



**УНИВЕРЗИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“ – БИТОЛА
ТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ - БИТОЛА**



**Трет циклус студии на студиска програма
Машинство**

**ВЛИЈАНИЕ НА ПОСТАПКАТА НА ЗАВАРУВАЊЕ ВРЗ
ЗАОСТАНАТИТЕ НАПОНИ**
докторски проект

Кандидат:
М-р. Никола Велески
Индекс бр.33

Ментор:
Проф.д-р. Стојанче Нусев

Содржина

Апстракт	3
1. Вовед	4
2. Основни поими во заварувањето и видови на заварување	5
3. Постапки на заварување	9
3.1. Гасно заварување	9
3.2. Рачно електролачно заварување (РЕЛ)	9
3.3. ТИГ заварување	10
3.4. МИГ/МАГ заварување	11
4. Поим и видови на заостанати напони	11
5. Заостанати напони во заварените споеви	12
6. Ефекти на заостанатите напони предизвикани од заварување	12
7. Нумеричка анализа на напрегањата кај вертикален цилиндричен резервоар	13
8. Заклучок	15
Користена литература	16

Апстракт

Во инженерството, компонентите се дизајнираат со пресметка на номиналниот напон, кој мора да биде помал од граничниот напон за карактеристичниот материјал. На пример, напонот на течење или заморната цврстина и еден или повеќе безбедносни фактори. Со овие фактори се покриваат влијанијата како што се квалитетот на површината, нехомогености во материјалот и точни услови на оптоварување. Освен овие добро познати фактори, доста непознат и често изоставен фактор се заостанатите напони, кои се јавуваат во текот на производствените процеси, на пример, валање, влечење, ковање или заварување, кои значително влијаат на стабилноста на конструкцијата при експлоатација. Посебно значење имаат заостанатите напони кои се јавуваат при процесот на електролачно заварување.

Клучни зборови: заварување, напон, заостанати напони,

1. Вовед

При проектирање на вертикални цилиндрични резервоари со рамно дно, односно ниско притисни садови, се користи релативно висок степен на сигурност. Сепак, недоволното познавање на сите условите за работа, лошата контрола на квалитетот за време на производството, како и промените во работните услови, можат значително да го намалат проектираниот степен на сигурност. Една од најзначајните промени во работните услови е процесот на изработка на самите резервоари.

Со оглед на различните механички својства на одредени области на заварените споеви, однесувањето на садовите со големи димензии како целина не е лесно за предвидување или толкување. Иако вертикалните цилиндрични резервоари со рамно дно припаѓаат на тенкосидните садови, чија пресметка по мембранска теорија значително се поедноставува, во оваа прилика би сакале да го истакнеме конструкцискиот аспект што не може да се игнорира. Во областа на преодните споеви помеѓу плаштот и подот на резервоарот, потоа во областа на спојување на подот, оваа теорија на дистрибуција на напонските состојби не е сигурна, односно присутна е исклучително висока концентрација на напони. Имено, овие области припаѓаат на садови со дебели ѕидови каде што се применува моменталната теорија и имаат сосема поинаква регуларноста на распределбата на напрегањата и деформациите. Иако од вкупната површина на резервоарот зафаќа околу 10%, посочувањето на оваа појава е многу важна за безбедноста на целиот систем.

Тука, исто така, треба да се земат во предвид и другите оптоварувања на кои е изложена на самата констрикција: сопствена тежина, температура, сеизмика, ветер, снег и сл. Затоа има потреба од истражување во смисла на симулирање на издржливоста на конструкцијата со помош на софтвери, како и соодветни експериментални испитувања на напрегањата и деформациите во зоната на заварените споеви.

2. Основни поими во заварувањето и видови на заварување

➤ Основни поими

Во понатамошните излагања ќе бидат употребувани многу термини, специфични за оваа област. Некои се заеднички за поголем број, или сите техники на заварување, додека пак други термини се ограничуваат само на одделни техники.

Практично е да се дадат дефиниции на најчесто употребуваните термини, заеднички за голем број техники, пред да се помине на поединечно проучување на секоја од нив.

Термините ќе бидат дефинирани според азбучниот редослед:

- брзина на депонирање,
- грешка во заварот,
- дисконтинуитет,
- додатен материјал,
- завар
- заварен спој,
- заварливост,
- заварување,
- заостанати напони и деформации,
- зона под влијание на топлината, ЗВТ,
- оскан на заварот,
- пенетрација (продирање),
- предгревање,
- технологија на заварување.

Брзина на депонирање, претставува маса на додатен материјал нанесен во единица време во тек на заварувањето.

Грешка во заварот, еден или повеќе дисконтинуитети, кои поради акумулираните ефекти го чинат заварениот дел неспособен да ги задоволи стандардите или спецификациите.

Дисконтинуитет, прекин на стандардната маса на заварот, како нахомогеност во механички, металуршки или физички поглед на материјалот на заварот. Дисконтинуитетот немора да биде грешка во заварот.

Додатен материјал, обично е во форма на жица или електрода, која пред заварувањето не припаѓа на материјалот што се спојува, туку преку топење, во текот на заварувањето, учествува во спојувањето.

Завар, материјализирано место на спојувањето.

Заварен спој, два и повеќе компонирани елементи меѓусебно споени со завар.

