

Optimiranje parametara pri zavarivanju metala eksplozivom

Ćulić, Paulo

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:518637>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-16**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

**OPTIMIRANJE PARAMETARA PRI ZAVARIVANJU METALA
EKSPLOZIVOM**

Diplomski rad

Paulo Čulić

R 163

Zagreb, 2018.

OPTIMIRANJE PARAMETARA PRI ZAVARIVANJU METALA EKSPLOZIVOM
PAULO ĆULIĆ

Završni rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Eksplzivne tvari najviše se koriste u rudarstvu i građevinarstvu za dobivanje mineralnih sirovina kao i za iskop građevinskih jama te drugih objekata poput tunela. Međutim, eksplozivi imaju široku primjenu u drugim granama industrije. Jedan od postupaka koji se koristi u industriji je zavarivanje metala eksplozivom. U radu je prikazan postupak zavarivanja metala eksplozivom, navedeni su čimbenici koji utječu na uspješnost postupka te dani su različiti primjeri upotrebe ove metode. Pored toga prikazan je eksperimentalni pristup određivanja optimalnih parametara postava pri zavarivanju čelika i aluminija eksplozivom. Ispitivanje je izvedeno na u Laboratoriju za ispitivanje eksploziva RGN Fakulteta na uzorcima manjih dimenzija.

Ključne riječi: eksplozivi, metali, zavarivanje

Završni rad sadrži: 38 stranica, 31 slika, 7 tablica i 17 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Završni rad
pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Mentor: Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Muhamed Sućeska, redoviti profesor RGNF
Dr. sc. Mario Dobrilović, izvanredni profesor RGNF
Dr. sc. Vječislav Bohanek, docent RGNF

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Master's Thesis

OPTIMIZING PARAMETERS TO WELDING THE METAL WITH EXPLOSIVE
PAULO ĆULIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Mining and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

Explosive substances are mostly used in mining and construction for the production of mineral raw materials as well as for excavation of construction pits and other objects such as tunnels. However, explosives are widely used in other industries. Thesis presents the explosive welding of metal, the factors that influence on the success of the process are listed and different examples of the use of this method are given. In addition, an experimental approach to the determination of optimal parameters for explosive welding of steel and aluminum is presented. The test was performed at the Explosive Laboratory of the RGN Faculty on samples of smaller dimensions

Key words: explosives, metals, welding

Thesis contains: 38 pages, 31 figures, 7 tables i 17 references

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Supervisors: PhD Vječislav Bohanek, Assistant Professor

Reviewers: PhD Muhamed Sućeska, Full Professor
PhD Mario Dobrilović, Associate Professor
PhD Vječislav Bohanek, Assistant Professor

Defence date: July 20, 2018. Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. ZAVARIVANJE METALA.....	2
2.1. Povijest zavarivanja	2
2.2. Podjela postupaka zavarivanja.....	3
3. ZAVARIVANJE METALA EKSPLOZIVOM.....	5
3.1. Proces zavarivanja metala eksplozivom	5
3.2. Čimbenici koji utječu na uspješnost zavarivanja metala eksplozivom.....	8
3.2.1. Brzina detonacije eksploziva, brzina udara ploče pri zavarivanju i brzina gibanja točke sudara	8
3.2.2. Kut sudara (dinamički kut) i kut između dvije ploče	9
3.2.3. Udaljenost između dvije ploče	9
3.2.4. Granice uspješnog zavarivanja	11
3.3. Primjena zavarivanja metala eksplozivom	12
3.3.1. Zavarivanje metalnih ploča	14
3.3.2. Zavarivanje metalnih cijevi	17
4. PREGLED ISTRAŽIVANJA U ZAVARIVANJU METALA EKSPLOZIVOM	22
4.1. Mikrostruktura zone spoja	22
4.2. Zavarivanje istovrsnih metala eksplozivom	24
5. PRIMJER USKLAĐIVANJA PARAMETARA PRI ZAVARIVANJU METALA EKSPLOZIVOM	27
5.1. Mjerni postav	27
5.2. Eksplozivi i brzina detonacije eksploziva	30
6. REZULTATI ZAVARIVANJA I MJERENJA BRZINE DETONACIJE	33
7. ANALIZA USPJEŠNOSTI ZAVARIVANJA I ZAKLJUČAK	35
8. LITERATURA	38

POPIS TABLICA

Tablica 2-1. Osnovna podjela metoda zavarivanja.....	3
Tablica 3-1. Procjena mogućnosti zavarivanja raznorodnih materijala eksplozivom na temelju dijagrama stanja (Zaharenko, 1990.)	12
Tablica 3-2. Parametri koji utječu na uspješnost zavarivanja metalnih ploča.....	16
Tablica 5-1. Kemijski sastav legure Al 99,5	27
Tablica 6-1. Rezultati zavarivanja eksplozivom Ammonit	33
Tablica 6-2. Rezultati zavarivanja smjese ANFO-a i pentrita	34
Tablica 6-3. Rezultati ispitivanja s neizbrušenom i neobrađenom površinom čelika	34

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Zavareni spoj nastao taljenjem (Jelaska, 2005).....	2
Slika 2-2. Detaljna podjela metoda zavarivanja (Pondt, 2015).....	4
Slika 3-1. Proces zavarivanja metala eksplozivom (Akbari-Mousavi i sur, 2008).....	5
Slika 3-2. Konfiguracije koje se koriste za zavarivanje.....	6
Slika 3-3. Oblik spoja nastao zavarivanjem.....	7
Slika 3-4. Geometrijski odnos vektora brzina (Akbari-Mousavi i sur, 2008).....	7
Slika 3-5. Utjecaj udaljenosti između dvije ploče na oblik spoja (Durgutlu i sur., 2008) ..	10
Slika 3-6. Welding window (Petrushkov, 2009).....	11
Slika 3-7. 3" Promjer Al/SS prsten (High energy metals, 2009)	14
Slika 3-8. Cr-Mo čelik + nehrđajući čelik 321 (102 mm + 3 mm) 5m diam x35m (Nobelclad, 2015)	14
Slika 3-9. Tehnološki proces proizvodnje ploča zavarenih eksplozivom	15
Slika 3-10. Priprema za zavarivanje, zavarivanje i gotov proizvod (High Energy Metals, 2009)	15
Slika 3-11. Platiranje vanjske cilindrične površine (Sućeska, 2001).....	18
Slika 3-12. Platiranje vanjske cilindrične površine korištenjem dvaju eksplozivnih naboj (Sućeska, 2001)	19
Slika 3-13. Platiranje unutarnje površine cijevi (Sućeska, 2001)	19
Slika 3-14. Platiranje unutarnje površine cijevi (Sućeska, 2001)	21
Slika 3-15. Spajanje krajeva metalnih cijevi uz korištenje prstenaste spojnice (Sućeska, 2001).....	21
Slika 3-16. Spajanje krajeva metalnih cijevi uz korištenje prstenaste spojnice (Sućeska, 2001).....	21
Slika 3-17. Spajanje krajeva metalnih cijevi korištenjem unutarnjeg eksplozivnog naboja (Sućeska, 2001)	22
Slika 4-1. Različiti oblici spoja ovisni o detonacijskoj brzini (Shu i sur., 2010).....	23

Slika 4-2. Prikaz spoja pri inicijalnom kutu od 8° (a-inicijalni, b-prijelazni, c- završni dio) (Findik, 2011).	25
Slika 4-3. Prikaz spoja za jednaku udaljenost 0,5dpz te za različite eksplozivne omjere a- R=1.5, b-R=2.5 (Findik, 2011).	26
Slika 4-4. Prikaz spoja za jednaku udaljenost 3dpz te za različite eksplozivne omjere a- R=1.5, b-R=2.5 (Findik, 2011).	27
Slika 5-1. Stacionarna ploča i ploča koja se ubrzava	28
Slika 5-2. Kućište i linoleum.....	29
Slika 5-3. Shematski prikaz paralelnog postava	29
Slika 5-4. Komora za ispitivanje	30
Slika 5-5. Mljeveni ANFO.....	31
Slika 5-6. Pentrit	32
Slika 5-7. Elektronički sat Explomet – Fo 2000.	33
Slika 5-8. Prikaz metode mjerenja brzine udarnog vala	33

POPIS PRILOGA

Prilog 1 Predložak omota za CD

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

Simbol	Značenje	Jedinica
V_d	brzina detonacije	(m/s)
V_u	brzina udara metala	(m/s)
V_s	brzina točke sudara	(m/s)
β	kut sudara (dinamički kut)	(°)
α	kut između dvije ploče	(°)
d_e	debljina sloja eksploziva	(mm)
l_z	udaljenost između ploča	(mm)
C	masa eksploziva	(kg)
M	masa metala koji se ubrzava	(kg)
d_{pz}	debljina ploče koja se zavaruje	(mm)

1. UVOD

Jedan od posebnih oblika primjene energije eksploziva je obrada metala eksplozivom. Primjena eksploziva za obradu metala počela je istraživanjima koje je izveo Monroe 1888. godine. Većina značajnih istraživanja vezanih za obradu metala eksplozivom provedena su pedesetih godina 20. stoljeća, a rezultirala su različitim oblicima primjene energije eksploziva za obradu metala. S obzirom na namjenu postupka razlikujemo slijedeće postupke obrade metala eksplozivom:

- zavarivanje metala eksplozivom,
- oblikovanje metala eksplozivom,
- rezanje ili perforiranje metala eksplozivom,
- popuštanje zaostalih naprezanja eksplozivom,
- kompaktiranje metalnih prahova eksplozivom i
- povećanje tvrdoće metala eksplozivom.

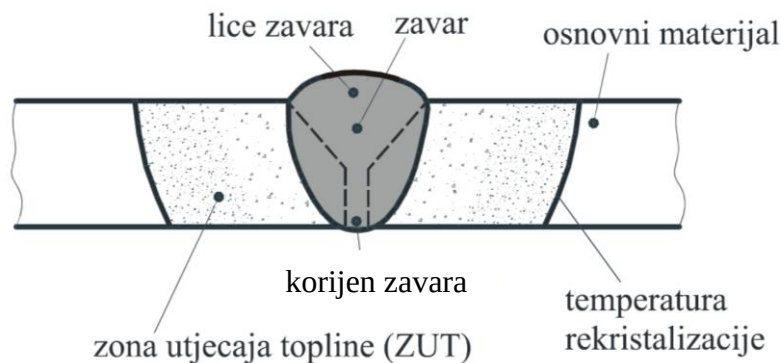
U radu je prikazano zavarivanje metala eksplozivom, navedeni su čimbenici koji utječu na uspješnost postupka te su dani različiti primjeri upotrebe ove metode.

2. ZAVARIVANJE METALA

Zavarivanje je spajanje materijala pri kojem se dijelovi koje treba spojiti zavarivanjem (zavarivani dijelovi) na spojnom mjestu obično zagriju do omekšalog, plastičnog stanja ili se rastale, a spajaju se staljivanjem, uz dodavanje ili bez dodavanja materijala.

Zavareni spojevi općenito se temelje na kohezijskim silama u zavaru, tako da poslije zavarivanja zavareni spoj čini neraskidivu cjelinu. Obzirom na način nastanka kohezijskih sila u zavarenom spoju razlikuje se:

- zavarivanje toplinskom energijom (zavarivanje taljenjem) i
- zavarivanje s mehaničkom energijom, toplo i hladno



Slika 2-1. Zavareni spoj nastao taljenjem (Jelaska, 2005)

Zavarljivost je svojstvo materijala da se spajanjem zavarivanjem njegovih dijelova dobije upotrebljiv spoj. Materijal je dobro zavarljiv ako je standardnom opremom i procedurom zavarivanja moguće ostvariti upotrebljiv spoj, pri čemu je ponovljivost postupka vrlo visoka. Materijal je slabo zavarljiv ako se spoj ostvaruje složenom opremom i procedurom zavarivanja (Jelaska, 2005).

2.1. Povijest zavarivanja

Usporedno s kovanjem i lijevanjem metala razvijalo se i zavarivanje i lemljenje. U Kini su pronađena željezna kola još iz doba prije Krista kojima su sastavni dijelovi spajani ljevačkim zavarivanjem, odnosno zalijevanjem željeznom talinom koja je nakon skrućivanja stvorila nerastavljiv spoj. Jedan od najstarijih načina zavarivanja je kovačko

zavarivanje, pri čemu se dva komada kovine, ugrijana u kovačkoj vatri, spajaju udarcima čekića. Zavarivanje i srodni postupci doživjeli su nagli razvoj tek u posljednjih stotinjak godina kada se kao izvor topline počeo primjenjivati električni luk.

N.de Bernardos i S.Olszewski su 1885. godine patentirali zavarivanje ugljenom elektrodom, a N.G.Slavjanov je 1888. godine patentirao elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama. Bio je to golem napredak, jer se električni luk nije više primjenjivao samo kao izvor topline već je elektroda ujedno služila kao dodatni materijal. Istodobno s elektrolučnim zavarivanjem razvijalo se i elektrootporno zavarivanje. Amerikanac E.Thompson prijavio je niz patenata s tog područja između 1885. i 1900.godine (Tehnička enciklopedija, 1993).

