемијски активни гасови редукујућег и оксидирајућег деловања (H_2 , N_2 , CO_2 и O_2) и
- Мешавине инертног и активног гаса.

Врста заштитног гаса утиче на:

- Врсту преноса материјала,
- Успостављање лука,
- Хемијски састав метала шава,
- Вискозитет металне купке и
- Профил уваривања (сл. 5.8).



Слика 5.8 Утицај врсте заштитног гаса на промену профила уваривања

Подаци о понашању, примени и својствима најчешће коришћених заштитних гасова према SRPS EN 439 и њихових мешавина дати су у табlici 5.2. Поред тога, у табlici 5.3 дати су утицаји неких заштитних гасова на технолошке карактеристике поступка.

Таблица 5.2 *Заштитни гасови и њихове смеше - примена и својства*

Гас	Симбол	Понашање	Примена	Карактеристика лука
Ar (99.998%)	I1	инертно	сви метали осим челика	највећа стабилност
He (99.99%)	I2	инертно	Al, Mg, Cu	повећана топлотна моћ
Ar+(25-75%) He	I3	инертно	Al, Mg, Cu	између I1 и I2
N ₂ (99,9%)		активно	Cu	повећана топлотна моћ
Ar+(25-30%) N ₂		инертно	Al, Mg, Cu	повећана топлотна моћ
Ar+2.5% CO ₂	M1-1	практ. инертно	високолегирани Cr-Ni челици	пренос у млазу
Ar+(1-3%) O ₂	M1-2	практ. инертно	високолегирани Cr-Ni челици	пренос у млазу
Ar+(4-8) O ₂	M2-3	оксидишуће	угљенични и нисколег. челици	пренос у млазу
Ar+(1-15%) H ₂	R2	редукујуће	високолегирани челици, Ni	велика дубина уваривања
CO ₂ (99.9%)	C	оксидишуће	угљенични и нисколег. челици	могуће распрскивање
Ar+(26-40%) CO ₂	M3-1	оксидишуће	угљенични и нисколег. челици	могуће распрскивање
Ar+(6-13% CO ₂)+(3-5%) O ₂	M3-2	оксидишуће	угљенични и нисколег. челици	могуће распрскивање
CO ₂ +20% O ₂		оксидишуће	угљенични и нисколег. челици	могуће распрскивање

Таблица 5.3. Заштитни гасови и њихове смеше - технолошке карактеристике

Карактеристика	Ar/CO ₂	Ar/O ₂	CO ₂
Дубина уваривања: - Нормални положај - Принудни положај	- Добра - Сигурнија заштита са повећањем CO ₂	- Добра - Може да постане критична због цурења испред металне купке повећане течљивости	Добра, сигурна
Термичко оптерећење пиштоља	Смањује се са повећањем % CO ₂	Велико	Мало (због добре термичке проводљивости)
Брзина оксидације	Расте са већим % CO ₂	Велика	Велика
Порозност	Опада са већим % CO ₂	Велика	Мала
Распрскавање	Расте са већим % CO ₂	Без распрскавања	Највеће, расте са повећањем снаге лука
Уведена топлота	Расте са повећањем % CO ₂ , мањом брзином хлађења, смањује се опасност од прелина	Највећа, велика брзина хлађења, опасност од прелина	Велика, мала брзина хлађења, мала опасност од прелина
Механичке и технолошке карактеристике	Добре, средње при CO ₂ >30%	Добре, срење при O ₂ >12%	Средње
Могућност попуње завора у корену	Расте са смањењем % CO ₂	Добра	Мања него код мешавина гасова
Пренос материјала кроз лук	Кратак лук, Средњи лук, Импулсно, Ротирајући лук	Кратак лук, Средњи лук, У млазу, Импулсно, Ротирајући лук	Кратак лук, Дуги лук

Заштитни гас или гасна мешавина бирају се у зависности од економских, технолошких и металуршких аспеката, при чему се у обзир узимају физичке особине гаса, као што су:

- Густина и релевантна густина,
- Ефективни напон и степен јонизације,
- Напон лука у зависности од јачине струје и врсте гаса,
- Вискозитет,

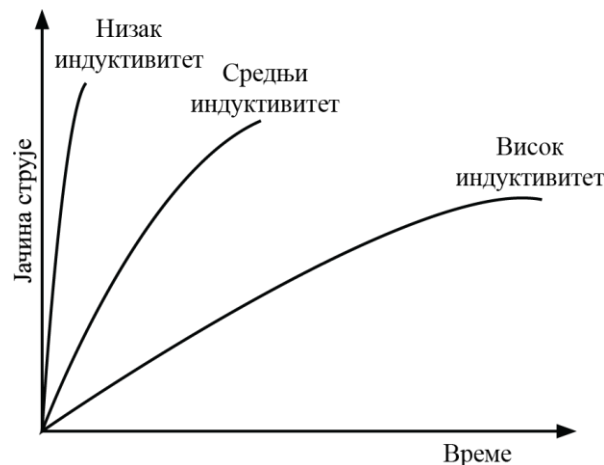
- Топлотна проводљивост,
- Електрична проводљивост и
- Топлотна вредност (енталпија).

Поларитет електродне жице

По правилу се за МАГ/МИГ заваривање електродна жица везује за + пол (обрнути поларитет, Е +), а у случају наваривања жичана електрода везује се за – пол (прави поларитет, Е -). Обрнути поларитет даје стабилан лук, равномернији пренос додатног материјала (по потреби пренос у млазу и при коришћењу активних гасова) са минималним губицима услед распрскивања. Као што је већ напоменуто користе се исправљачки извори једносмерне струје, а наизменична струја се не користи због мање стабилности лука при промени поларитета у сваком полупериоду циклуса.

Величина додатног индуктивитета

Добијање мирног и стабилног лука, нарочито при краткоспојеном преносу, основна је улога додатног индуктивитета који се регулише преко струјних намотаја извора напајања. Да би се успорила промена јачине струје после кратког споја, у струјно коло се убацује индукциони калем, који производи ефекат који је приказан на слици 5.9 како би се поправио квалитет заварених спојева. Без допунског индуктивитета заваривање краткоспојеним преносом не би било могуће.



Слика 5.9 Утицај пригушнице на јачину струје

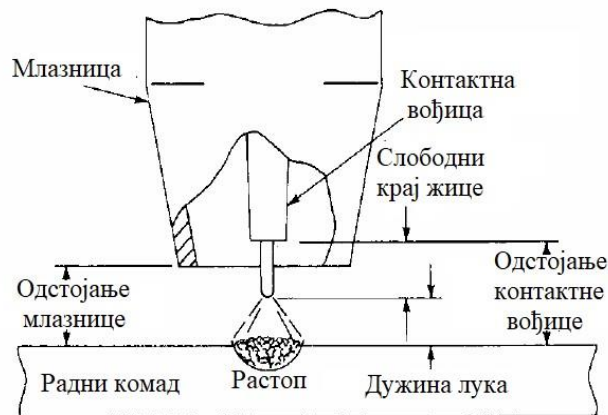
Ако је индуктивитет нижи, бржи је пораст јачине струје, кратки спојеви су учесталији, краће време се одржава лук и загревање је мање (“хладније“ заваривање).

У случају већег индуктивитета (пригушења), спорији је раст струје, ређе настају кратки спојеви и дуже је време одржавања лука (“топлије“ заваривање).

Дужина слободног краја електродне жице

Слободни крај електродне жице мора да буде у одређеним границама јер његова превелика дужина доводи до вишка додатног материјала, те је дата количина топлоте недовољна за његово топљење, самим тим уваривање је плитко, а облик шава неповољан.

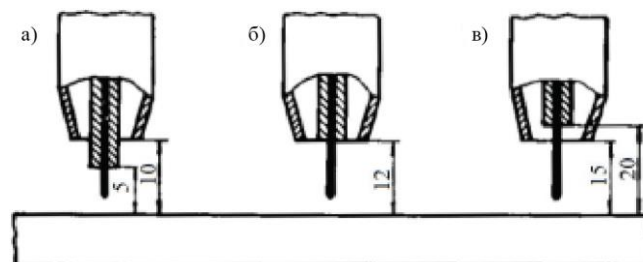
Супротно томе, премала дужина слободног краја жице доводи до нестабилности лука. Дужину слободног краја електродне жице неопходно је контролисати и по могућности одржавати је константном у току заваривања. На слици 5.10 приказани су карактеристични положаји при МАГ/МИГ заваривању.



Слика 5.10 Карактеристични положаји при МАГ/МИГ заваривању

За режим краткоспојеног преноса дужина слободног краја електродне жице креће се у распону $6 \div 13 \text{ mm}$, а за остале начине преноса $13 \div 25 \text{ mm}$. По правилу, треба ићи на што мању дужину слободног краја жице јер се тако добија мирнији лук.