Заварливост, способност на еден материјал да биде заварен, а во наметнати услови од природата на конструкцијата, при што покажува задоволително однесување во експлоатација.

Заварување, претставува процес на спојување на два или повеќе елементи од исти или различни материјали, со загревање на погодна температура, со или без употреба на притисок и со или без примена на додатен материјал, со што се остварува

материјален континуитет и при тоа се тежи спојот да има што порамномерни карактеристики.

Заостанати напони, кои постојат во конструкција или дел, како последица на термичка или механичка обработка. При заварувањето произлегуваат поради собирање на растопениот материјал при ладење до температурата на околината, а како резултат на реакцијата на пониско загреани зони оддалечени од оската на заварот.

Зона под влијание на топлината, ЗВТ, дел од основниот материјал кој не се топи, но чии механички карактеристики или микроструктура, се менуваат поради внесената топлина при заварувањето.

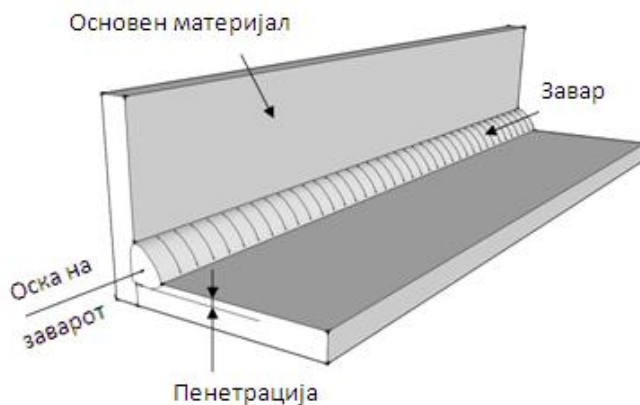
Оска на заварот, линија по должина на заварот низ геометрискиот центар на попречниот пресек на заварот.

Основен материјал, материјал од кој се изработени деловите кои се спојуваат.

Пенетрација (продирање), претставува минимална длабочина на заварот мерено од лицето.

Предгреење, внесување на топлина во основниот материјал кратко време пред заварувањето.

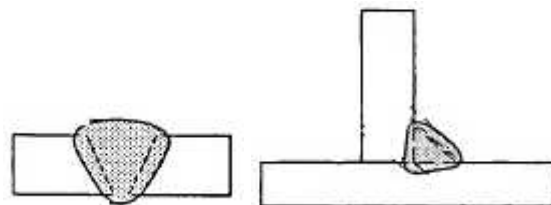
Технологија на заварување, детални техники за изведба на заварени споеви, а за добивање на заварена конструкција.



Слика 1. Приказ на некои поими од техниките на заварување

➤ Видови завари

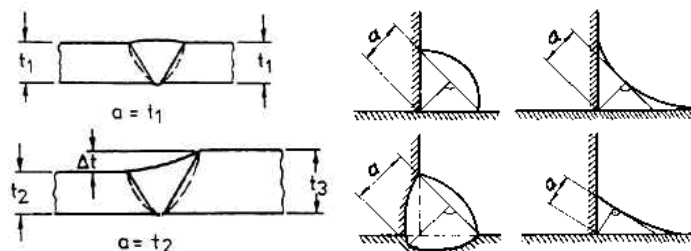
Од претходно изнесените дефиниции за завар и заварен спој се гледа основната разлика помеѓу овие два поими, кои многу често во праксата се изедначуваат како да се работи за едно исто. Но да се потенцира уште еднаш, **завар** претставува материјализирано место на спојувањето, а **заварен спој** чинат два и повеќе елементи поставени во определена положба и меѓусебно споеви со завар. Заварите најчесто се изведуваат како челни, слика 2а и аголни, слика 2б.



Слика 2. а)Челен завар б)Аголен завар

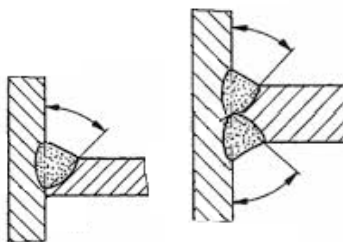
Челните завари се изведуваат по целата дебелина на еден и/или двата елементи кои се спојуваат. Димензии на еден завар се: должина L , широчина b и дебелина a .

Дебелината на еден челен завар е еднаква со дебелината на елементите кои се спојуваат, ако се со исти дебелини, или со дебелината на потенкиот елемент, ако се со различни дебелини, слика 3а. Додека дебелината на еден аголен завар е еднаква на височината на впишан рамнокрак триаголник во попречниот пресек на заварот. Во случај на поголема пенетрација на коренот на заварот дебелината е поголема, слика 3б.



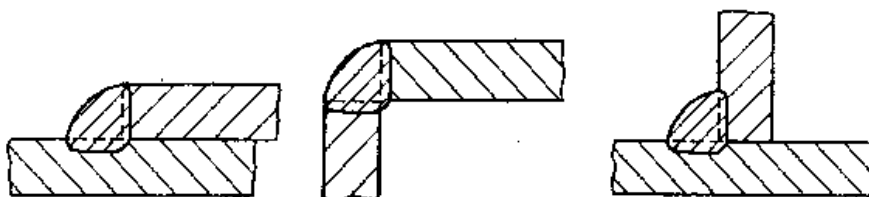
Слика 3. а) Дебелина на челен завар б) Дебелина на аголен завар

Со челни завари се спојуваат елементи кои лежат во иста рамнина, еден спроти друг, и поретко елементи кои се во различна рамнина, нормални еден на друг. Тоа се елементи кои се изложени на товари кои предизвикуваат нормални напони на затегнување или притисок. Додека со аголни завари се спојуваат елементи во најразлични взаемни положби, кои се изложени на товари кои предизвикуваат нормални и тангенцијални напони. Со челни завари може да се изведат аголни споеви, слика 4.