2.2. Podjela postupaka zavarivanja

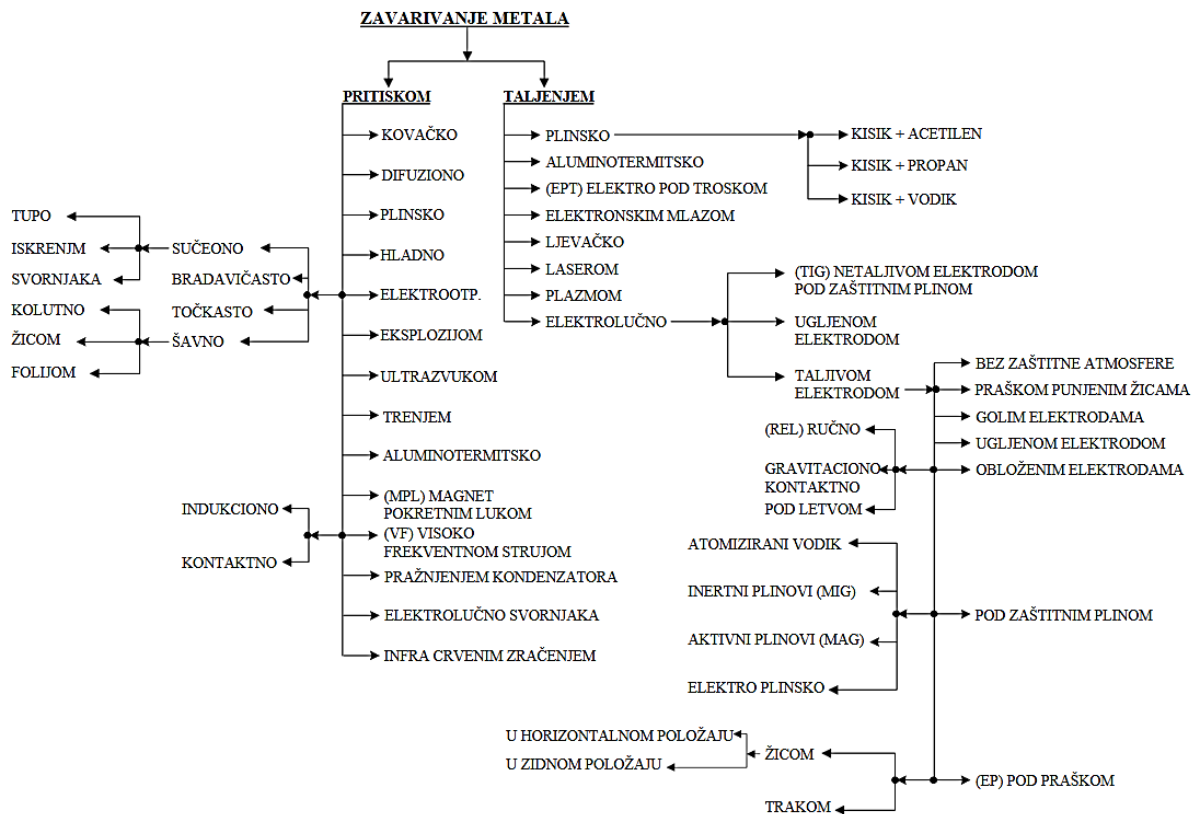
S obzirom na brojnost i raznovrsnost postupaka za zavarivanje metala postoji podjela postupaka zavarivanja na dvije osnovne grupe:

- zavarivanje taljenjem
- zavarivanje pritiskom

U tablici 2-1 dana je osnovna podjela metoda zavarivanja dok je na slici 2-2 prikazana detaljna podjela metoda zavarivanja.

Tablica 2-1. Osnovna podjela metoda zavarivanja

ZAVARIVANJE TALJENJEM	ZAVARIVANJE PRITISKOM
Elektrolučno	Kovačko
Aluminotermijsko	Plinsko
EPT Elektro pod troskom	Difuzijono
Elektronskim mlazom	Hladno
Ljevačko	Elektrootporno
Laserom	Eksplozijom
Plazmom	Aluminotermijsko
Elektrolučno	Trenjem
Plinsko	MPL Magnet pokretnim lukom
Kisik acetylen	VF visokofrekventom strujom
Kisik propan	Elektrolučno svornjaka
Kisik vodik	Infracrvenim zračenjem



Slika 2-2. Detaljna podjela metoda zavarivanja (Pondt, 2015)

Pri zavarivanju s toplinskom energijom spajani dijelovi iz jednakog ili srodnog materijala (osnovni materijal) te dodatni materijal, zagrijava se na temperaturu koja je viša od tališta materijala dijelova koji se zavaruju. Pri tome na mjestu spoja dolazi do stapanja taline osnovnog i dodatnog materijala. Zavareni spoj nastaje zbog kohezijskih veza koje postoje među atomima nakon hlađenja zavara u čvrsto stanje. Materijal u zavarenom spoju ima strukturu ljevka, i nakon potpunog otvrdnuća tvori čvrst, nerastavljiv spoj između spojenih dijelova.

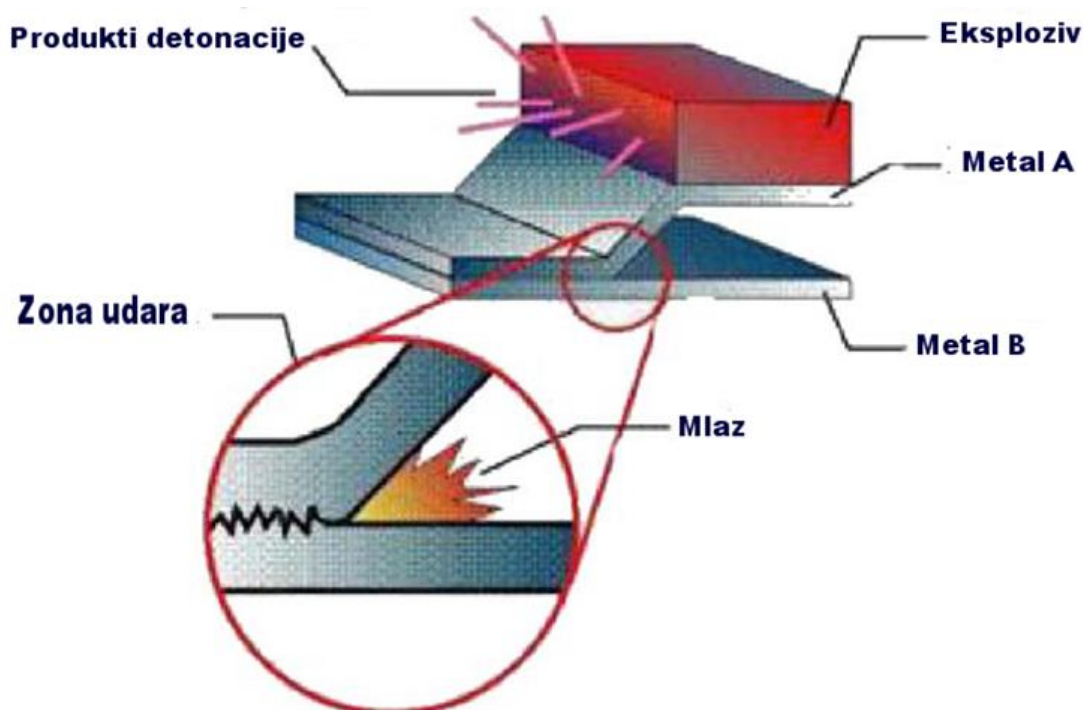
Zavarivanje pod pritiskom naziva se i zavarivanje s mehaničkom energijom. Pri zavarivanju s mehaničkom energijom dijelovi se spajaju bez dodavanja materijala. U području spoja spajani materijali su izloženi velikim plastičnim deformacijama. To dovodi do izmjene atoma i time do difuzije na dodirnim površinama, lokalne rekristalizacije te do nastanka adhezijskih i kohezijskih veza među dijelovima koji se spajaju (Jelaska, 2005). Iz podjele je vidljivo da se zavarivanje materijala eksplozivom (eksplozijom) ubraja u metode zavarivanja s mehaničkom energijom, odnosno zavarivanje pod pritiskom.

3. ZAVARIVANJE METALA EKSPLOZIVOM

Za vrijeme Prvog svjetskog rata primijećeno je da šrapneli granate nakon detonacije ostaju zalijepljeni za metale koji se nalaze u okolici. Ova pojava prethodila je otkriću upotrebe eksploziva za zavarivanje. L.R. Karl je 1944. godine zapisao svoja istraživanja o zavarivanju metala pri visokim brzinama. Carl je izveo niz eksperimenata zavarivanja metala energijom eksploziva, a u svojim pokusima je koristio broncu. DuPont Chemical je razvijao tehnologiju zavarivanja metala eksplozivom i patentirao ju je 1964. godine (Young, 2004). Danas se zavarivanje metala eksplozivom koristi kao standardni komercijalni postupak zavarivanja u mnogim granama industrije.

3.1. Proces zavarivanja metala eksplozivom

Proces zavarivanja metala eksplozivom uključuje dvije metalna ploče, od kojih je jedna u pravilu stacionarna (metal A) i može biti bilo koje debljine i druge ploče (metal B) koja se ubrzava detonacijom eksplozivnog punjenja. Shematski postupak zavarivanja može se prikazati slikom 3-1.

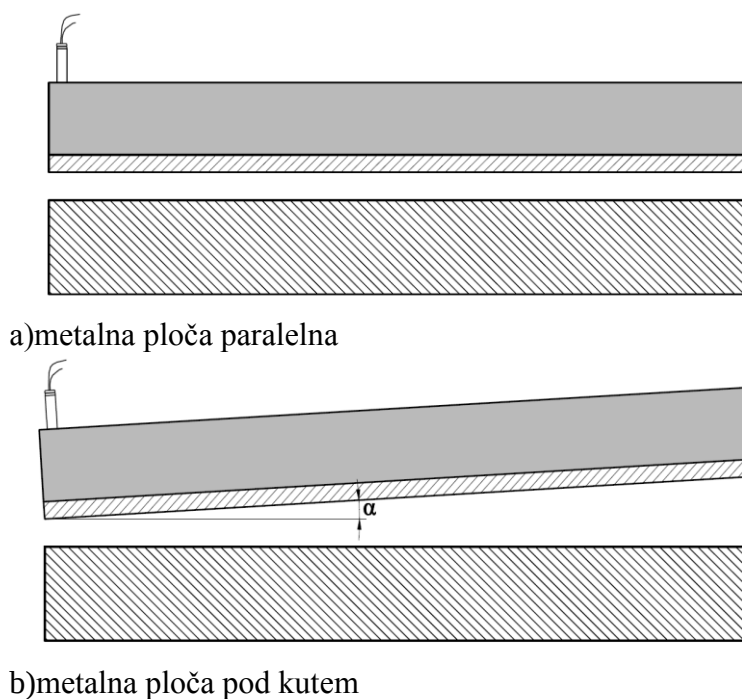


Slika 3-1. Proces zavarivanja metala eksplozivom (Akbari-Mousavi, Al-Hassani, 2008)

Zavarivanje metala eksplozivom uzrokovano je detonacijom eksplozivnog naboja i vremenski gledano odvija se u vrlo kratkom periodu koji se mjeri u μs . Sam proces može se podijeliti u tri faze:

1. detonacija eksplozivnog punjenja,
2. deformacija i ubrzanje metala koji se zavaruje (metal A) i
3. spajanje (zavarivanje) metala (metal A i metal B)

Detonacijom eksplozivnog punjenje ubrzava se metal koji se zavaruje u pravcu metala na koji se zavaruje. Za zavarivanje se koriste dvije osnovne konfiguracije, u prvoj konfiguraciji metalna ploča koje se ubrzava paralelna je s metalnom pločom na koju se zavaruje, dok se u drugoj konfiguraciji nalazi pod određenim kutom u odnosu na ploču na koju se zavaruje. Ukoliko se koristi kutna metoda, metalna ploča se postavlja pod malim kutom koji iznosi od 2° do 10° . Konfiguracije koje se koriste za zavarivanje prikazane su slikom 3-2.