С друге стране, слободни крај жице не сме да буде прекратак јер би течан метал врло брзо оштетио млазницу. Поред слободног краја жице, и одстојање контактне вођице, као и млазнице од радног комада битно утиче на заваривање (сл. 5.11). Пракса је показала да се вођица монтира у млазницу најчешће према схеми 5.11в. У табелици 5.4 дате су вредности за дужину слободног краја жице и за удаљење млазнице у зависности од јачине струје.



Слика 5.11 Положај млазнице за гас и контактне вођице за различите вредности јачина струја: а) $I = 50-150 \text{ A}$, б) $I = 150-350 \text{ A}$, в) $I > 350 \text{ A}$

Удаљеност млазнице заштитног гаса од радног комад

Ово растојање је веома битно правилно одабрати јер се једино тако може обезбедити правилна заштита металног растопа, најбоља стабилност лука и заштита млазнице од превеликог трошења. С једне стране, одстојање млазнице од радног комада треба да буде што мање да би заштита гасом била што ефикаснија, док с друге стране, сувише мало одстојање излаже млазницу превеликој топлоти и смањује заваривачу могућност визуелне контроле зоне заваривања.

Схематски приказ положаја млазнице у односу на контактну вођицу приказано је на слици 5.11, а вредности растојања млазнице у зависности од јачине струје дате су у табелици 5.4.

Таблица 5.4. Дужина слободног краја електродне жице (*a*) и растојања млазнице (*b*) у зависности од јачине струје

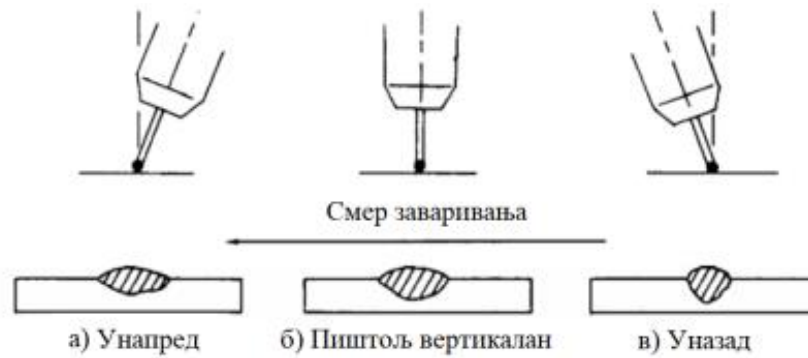
Јачина струје, <i>A</i>	50	100	150	200	250	300	350	400
<i>a</i> , mm	5	6	8	10	12	14	17	20
<i>b</i> , mm	10	10	10	12	12	12	15	15

Положај пиштоља у и смер заваривања

Положај пиштоља у односу на радни комад има значајан утицај на облик шава и дубину уваривања. Код МАГ/МИГ заваривања користе се две основне технике улево и удесно, а која ће бити примењена, зависи од тога да ли се захтева већа дубина уваривања или лепши изглед шава.

Технику улево карактерише мање уваривање, већа ширина шава али и већа порозност шава, те се примењује за заваривање тањих лимова. Технику удесно карактерише већа дубина уваривања, ужи и испупчен шав, лошији изглед али и мања порозност шава. Шав поседује боље механичке особине, те се примењује за заваривање дебљих лимова.

Према нагибу пиштоља у односу на вертикалну раван разликују се следеће технике заваривања: унапред (отклон пиштоља супротно смеру заваривања, сл. 5.12а), уназад (отклон пиштоља у смеру заваривања, сл. 5.12в) и неутрална (вертикалан положај пиштоља, сл. 5.12б). Иако је нагиб пиштоља релативно мали (10-15°), то знатно утиче на облик и димензије шава, као и на дубину уваривања.

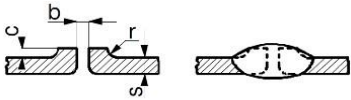
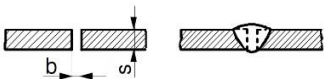
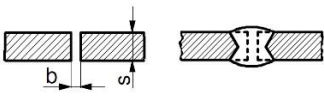
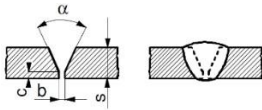
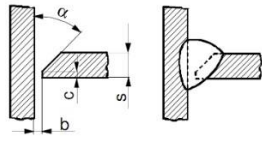
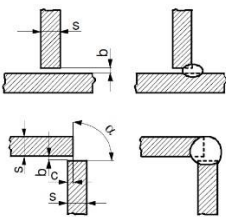


Слика 5.12 Утицај нагиба пиштоља на облик шави

5.2.2. Технолошки параметри МАГ/МИГ заваривања

При извођењу сучеоних спојева у хоризонталном положају и угаоних спојева у коритастом положају, технолошки параметри заваривања приближно се одређују на основу полазних података, као што су: врста споја, пречник електродне жице и облик шави. Прво се, у зависности од дебљине делова и врсте споја, бирају облик и димензије жлеба према препорукама датим у табlici 5.5.

Таблица 5.5 Припрема страница за заваривање у заштити активних гасова

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

Лимови дебљине до 4 mm заварују се без припреме страница у хоризонталном положају (до 3 mm у осталим положајима), док се за лимове већих дебљина израђују V, X и K - жлебови.

Таблица 5.6 Гранични пресеци појединих завара

Врста споја	Врста завара	Допуштени пресек завара у mm^2 за:			
		Положај "а" за пречник жице:			
		d = 1.2 mm		d = 1.6 mm	
Сучеони	Коренски завар	11.0		11.0	
	Завари испуне	6.25÷64.0		15.0÷64.0	
	Покривни завар	15.0÷64.0		15.0÷64.0	
Угаони	Завари попуне Покривни завар	Положај "б"		Положај "в"	
		d = 1.2 mm	d = 1.6 mm	d = 1.2 mm	d = 1.2 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 CH3.011/82 разликују се положаји:

а) хоризонталан (бочан) б) коритаст в) хоризонтално-вертикалан

Таблица 5.7 Избор пречника електродне жице за сучеони и угаони спој

Сучеони спој			
s, mm	≤ 2	2÷20	10÷30
d, mm	0.8	1.2	1.6
Угаони спој			
a, mm	2	3	> 3
d, mm	1.2	1.2	1.6

Таблица 5.8 Оријентациони избор броја пролаза у зависности од дебљине завариваних делова

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

Усвојени параметри представљају полазну основу за избор режима заваривања који се проверавају на пробним узорцима, и евентуално коригују пре почетка заваривања стварних делова.

5.3. Предгревање и међупролазна температура

Када је утврђено којим ће се методом заваривања извести заварени спојеви, може се одредити температура предгревања.

Предгревање представља процес загревања основног материјала на одређену температуру изнад температуре околине пре почетка заваривања. Примењује се само када се утврди да је челик условно заварљив, тј. када еквивалент угљеника прелази вредност од 0.45%, као што је то случај са челиком ARMOX 500T. Предгревање има вишеструки позитиван утицај на особине завареног споја које одговарају радним условима заварене конструкције, успорава хлађење заварених спојева због чега се у металу шава, и нарочито у ЗУТ-у добијају структуре које су мање склоне закаљивању, стварају се погодни услови за ослобађање гасова из метала шава, што доприноси смањењу вероватноће да се појави порозност и смањује се количина растворених гасова у металу шава, што је посебно важно када се ради о водонику који је главни узрочник настанка хладних прелина.

Супротно томе, неправилно предгревање (сувише ниска или висока температура, као и кратко или предуго задржавање на температури предгревања) негативно утиче на особине заварених спојева, јер може повећати њихову склоност ка појави топлих прелина, може да доведе до ширења ЗУТ-а, до ширења крупнозрног дела у ЗУТ-у и до раста зрна у ЗУТ-у. За одређивање температуре предгревања у литератури постоји неколико начина за израчунавање. Међутим, уколико постоје препоруке произвођача или искуствене препоруке од стране проверених стручњака, увек се могу усвојити.

Према препоруци произвођача SSAB Oxelösund температура предгревања не сме бити већа од 200°C, јер се тиме поништавају све повољне особине овог челика, као што је то случај у ЗУТ-у који представља критичну зону завареног споја. Наиме, долази до прекомерног отпуштања и губитка повољних механичких особина којима се одликује ова класа челика. Температура предгревања при заваривању феритним додатним материјалима креће се у границама 75-200°C у зависности од дебљине плоча и од погонске енергије заваривања (таб. 5.9).

Температуру предгревања треба одржавати константном током заваривања, како коренских, тако и покривних зава. Уколико се користи аустенитни додатни материјал, без обзира што је за плоче до 30 mm дебљине усвојено да се могу заваривати на собној температури (18-25°C), пожељно је гориоником пажљиво загрејати непосредну зону спајања

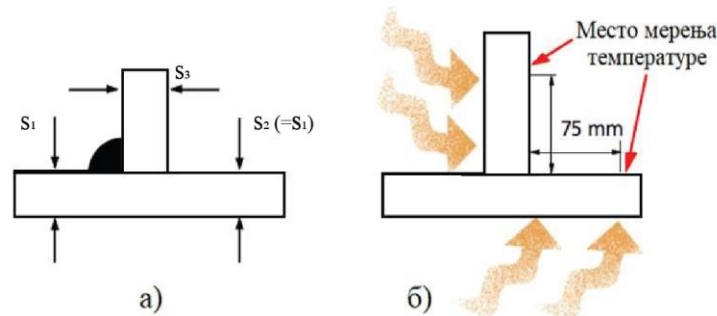
и његову околину (сл. 5.13б), водећи рачуна да се делови не загреју изнад препоручене температуре предгревања/отпуштања (150-200°C). За плоче дебљине веће од 30 mm предгревање на температуру од 100-150°C је обавезно.