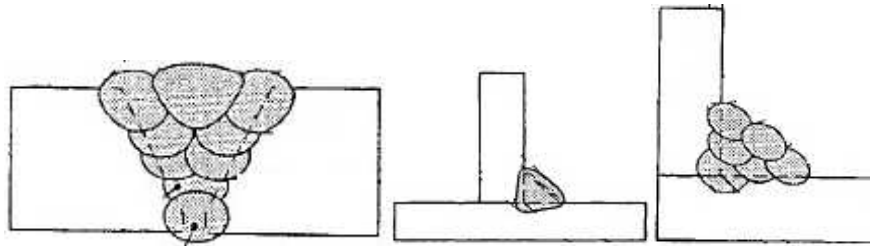
Слика 4. Аголни споеви реализирани со челен завар

Со аголни завари може да се реализираат повеќе видови заварени споеви и тоа:



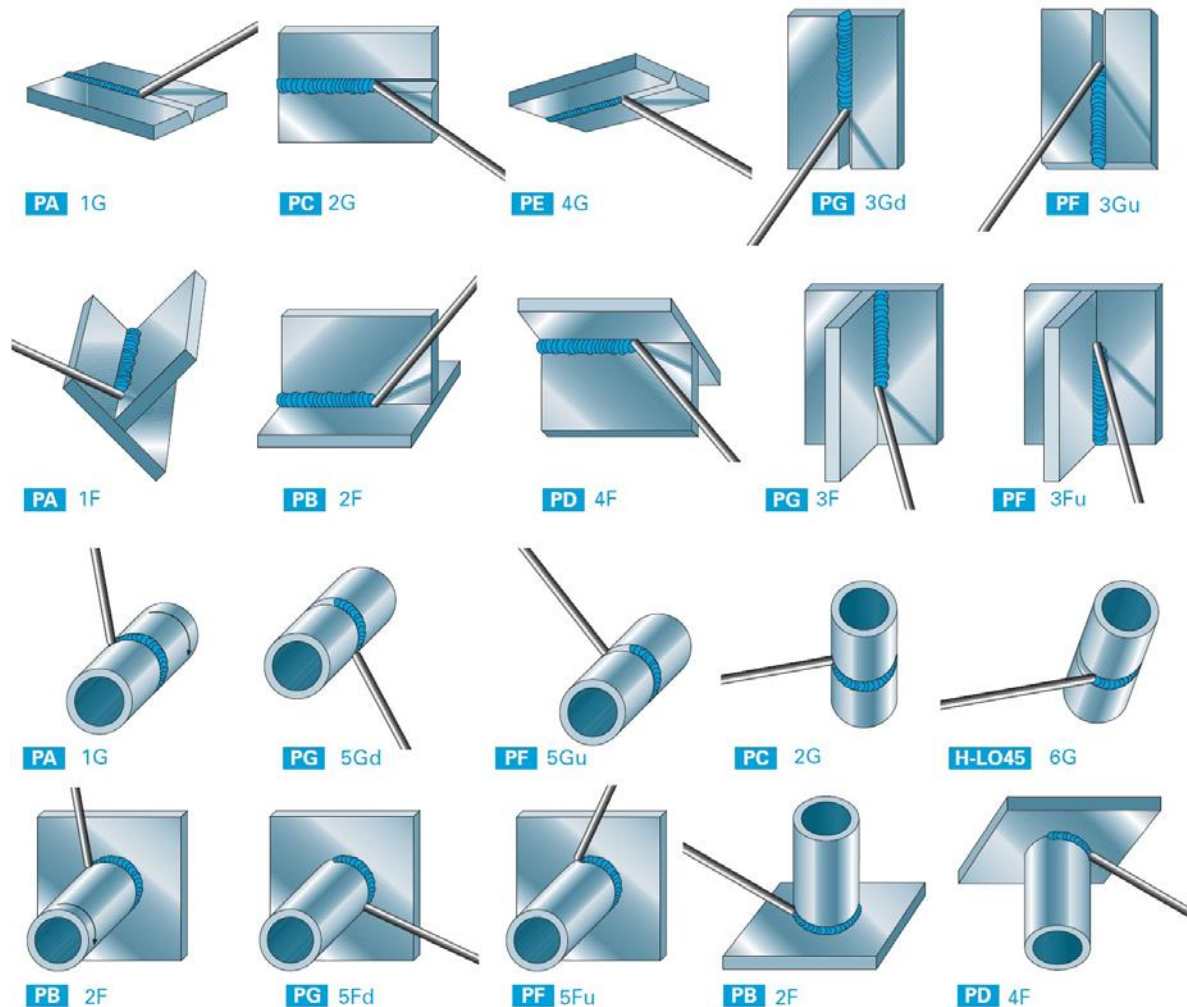
Слика 5. Видови заварени споеви реализирани со аголен завар

Заварите, во зависност од дебелината на елементите кои се спојуваат и применетата техника на заварување, може да бидат изведени во еден или во повеќе премини, слика 6. Така една иста дебелина од исти материјал со РЕЛ техника може да се завари во два или повеќе премини, а со ЕПП техника само во еден премин.