Slika 3-2. Konfiguracije koje se koriste za zavarivanje

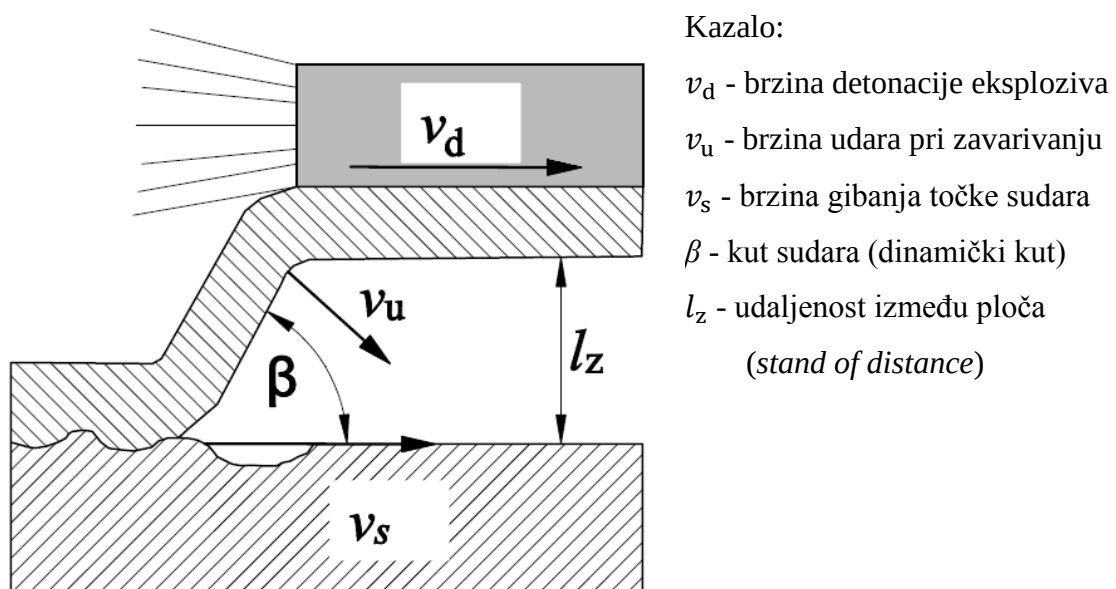
Postoje mnoge teorije o zavarivanju koje se razlikuju u fizikalno mehaničkom objašnjenju postupka. Opće prihvaćeno mišljenje je da je za uspješan proces zavarivanja nužan nastanak mlaza u točki spoja dvaju metala. Ukoliko dođe do pojave mlaza, mlaz ispred sebe čisti oksidni sloj s metalne površine ostavljajući za sobom čistu površinu kako bi lakše došlo do ostvarivanja spoja dvaju metala prilikom sudara uslijed djelovanja tlaka

detonacije. Da bi se spoj ostvario, nužno je da tlak bude dovoljno velik i da djeluje određeni vremenski period. Visoki tlak uzrokuje lokalne plastične deformacije u zoni vara. Na slici 3-3 prikazan je spoj nastao zavarivanjem metala eksplozivom.



Slika 3-3. Oblik spoja nastao zavarivanjem

Proces zavarivanja može se opisati odnosom vektora brzina i geometrijskim značajkama postava zavarivanja. Na slici 3-4 dan je geometrijski odnos vektora brzina koji vrijedi ukoliko se za zavarivanje koristi paralelna konfiguracija.



Slika 3-4. Geometrijski odnos vektora brzina (Akbari-Mousavi i sur., 2008)

Veza između kuta sudara β , brzine detonacije eksploziva v_d , brzina gibanja točke sudara v_s i brzina udara metalne ploče v_u za paralelnu konfiguraciju matematički se može izraziti jednadžbom

$$v_u = 2v_s \sin\left(\frac{\beta}{2}\right), \quad (3-1)$$

brzina gibanja točke sudara v_s je pri ovoj konfiguraciji jednaka brzini detonacije eksploziva v_d

Ukoliko za zavarivanje koristimo konfiguraciju u kojem se ploča koja se zavaruje nalazi pod kutom α u odnosu na ploču na koju se zavaruje jednadžba glasi

$$v_u = v_s \frac{\sin \beta}{\cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)} \quad (3-2)$$

3.2. Čimbenici koji utječu na uspješnost zavarivanja metala eksplozivom

Ranije je rečeno da do zavarivanja metala može doći samo prilikom nastanka mlaza, no da bi nastao mlaz nužno je uskladiti niz parametara u procesu zavarivanja metala eksplozivom:

- v_d - brzina detonacije eksploziva
- v_u - brzina udara pri zavarivanju
- v_s - brzina gibanja točke sudara
- β - kut sudara (dinamički kut)
- l_z - udaljenost između ploča

3.2.1. Brzina detonacije eksploziva, brzina udara ploče pri zavarivanju i brzina gibanja točke sudara

Brzina detonacije je ključni parametar u procesu zavarivanja metala eksplozivom. O brzini i tlaku detonacije ovisi kako i koliko će se ubrzati metalna ploča koja se zavaruje.

O izboru eksploziva i udaljenosti između dva metala ovisi uspješnost procesa. Eksplozivi koji se koriste pri zavarivanju moraju imati slijedeće karakteristike:

- Brzina detonacije mora biti manja od brzine prolaza zvuka u metalima koji se koriste, brzina u pravilu iznosi od 1500 m/s pa do brzine prolaza zvuka u metalu.
- Ukoliko se koriste tanki slojevi eksploziva eksploziv imati stabilnu detonaciju
- Eksploziv mora biti siguran za rukovanje, jeftin, postojanih svojstava i ne smije biti štetan za okolinu.

Prema literaturi, brojni eksplozivi s različitim brzinama i tlakom detonacije koristili su se za eksplozivno zavarivanje. Komercijalni eksplozivi s velikim brzinama detonacije rijetko se koriste zbog mogućnosti oštećenje materijala. Najviše se koriste ANFO eksplozivi koji su pogodni s obzirom na brzinu detonacije, jednostavnu proizvodnju i cijenu. ANFO se prilikom zavarivanja stavlja u drvene kutije. Kako je ovaj tip eksploziva neosjetljiv na RK 8 za iniciranje se uz detonator koristi i pojačnik.

Ukoliko je brzina ANFO eksploziva prevelika za zavarivanje, eksploziv se miješa sa inertnim materijalom poput pijeska i perlita kako bi mu se smanjila brzina detonacije.

Brzina udara pri zavarivanju ovisi o brzini detonacije korištenog eksploziva, masi eksploziva i metala i konfiguracije koja se koristi. Ubrzani materijal bi trebao postići brzinu u točki udara u drugi materijal u iznosu od 200 m/s do 500 m/s.

Brzina gibanja točke sudara ovisi o masi eksploziva konfiguracije koja se koristi. U paralelnoj konfiguraciji jednaka je brzini detonacije eksploziva.

3.2.2. Kut sudara (dinamički kut) i kut između dvije ploče

Iskustveni podaci govore da kut koji zatvaraju dvije metalne površine u točki udara iznosi od 2° do 25°.

3.2.3. Udaljenost između dvije ploče

Udaljenost između dvije ploče mora biti takva da metalna ploča koja se zavaruje uspije razviti brzinu koja je potrebna za proces zavarivanja. Udaljenost se izražava u odnosu na debljinu ploče koja se zavaruje (d_{pz}). Prema iskustvenim podacima, minimalna udaljenost pogodna za zavarivanje iznosi $0,5 d_{pz}$. Empirijski izvedena formula za određivanje optimalne udaljenosti glasi :

$$l_z = 3k d_e C / M$$

Gdje je:

l_z - udaljenost između ploča (stand of distance)

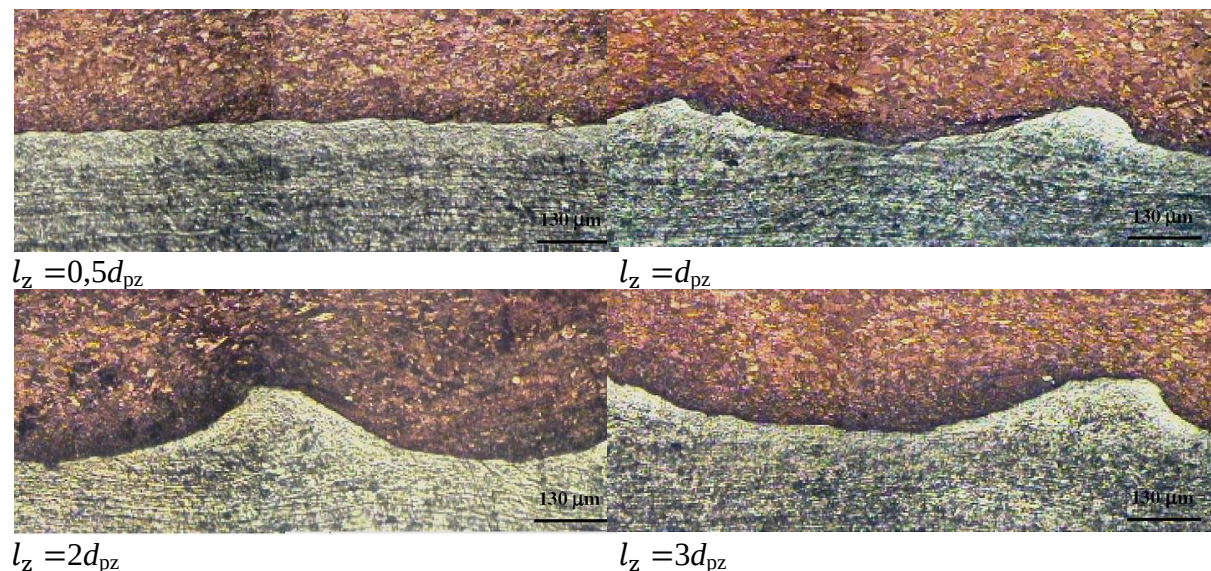
k - koeficijent koji ima vrijednost od 3 do 7 ovisno o zahtijevanoj brzini udara

d_e - debljina sloja eksploziva

C - masa eksploziva

M - masa metala koji se ubrzava

Provedeno je ispitivanje čiji je cilj odrediti kako udaljenost između dviju ploča utječe kvalitetu vara prilikom zavarivanja bakra i čelika (Durgutlu i sur, 2008). Udaljenosti između dviju ploča mijenjani su od $0,5 d_{pz}$ do $3 d_{pz}$. Proučavan je oblik spoja dvaju metala s obzirom na udaljenost između dvaju metala. Rezultati ispitivanja su prikazani na slici 3-5.



Slika 3-5. Utjecaj udaljenosti između dvije ploče na oblik spoja (Durgutlu i sur., 2008)

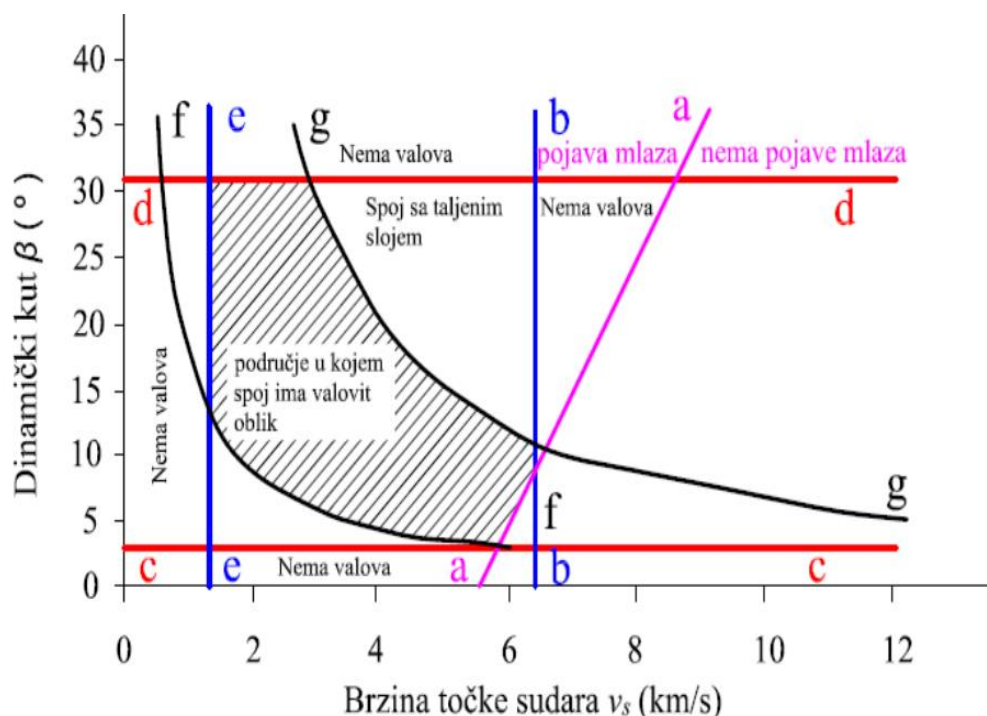
Iz slike je vidljivo slijedeće:

- Kada je udaljenost premala neće doći do razvijanja valovite površine poprečnog presjeka spoja dvaju metala.
- Udaljenost između valova i amplituda valova postaje veća sa povećavanjem udaljenosti.

- Kad je udaljenost prevelika izgled spoja postaje sličan onom kad je udaljenost premala zbog velikog međusobnog razmaka između pojedinih valova.

3.2. 4. Granice uspješnog zavarivanja

Za pojedine metale koji se zavarivaju eksplozivom izrađuje se poseban dijagram u kojemu su objedinjeni parametri koji utječu na uspješnost zavarivanja eksplozivom. Dijagram se naziva *welding window*. Parametri α , β , v_d , v_u , v_s i značajke materijala određuju izgled dijagrama. Dijagram može biti nacrtan u v_u - β obliku i u v_s - β obliku. Na slici 3-6 prikazan je dijagram granica zavarivanja u v_s - β obliku



Slika 3-6. Welding window (Petrushkov, 2009)

Granica formiranja mlaza - linija a-a označava granicu formiranja mlaza, lijevo od linije doći će do formiranja mlaza, a desno od linije je područje u kojem ne dolazi do pojave mlaza. Do pojave mlaza dolazi kad je brzina točke sudara manja od brzine prolaza zvuka metala. Vidljivo je da područje u kojem mlaz nastaje raste proporcionalno s porastom brzine točke sudara i dinamičkog kuta.

Gornja i donja granica brzine točke sudara – linija b-b i linija e-e

linija b-b označava gornju granicu i prema procjenama je 20% do 50% veća od brzine prolaza zvuka u pojedinim materijalima.

linija e-e označava donju granicu i različiti autori predlažu različite formule za izračun donje granice.