Таблица 5.9 Температуре предгревања при заваривању феритним додатним материјалима

Пофонска енергија заваривања q_l [kJ/mm]		Збир дебљина завариваних плоча ($s_1 + s_2 + s_3$) [mm]					
		20	30	40	50	60	70
$q_l = \frac{U \cdot I \cdot 60}{v_z \cdot 1000}$	1	125°C	150°C	175°C	200°C	200°C	200°C
	2	75°C	100°C	125°C	150°C	175°C	200°C

v_z – брзина заваривања у mm/min.

На слици 5.13 приказане су дебљине спајаних плоча које се сабирају и на основу тог збира, из горње табеле одређује се температура предгревања при заваривању феритним додатним материјалима.



Слика 5.13 а) Дебљине спајаних плоча (s_1, s_2, s_3); б) зона предгревања и место мерења температуре

Међупролазна (interpass) температура представља дозвољену температуру при којој се полаже наредни завар. При заваривању овог челика препоручене вредности interpass температуре крећу се у границама 150-175°C.

5.4. Преглед додатних материјала

Код додатних материјала високе јачине, чији је напон течења већи од 600 MPa постоји опасност да се образују хладне прслине и у металу шава. Из тог разлога, за заваривање челика ARMOX 500T користе се додатни материјали чија јачина не прелази 500÷600 MPa.

Поред тога, применом додатних материјала мање јачине у односу на основни материјал постиже се већа жилавост завареног споја, већа отпорност ка хладним прслинама и нижи заостали напони у завареном споју, нарочито у ЗУТ-у.

Додатни материјали који су повољни за заваривање овог челика морају гарантовати да садржај водоника у металу шава буде $\leq 5 \text{ ml}/100 \text{ g}$ метала шава. Додатне материјале за МАГ/МИГ методе које препоручује произвођач панцирног челика ARMOX 500T SSAB

Oxelösund налазе се у табlici 5.10. Аустенитни су намењени за МИГ метод, а феритни за МАГ метод.

Таблица 5.10 Препоручени додатни материјали од стране произвођача

Произвођач	Аустенитни	Феритни
ESAB	OK Autrod 16.95 OK Tubrod 14.36	OK Autrod 12.51 OK Tubrod 15.00
FILARC	Filarc PZ 6070 Filarc PZ 6470	Filarc PZ 6000 Filarc PZ 6130
OERLICON	NERTALIC 51 SAFDUAL 651	FLUXOFIL 40 Carbofil 100
THYSSEN	THERMANIT X	TG 50 B Union K52

5.5. Препоручени параметри заваривања

У овом поглављу дато је кратко упутство за заваривање ове класе челика аустенитним и феритним додатним материјалима, као и кратко упутство за заваривање комбиновањем различитих додатних материјала.

Ова упутства настала су на основу искуствених препорука стручњака који су се бавили овом проблематиком. Заваривање се изводи са предгревањем на температуру $100\div 175^{\circ}\text{C}$ уз поштовање међуслојне (interpass) температуре у опсегу $150\div 175^{\circ}\text{C}$. За еквивалентну дебљину већу од 30 mm обавезно је извести накнадно отпуштање највише до 200°C са прогревањем од 2 до 5 min/mm дебљине зида (споро загревање и хлађење). После заваривања/загревања загрејану зону је потребно прекрити изолационим материјалом у циљу смањења брзине хлађења.

У табlici 5.12 дати су параметри МАГ заваривања додатним материјалима из табlice 5.11.

Таблица 5.11 Хемијски састав и механичке особине феритних додатних материјала за МАГ метод заваривања

Тип	Хемијски састав, %			
	C	Mn	Si	
ESAB	0.078	1.46	0.85	
SŽ FIPROM	0.06	1.44	0.70	
VAC 60*	0.08	1.50	0.90	
VAC 60 Ni*	0.08	1.50	0.80	
Тип	Механичке особине чистог метала шави			
	R _m , МПа	R _{p02} , МПа	A ₅ , %	KV, J
OK Autrod 12.51	560	480	26	90 (на -40°C)
OK Tubrod 15.00	569	456	28	129 (на -30°C)
VAC 60	510-590	> 410	> 22	> 47 (на -40°C)
VAC 60 Ni	530-630	> 430	> 22	> 47 (на -40°C)

Таблица 5.12 Процесни параметри МАГ заваривања

Пречник жице	Ø 1.2 mm
Струја заваривања	≈ 220-250 A
Радни напон	≈ 24-25 V
Брзина заваривања	≈ 0.35-0.40 cm/s (21-24 cm/min)
Погонска енергија заваривања	≈ 12822-13281 J/cm
Очекивана дубина уваривања	≈ 1.8-1.86 mm
Заштитни гас (гасови)	82% Ar + 18% CO ₂ ; 12-18 l/min

У табlici 5.14 дати су параметри МАГ заваривања додатним материјалима из таблице 5.13.

Таблица 5.13 Хемијски састав и механичке особине аутенитних додатних материјала за МИГ метод заваривања

Тип	Хемијски састав, %						
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
ESAB	0.08	7.0	0.9	8.1	18.7	0.20	0.10
SŽ FIPROM	0.08	7	0.80	9	18.5	-	-
MIG 29/9*	< 0.14	1.75	0.4	9	30.5	-	-
Тип	Механичке особине чистог метала шави						
	R _m , <i>MPa</i>		R _{p02} , <i>MPa</i>		A ₅ , %		KV, <i>J</i>
OK Autrod 16.95	640		450		41		130 (на -20°C)
MIG 18/8/6 Si	560-660		> 380		35		> 40 (на +20°C)
MIG 29/9	740-850		> 540		26		> 30 (на +20°C)

Таблица 5.14 Процесни параметри МИГ заваривања

Пречник жице	Ø 1.2 mm
Струја заваривања	≈ 220-250 A
Радни напон	≈ 24-25 V
Брзина заваривања	≈ 0.35-0.40 cm/s (21-24 cm/min)
Погонска енергија заваривања	≈ 12822-13281 J/cm
Очекивана дубина уваривања	≈ 1.8-1.86 mm
Заштитни гас	Ar + 2.5% CO ₂ или Ar + 1-3% O ₂ ; 12-18 l/min

Комбиновано заваривање дебелих плоча заснива се на вишепролазном заваривању, применом пуних/пуњених жица .

Припојне заваре, први пролаз и неке заваре испуне треба извести са пуном електродном жицом МИГ 18/8/6 Si или МИГ 29/9 или пуњеном жицом FILTUB 12B (МИГ), а преостале заваре испуне (и обавезно покривни завар) извести са пуњеним жицама FILTUB DUR12 или FILTUB DUR14B тврдоће покривног зава/навара 37-42 HRC до 48-53 HRC (МАГ).

На овај начин долази до повећања отпорности на хабање, површинска зона споја би се по тврдоћи приближила основном материјалу, али све на рачун пластичности и жилавости. И у овом случају дошло би до омекшавања једне, али веома уске зоне око споја.

Тек после лабораторијских и експерименталних испитивања параметри би били утврђени и тада би технологија могла да буде пренесена на стварне радне комаде.

Хемијски састав и механичке особине додатних материјала намењених за заваривање коренских пролаза и пролаза испуне МИГ методом дати су у табlici 5.15, а препоручени параметри заваривања дати су у табlici 5.16. Што се тиче термичке обраде иста је као што је наведено за претходни случај.

Таблица 5.15 Хемијски састав и механичке особине додатних материјала за коренске пролазе и пролазе испуне

Тип	Хемијски састав, %						
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
ESAB	0.08	7.0	0.9	8.1	18.7	0.20	0.10
SŽ FIPROM	0.08	7	0.80	9	18.5	-	-
MIG 29/9*	< 0.14	1.75	0.4	9	30.5	-	-
FILTUB 12B	0.05	1.40	0.35	-	-	-	-
Тип	Механичке особине чистог метала шав						
	R _m , <i>MPa</i>		R _{p02} , <i>MPa</i>		A ₅ , %		KV, <i>J</i>
OK Autrod 16.95	640		450		41		130 (на -20°C)
MIG 18/8/6 Si	560-660		> 380		35		> 40 (на +20°C)
MIG 29/9	740-850		> 540		> 18		> 30 (на +20°C)
FILTUB 12B	510-610		> 420		> 26		> 60 (на -40°C)

Таблица 5.16 Параметри МИГ заваривања коренских пролаза и пролаза испуне

Пречник жице	Ø 1.2 mm
Струја заваривања	≈ 150-200 A
Радни напон	≈ 20-27 V
Брзина електродне жице	≈ 3-10 m/min
Брзина заваривања	≈ 0.35 cm/s (21-24 cm/min)
Погонска енергија заваривања	≈ 7300-13115 J/cm
Очекивана дубина уваривања	≈ 1.38-1.84 mm
Заштитни гас	Ar + 2.5% CO ₂ или Ar + 1-3% O ₂ ; 12-18 l/min

Покривни завари изводе се МАГ методом, са неким од додатних материјала који су дати у табlici 5.17 а са технолошким параметрима датим у табlici 5.18. При комбинованом заваривању требало би применити технику заваривања улево.