Слика 6. Изведба на заварите во еден и повеќе премини

При спојувањето на плоскати елементи, аголот што го чини оската на заварот со хоризонталната рамнина, како и рамнината во која е направен заварот, ја определува положбата на заварување. Положбите на заварување при спојувањето на: плоча со плоча со челен или аголен завар, цевка со цевка со челен завар и цевка со плоча со аголен завар, се дефинирани во стандардот DIN EN ISO 6947 и ASME, слика 7. Положбите на заварување често се прикажуваат и описно, како: корито, хоризонтална, хоризонтално-вертикална, вертикална, над глава и слично.



Слика 7. Положби на заварување

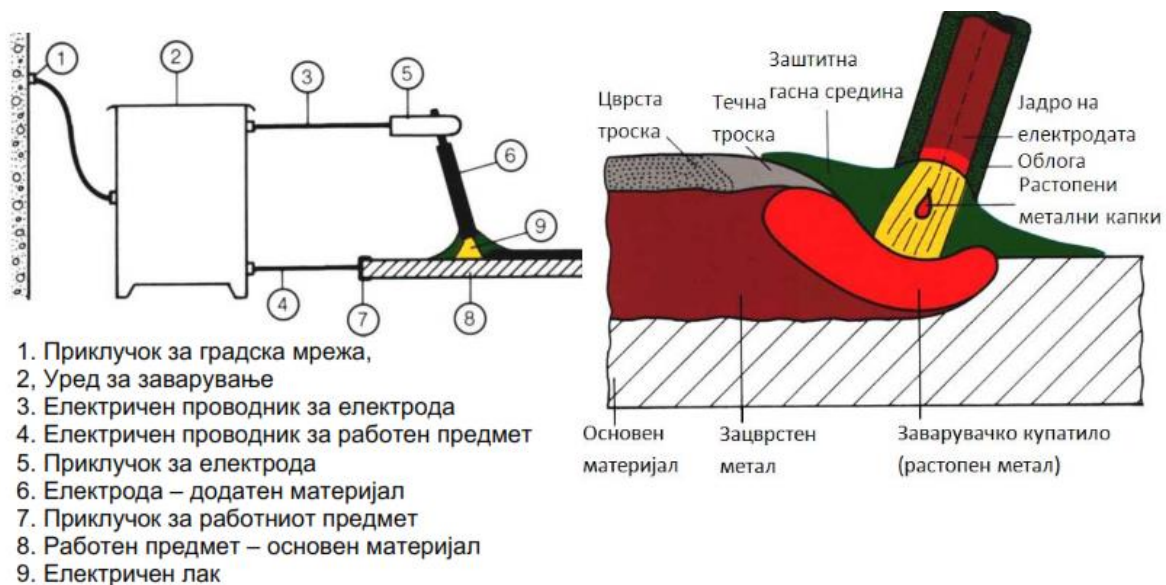
3. Постапки на заварување

3.1. Гасно заварување

Гасно заварување е постапка со која се создава нераздвоива врска врз основа на енергијата на активација, обезбедена од согорување на гасови за согорување, при што се растопува само соновниот или основниот и додатниот материјал. Овој вид заварување често се користи за структури со тенки јаглородни челици, за поправка на производи од леано железо, како и за заварување на оштетени делови од црни и обоени метали.

3.2. Рачно електролачно заварување (РЕЛ)

Рачното електролачно заварување (РЕЛ), според квантитетот на примената, сè уште е една од најприменуваните техники на заварување во заварувачката технологија кај нас. Широката примена е последица на можностите и економичноста што ги пружа во голем број случаи: се заварува во сите положби и за голем број материјали и, доколку работи квалификуван заварувач, може да се постигнат завари со добар квалитет, односно да ги задоволат барањата на експлоатацијата. Оваа техника се применува за работа во фабрички и теренски услови и, главно, просторните барања за користење на оваа техника се незначителни. Електричниот лак се воспоставува во слободна атмосфера со метален контакт меѓу електродата, која воедно е и додатен материјал и, работниот или некој помошен предмет. Потоа електродата се оддалечува од предметот и рачно се одржува растојанието т.е. должината на електричниот лак. Поради рачното водење на електродата, должината на лакот се менува и, со суперпонирање на ефектот на куси врски заради капење на растопениот метал од електродата, режимот на заварувањето осцилира во пошироки граници. Заварувањето може да се изврши со обложени и необложени електроди. Денес за индустриска примена е интересно само заварувањето со обложени електроди. На слика 8 се дадени главните елементи кои го овозможуваат заварувањето и резултатите на дејствување на електричниот лак, изворот на струја кој дава еднонасочен или променлив напон и кој има стрмно опаднувачка карактеристика, каблите и држачот на електродата, електрода со облога и работниот предмет кои делумно се топат за време на процесот и состојбата на околината на лакот во текот на заварувањето.