Donja i gornja granica dinamičkog kuta β – linija c-c i linija d-d

Predložena donja granica za paralelan postav iznosi između 2° i 3° stupnja, a gornja granica iznosi oko 31°. Kod postava pod kutom donja granica dinamičkog kuta iznosi 3° a gornja 18°.

Donja i gornja granica udranog tlaka – linija g-g i linija f-f

Da bi došlo do uspješnog spoja nužno je zadovoljiti sve navedene uvijete odnosno postići uvjete u šrafiranom dijelu dijagrama.

3.3. Primjena zavarivanja metala eksplozivom

Primjena ove metode zavarivanja dosta je rasprostranjena. Ovom metodom moguće je spojiti različite vrste metala koje niti jednom drugom metodom nije moguće zavariti, a metoda se koristi za metalne obradke različitih oblika. U tablici 3-1 dana je procjena zavarivanja raznorodnih materijala eksplozivom.

Tablica 3-1. Procjena mogućnosti zavarivanja raznorodnih materijala eksplozivom na temelju dijagrama stanja (Zaharenko, 1990)

	Ag	Al	Au	Be	Cd	Co	Cz	Cu	Fe	Mg	Mn	Mo	Nb	Ni	Pb	Pt	Re	Sn	Ta	Ti	V	W	Zr
Ag		C	S	X	C	D	C	C	D	X	C	D	N	C	C	D	C	D	C	D	D	X	X
Al	S		X	C	X	X	X	C	X	C	X	X	X	X	C	X	N	C	X	X	X	X	X
Au	S	X		X	X	C	D	S	C	X	X	C	N	S	X	S	N	X	N	X	D	X	X
Be	X	C	X		N	X	X	X	X	X	X	X	X	X	D	D	X	X	X	X	X	X	X
Cd	C	X	X	N		D	D	X	D	S	D	N	N	D	C	X	N	C	N	X	N	N	D
Co	D	X	C	X	D		C	C	C	X	C	X	X	S	C	S	S	X	X	X	X	X	X
Cz	C	X	D	X	D	C		C	C	X	C	S	X	C	C	C	S	C	X	C	D	S	X
Cu	C	C	S	X	X	C	C		C	X	S	D	D	S	C	S	D	C	D	X	D	D	X
Fe	D	X	C	X	D	C	C	C		D	C	C	X	C	C	S	X	X	X	X	C	X	X
Mg	X	C	X	X	S	X	X	X	D		X	D	N	X	X	X	N	X	N	D	N	D	D
Mn	C	X	X	X	D	C	C	S	C	X		D	X	C	C	X	N	X	X	X	X	D	X
Mo	D	X	C	X	N	X	S	D	C	D	D		S	X	D	D	X	D	S	S	S	S	X
Nb	N	X	N	X	N	X	X	D	X	N	X	S		X	N	X	X	X	D	S	S	D	S
Ni	C	X	S	X	D	S	C	S	C	X	C	X	X		C	S	D	X	X	X	X	X	X
Pb	C	C	X	N	C	C	C	C	C	X	C	D	N	C		X	N	C	N	C	N	D	X
Pt	S	X	S	X	X	S	C	S	S	X	X	D	X	S	X		C	X	X	X	X	X	X
Re	D	N	N	X	N	S	S	D	X	N	N	X	X	D	N	C		D	D	X	D	X	X
Sn	C	C	X	D	C	X	C	C	X	X	X	D	X	X	C	X	D		X	X	X	D	X
Ta	D	X	N	D	N	X	X	D	X	N	X	S	D	X	N	X	D	X		S	D	D	X
Ti	C	X	X	X	X	X	S	X	X	D	X	S	S	X	X	X	X	X	S		S	C	S
V	D	X	D	X	N	X	D	D	S	N	X	S	S	X	N	X	D	X	D	S		D	X
W	D	X	N	X	N	X	S	D	X	D	D	S	D	X	D	X	X	D	D	C	D		X
Zr	X	X	X	X	D	X	X	X	X	D	X	X	S	X	X	X	X	X	X	S	X	X	

Legenda :

X-parovi koji se mogu zavariti (stvaraju intermetalne spojeve) ;

S-parovi koji se dobro zavaruju (stvaraju čvrste otopine) ;

C-parovi koje je moguće zavariti (odlikuju se stvaranjem složene mikrostrukture zone spoja) ;

D-parovi kod kojih zavarivanje se obavlja uz posebne uvjete ;

N-parovi za koje nema podataka

Premda se eksplozivom mogu zavarivati metali različitih oblika, postoji gruba podjela zavarivanja prema obliku na:

- zavarivanje metalnih ploča i
- zavarivanje metalnih oblika kružnog poprečnog presjeka (cijevi).

S obzirom na veličinu obradka ona varira od vrlo malih obradaka do obradaka velikih dimenzija. Proizvodi nastali zavarivanjem metala eksplozivom koriste se u različitim granama industrije. Slike 3-7. i 3-8. prikazuju obradke različitih dimenzija.



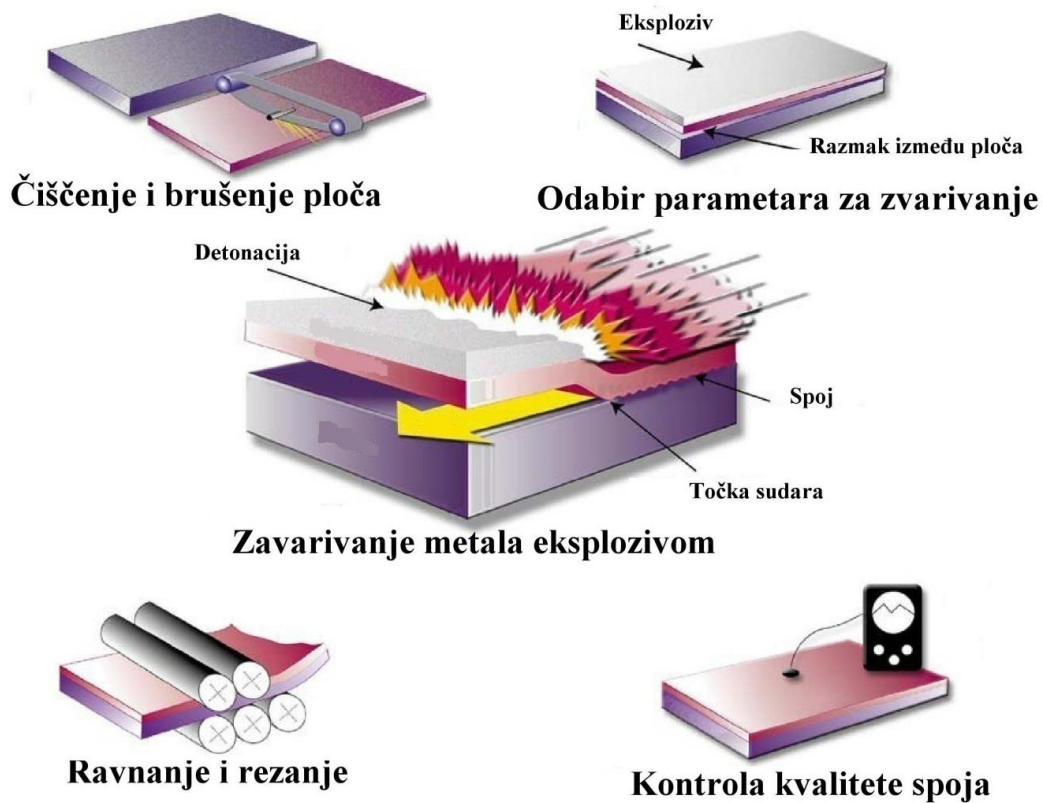
Slika 3-7. 3" Promjer Al/SS prsten (High Energy Metals, 2009)



Slika 3-8. Cr-Mo čelik + nehrđajući čelik 321 (102 mm + 3 mm) 5m diam x35m
(Nobelclad, 2016)

3.3.1. Zavarivanje metalnih ploča

Tehnološki gledano, industrijski postupak proizvodnje ploča zavarenih energijom eksploziva uključuje niz faza osim samog zavarivanja. Tehnološki proces proizvodnje ploča zavarenih eksplozivom prikazane su slikom 3-9.



Slika 3-9. Tehnološki proces proizvodnje ploča zavarenih eksplozivom

Na slici 3-10 prikazana je priprema za zavarivanje, zavarivanje i gotov proizvod.



Slika 3-10. Priprema za zavarivanje, zavarivanje i gotov proizvod (High Energy Metals, 2009)

Prije samog zavarivanja potrebno je površine metala dobro očistiti i pripremiti za zavarivanje. U pravilu su površine metala presvučene tankim slojem koji obično uključuje okside metala i apsorbirane plinove. Proces zavarivanja metala eksplozivom odvija se vrlo brzo i ne postoji mogućnost utjecanja na karakteristike vara za vrijeme trajanja procesa, zbog toga je potrebno sve utjecaje parametra uskladiti prije početka procesa. Prije početka mogu se provjeriti karakteristike metala i eksploziva. Kod ulaznih parametara eksploziva kontrolira se brzina detonacije eksploziva. Nakon priprema površina koje se spajaju dolazi proces zavarivanja. Nakon procesa zavarivanja spojene ploče se ravnaју, jer se uslijed djelovanja tlaka detonacije iskrive. Nakon ravnjanja, ploče se režu na željene dimenzije. Ukoliko je potrebno, provodi se oslobađanje stresa na varovima koje se također izvodi uz pomoć eksploziva. Prije prodaje proizvoda nužno je provesti kontrolu kvalitete spoja. Kvaliteta spoja kontrolira se nedestruktivnim metodama i mehaničkim testiranjem.

Kod zavarivanja metalnih ploča, u pravilu, jedna ploča je veće debljine i naziva se osnovna ploča (*base plate*) i na nju se zavaruju ploče manje debljine. Materijali osnovne ploče obično su razne čelične legure, aluminij, ugljični čelik i nehrđajući čelik, a na njima se najviše zavaruju aluminij, legure bakra, legure nikala, nehrđajući čelici, Tantal, Titan i Cirkonij. U tablici 3-2 dani su parametri koji utječu na uspješnost zavarivanja ploča te su podijeljeni na bitne i nebitne.

Tablica 3-2. Parametri koji utječu na uspješnost zavarivanja metalnih ploča

Polje	Parametar	Bitno	Nebitno
Osnovna ploča	Tip i razred	X	
	Debljina	X	
	Toplina tretiranja	X	
Ploča koja se zavaruje	Tip i razred	X	
	Debljina	X	
	Toplina tretiranja	X	
Dimenzije ploče	Aktivna površina		X
	Omjer debljina ploča	X	
	Dužina i širina		X
	Razmak	X	

Ostali parametri	Eksplziv, masa / površina	X	
	Tip eksploziva i sastav	X	
	Površinsko stanje	X	
	Tip i točka paljenja		X
	Odstojnici		X
	Konačna težina eksploziva		X
	Brzina detonacije	X	
	Usporivači	X	

Veličina ploča, uglavnom, je limitirana masom trenutno otpucanog eksploziva. Kompanija Dynamic Materials Corporation navodi da je u mogućnosti zavariti metalne ploče duljine 12 m- širine 5 m, a maksimalna debljina ploča koje se ubrzavaju djelovanjem eksploziva iznosi 25 mm.

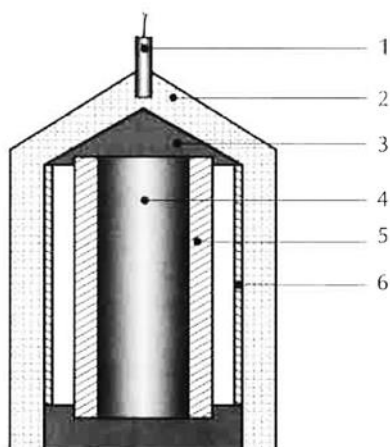
3.3.2. Zavarivanje metalnih cijevi

Temeljne zakonitosti koje vrijede za zavarivanje eksplozijom ravnih metalnih ploča vrijede i za zavarivanje cijevi, bez obzira na to što se zavarivanje cijevi odlikuje nizom specifičnosti. U praksi razlikujemo dva osnovna postupka kod zavarivanja metalnih cijevi:

- platiranje ili oblaganje cijevi
- spajanje ili zavarivanje cijevi

3.3.2.1. Platiranje

Platiranje cijevi tankim slojem drugog metala izvodi se s ciljem poboljšanja tvrdoće ili čvrstoće cijevi. Na ovaj način je cijev moguće učiniti otpornom na koroziju i smanjiti cijenu koštanja izrade cijevi. Platiranjem se izrađuju bimetalni elementi (dijelovi) različitih dimenzija od svega nekoliko milimetara pa do nekoliko metara. Platirati se mogu vanjske i unutarnje površine cijevi. Za platiranje vanjskih cilindričnih površina općenito najčešće se primjenjuje način prikazan slikom 3-11.