Заваривање препорученом технологијом је отежано у принудним положајима, тако да није лако изводљиво те се морају ангажовати вешти заваривачи.

Таблица 5.17 Хемијски састав и механичке особине додатних материјала за покривни завар

Тип	Хемијски састав, %					Тврдоћа, HRC
	C	Mn	Si	Cr	Mo	
FILTUB DUR 12	0.12	1.50	0.60	5.50	1.00	37-42
FILTUB DUR 14	0.35	1.20	0.60	5.50	0.8	48-53
SŽ FIPROM Jesenice						

Таблица 5.18 Параметри МАГ заваривања покривних завара

Пречник жице	Ø 1.2 mm
Струја заваривања	≈ 130-250 A
Радни напон	≈ 23-28 V
Брзина електродне жице	≈ 2.5-8 m/min
Брзина заваривања	≈ 0.35 cm/s (21-24 cm/min)
Погонска енергија заваривања	≈ 7300-13200 J/cm
Очекивана дубина уваривања	≈ 1.38-1.85 mm
Заштитни гас	82% Ar + 18% CO ₂ ; 12-18 l/min

Све наведене технологије заваривања коначно се могу усвојити тек после спроведених моделских и поновљених реалних испитивања.

6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИСПИТИВАЊА

6.1. Стандарди балистичке заштите

Многе земље имају прописане стандарде који се односе за нивое балистичке заштите, али најчешће коришћени од стране произвођача ARMOX-а, пре свега због својих купаца, су STANAG 4569 (таб. 6.1) који прописује NATO и EN 1522 (таб. 6.2) који је прописан од стране UN-а. Отпорност ARMOX-а на основу ова два стандарда приказана је у таблицама 6.1 и 6.2. STANAG 4569 односи се на степене заштите за логистичка и лака оклопна возила.

Стандард укључује претње балистичких пројектила, малих и средњих калибра, као и фрагменте који симулирају пенетраторе у циљу симулирања артиљеријских дејстава. Намењен је поновљивим поступцима испитивања за оцену балистичке заштите делова оклопних возила и за утврђивање критичних зона на возилима.

Претње су подељене у пет различитих нивоа, где је први ниво намењен цивилним претњама, док су остали нивои намењени за различите степене војних претњи.

Таблица 6.1 Заштитни нивои према STANAG 4569 NATO

Ниво	Врста оружја	Калибар	Растојање, <i>m</i>	Брзина, <i>m/s</i>
I	Пушка	7.62 x 51 NATO Ball (Ball M80)	30	833
		5.56 x 45 NATO SS109		900
		5.56 x 45 M193		937
II	Пешадијска пушка	7.62 x 39 API BZ	30	695
III	Снајперска пушка	7.62 x 51 AP (WC core)	30	930
		7.62 x 54R B32 API (Dragunov)		854
IV	Митраљез	14.5 x 114AP / B 32	200	911
V	Аутоматски топ	25 mm APDS-TM-791 или TLB	500	1258

EN 1522 односи се на заштитне прозоре, ролетне и врата. Због тачности резултата, заштитне ролетне тестирају се одвојено, а не у комбинацији са прозором или вратима.

Као што се види у табели 6.2 EN 1522 односи се на нападе пиштољем или пушком.

Таблица 6.2 *Заштитни нивои према EN 1522 UN*

Ниво	Врста оружја	Калибар	Растојање, <i>m</i>	Брзина, <i>m/s</i>
I	Пушка	7.62 x 51 NATO Ball (Ball M80) 5.56 x 45 NATO SS109 5.56 x 45 M193	30	833 900 937
II	Пешадијска пушка	7.62 x 39 API BZ	30	695
III	Снајперска пушка	7.62 x 51 AP (WC core) 7.62 x 54R B32 API (Dragunov)	30	930 854
IV	Митраљез	14.5 x 114AP / B 32	200	911
V	Аутоматски топ	25 mm APDS-TM-791 или TLB	500	1258

6.2. Балистичка својства

Балистика је научно-техничка дисциплина која се бави проучавањем појава од момента опаљења пројектила до његовог поготка у мету и последица дејства на мети. У то спадају комплексне и међусобно тесно повезане појаве и процеси који су у основи тројаки, па се према томе балистика може поделити на:

- Унутрашњу балистику: проучавање појава унутар цеви, тј. сагоревање барута у цеви, настали притисак, конструкцију цеви која треба да издржи притисак, кретање пројектила кроз цев, брзину пројектила у цеви,
- Спољашњу балистику: проучавање кретања пројектила по изласку из цеви све до поготка у мету и
- Терминалну балистику: проучавање последица дејства пројектила на мету и у зависности од начина проучавања појава и процеса разликује се:
 - Теоријска (математички моделира процесе и појаве) и
 - Експериментална (проучава методе и бележи појаве при опаљењу и кретању пројектила).

У практичном делу овог рада користи се експериментална терминална балистика којом се може испитати балистичка отпорност панцирног челика ARMOX 500T. Преко терминалне балистике може се предвиђати понашање оклопа, а поред тога може се одредити и степен оклопне заштите. Према томе, у овом раду је из тих разлога посебан акценат стављен на терминалну балистику.

Терминална балистика подразумева већи број фактора због којих се разликују удари пројектила у мету од којих је најбитнија брзина пројектила. Брзина пројектила доминантан је фактор из разлога зато што она непосредно пре удара у мету утиче на његово понашање, као и на појаве које доминирају при ударима.

Познато је да је кинетичка енергија пропорционална са квадратом брзине, а како се брзина којом пројектил удара у мету повећава, оштећење на зони удара се смањује, тј. прелази из структурног у локално.

Брзине пројектила подељене су у следеће групе:

- 0-50 *m/s*: у овим границама брзине јављају се еластичне и пластичне деформације. Померање мете услед савијања је велико тако да дејство пројектила на мету није локално, већ се шири на локалне елементе конструкције који евентуално могу утицати на пробијање.

- 50-500 *m/s*: у овим границама деформације пројектила, који су у већини случајева веће тврдоће од мете су еластичне, а мета се пластично деформише. Утицај удара пројектила је локализованији са порастом брзине, тако да се пластично деформисање мете остварује у уској зони око места удара пројектила.

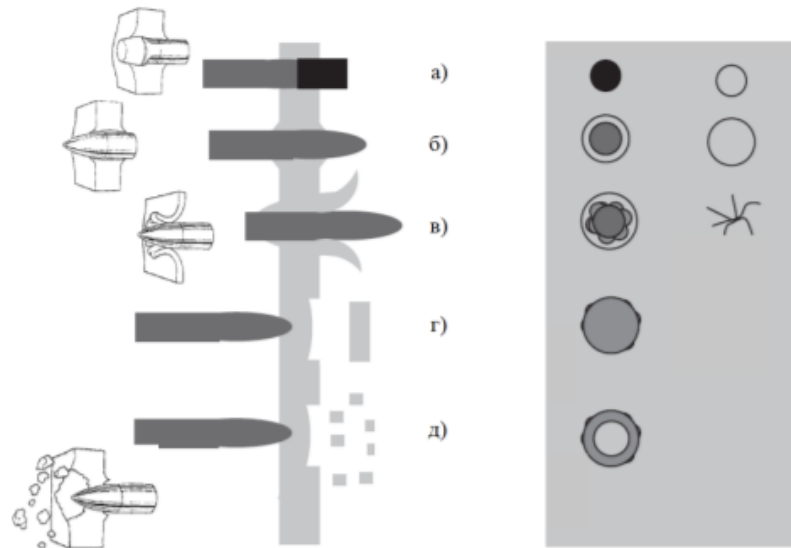
- 500-1300 *m/s*: у овој области долази до претварања кинетичке енергије у рад пластичне деформације како пројектила, тако и мете. Порастом брзине расте и утицај густине материјала пројектила на дејство пробијања. Локална зона пластичне деформације све је више ограничена на област која је два до три пута већа од пречника пројектила, те су глобалне деформације све мање видљиве. У ову област брзина спада већина војних пројектила, од меткова до пенетратора високе кинетичке енергије.

- 1300-3000 *m/s*: овде се понашање материјала може описати слично понашању флуида. Наиме, ове брзине налазе се изнад хидродинамичке прелазне брзине за дуктилне метале (брзина испод које се пројектил и мета могу описати као еластична тела, а изнад као флуиди). Притом долази и до ерозије пројектила услед напона који достижу и до неколико пута веће вредности у односу на вредности јачине материјала пројектила. Густина материјала пројектила представља веома битан фактор од којег зависи пробијање мете.