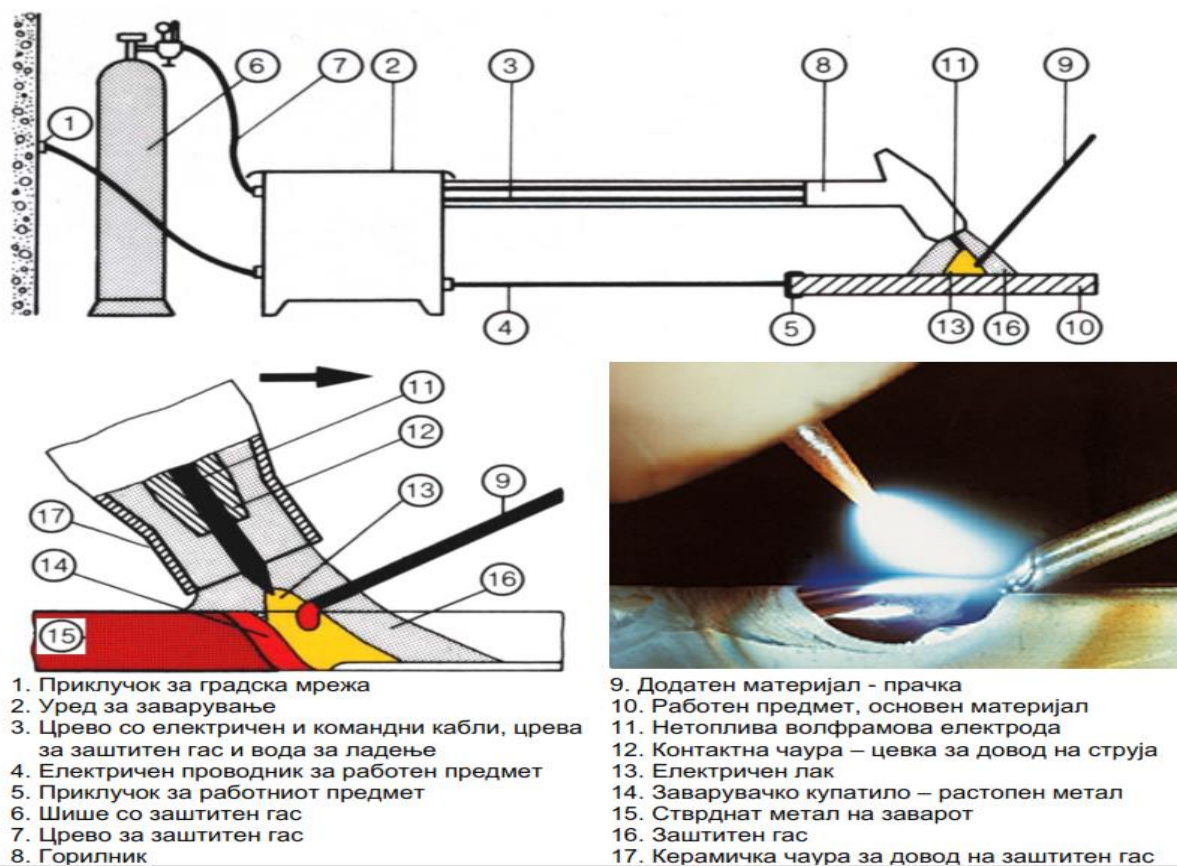


Слика 8. Основни елементи при РЕЛ заварување

Топлината што ја ослободува електричниот лак го топи металното јадро на електродата, облогата и најблиските слоеви од основниот материјал. Како резултат на тоа, непосредно под столбот на лакот се јавува кратер, бања на течен метал, кој е покриен со течна троска, која е производ на топењето на облогата. На одредена далечина од лакот, во линија каде што тој дејствувал, постои стврднат метал, завар покриен со стврдната троска. При топење на облогата се ослободува облак на гасови или пареи кои ја обвиваат растопената бања, играјќи улога на заштитник против дејството на околната атмосфера. Слична е улогата и на стврднатата троска која го заштитува металот на заварот во текот на ладењето. Режимот на РЕЛ го чинат: дијаметарот и видот на електродата, висината на напонот и јачината на струјата, брзината на заварувањето, видот на електричната струја и поларитетот. При заварување со еднонасочна струја поларитетот може да биде директен и индиректен. При директниот поларитет, додатниот материјал, електродата е на „-“ пол - катода, а основниот материјал е на „+“ пол - анода. При индиректниот поларитет додатниот материјал, електродата е на „+“ пол - анода, а основниот материјал е на „-“ пол – катода. Режимот се избира според дијаметарот и видот на електродата, а електродата се избира во зависност од работните предмети, кои, природно, секогаш се појдовниот и крајниот фактор во заварувањето. Вообичаено при оваа техника на заварување се среќаваат напони од 17 до 40V и јачина на струјата од 15 до 500A.

3.3. ТИГ постапка

Кај ТИГ техниката на заварување електричниот лак гори помеѓу нетопливата електрода од волфрам и основниот материјал, во заштитна атмосфера од инертен гас, најчесто аргон, слика 9.