Kazalo:

- 1-detonator
- 2-eksplozivni naboj
- 3-konus;
- 4-metalna jezgra(trn)
- 5-cijev koja se platira(unutarnja)
- 6-platirajuća (vanjska) cijev

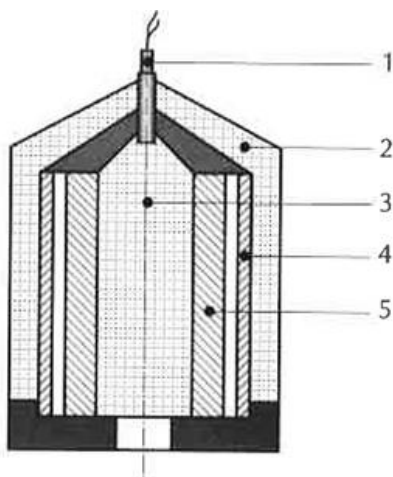
Slika 3-11. Platiranje vanjske cilindrične površine (Sućeska, 2001)

Cijev čija se vanjska površina platira (unutarnja cijev) postavlja se koaksijalno s platirajućom cijevi (vanjskom), a između njih se ostavlja određeni zazor. Kako bi se duž osi cijevi postigla pravilna prstenasta fronta detonacijskog vala koriste se konusni umetci. Oni omogućuju izradu takvog oblika eksplozivnog naboja kojim se dobiva prstenasta fronta detonacijskog vala. Bitna razlika između zavarivanja cijevi i zavarivanja ravnih metalnih ploča jest u tome što se u zazoru između cijevi, ispred točke dodira, nakupljaju čestice materijala otrgnute s površina cijevi.

Izvjescna asimetrija pri sudaranju, koja je uvijek moguća, rezultira koncentriranjem čestica na pojedinim dijelovima površina cijevi koje se zavaruju i nastajanjem defekata na zavarenom spoju. Eksperimentalno je utvrđeno da je vrlo teško dobiti kvalitetan spoj na dužini većoj od 4-5 promjera cijevi.

Da bi se izbjeglo deformiranje cijevi u nju se stavlja tvrda metalna jezgra (trn). Između cijevi i jezgre ostavlja se izvjesni zazor koji se ispunjava vodom ili nekim lako taljivim materijalom. Po završetku procesa zavarivanja taj se materijal uklanja, čime se omogućuje lako razdvajanje cijevi i unutarnje metalne jezgre.

Platiranje vanjske površine cijevi moguće je i na način prikazan slikom 3-12.



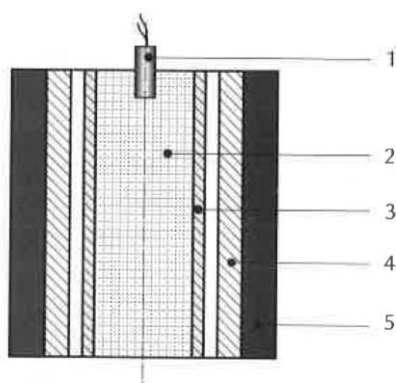
Kazalo:

- 1-detonator i prijenosni eksplozivni naboj
- 2-vanjski eksplozivni naboj
- 3-unutarnji eksplozivni naboj
- 4-platirajuća cijev (vanjska)
- 5-cijev čija se vanjska površina platira

Slika 3-12. Platiranje vanjske cilindrične površine korištenjem dvaju eksplozivnih nabojâ (Sućeska, 2001)

Postupak platiranja sastoji se u korištenju dva eksplozivna naboja-vanjskog naboja postavljenog na površinu platirajuće (vanjske) cijevi i unutarnjeg naboja postavljenog na površinu cijevi koja se platira (unutarnja cijev). Sinkroniziranim iniciranjem oba nabojâ pomoću generatora cilindričnog udarnog vala osigurava se istodobno “ispaljivanje” obje cijevi, jedne u susret drugoj, i njihovo spajanje.

Primjenom opisanog načina plakiranja cijevi, nije potrebno korištenje ikakvih vanjskih okova (matrica) kojima se inače sprječava deformiranje cijevi pri platiranju. Platiranje unutarnje površine metalne cijevi moguće je izvršiti na način prikazan slikom 3-13.



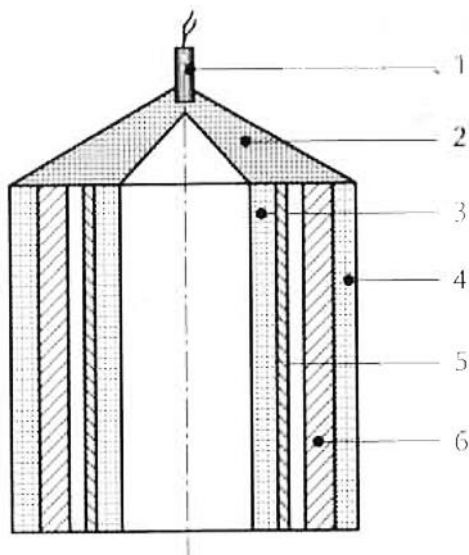
Kazalo:

- 1-detonator
- 2-eksplozivni naboj
- 3-platirajuća cijev
- 4-cijev čija se unutarnja površina platira
- 5-vanjska matrica (okov)

Slika 3-13. Platiranje unutarnje površine cijevi (Sućeska, 2001)

Platirajuća cijev (unutarnja cijev) pomoću eksplozivnog naboja “ispaljuje” se prema cijevi čija se unutarnja površina platira (vanjska cijev). Da ne bi došlo do

deformiranja vanjske cijevi, ona se pri platiranju stavlja u krutu matricu (okov), koja pri detonaciji naboja preuzima dio opterećenja. Kada se platira unutarnja površina cijevi velikog promjera, tada se koristi eksplozivni naboj u obliku šupljeg cilindra, a umjesto vanjskog okova (matrice) koristi se eksplozivni naboj na vanjskoj površini cijevi koja se platira. Postupak je prikazan slikom 3-14.



Kazalo:

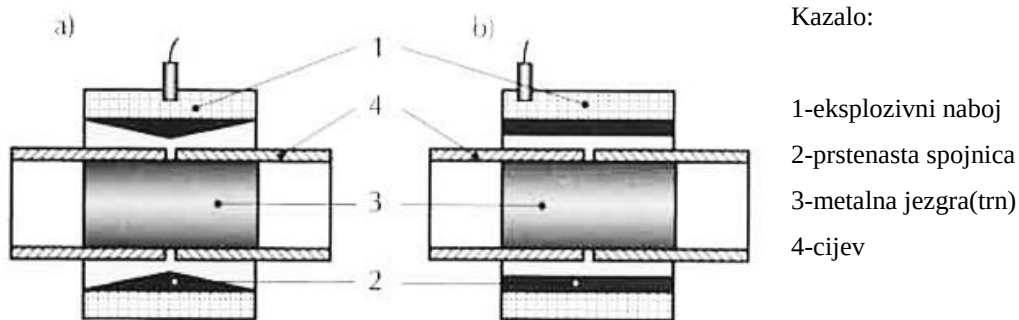
- 1-detonator
- 2-generator cilindričnog udarnog vala
- 3-unutarnji naboj
- 4-vanjski naboj
- 5- platirajuća cijev
- 6-cijev čija se unutarnja površina platira

Slika 3-14. Platiranje unutarnje površine cijevi (Sućeska, 2001)

Unutarnje platiranje cilindričnih elemenata primjenjuje se, na primjer, pri izradi kliznih ležajeva. Ta tehnologija omogućuje, ne samo ekonomičnije trošenje obojenih metala, već i bitno poboljšanje svojstva ležajeva. Platiranjem unutrašnjih površina velikih posuda izrađenih od konstrukcijskih čelika slojem nehrđajućeg čelika, titana, tantala ili nekog drugog metala, dobivaju se posude s površinom otpornom na koroziju. To su samo neki od nekih praktičnih primjera primjenjivosti tehnologije platiranja metalnih cijevi i drugih cilindričnih elemenata eksplozijom (Sućeska, 2001).

3.3.2.1. Spajanje krajeva metalnih cijevi

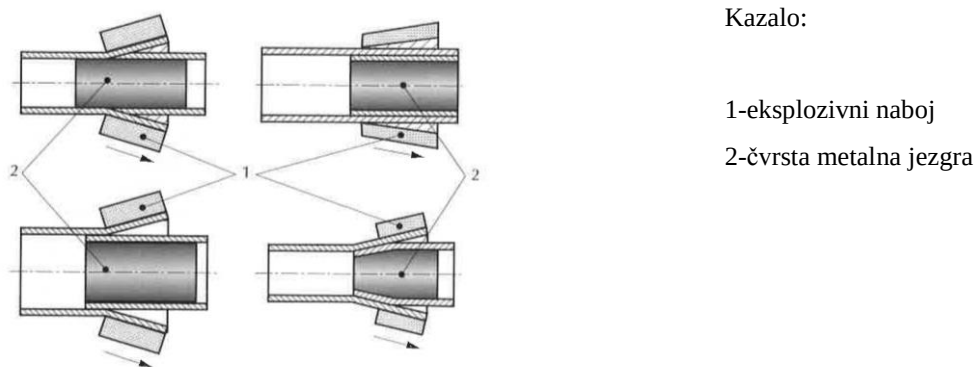
Postoje brojni načini spajanja metalnih cijevi, ovisno o tome jesu li njihovi krajevi istog promjera, jesu li cijevi izrađene od istoga materijala, kakve su im dimenzije itd. Tipičan način spajanja dviju cijevi od istog materijala i istog promjera, uz korištenje prstenaste spojnice, prikazan je na slici 3-15.



Slika 3-15. Spajanje krajeva metalnih cijevi uz korištenje prstenaste spojnice (Sućeska, 2001)

Slika 3-15. pod 'a' prikazuje način spajanja krajeva metalnih cijevi kod kojega se iniciranje eksplozivnog naboja vrši na njegovom središnjem dijelu tako da se detonacijski val širi prema krajevima naboja i spojnice, paralelno s osi cijevi, dok slika 3-13 pod 'b' prikazuje način spajanja kod kojeg se inicijacija naboja vrši na jednom od njegovih krajeva.

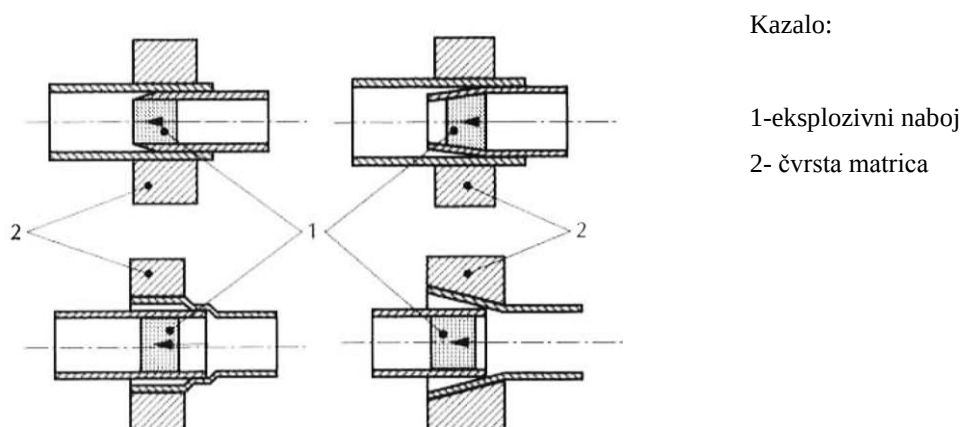
Još nekoliko načina spajanja krajeva metalnih cijevi kod kojih se eksplozivni naboj postavlja s vanjske strane cijevi prikazano je na slici 3-16. Spajanje cijevi primjenom vanjskog eksplozivnog naboja jednostavno je, ali primjenjivo samo pri spajanju cijevi koje imaju slobodan bar jedan kraj kroz koji se unutar cijevi stavlja metalna jezgra koja sprječava deformiranje cijevi.



Slika 3-16. Spajanje krajeva metalnih cijevi uz korištenje prstenaste spojnice (Sućeska, 2001)

Krajevi metalnih cijevi istog ili različitog promjera mogu se spojiti i pomoću unutarnjeg eksplozivnog naboja, na neki od načina prikazanih na slici 3-17.

Nedostatak tog načina spajanja cijevi jest u tome što on zahtijeva upotrebu masivnih vanjskih okova (matrice) kojima se sprječava deformiranje zavarenih krajeva cijevi.



Slika 3-17. Spajanje krajeva metalnih cijevi korištenjem unutarnjeg eksplozivnog naboja (Sućeska, 2001)

4. PREGLED ISTRAŽIVANJA U ZAVARIVANJU METALA EKSPLOZIVOM

S razvitkom tehnologije pojavila se potreba za novijim istraživanjima u svrhu dobivanja materijala iznimnih svojstava za industrijsku primjenu, poput otpornosti na koroziju i habanje. Poznato je kako je postupak platiranja primjenom eksploziva uspješan u slučaju platiranja istovrsnih metala, primjerice čelik – čelik, aluminij – aluminij, nehrđajući čelik – čelik, ali i raznovrsnih metala poput čelik – aluminij, čelik – titan, željezo – bakar, aluminij – bakar te mnogi drugi (Findik, 2011). Prije početka samog procesa potrebno je pažljivo odabrati parametre prema kojima će se provesti postupak zavarivanja.