- > 3000 *m/s*: при овако великим брзинама понашање материјала пројектила и мете може се описати као понашање флуида, док чврстоћа материјала постаје занемарљива. Ерозија пројектила је неизбежна, док се на брзинама изнад 12000 *m/s* дешавају и експлозије при удару услед ослобађања велике количине кинетичке енергије. У овој области брзина спадају удари свемирских тела у свемирске летелице или удари пројектила који пробијају механизмом кумулативног млаза.

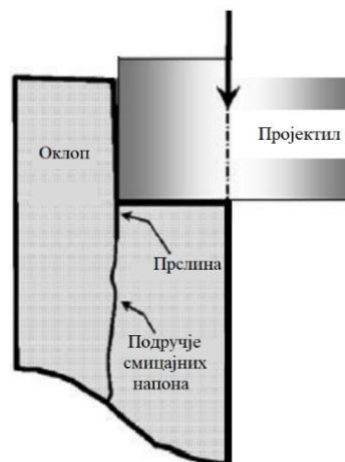
Проузрокована напрезања и деформације пролазе кроз материјал веома великим брзинама због чега квазистатичке силе образују стање равнотеже јер се спољашњим оптерећењима супротстављају напрезања која делују унутар материјала. При удару пројектила великом брзином, спољашње силе локално достижу свој максимум и разлажу се пре него што материјал у потпуности осети проузрокована напрезања. То је разлог због чега се ствара перфорација, а не пластична деформације већег дела конструкције.

Терминална балистика подразумева више начина перфорације оклопа услед дејства пројектила, који се јављају у зависности од својстава материјала оклопа, као и од облика врха пројектила.



Слика 6.1 Начини перфорације пројектила у оклоп

Први начин приказан на слици 6.1а при којем долази до избијања чепа из оклопа, где чеп настаје услед удара пројектила са равним или хемисферичним врхом при брзини која је око граничне брзине пробијања (најмања брзина при којој пројектил перфорира оклоп). Чеп настаје услед дејства адијабатског смицања при чему долази до формирања подручја смицајних напона (сл. 6.2).



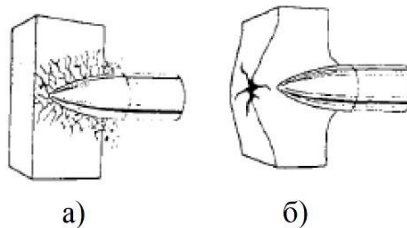
Слика 6.2 Формирање чепа

У том подручју сав рад пластичног деформисања претвара се у топлоту која доводи до локалног пораста температуре, јер због брзине деформисања и целог процеса пројектил не стиже да прође у потпуности кроз оклоп.

Локални пораст температуре узрокује додатно пластично течење у зони смицајног напрезања све до отпуштања или лома материјала. Начин перфорације приказан на слици 6.1б настаје услед дејства пројектила са шиљатим врхом у дуктилне материјале оклопа при чему пројектил погађа мету у тачки, а затим шири отвор гурајући радијално оклопни (заштитни) материјал.

На слици 6.1в приказан је начин перфорације оклопа који је такође карактеристичан за ударе пројектила са шиљатим врхом у оклопе мале дебљине, али и у неким случајевима јавља се и при ударима пројектила са равним врхом при брзинама које су приближне граничним брзинама пробијања.

Последице пробијања за овај начин перфорације карактеристичне су по томе што облик рупе са излазне стране оклопа личи на латице цвета. Ова појава карактеристична је код кртих материјала, а може се јавити у облику који је приказан на слици 6.3а. Начин перфорације који је приказан на слици 6.1г сличан је начину на слици 6.1д где се лом на излазној страни јавља услед иницијалне прслине због локалне нехомогености материјала насталој услед превелике деформације. Код керамичких материјала, начин перфорације карактеристичан је по доминантно радијалном смеру ширења прслине на излазној страни оклопа (сл. 6.3б).

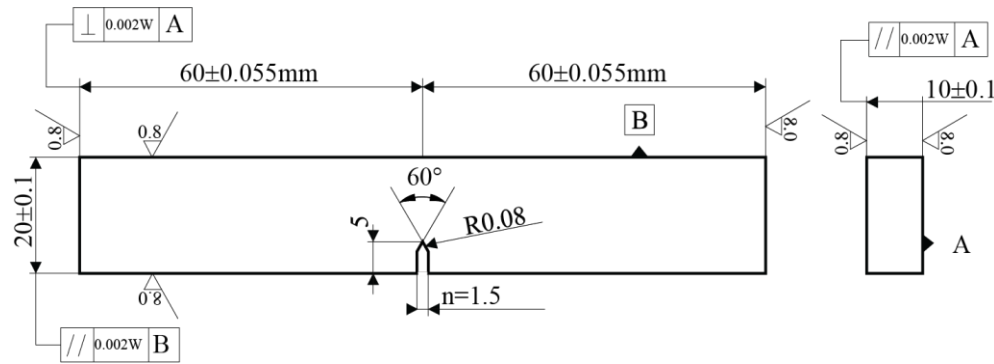


Слика 6.3 а) Перфорација кртих материјала и б) перфорација са радијалним ширењем прслине

6.3. Испитивање механике лома заварених спојева

Дијаграми механике лома основног материјала су добијени применом линеарно еластичне механике лома, док су дијаграми метала шава и ЗУТ-а добијени применом еласто пластичне механике лома. Узорак типа SEN (В), слика 6.4 дебљине 11 mm, ширине 120 mm и дужине 20 mm, су исечене из завареног споја, уређајем Water-jet.

Машински створена прслина је направљена у основном материјалу, ЗУТ-у и металу шава. Профилно тоцило са великом брзином обртања је коришћено за стварање машински зарезане прслине. После машински створене прслине, епрувета је обрађена на коначне димензије после чега је и обрушена на финалне мере (сл. 6.4). Епрувете су затим заморене, високофреквентним пулзатором, приказаним на слици 6.5. Током стварања иницијалне прслине констатно је праћена њена дужина техником попустљивости. Заморне прслине су у просеку дужине ≈ 5 mm.



Слика 6.4 Стандардна епрувета за савијање SEN (B)

За ова испитивања заморна прслина је добијена синусоидалним променљивим оптерећењем у опсегу - 70 до 70 Nm. Сви узорци су замарани при истом односу оптерећења $R=0,1$. Средње оптерећење и амплитуда су регистровани са тачношћу ± 5 Ncm. Остварена учесталост је око 200 Hz. Момент силе је био око 40 Nm, а у појединим случајевима и већи, јер је биран тако да заморна прслина порасте на жељену дужину за око 80000 циклуса.



Слика 6.5 Високофреквентни пулзатор за стварање заморне прслине

Стезни алат епрувете за савијање у три тачке је омогућио незнатно трења између додирних површина. Мерење отварања врха прслине, је испитано постављањем екстензометра на чеоној површини епрувете.

Дужина механички и променљивим оптерећењем створене прслине је измерена оптичким уређајем приказаним на слици 6.6



Слика 6.6 Уређај за мерење дужине прслине

6.3.1. Механике лома у основном материјалу

За време статичког деловања силе преко мерача је праћено померање, V , у зависности од интензитета примењене силе, P . Брзина оптерећивања епрувете је била толика да је брзина промене K -фактора у епрувети у границама од 0,5 до 2,75 $MPa\ m/s^{1/2}$.

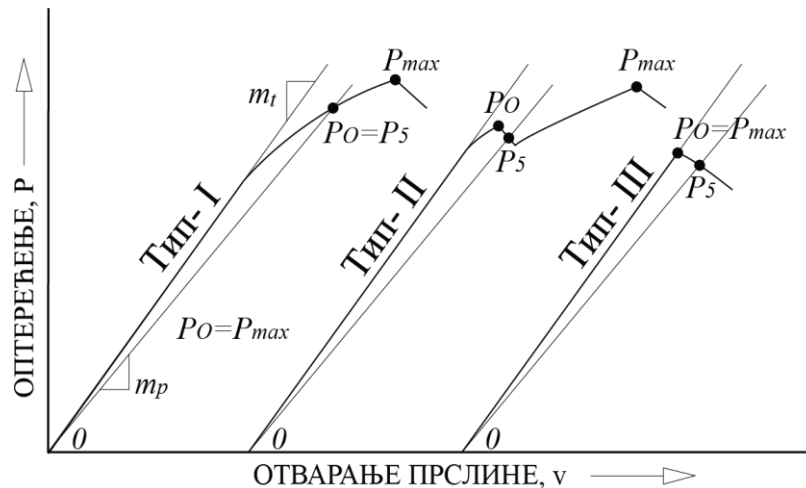
Испитивање је трајало док узорак више није могао да прихвати растуће оптерећење, односно када је дошло до пада интензитета силе. Мерење вредности сила померања је измерено помоћу екстензометра који је постављен на чеоним површинама епрувете (сл. 6.7).