Слика 9. Основни елементи при ТИГ заварување

ТИГ техниката се применува за заварување на потенки елементи од високолегирани челици, алуминиум и алуминиумски легури, бакар и бакарни легури и слични материјали. При подготовката на елементите од овие материјали за заварување со ТИГ потребно е аголот на закосување да е поголем од 60° , поголем од закосувањето за соодветни дебелини кај РЕЛ. Ова е поради помалата пенетрација, која се постигнува со ТИГ, поради помалата густина на струјата.

3.4. Основи на МИГ/МАГ заварувањето

Поради обемниот и разновиден вид на материјали кои се заваруваат, вообичаено е за истите да се користат и други заштитни гасови, освен инертните чист аргон или хелиум и активниот јаглерод диоксид. Затоа се наметнува оправданоста од постоење на гасни смеси во кои ќе има инертни и активни гасови, во однос соодветен на природата на заваруваните материјали. Така на пример за заварување на челик со легирачки елементи до 4,5% се користи заштита од CO_2 или МАГ заварување, а за челиците со легирачки елементи поголема од 6% се користи заштита од инертни гасови МИГ заварување или ТИГ заварување. Но со оглед на блискоста во хемискиот состав и особините на овие два материјали, несомнено се наметнува заклучокот дека најоптимално заварување би било во заштита од смеса од активен и инертен гас.

Основите на заварувањето во заштитна атмосфера од смеси на гасови, МИГ/МАГ заварувањето се идентични како и основите на МИГ, односно МАГ заварувањето. Идентични се уредите за заварување и користениот поларитет за

заварување, видовите пренос на растопениот додатен материјал, како и влијанијата на режимот на заварување. Тука главен акцент се става на дејството и влијанието на составот на заштитната гасна смеса. Заштитните гасови дејствуваат специфично на електричниот лак и, како резултат на тоа, се јавуваат различни облици на попречниот пресек на заварите. Тоа влијание е пред се поради различната природа и однесување на гасот при заварувањето, при зголемени температури. Тука пред се најголемо влијание има топлинспроводливоста, густината и активноста на гасот.

4. Поим и видови на заостанати напони

Заостанати или сопствени напони се такви напони кои што постојат во материјалот пред да биде подложен на дејство на некое надворешно оптоварување. Тие постојат и тие се избалансирани во материјалот и по отстранувањето на причината за нивно појавување. Заостанатите напони во материјалот во повеќето случаи се резултат на производниот процес. Практично сите производствени процеси: лиење, заварување, ладна и топла деформација, машинска обработка, термичка обработка итн. внесуваат заостанати напони во материјалот. Во некои случаи, заостанатите напони во материјалот исто така може да бидат внесени со последователни процеси како на пр. составување на конструкцијата, одржување, поправки или модификации.

Заостанатите напони од прв ред или макро заостанати напони опфаќаат неколку зрна и се урамнотежуваат низ целата површина. Постојат голем број на процеси со кои се генерираат заостанатите напони од прв ред. Така, механичката, термичката, хемиската обработка или која било комбинација од нив предизвикува појава на заостанати напони од прв ред.

Заостанатите напони од втор ред или хомогени микро-заостанати напони, кои се речиси хомогени во микроскопската област (едно зрно или дел од зрно од материјалот) и се урамнотежени во областа на доволен број зрна. Заостанатите напони од втор ред се случуваат многу ретко.

Заостанатите напони од трет ред или нехомогени микрорезидуални напони се нехомогени во субмикроскопската област на материјалот, т.е. неколку меѓуатомски растојанија во мала област на зрното.

5. Заостанати напони во заварените споеви

Заварените конструкции и нивните конструктивни елементи, во зависност од нивната намена, при експлоатација се изложени на различни надворешни оптоварувања, динамички и статички, така што кога делуваат во форма на сили и моменти, настануваат и соодветни работни напони. Покрај наведените напони, во материјалот може да има и заостанати напони кои не се резултат на надворешно оптоварување, туку се последица на други фактори како што се: лиење, термичка обработка, ладна пластична деформација, заварување и сл.

Појавата на заостанатите напони и деформации во процесот на заварување е неизбежна. Одредувањето на големината, знакот и распределбата на заостанатите напони е многу важно, особено затоа што заостанатите напони кај заварените

конструкции можат значително да влијаат на создавањето и растот на пукнатините, појавата на кршливи фрактури, замор на материјалот, свиткување итн. Заостанатите напони се предизвикани од термички циклуси на загревање и ладење во локалните области на деловите за време на заварувањето, при што загреаниот материјал на заварување (заварот) е сместен помеѓу ладни области од двете страни.

Најзначаен извор на заостанатите напони за време на заварувањето е температурната разлика при загревање и ладење. Главната причина за создавањето на заостанатите напони кај сите видови на заварување, кои предизвикуваат локално загревање, е собирањето на многу топлиите зони, што е спречено од поладните зони кои малку или воопшто не се собираат. Во пракса, заостанатите напони во зависност од околината можат да стигнат до границата на течење на материјалот и како последица на тоа се јавуваат пластични деформации.