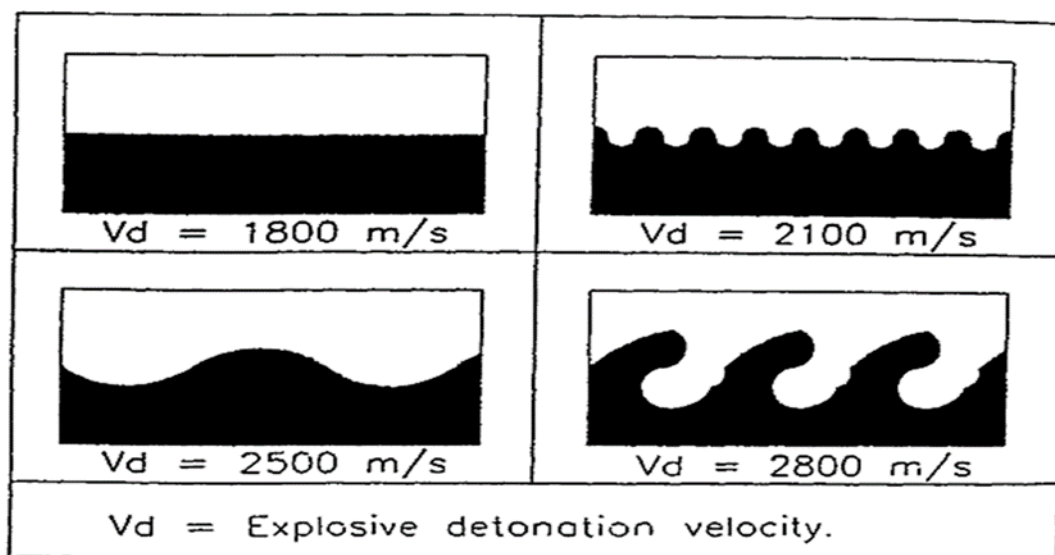
4.1. Mikrostruktura zone spoja

Proučavanje međudjelovanja dviju metalnih ploča na atomskoj razini za sada nije dalo sasvim zadovoljavajuće rezultate, pa se sudaru metalnih ploča češće pristupa sa stajališta dinamike čvrstog tijela. U svakom slučaju, pretpostavka je da do spajanja metala eksplozijom dolazi zbog približavanja atoma na udaljenost na kojoj međuatomsko djelovanje postaje dovoljno snažno.

Proučavanjem mikrostrukture zavarenog spoja niza različitih materijala u zoni spoja uočeni su različiti efekti kao što su primjerice, valni oblik zavarenog spoja, plastično tečenje u okolnoj zoni, stvaranje vrtloga i “džepova” od rastaljenog materijala,

stvaranje intermetalnog spoja itd. Ti efekti potvrđuju da mehanizam spajanja metala eksplozijom metala eksplozijom nije u svim slučajevima isti, nego da ovisi i o vrsti metala koji se spajaju i o uvjetima spajanja (brzini plirajuće ploče, metodi spajanja itd.). Općenito se može reći da su u zoni spoja nađene strukture karakteristične za stanje snažnog deformiranja (jako izdužena zrna, šupljikava struktura, visoka gustoća dislokacije itd.)

Prema Cowanu i Holtzmanu uvjet efikasnog zavarivanja dvaju metala eksplozijom jest da u točki dodira dođe do stvaranja mlaza koji sadži površinske slojeve obiju ploča (Cowan i Holtzman, 1963). Mogućnost zavarivanja dvaju raznorodnih metala eksplozijom ovisi ponajprije o njihovoj metalurškoj kompatibilnosti, tj. međusobnoj topivosti u čvrstom i tekućem stanju, te o mogućnosti stvaranja krtih intermetalnih spojeva. Taljenjem nije moguće zavariti metale i slitine koji se u tekućem stanju ne mogu međusobno otapati – primjerice željezo i magnezij, čisto olovo i bakar, bakar i željezo itd. Ako se pomiješaju taline parova tih metala, doći će do njihova raslojavanja tako da se nakon hlađenja mogu lako razdvojiti. Dobar spoj zavarivanjem mogu činiti metali koji se dobro otapaju u rastaljenom pa čak i u čvrstom stanju. Međusobna topivost metala ovisi o sličnosti njihovih kristalnih rešetaka, razlike u veličini atoma i elektronegativnosti (Sućeska, 2001).



Slika 4-1. Različiti oblici spoja ovisni o detonacijskoj brzini (Shu i sur., 1994).

Veće eksplozivno punjenje te veći razmak između ploča uzrokuje veći kut sudara dviju ploča te turbulentniji spoj na mjestu sudara. Ukoliko želimo povećati vlačnu čvrstoću

težiti ćemo valovitijem spoju, a ukoliko želimo smanjiti reaktivnu zonu zbog termalnih i kinetičkih razloga težiti ćemo ravnoj zoni spoja (Shu i sur., 1994). Istovrsne metale i one koji imaju slični koeficijent termalnog rastezanja možemo spajati tako da dobijemo valovitu strukturu radi poboljšanja vlačne čvrstoće, odnosno čvrstoće na posmik po površini spoja, a kada nam valovita struktura više šteti zbog različitog temperaturnog rastezanja nego što koristi zbog veće vlačne čvrstoće tada ćemo težiti ravnoj zoni spoja.

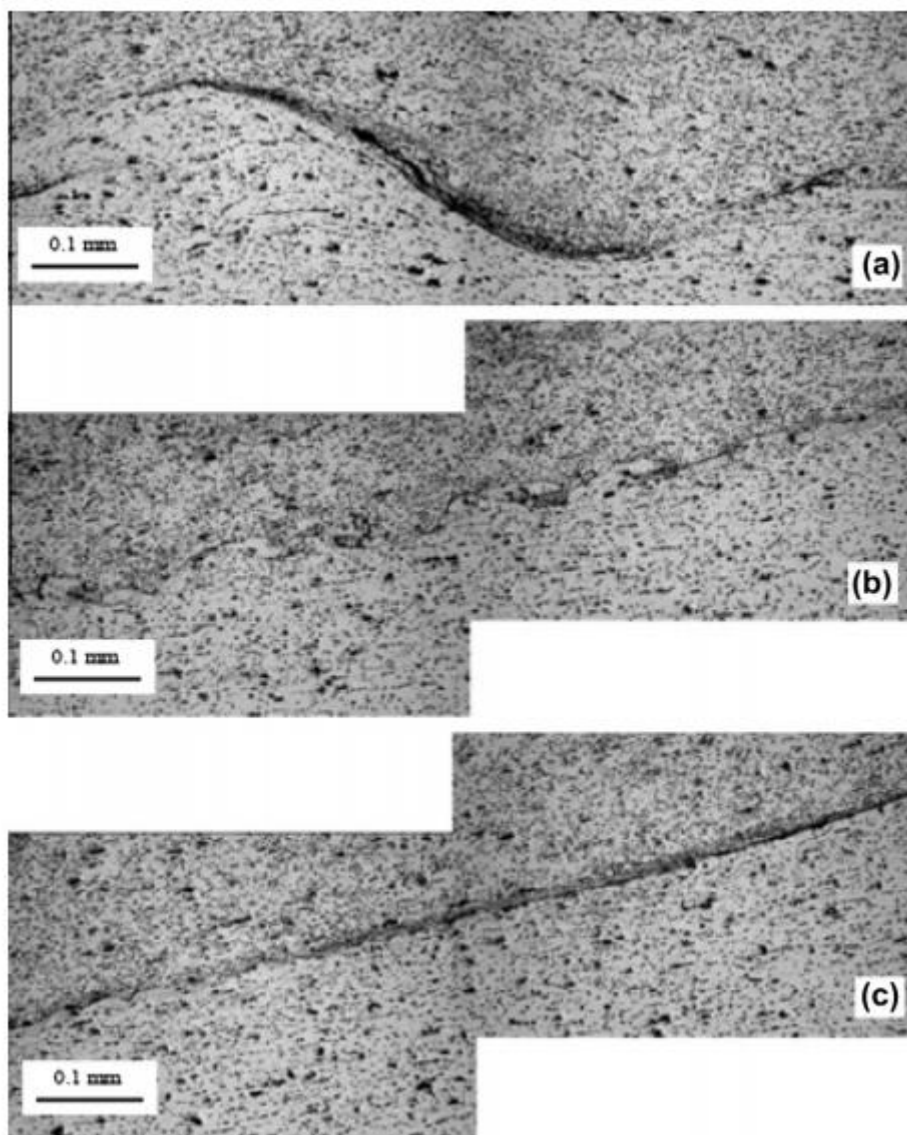
4.2. Proces zavarivanja istovrsnih metala eksplozivom

4.2.1. Čelik – Čelik

Acarer i suradnici ispitivali su parametre samog procesa zavarivanja čeličnih dijelova i njihove učinke na mikro čvrstoću i otpornost na smicanje dok je Findik (2010) u svom radu opisao različite površine spoja koje nastaju promjenom parametara zavarivanja poput udaljenosti između ploča, količine eksploziva te kuta sudara. Dobiveni spojevi istraživani su pri toplinski obrađenim i neobrađenim uvjetima. Rezultati istraživanja pokazuju da se struktura spoja mijenjala s promjenom u količini eksploziva i udaljenosti među pločama. Kod valovite strukture, prilikom povećanja količine eksploziva amplituda i duljina vala je rasla. Isto tako, dobiveni su bolji rezultati za vlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje kod onih uzoraka koji su toplinski obrađeni u usporedbi s onima koji nisu toplinski obrađeni. Štoviše, kod testa na savijanje uočeno je da zona savijanja nema pukotine. Tvrdća je povećana u blizini spoja obiju ploča, dok tvrdća opada s udaljenošću od spoja. Ispitivanjem čvrstoće na smicanje dobiveni su prihvatljivi rezultati (Findik, 2011).

4.2.2. Aluminij – Aluminij

Parametri zavarivanja birani su tako da se dobije valovita i ravna struktura. Proces je rađen u različitim uvjetima (Findik, 2011). Eksperimentalna opažanja pomoću optičkog mikroskopa sugerirala su da odnos $V_p - \beta$ nije konstantan tijekom samog procesa jer je valovita struktura praćena ravnim spojem. Valja napomenuti da debljina materijala utječe na kut sudara i kvalitetu spoja. Eksperimenti su rađeni s različitim inicijalnim kutovima 4, 6, 8, 10, 12 i 14. Struktura spoja je 1/3 valovita, a nadalje ravna što je vidljivo na slici 4-2. za inicijalni kut od 8 stupnjeva, krećući s lijeva na desno. Slična je struktura dobivena i za druge inicijalne kutove, ali je valna duljina spoja drugačija (Findik, 2011).

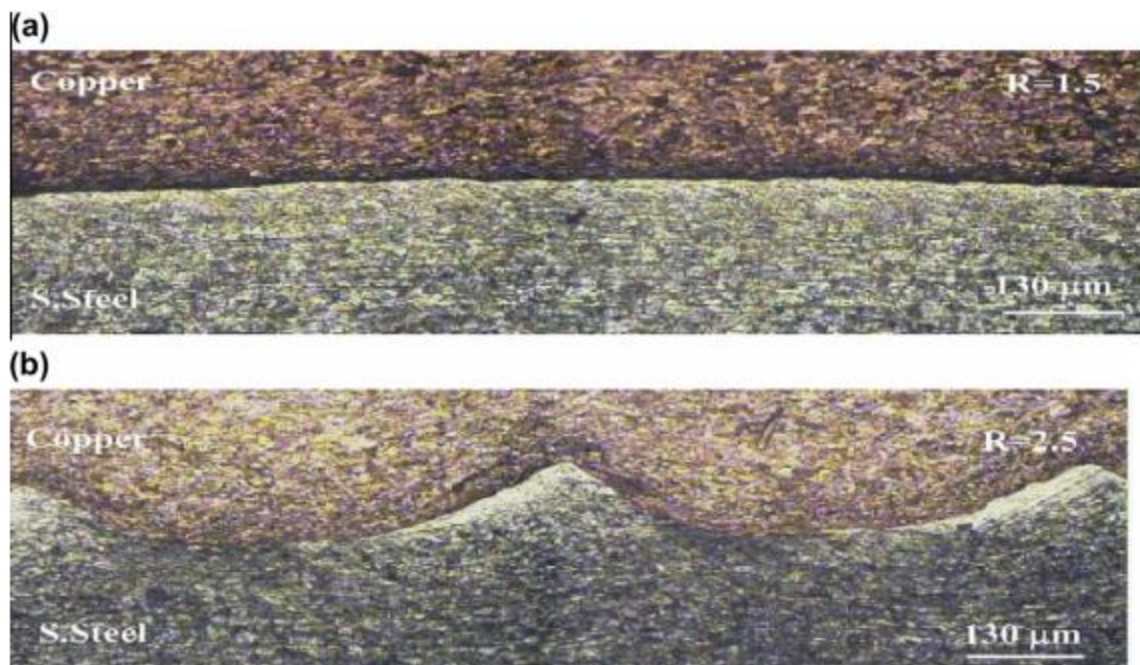


Slika 4-2. Prikaz spoja pri inicijalnom kutu od 8° (a-inicijalni, b-prijelazni, c- završni dio) (Findik, 2011).