За израчунавање кандидоване вредности жилавост лома, K_Q , узета је сила P_Q која је добијена повлачењем сечице OP_5 тако да је њен нагиб био за 5% мањи од нагиба тангенте $(P/V)_5 = 0,95 * (P/V)_0$, тачка P_5 , сл. 6.8 а), или се пре тачке P_5 појавио одскок, сл. 6.8 б), или је једнака највећој сили на P - V дијаграму између тачака O и P_5 , сл. 6.8 ц).

Мерење вредности сила померање је измерено помоћу екстензометра који је постављен на чеоним површинама епрувете (сл. 6.7).



Слика 6.7 Опрема за испитивање механике лома: основи ваљци, екстензометар, SEN(B) епрувета и трн за савијање

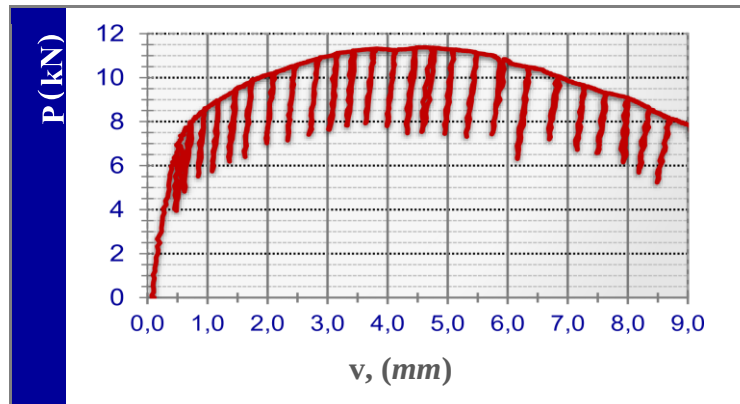


Слика 6.8 Облик записа зависности $P-V$ са поступком одређивања силе P_Q меродавне за израчунавање жилавости лома

6.3.2. Механика лома у метал шаву и ЗУТ-у

Експеримент механике лома је урађен методом једне епрувете према стандарду ASTM E1820-16. Док се дужина прслине утврђивала у одређеним интервалима (сл. 6.9).

За праћење прслине коришћена је техника пада потенцијала и попустљивости епрувете. При испитивањима мерен је и ход клипа. Током процеса затезања узорка се делимично растеретила а затим поново оптеретила (сл. 6.9).



Слика 6.9 Типични изглед криве сила-померање P - V са повременим растерећењима за примену методе попустљивости

На бази нагиба праве која дефинише попустљивост епрувете $C_i = (\Delta V / \Delta P)$, (попустљивост се повећава и нагиб праве растерећења се смањује како прслина напредује), док се на основу израза за калибрацију $a_i = f(C_i)$ одредила дужина прслине.

Историја оптерећења J_R крива отпорности у тренутку растерећења и J -интеграл се израчунава на основу израза:

$$J_i \frac{K_{(2i)}(1 - \nu_2)}{E} + J_{pl(i)},$$

где су:

E – модул еластичности,

K_i – фактор интензитета напона,

ν – Поасонов коефицијент,

J_{pl} – пластична компонента J -интеграла,

Фактор интензитета напона K_i је одређен изразом:

$$K_i = \left[\frac{P_i}{(B \cdot B_n W)^{1/2}} \right] \cdot \frac{2 + \frac{a_i}{W}}{\left(1 - \frac{a_i}{W}\right)^{3/2}} \cdot f_i \left(\frac{a_i}{W} \right).$$

Пластична компонента J интеграла дефинисана је изразом:

$$J_{pl(i)} = \left[J_{pl(i-1)} + \left(\frac{n_{i-1}}{b_{i-1}} \right) \frac{A_{pl(i)} - A_{pl(i-1)}}{B_n} \right] \cdot \left[1 - \frac{\gamma_{i-1}}{b_{i-1}} \cdot (a_i - a_{i-1}) \right]$$

где су:

$J_{pl(i)}$ – интеграл (параметар механике лома) пластична компонента,

B_n – нето дебљина епрувете,

$A_{pl(i)}$ – површина испод P-V криве након i -тог циклуса,

$A_{pl(i-1)}$ – површина испод P-V криве након $i-1$ циклуса,

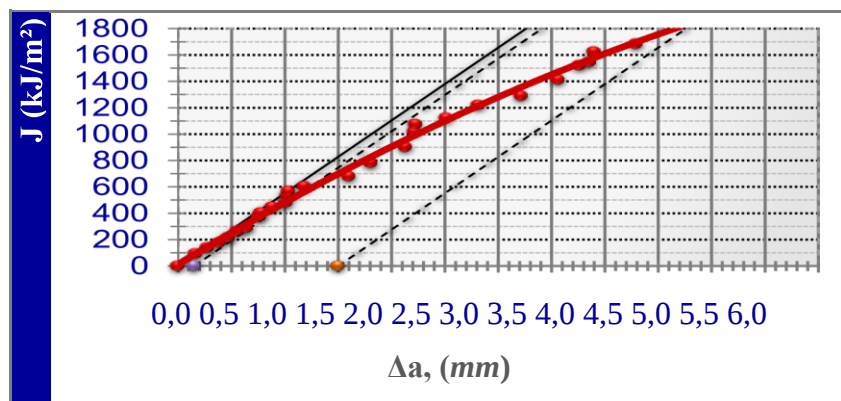
a_i – дужина прслине у i -том циклусу оптерећења,

a_{i-1} – дужина прслине у $i-1$ -том циклусу оптерећења,

Вредности $f(a_0/W)$ у изразу за срачунавање $K_{(i)}$ као и еластичне попустљивости епрувете $C_i=(\Delta V/\Delta P)$ која је потребна да би се срачунала површина $A_{pl(i)}$ као мера енергије утрошене на пластичну деформацију, су дефинисане стандардом ASTM E 813.

На основу података за серију епрувета може се зависност $J=J(\Delta a_i)$ односно крива отпорности J_R приказати у облику степене функције $J=C_2(\Delta a)C_1$ (сл. 6.10).

Коефицијенти C_1 и C_2 се одређују регресионом методом најмањих квадрата, при чему се узимају само они подаци који се налазе унутар линија одбацивања које су паралелне са правом затупљивања а повучене за дужине прслина $\Delta a=0,15 \text{ mm}$ и $\Delta a=1,5 \text{ mm}$ (сл. 6.10). Линија затупљивања на поменутој слици описује процес који непосредно претходи иницирању и стабилном расту прслине дуктилним чупањем у коме прслина привидно расте због заобљавања њеног врха.



Слика 6.10 Шематски приказ поступка дефинисања J_R криве отпорности

Гранична линија $0,15 \text{ mm}$ обезбеђује да је Δa најмање $0,15 \text{ mm}$, што омогућава прецизније мерење. Гранична линија $1,5 \text{ mm}$ обезбеђује да је Δa , начелно мање од 6% преосталог лигамента епрувете, што обезбеђује примењивост израза за срачунавање вредности J -интеграла.

Истовремено вредности J_i морају бити мање од максималне $J_{\max}=b_0\sigma_y/15$ коју капацитет епрувете дозвољава. Због стандарда ASTM E 813 који дефинише почетак раста прслине тренутак када она напредује за $0,2 \text{ mm}$ од почетне дужине прслине a_0 . То значи да је кандидована вредност J_q за критичну вредност J_{IC} дефинисана пресеком сечице паралелне линији затупљивања повучене $\Delta a=0,2 \text{ mm}$ и експоненцијалне J_R криве $J=C_2(\Delta a)C_1$.

Да би J_q важило као J_{IC} мора се испунити услов да је:

$$B \cdot b_0 > 25 \cdot \frac{J_q}{\sigma_y}$$

где су:

B – дебљина епрувете,

b_0 – лигамент

J_q – кандидована вредност J –интеграла,

σ_y – напон течења

Када се епрувете понашају на претежно еластичан начин, могу се одредити било K_{IC} или J_C али случај са K престаје да важи са појавом већег пластичног деформисања на врху прслине. Уколико се испуне потребни димензионални захтеви при одређивању J_C онда се она преко наведеног израза може изразити у облику еквивалентног K_{IC} .

Вредност J_{IC} за почетак дуктилног раста прслине мора да задовољи једначину дату испод. Такође да би се конверзија могла извршити и у случају да се цепање при J_C коме не претходи стабилан раст прслине одвијао под контролом J -интеграла мора се задовољити услов да је:

$$B \cdot b_0 \geq \frac{M \cdot J_C}{\sigma_y}$$

После потпуно завршеног испитивања, величина и облик заморне прслине се могу релативно лако утврдити. Површина заморног прелома и оне добијене статичким дејством силе током испитивања имају различиту топографију, а тиме и различито одбијања светлости. То омогућава јасно раздвајање ове две области.