6. Ефекти на заостанатите напони предизвикани од заварување

Заостанатите напони предизвикани од заварување може да ги имаат следните ефекти:

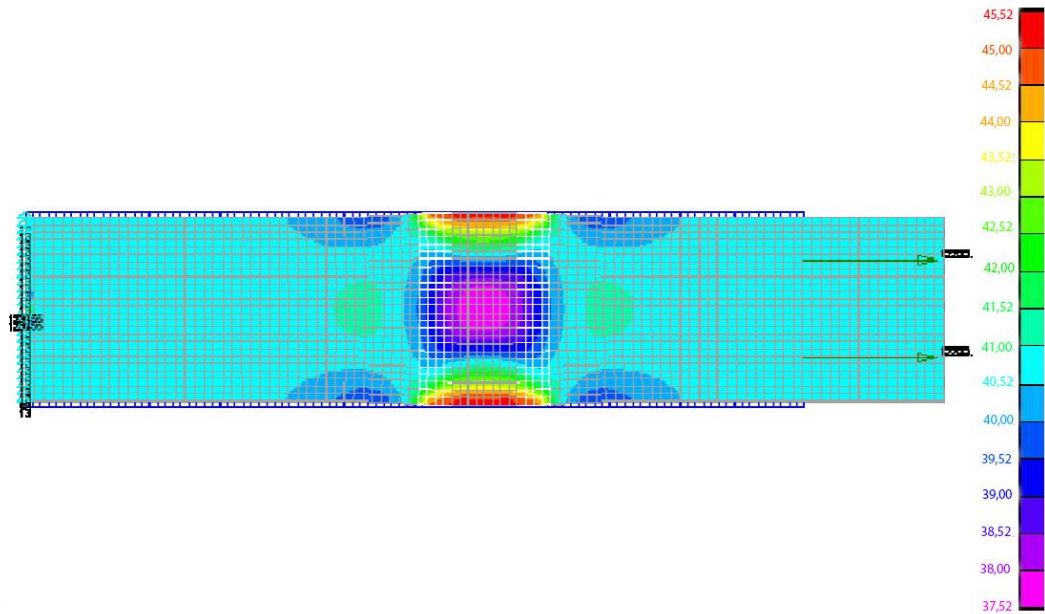
1. Намалување или зголемување на напонот на течење,
2. Локални промени во тврдоста,
3. Формирање на ладни прснатини без оптоварување,
4. Зголемен ризик од кршливи фрактури поради:
 - зголемување на вкупниот напон ако оптоварувањето и заостанатите напони се суперпонираат со состојбата на материјалот каде што $Re \approx Rm$.
 - повеќеосна напонска состојба.
 - спонтан раст на мали пукнатини
5. Намалување или зголемување на отпорноста на замор како резултат на затезни или притисни заостанати напони во точките критични за дефект на замор.
6. Намалување или зголемување на ризикот од свиткување како резултат на заостанатите напони на истегнување или притисок.
7. Појава на свиткување

7. Нумеричка анализа на напрегањата и деформациите кај вертикален цилиндричен резервоар

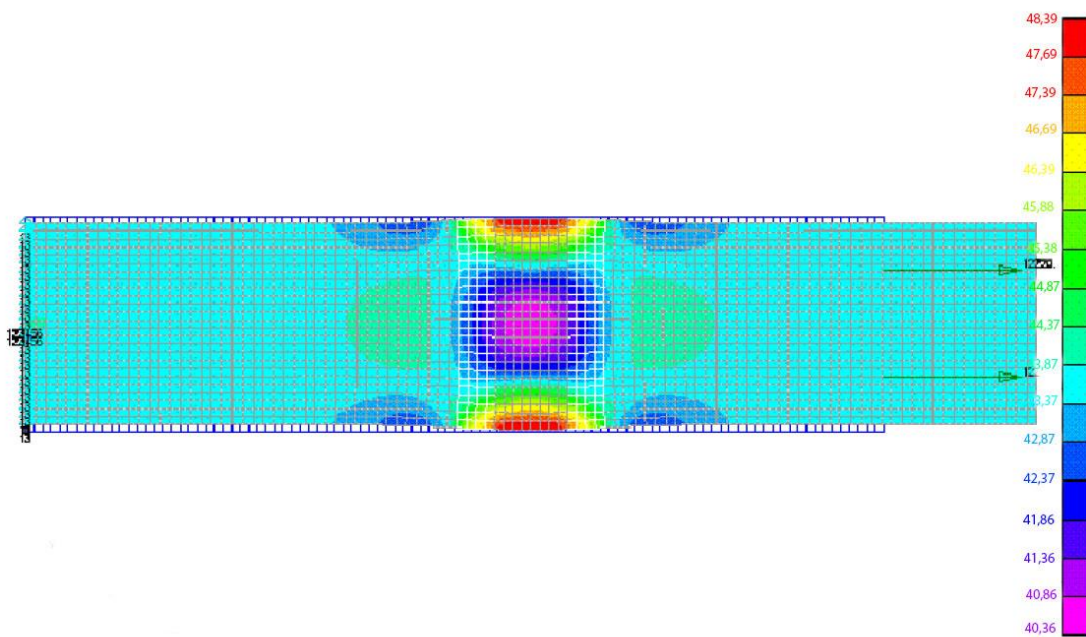
Основата за проценка кај вертикалните цилиндрични резервоари во, како и проценката на експлоатацијата на таков резервоар, е висококвалитетно напонско поле. Терминот „квалитетно напонско поле“ се однесува на избалансирана стресна состојба во набљудуваната структура. Целта на оваа пресметка е, покрај добивањето висококвалитетно напонско поле, да се определат и места кои имаат високи напонски вредности, чија вредност треба да се проверуваат експериментално.