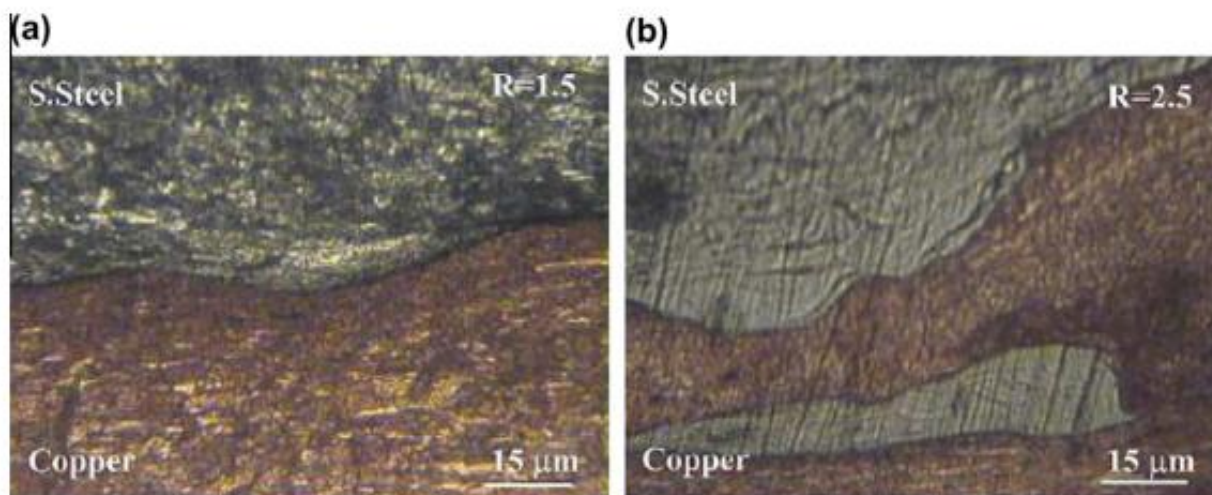
4.2.3. Bakar –Čelik

Mogućnost platiranja bakra i čelika primjenom eksploziva istraživana je korištenjem različitih eksplozivnih omjera i udaljenosti između ploča koje se platiraju (Findik, 2011). Istraživanje je pokazalo da spoj koji nastaje ima visoku kvalitetu. Nadalje, uočeno je da povećavanjem eksplozivnog omjera i udaljenosti ravni spoj prelazi u valoviti te da navedenim povećavanjem raste amplituda i valna duljina vala. Isto tako, tvrdoća spoja kao i samih ploča povećala se uslijed deformacije koja je posljedica udara. Povećana je i unutrašnja površina kao posljedica valovitog spoja koji je nastao povećanjem eksplozivnog

omjera i udaljenosti, štoviše spoj se nije rastavio uslijed vlačno smičnog testa. Kako je prikazano na slici paralelna konfiguracija ploča odabrana je za eksperiment dok je kao stacionarna osnovna ploča izabran bakar radi njegovog sveobuhvatnog korištenja u brodogradnji. Čelik je odabran kao (flyer plate) ploča koja se ubrzava radi mehaničkih i korozivnih svojstava (Findik, 2011). Udaljenost se izražava u odnosu na debljinu ploče koja se zavaruje (d_{pz}) te su tako u radu korištene udaljenosti $0,5d_{pz}$, $1d_{pz}$, $2d_{pz}$, $3d_{pz}$, a eksplozivni omjer $R=1,5$ i $R=2,5$. Mikrostruktura je pokazala da za manji omjer $R=1,5$ nastaje ravni spoj dok za $R=2,5$ valovit dok u slučaju za veliku udaljenost $3d_{pz}$ i za mali omjer $R=1,5$ dobiven je valoviti oblik spoja prikazan na slici 4-4. Nadalje, za istu udaljenost $0,5d_{pz}$ i različite omjere oblik spoja je prikazan na slici 4-3.



Slika 4-3. Prikaz spoja za jednaku udaljenost $0,5d_{pz}$ te za različite eksplozivne omjere a- $R=1,5$, b- $R=2,5$ (Findik, 2011).



Slika 4-4. Prikaz spoja za jednaku udaljenost $3d_{pz}$ te za različite eksplozivne omjere a- $R=1.5$, b- $R=2.5$ (Findik, 2011).

Bitno je napomenuti da je valovit spoj poželjan u ovom postupku zbog veće unutrašnje površine kao i veće čvrstoće. Povećanje čvrstoće proporcionalno je povećanju eksplozivnog omjera i udaljenosti.

5. PRIMJER USKLADIVANJA PARAMETARA PRI ZAVARIVANJU METALA EKSPLOZIVOM

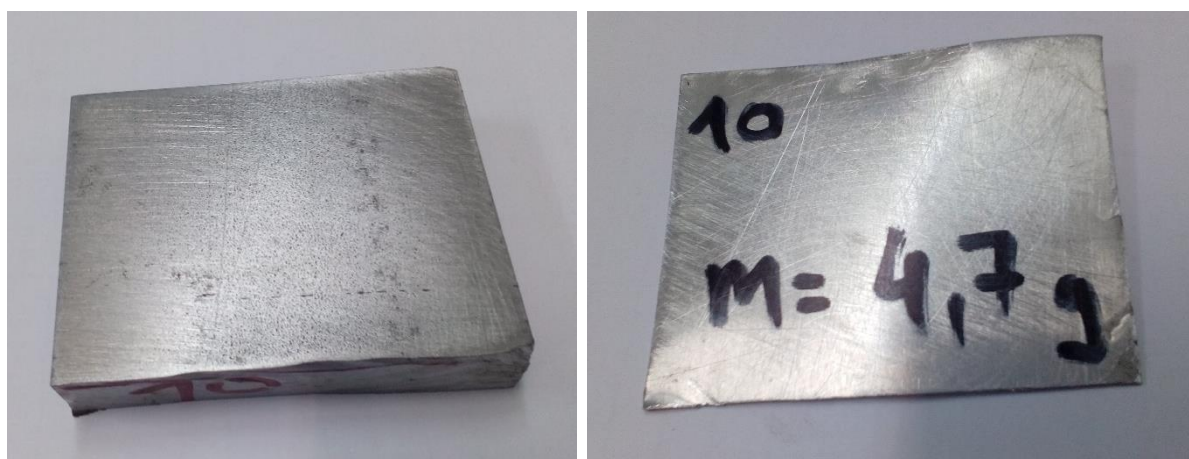
5.1. Mjerni postav

Za praktični primjer zavarivanja metala eksplozivom izabran je spoj aluminija i čelika. Osnovna ploča (*base plate*) izrađena je od svijetlo vučenog čelika dimenzija 60 mm x 50 mm x 12 mm. Ploča koja se ubrzava (*flyer plate*) dimenzija 60 mm x 50 mm x 0,5 mm i izrađena je od aluminija. Aluminijski lim je izrađen od legure aluminija s udjelom aluminija od minimalno 99,5 %. Kemijski sastav legure prema Al 99,5 dan je tablicom 5-1.

Tablica 5-1. Kemijski sastav legure Al 99,5

Element	Udio (%)
Al	$\geq 99,5$
Cu	$\leq 0,05$
Mn	$\leq 0,05$
Mg	$\leq 0,05$
Si	$\leq 0,25$
Fe	$\leq 0,4$
Zn	$\leq 0,07$
Ti	$\leq 0,05$

Prije samog postupka zavarivanja metalne ploče su očišćene kako bi se uklonili oksidni slojevi metala i apsorbiranih plinova. Izmjerena je masa aluminijske ploče. Ploče su prikazane slikom 5-1.



Stacionarna ploča (*base plate*)

Ploča koja se ubrzava (*flyer plate*)

Slika 5-1. Stacionarna ploča i ploča koja se ubrzava

Eksplziv je bio smješten u kartonsko kućište, a u pojedinim slučajevima za zaštitu aluminijskog lima od razornog djelovanja eksploziva korišten je linoleum debljine 2 mm. Kućište i linoleum su prikazani slikom 5-2.



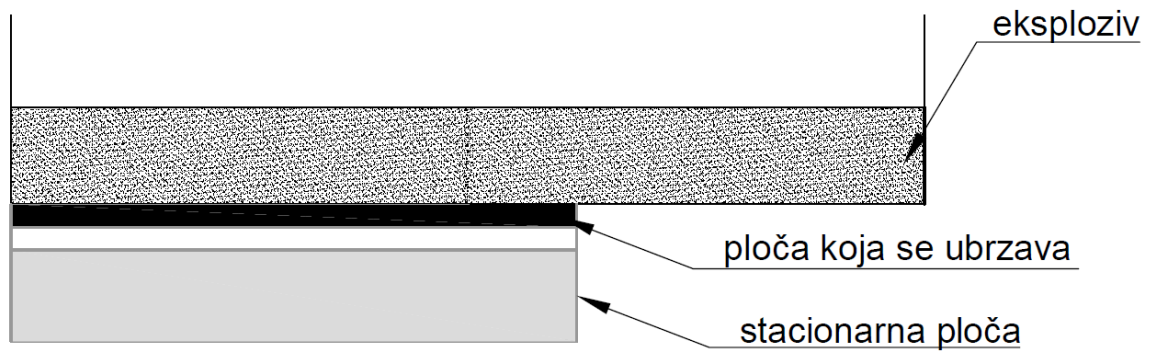
Kućište



Linoleum

Slika 5-2. Kućište i linoleum

Koristio se tradicionalni paralelni postav shematski prikazana slikom 5-3, linoleum se prema potrebi stavlja između ploče koja se ubrzava i eksploziva.



Slika 5-3. Shematski prikaz paralelnog postava

Obzirom da su ispitivanja izvedena u Laboratoriju za ispitivanje eksplozivnih tvari RGN fakulteta, dimenzije metalnih ploča, masa eksplozivnog punjenja i dimenzije cijelog postava ograničene su. Masa eksploziva po pucanju iznosila je 15 g, a uzorci su se nalazili u komori za pucanje prikazanoj slikom 5-4.



Slika 5-4. Komora za ispitivanje

5.2. Eksplozivi i brzina detonacije eksploziva

5.2.1. Eksplozivi

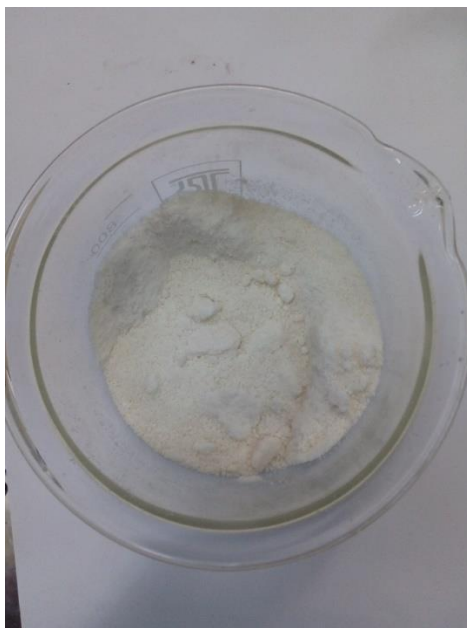
Kao eksplozivni naboj prilikom zavarivanja eksploziva korištena su tri različita eksploziva i smjese pojedinih eksploziva u različitim omjerima. Korišteni eksplozivi su; Ammonit, Mljeveni ANFO i Pentrit.

Ammonit je trgovački naziv amonij nitrati praškasti firme EXTRACO s.a. Eksplozivi se sastoje od mljevenog amonijevog nitrata i organskih goriva, a senzibilizirani su trinitrotoluolom. Osjetljiv je na inicijalni impuls rudarske kapice br. 8 i nije vodootporan. Eksplozivno punjenje od Ammonita je vidljivo na slici 5-8.

Mljeveni ANFO eksploziv je na bazi amonijevog nitrata pomiješanog s gorivom. Odnos između amonijevog nitrata i nafte koja se koristila kao gorivo iznosio je 94 % amonijevog nitrata prema 6% nafte.

Sam amonijev nitrat nije osjetljiv na standardne rudarske detonatore i ne može postići stabilnu detonaciju. Zbog otpornosti na trenje, udar i temperaturu, jednostavan je za

transport. Kod skladištenja problem je vlaga jer je amonijev nitrat lako topljiv u vodi, a s obzirom na poroznost i sastav, lako upija vlagu. Mljeveni ANFO je prikazan slikom 5-5.



Slika 5-5. Mljeveni ANFO

Pentrit

(PETN, pentaerythrol tetranitrate) je vrlo stabilan, netopljiv u vodi, djelomično topljiv u alkoholu i topljiv u acetonu. Koristi se kao eksplozivno punjenje detonirajućih štapina i pojedinih detonatora. Može se flegmatizirati dodavanjem manje količine voska i prešati za eksplozivna punjenja manjih projektila (Meyer 1987). Izmjerena brzina detonacije pentrita u detonirajućem štapinu iznosila je 7000 m/s.