6.4. Добијени резултати тестирања

Иако су узорци израђени тако да буду по три у свакој групи (сучеони, угаони и угаоно-рубни), испитивање на балистичка оптерећења изведена су само на по једном узорку из сваке групе. Тако је урађено, пре свега, због сложености експеримента, а поред тога добијени подаци су били довољни да се процени отпорност. Циљ овог експеримента био је оцена оштећења, односно тип пробоја на основним зонама завареног споја (основном материјалу-ОМ, зони утицаја топлоте-ЗУТ, зони стапања-ЗС, као и на металу шава-МШ) , муницијом врсте 7.62 x 39 M67 Ball, 7.62 x 51 NATO Ball (Ball M80) и панцирним метком 7.62 x 54R B32 API (Dragunov). Метак 7.62 x 39 M67 Ball није по заштитним нивоима које НАТО прописује, већ по руским стандардима балистичке заштите за који SSAB не гарантује.

Опрема за извођење опита:

- Опитна цев са затварачем за мерење брзине, у калибру 7.62 x 39 mm,
- Опитна цев са затварачем за мерење брзине, у калибру 7.62 x 51 mm,
- Опитна цев са затварачем за мерење брзине, у калибру 7.62 x 54 mm,
- Постоље за опитну цев,
- Муниција 7.62 x 39 M67 Ball, брзина на $v_{25} = 725 \text{ m/s}$ (сл. 6.11; таблица 6.4),

- Муниција 7.62 x 54R B32 API, брзина на $v_{25} = 790 \text{ m/s}$ (сл. 6.12; таблица 6.5).



Слика 6.11 7.62x39 M67 Ball

Таблица 6.4. Карактеристике муниције 7.62 x 39 M67 Ball

Даљина, <i>m</i>	0	50	100	150	200	250	300
Брзина, <i>m/s</i>	750	701	655	610	566	526	487
Енергија, <i>J</i>	2242	1961	1708	1481	1278	1101	946
Путања, <i>cm</i>	-5	1.9	3.8	0	-10.2	-28.6	-56.0



Слика 6.12 7.62x54R B32 API

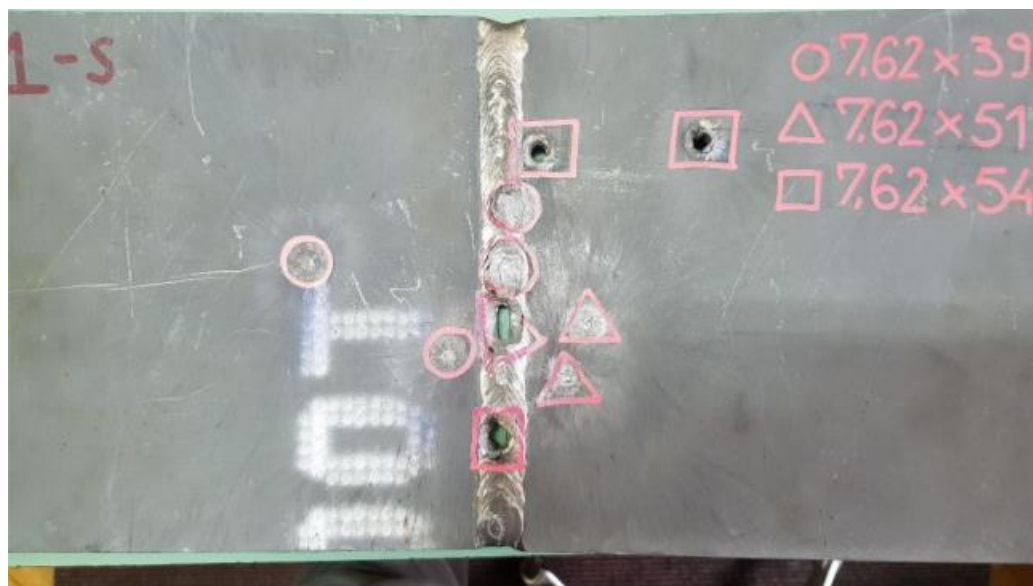
Таблица 6.5. Карактеристике муниције 7.62 x 54R B32 API

Даљина, <i>m</i>	0	100	200	300
Брзина, <i>m/s</i>	864	795	730	668
Енергија, <i>J</i>	3507	2973	2504	2096
Путања, <i>cm</i>	-	0	-3.6	-13.3

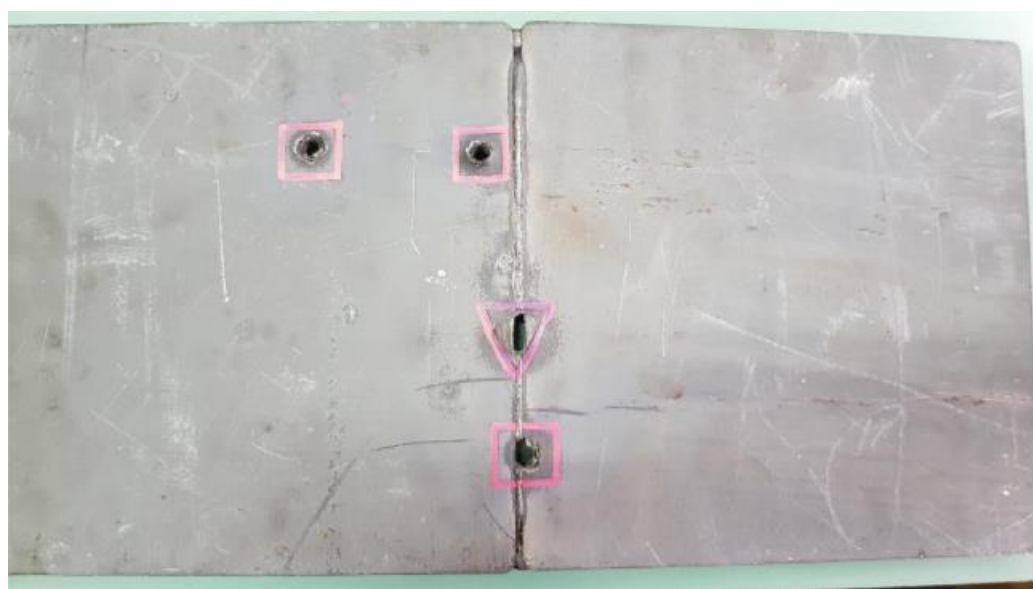
Узорци панцирног челика пре почетка експеримента позиционирани су чврсто у у дрвеним оквирима како не би дошло до губитка енергије услед померања плоча при удару метка. Растојање излазног отвора опитне цеви до узорка је 10 *m*.

По плану експеримента заварени спојеви су постављани тако да завар буде управан на правац кретања метка, што ће код угаоног и угаоно-рубног споја показати понашање основног материјала и зоне утицаја топлоте при удару метка под углом.

У табlici 6.6 дат је извештај добијен на основу визуелног прегледа сучеоног споја после завршеног експеримента који је приказан на слици 6.13 са улазне стране, док је на слици 6.14 дат приказ излазне стране. Испалено је укупно 10 пројектила три различита калибра, а уколико је до пробоја дошло, тип пробоја усвојен је према слици 6.1.



Слика 6.13 Приказ испитаног узорка сучеоног споја са улазне стране



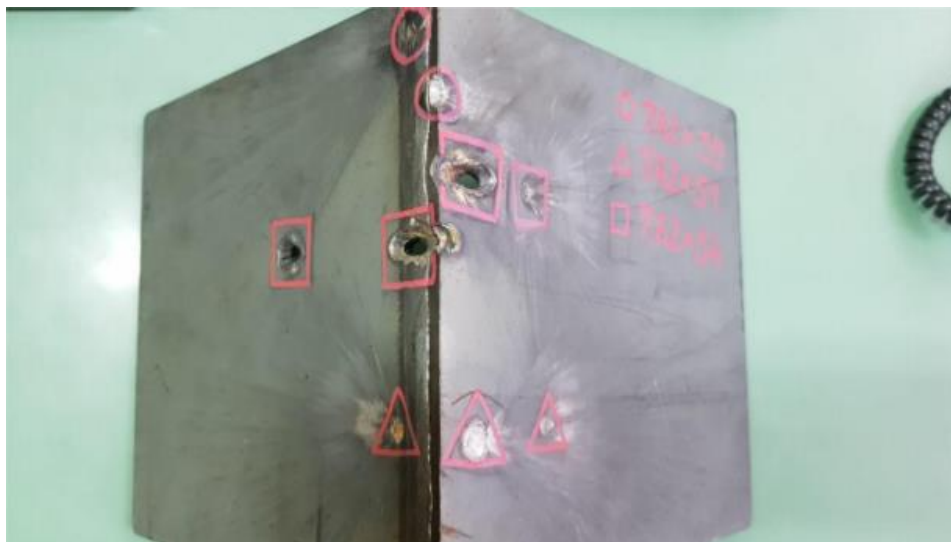
Слика 6.14 Приказ испитаног узорка сучеоног споја са излазне стране

Таблица 6.6 Извештај о балистичком испитивању сучеоног споја

Калибар	Зона поготка	Број погодака	Степен оштећења	Тип пробоја
7.62 x 39	ОМ	1	Без значајног оштећења	-
7.62 x 39	ЗУТ	1	Без значајног оштећења	-
7.62 x 39	МШ	2	Непотпуни пробој	-
7.62 x 51	ЗУТ	2	Без значајног оштећења	-
7.62 x 51	МШ	1	Непотпуни пробој	-
7.62 x 54	ОМ	1	Потпуно пробијено	сл. 6.1в
7.62 x 54	ЗУТ	1	Потпуно пробијено	сл. 6.1в
7.62 x 54	МШ	1	Потпуно пробијено	сл. 6.1в

Када је оцењено стање сучеоног споја на балистичка оптерећења приступљено је фиксирању угаоног споја, такође у дрвени оквир. Испалено је укупно 9 пројектила три различита калибра, а извештај балистичког испитивања дат је у табlici 6.7.