Во овој случај за анализа на напонската состојба кај челно заварените споеви за двете избрани технологии на заварување (REL и MIG/MAG постапка) користена е

нелинеарна структурна анализа со примена на соодвете софтверски пакет. Анализата е извршена на база на користење на нелинеарни криви за однесувањето на основниот материјал, додатниот материјал и материјалот на влијание на топлината.



Слика 10. Распределба на напоните при заварување со MIG/MAG постапка



Слика 11. Распределба на напоните при заварување со REL постапка

Согласно избраните методи на заварување, метода со REL постапка на заварување при заварување на коренот и исполната на заварениот спој со користење на додатен материјал електрода EVB 50 и метода на заварување во MIG/MAG постапка за коренскиот завар и исполната на заварениот спој, за која се користи додатен материјал VAC 60 каде што како основен материјал се користи челик S235 JR со дебелина на материјалот од 8мм. Материјалот е соодветно припремен во V припрема за заварување.

Опремата за заварување како и параметрите на заварување се одредени со соодветна pWPS постапка. Во pWPS се предвидени начинот, јачината на струјата, напонот како и брзината на заварување за секоја постапка. Истите параметри се користени и при користење на соодветна програма за симулација на напоните од заварувањето и добиени се резултати како на дијаграмите. Од дијаграмите може да се забележи дека при заварување со REL постапка има појава на поголеми напони во основниот материјал, за разлика од MIG/MAG постапката каде имаме помали напони од заварување во основниот материјал.

8. Заклучок

Заварените конструкции и нивните конструктивни елементи, во зависност од нивната намена, во текот на нивната експлоатација се изложени на различни надворешни оптоварувања, динамични и статички, така што кога делуваат во форма на сили и моменти, се создаваат соодветни погонски напрегања. Покрај работните напрегања во материјалот може да има и заостанати напрегања кои не се резултат на надворешно оптоварување. Вкупниот напон е еднаков на збирот на заостанатиот и работниот напон. Работните напони може да се пресметаат додека пак заостанатите може да се измерат и на тој начин да се одреди вкупниот напон и да се предвиди однесувањето на конструкцијата во работни услови. Влијанието на заостанатите напони како резултат на процесот на заварување во целокупната напонска состојба на заварениот спој е од големо значење. Досегашните искуства укажуваат дека би било неопходно да се обезбеди проценка на состојбата на деформација и напрегање во критичните зони на заварениот спој со помош на соодветен метод на тестирање, што нема да го загрози структурниот интегритет на испитуваните места.

Големината и распределбата на заостанатите напони зависат од повеќе параметри, имено: количината на внесена топлина при заварувањето, брзината на движењето на лакот, својствата на материјалот, обликот и димензиите на деловите, како и нивната

крутост. Познавањето на големината и распределбата на преостанатите напрегања кои се преклопуваат со работниот напон е од клучно значење за одредување и продолжување на животниот век на заварените конструкции. Поради тоа избирањето на правата постапка на заварување при изработката на заварените конструкции е еден од клучните елементи при процесот на изработка.

Користена литература

- [1] T. Vuherer, D. Rojko, V. Gliha, Uticaj reparature na nivo i raspodjelu zaostalih napona u sučeono zavarenom spoju čelika, Zavarivanje i Zavarene konstrukcije 2/2004
- [2] M. Manjgo, ANALYSIS OF RESIDUAL STRESSES IN BUTT WELD JOINT, Master's thesis, Faculty of Mechanical Engineering, University of Maribor, 2020
- [3] Mirza Manjgo, Tomaž Vuherer, Darko Bajić, EXPERIMENTAL MEASUREMENT OF REFINED TENSIONS, 12th International Scientific Conference on production Engineering Development and Modernization of production, 18- 20.9.2019, Sarajevo, BiH
- [4] Joseph A., Palanichamy P., Rai SK, Jayakumar T. and Raj B. Nondestructive measurement of residual stresses in carbon steel weld joints. Science and Technology of Welding and Joining, 3(6): 267-271, 1998.
- [5] API standard 620 “Recommended Rules for the Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Storage Tanks”, 7th ed. Rev. 1, 1985.

- [6] EN 14015:2004 - Specification for the design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above
- [7] Islamović F., "*Prilog razvoju algoritma za projektovanje nadzemnih višekomornih posuda za tečna goriva*", Zenica, 2001.
- [8] Z, Manjgo M. "*Primena mehanike loma u oceni osobina zavarenih spojeva*", RIM - Bihać, 2001,
- [9] Senjanović I., "*Theory of Shells of Revolution*", Brodarski institut, Zagreb, 1983.
- [10] Timošenko, S., "*Teorija ploča i ljuski*", Građevinska knjiga – Beograd, 1962.
- [11] Tetelman, A. S. and McEvily, A. J., "*Fracture of Structural Materials*", John Wiley, New York, 1967.
- [12] Milosavljević A., Prokić-Cvetković R., Zrilić M., Smiljanić P., "*Iskustva merenja zaostalih napona magnetnoelastičnom metodom i mogućnosti usavršavanja postupka*", Godišnja skupština DUZ Srbije, 1993