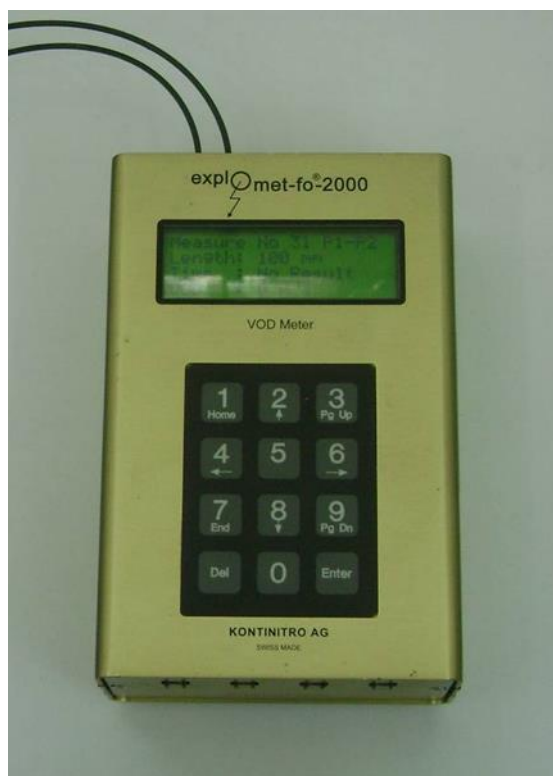


Slika 5-6. Pentrit

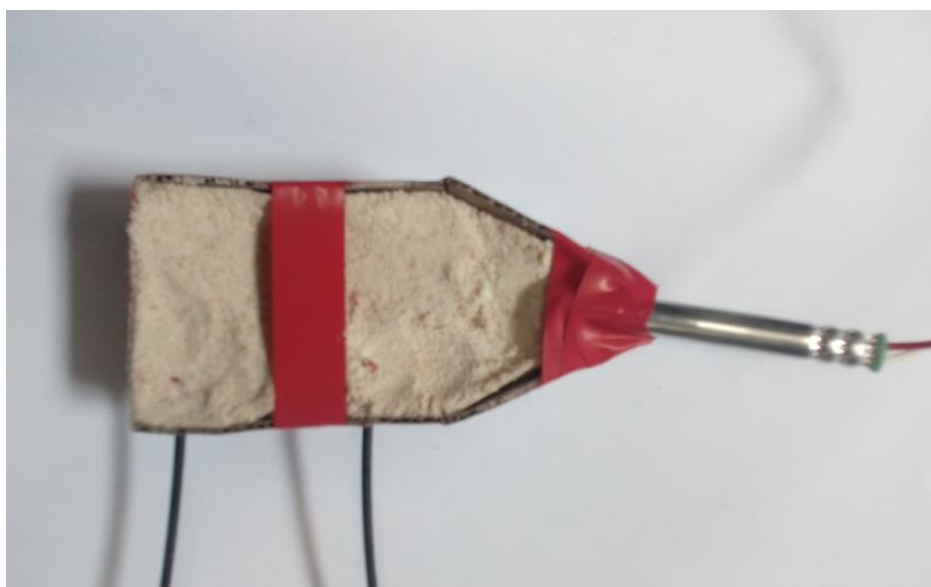
5.2.2. Brzina detonacije eksploziva

Brzina detonacije jedna je od važnijih karakteristika eksploziva, a prema njenom iznosu može se ocjeniti adekvatnost eksploziva za pojedinu upotrebu. O brzini detonacije ovisi i razorna snaga, odnosno brizantnost eksploziva. Brzina eksploziva je bitan parametar koji se mora prilagoditi procesu zavarivanja.

Brzina detonacije mjerena je elektrooptičkom metodom elektroničkim satom Explomet-Fo-2000. Uređaj ima mogućnost mjerenja brzine detonacije na pet segmenata. Metodom se mjeri vrijeme između dvije točke koje je potrebno fronti detonacijskoga vala da prijeđe udaljenost između njih. Na osnovi izmjerene vremena i poznate udaljenosti izračunava se brzina. Točnost mjerenja vremena iznosi $\pm 0,1 \mu\text{s}$ na ukupno trajanje do $10\,000 \mu\text{s}$. Brzina detonacije mjerena je na 1 segmentu. Osjetila su postavljena na međusobnoj udaljenosti od 40 mm. Uređaj Explomet-Fo-2000 prikazan je na fotografiji mjerenja brzine detonacije na slici 5-7.



Slika 5-7. Elektronički sat Explomet – Fo 2000.



Slika 5-8. Prikaz metode mjerenja brzine udarnog vala

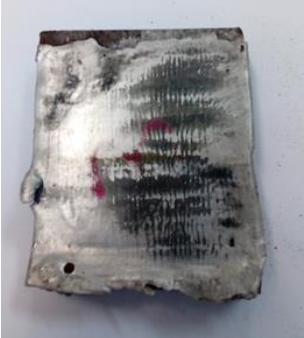
6. REZLTATI ZAVARIVANJA I MJERENJA BRZINE DETONACIJE

Ukupno je izvedeno sedam pucanja s različitim eksplozivnim punjenjima. Masa eksplozivnog punjenja cijelo je vrijeme bila konstantna kako i udaljenost (*stand off distance*) između dva metala koja je iznosila 2 mm. U pojedinim slučajevima je dodavan linoleum kao zaštita metala koji je u kontaktu te je mijenjan odnos između pojedinih eksploziva za slučaj dva eksploziva. Za prva dva pucanja korišten je ammonit, a za ostala pucanja različite smjese ANFO-a i pentrita različitih omjera. Kvaliteta spoja dvaju metala te oštećenje aluminijske ploče ocijenjeno je vizualnim pregledom. U tablici 6-1 dani su rezultati zavarivanja eksplozivom Ammonit, a u tablici 6-2 rezultati zavarivanja smjese ANFO-a i pentrita različitih omjera.

Tablica 6-1. Rezultati zavarivanja eksplozivom Ammonit

	Eksploziv	Ammonit 15g
	Brzina detonacije (m/s)	NP
	Masa Al pločice (g)	4,6
	Linoleum	Ne
	Oštećenost Al pločice	NP
	Opis spoja dvaju metala	Bez spoja
	Eksploziv	Ammonit 15g
	Brzina detonacije (m/s)	NP
	Masa Al pločice (g)	4,7
	Linoleum	Ne
	Oštećenost Al pločice	NP
	Opis spoja dvaju metala	Bez spoja

Tablica 6-2. Rezultati zavarivanja smjese ANFO-a i pentrita

	Eksplziv	ANFO 7,5g / Pentrit 7,5 g
	Brzine detonacije (m/s)	4761
	Masa Al pločice (g)	4,6
	Linoleum	Ne
	Oštećenost Al pločice	Znatno smanjena debljina Al pločice. Površina gornje strane pločice oštećena
	Opis spoja dvaju metala	Spoj po cijeloj površini pločice
	Eksplziv	ANFO 7,5g / Pentrit 7,5 g
	Brzine detonacije (m/s)	4255
	Masa Al pločice (g)	4,6
	Linoleum	DA
	Oštećenost Al pločice	Manje smanjena debljina Al pločice. Površina gornje strane manje oštećena
	Opis spoja dvaju metala	Spoj po cijeloj površini pločice
	Eksplziv	ANFO 10g/ Pentrit 5 g
	Brzine detonacije (m/s)	2531
	Masa Al pločice (g)	4,8
	Linoleum	DA
	Oštećenost Al pločice	Debljina Al pločice ista . Površina gornje strane neznatno oštećena
	Opis spoja dvaju metala	Spoj po cijeloj površini pločice
	Eksplziv	ANFO 12g/ Pentrit 3 g
	Brzine detonacije (m/s)	NP
	Masa Al pločice (g)	4,9
	Linoleum	DA
	Oštećenost Al pločice	NP
	Opis spoja dvaju metala	Bez spoja

Nakon serije ispitivanja izvedeno je još jedno ispitivanje s ciljem određivanja utjecaja površine metala na uspješnost zavarivanja. U ovom slučaju površina čelika nije prethodno izbrušena i obrađena. Rezultati ispitivanja su dani u tablici 6-3.

Tablica 6-3. Rezultati ispitivanja s neizbrušenom i neobrađenom površinom čelika

	Eksplziv	ANFO 10g/ Pentrit 5 g
	Brzine detonacije (m/s)	2773
	Masa Al pločice (g)	4,5
	Linoleum	DA
	Oštećenost Al pločice	Znatno smanjena debljina Al pločice. Površina gornje strane pločice oštećena
	Opis spoja dvaju metala	Spoj samo na jednom dijelu površine pločice

7. ANALIZA USPJEŠNOSTI ZAVARIVANJA I ZAKLJUČAK

Ukupno je otpucano sedam različitih postava od kojih je prvih šest služilo za određivanje optimalne konfiguracije korištenog postava, a posljednji sedmi za podređivanje utjecaja pripreme površine metala prije zavarivanja. Kod prva dva postava za eksplozivno punjenje korišten je Ammonit. Iniciranje eksplozivnog punjenja izvedeno je trenutnim električnim detonatorom. Eksploziv nije uspješno iniciran u oba puta stoga nije bilo moguće ostvariti uspješno zavarivanje dvaju metala. Iz tehničke dokumentacije ustanovljeno je da je kritični promjer eksploziva Ammonit 30 mm. Prilikom pucanja debljina sloja eksploziva iznosila je 10 mm te je bila ispod kritičnog promjera detonacije eksploziva što je dovelo do izostanka detonacije. Nakon dva neuspješna pokušaja s Ammonitom prešlo se na upotrebu druga dva eksploziva. Obzirom da pentrit ima preveliku brzinu detonacije korištene su smjese dvaju eksploziva.

U druga dva postava korištena je smjesa mljevenog ANFO-a u masenom odnosu 50%:50%. Razlika između ta dva pucanja je u tome što je u drugom slučaju korišten linoleum koji je postavljen između eksploziva i aluminijske pločice. U oba slučaja došlo je do uspješnog zavarivanja, međutim, aluminijske pločice bile su znatno istanjene i oštećene. Oštećenje je bilo manje u slučaju kada je korišten linoleum. Srednja izmjerena vrijednost brzine detonacije eksploziva iznosila je približno 4500 m/s. U slijedećem postavu korištena je smjesa od 10 g ANFO-a i 5 g pentrita zajedno s linoleumom između eksploziva i pločice. Izmjerena brzina detonacije iznosila je 2531 m/s, došlo je do potpunog zavarivanja

između dva metala. Debljina aluminjske pločice ostala je ista i neznatno je bila oštećena. Nakon toga, u idućem testu, udio petita smanjen je na 3 g i došlo je do izostanka detonacije. Nadalje, ponovljeno je ispitivanje s postavom od 10 g ANFO-a i 5 g pentrita, ali je površina čelika ostala neobrađena i neočišćena. U ovom slučaju izostalo je potpuno zavarivanje dvaju metala, spoj je bio samo na jednom dijelu pločica dok je aluminjska pločica bila oštećena.

Iz svega navedenog izvedeni su slijedeći zaključci koji se odnose na zavarivanje manjih obradaka Alumija i čelika eksplozivom:

- Za zavarivanje metala manjih dimenzija nužno je koristiti eksplozive koji su sposobni detonirati u manjim kritičnim primjerima.
- Kao optimalno eksplozivno punjenje izabrana je smjesa između ANFO eksploziva i pentrita u omjerima 10g ANFO eksploziva i 5g pentrita.
- Upotrebom linoleuma kao zaštitnog sloja između eksploziva i aluminijske osigurava se manja oštećenost aluminijske.
- Čišćenje i obrada metala prije zavarivanja metala eksplozivom utječe na kvalitetu spoja.

Bitno je napomenuti da se navedeni zaključci odnose samo na testirane postavke. Za izvođenje općenitih zaključaka potrebno je ispitivanja ponoviti na poligonu na uzorcima većih dimenzija. Pored toga potrebno je primijeniti metode i uređaje koji bi jednoznačnije kvantificirali kvalitetu spoja dvaju metala.

7. LITERATURA

- Akbari-Mousavi S.A.A, Barrett L.M., Al-Hassani S.T.S., 2008. Explosive welding of metal plates. Journal of materials processing technology, 29(1), str. 1-19.
- Akbari Mousavi, S.A.A., Al-Hassani S.T.S, 2008. Finite element simulation of explosively-driven plate impact with application to explosive welding. Materials and Design, 202(1-3), str. 224-239.
- Cowan, A.H. & Holtzman. J., 1963. Flow Configurations in Colliding Plates. Explosive Bonding, Journal of Applied Physics, 34(4), str. 928-939.
- Durgutlu A., Okuyucu H., Gulenc B., 2008. Investigation of effect of the stand-off distance on interface characteristics of explosively welded copper and stainless steel. Materials and Design, 29(7), str. 1480-1484.
- Findik F., 2011. Recent developments in explosive welding. Materials & Design, 32(3), str. 1081-1093.
- High Energy Metals, 2009. Explosion bonding URL: <http://www.explosionbonding.com/> (08.09.2016)
- Jelaska D., 2005. Elementi strojeva. Skripta. Split: Fakultet Elektrotehnike Strojarsstva i Brodogradnje
- Meyer, R. 1987. Explosives. VCH Publishers
- Nobel Clad, 2016. Metal reinvented URL: <http://www.nobelclad.com/> (08.09.2016)
- Petrushkov V.G., 2009. Explosion and its Applications In Metalworking, Nova Science Publisher, 696 pp., New York
- Pondt d.o.o, 2015. Zaštita na radu kod elektrolučnih postupaka zavarivanja URL: <http://www.pondt.hr/zavarivanjeall.pdf> (28.08.2016.)
- RAM Rijeka, 2016. Oprema za zavarivanje URL: <http://www.ram-rijeka.com/> (24.08.2016)
- Shu D., Li Y., Ryding D., Kuzay T.M., 1994. Explosive Bonding and Its Application in the Advanced Photon Source Front-End and Beamline Components Design, United States of America, 26(1), str. 1-17.
- Sućeska, M., 2001. Eksplozije i eksploziv - njihova mirnodopska primjena, 305 pp. Zagreb: Brodarski institut.
- Tehnička enciklopedija, 1993. svezak 13, Zagreb, str. 583.
- Zaharenko, I.D., 1990. Svarka maetalovvzrivom. Minsk: Nauka i tehnika
- Young G., 2004. Explosion Welding, Technical Growth and Commercial History, Stainless Steel World, KCI Publishing BV.