На слици 6.15 приказана је улазна страна угаоног споја, док је на слици 6.16 дат приказ излазне стране, на основу којих је визуелним прегледом и на основу слике 6.1 сачињен овај извештај.



Слика 6.15 Приказ испитаног узорка угаоног споја са улазне стране



Слика 6.16 Приказ испитаног узорка угаоног споја са излазне стране

Таблица 6.7 Извештај о балистичком испитивању угаоног споја

Калибар	Зона поготка	Број погодака	Степен оштећења	Тип пробоја
7.62 x 39	ОМ	1	Без значајног оштећења	-
7.62 x 39	ЗС	2	Без значајног оштећења	-
7.62 x 51	ОМ	1	Без значајног оштећења	-
7.62 x 51	ЗУТ	1	Без значајног оштећења	-
7.62 x 51	ЗС	1	Без значајног оштећења	-
7.62 x 54	ОМ	1	Потпуно пробијено	сл. 6.1в
7.62 x 54	ЗУТ	1	Потпуно пробијено	сл. 6.1в
7.62 x 54	МШ	1	Потпуно пробијено	сл. 6.1в

На крају је испитан угаоно-рубни спој који, како је већ напоменуто, са унутрашње стране има плочице од истог материјала које би идејно требало да представљају додатну заштиту у случају пробоја метала шава и његове околине. Испалено је укупно 8 пројектила три различита калибра у карактеристичне зоне завареног споја.

Извештај балистичког испитивања приказан у табlici 6.8 сачињен је, такође на основу визуелног прегледа улазне (сл. 6.17) и излазне стране (сл. 6.18) угаоно-рубног узорка, а уколико је дошло до пробоја, тип пробоја је усвојен на основу слике 6.1.



Слика 6.17 Приказ испитаног узорка угаоно-рубног споја са улазне стране



Слика 6.18 Приказ испитаног узорка угаоно-рубног споја са улазне стране

Таблица 6.8 Извештај о балистичком испитивању угаоно-рубног споја

Калибар	Зона поготка	Број погодака	Степен оштећења	Тип пробоја	Степен оштећења ојачања	Тип пробоја ојачања
7.62 x 39	ОМ	2	Без значајног оштећења	-	-	-
7.62 x 39	ЗУТ	2	Без значајног оштећења	-	-	-
7.62 x 51	ОМ	1	Без значајног оштећења	-	-	-
7.62 x 51	ЗС	1	Без значајног оштећења	-	-	-
7.62 x 51	МШ	1	Потпуно пробијено	6.1a	-	-
7.62 x 54	ЗС	2	Потпуно пробијено	6.1в	Потпуно пробијено	6.1a
7.62 x 54	ОМ	1	Потпуно пробијено	6.1в	Непотпуно пробијено	-

7. ЗАКЉУЧАК

Индустрија челика се селективно и успешно суочава са решавањем питања који челик одабрати за специфичне намене. Развијене су нове класе челика које су омогућиле израду заварених конструкција за много строже услове рада, уз истовремени развој додатних материјала. Истраживања у области нових челика и додатних материјала, заједно са усавршавањем технологија заваривања, имају велику улогу у повећању сигурности безбедности заварених конструкција из аспекта отпорности према кртом лому, замору, корозији, хабању, пузању итд.

Овде је конкретно разматрана заварљивост панцирног челика ARMOX 500T који спада у групу челика повишене јачине, те је на почетку овог рада указано је на њихове повољне особине, дата је подела, као и проблеми који се јављају у току заваривања за различите групе челика повишене јачине. Будући да су склони настанку хладних прслина дате су препоруке и мере за њихово спречавање.

Што се тиче панцирних челика, описане су могућности њихове примене у индустрији, захтеви који се за њих постављају, приказан је процес њихове производње и утицај легирајућих елемената које панцирни челици садрже у свом хемијском саставу. С обзиром на то да је реч о челицима класе ARMOX дат је и преглед различитих класа тих челика под том комерцијалном ознаком светски познатих произвођача.

Оцена заварљивости и избор оптималне технологије заваривања, обрађени у четвртој глави овог рада, имају за циљ да се на правилан начин, узимајући у обзир све факторе, правилно пропише технологија заваривања којом ће се добити заварени спојеви без појаве хладних прслина, без грешака и са захтеваним механичким особинама. Добијена оптимална технологија заваривања пренета је на израду узорака намењеним за балистичка испитивања. Цео процес израде узорака илустрован је фотографијама уз комплетну спецификацију технологије заваривања.

Добијеним резултатима показало се да су ОМ, ЗУТ и МШ отпорни на меткове калибра 7.62x39. Испитивањем муницијом калибра 7.62x51, као зона отпорна на пробој, показао се само ОМ. За панцирну муницију калибра 7.62x54R нема препрека, све зоне су угрожене, па чак и ојачања постављена код угаоно-рубног споја.

На основу добијених резултата и њиховог разматрања, код заварених конструкција које су изложене дејству пројектила, пројектовати заварене спојеве тако да метал шава увек буде сакривен колико год је могуће, а сучеоне спојеве строго избегавати.

8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Јовановић, М., Лазић, В., Маринковић, П., Недељковић, Б., Александровић, С., Милосављевић, Д.: *Оцена заварљивости и избор најповољнијег поступка и технологије заваривања челика повишене јачине Weldom 700*, Крагујевац, мај 2015.
- [2] Јовановић, М., Лазић, В.: *Технологија ливења и заваривања*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2015.
- [3] Јовановић М., Адамовић Д., Лазић В.: *Технологија заваривања - приручник*, друго издање, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2011.
- [4] Јовановић, М., Лазић, В., Арсић, Д.: *Наука о материјалима I*, Факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2017.
- [5] Јовановић, М., Лазић, В.: *Предлог технологије заваривања панцирних челика (класе ARMOX 500T)*, Крагујевац, 2012.
- [6] Јовановић, М., Лазић, В.: *Препоручени параметри комбинованог заваривања панцирних челика класе ARMOX – (кратко упутство)*, Крагујевац, 2012.
- [7] Смиљанић, М.: *Заварљиви финозрни челици-способност заваривања и заваривање*, Заваривање и заварене конструкције (4/2006), стр. 155-164.
- [8] Вељановски, Б., Калезић, М., Грабулов, В., Никачевић, М.: *Примена легура алуминијума у средствима наоружања*, Научно-технички ПРЕГЛЕД, бр. 3, 1999. године, стр. 60-65.
- [9] Јовановић, М., Лазић, В.: *Практикум РЕЛ и МАГ/МИГ заваривања*, Машински факултет у Крагујевцу, Крагујевац, 2008.
- [10] Група аутора: *Заваривање топљивом електродом у заштити инертних гасова или активних гасова (МИГ-МАГ и пуњена жица)*, Материјали за IWE/IWT, број док.: 1.8.1 и 1.8.2, Завод за заваривање, Београд, 2014.
- [11] Gas Metal Arc Welding-Product and Procedure Selection, www.lincolnelectric.com, приступљено 2.10.2020.год.
- [12] Scotti, A., Ponomarev, V., Lucas, W.: Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: Features, mechanisms, classification, Journal of Material Processing Technology 214 (2014) pp. 2488-2496.
- [13] Perform Gas Metal Arc Welding, Workbook (AUM8057A) http://www.dtwd.wa.gov.au/sites/default/files/teachingproducts/AUT032_CCBY.PDF, приступљено 3.10.2020. год.
- [14] Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW), <http://www.millerwelds.com>, приступљено 7.9.2020. год.
- [15] Група аутора: *Увод у електролучно заваривање у заштити гаса*, Материјали за IWE/IWT, број док.: 1.6., Завод за заваривање, Београд 2014.
- [16] <https://www.ssab.com/products/brands/armox>

[17] Радовић, Н., Дробњак, Ђ.: *Развој челика за израду заварених конструкција повишене сигурности*, Заваривање и заварене конструкције (3/2001), стр. 81-92.

[18] Каталог Електроде Јесенице

[19] Ракичевић, М.: *Оцена заварљивости и избор оптималне технологије заваривања панцирног челика ARMOX 500T*, мастер рад, факултет инжењерских наука у Крагујевцу, Крагујевац, 2018.