

# Zavarivanje metala eksplozijom

---

**Medvidović, Matej**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:169:015368>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-03**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**ZAVARIVANJE METALA EKSPLOZIJOM**

Diplomski rad

Matej Medvidović

R-221

Zagreb, 2021

## ZAVARIVANJE METALA EKSPLOZIJOM

MATEJ MEDVIDOVIĆ

Rad je izrađen na: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku  
Pierottijeva 6, 10 000 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 ovom radu opisane su vrste i principi zavarivanja metala eksplozijom. Detaljno su opisani čimbenici koji utječu na uspješnost zavarivanja, te upotreba opisani metoda u praksi.

Ključne riječi: Eksplozivi, metali, zavarivanje  
Diplomski rad sadrži: 43 stranice, 4 tablice, 36 slika i 14 referenci  
Jezik izvornika: Hrvatski  
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko – geološko – naftnog – fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb  
Mentor: Dr.sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF  
Ocjenjivači: Dr. sc. Vinko Škrlec, izvanredni profesor RGNF  
Dr.sc. Vječislav Bohanek, izvanredni profesor RGNF  
Dr.sc. Mario Dobrilović, redoviti profesor RGNF

## EXPLOSION METAL WELDING

Matej Medvidović

Thesis completed in: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Mining Engineering and Geotechnic,  
Pierottijeva 6, 10 002 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. One of the processes used in the industry is welding metals with explosives. This paper describes the types and principles of explosion welding of metals. The factors that affect the success of welding are described in detail, and the use of the described methods in practice.

Keywords: explosives, metals, welding  
Thesis contains: 43 pages, 4 tables, 36 figures and 14 references  
Original in: Croatian  
Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb  
Supervisor: Dr.sc.Mario Dobrilović, full professor RGNF  
Reviewers: Dr.sc. Vinko Škrlec, associate professor RGNF  
Dr.sc. Vječislav Bohanek, associate professor RGNF  
Dr.sc.Mario Dobrilović, full professor RGNF

# SADRŽAJ

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | UVOD .....  | 1  |
| 2     | ZAVARIVANJE METALA.....   | 2  |
| 2.1   | Povijest zavarivanja.....   | 3  |
| 2.2   | Zavarljivost.....   | 5  |
| 2.3   | Postupci zavarivanja.....   | 6  |
| 3     | POSTUPCI OBRADJE METALA EKSPLOZIVOM .....                               | 10 |
| 3.1   | Eksplozivne tvari .....   | 10 |
| 3.2   | Oblikovanje metala eksplozivom .....                                    | 11 |
| 3.2.1 | Kontaktna metoda oblikovanja.....                                       | 12 |
| 3.2.2 | Nekontaktna metoda oblikovanja .....                                    | 13 |
| 3.2.3 | Zatvoreni sustav oblikovanja.....                                       | 13 |
| 3.2.4 | Otvoreni sustav oblikovanja.....  | 14 |
| 3.2.5 | Čimbenici koji utječu na oblikovanje metala eksplozivom.....            | 14 |
| 3.3   | Rezanje metala eksplozivom .....  | 15 |
| 3.4   | Popuštanje zaostalih naprezanja eksplozivom.....                        | 18 |
| 3.5   | Kompaktiranje metalnih prahova eksplozivom.....                         | 20 |
| 3.5.1 | Kompaktiranje primjenom udarnog klipa.....                              | 20 |
| 3.5.2 | Kompaktiranje primjenom cilindra .....                                  | 21 |
| 3.6   | Povećanje tvrdoće materijala eksplozivom .....                          | 22 |
| 4     | ZAVARIVANJE METALA EKSPLOZIVOM.....                                     | 25 |
| 4.1   | Proces zavarivanja metala eksplozivom.....                              | 25 |
| 4.2   | Čimbenici koji utječu na uspješnost zavarivanja metala eksplozivom..... | 29 |
| 4.3   | Primjena metode zavarivanja metala eksplozivom .....                    | 31 |
| 4.3.1 | Zavarivanje metalnih ploča eksplozivom .....                            | 33 |
| 4.3.2 | Zavarivanje metalnih cijevi eksplozivom.....                            | 34 |
| 5     | EKSPLOZIVNO ZAVARIVANJE ISTOVRISNIH I RAZLIČITIH MATERIJALA .....       | 39 |
| 5.1   | Čelik na čelik.....   | 39 |
| 5.2   | Aluminij na aluminij .....  | 40 |
| 5.3   | Aluminij na čelik .....   | 41 |
| 5.4   | Bakar na čelik.....   | 41 |
| 6     | ZAKLJUČAK .....   | 43 |
| 7     | LITERATURA.....   | 44 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| <b>Tablica 1.</b> Osnovna podjela metoda zavarivanja .....  | 6  |
| <b>Tablica 2.</b> Procjena mogućnosti zavarivanja raznorodnih materijala eksplozivom na temelju dijagrama stanja..... | 32 |
| <b>Tablica 3.</b> Parametri koji utječu na zavarivanje metalnih ploča .....   | 34 |
| <b>Tablica 4.</b> Sažeti prikaz eksperimentalnih parametara s raznim eksplozivima .....                               | 39 |

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| <b>Slika 2-1.</b> Zavareni spoj nastao taljenjem i nazivi dijelova zavarenog spoja.....                              | 2  |
| <b>Slika 2-2.</b> Spojevi materijala.....  | 3  |
| <b>Slika 2-3.</b> Međusobna interakcija svih faktora koji određuju zavarljivost materijala.....                      | 5  |
| <b>Slika 2-4.</b> Podjela postupka zavarivanja taljenjem .....   | 7  |
| <b>Slika 2-5.</b> Podjela postupka zavarivanja taljenjem .....   | 8  |
| <b>Slika 2-6.</b> Detaljna podjela metoda zavarivanja.....   | 9  |
| <b>Slika 3-1.</b> Opća podjela eksplozivnih tvari .....  | 11 |
| <b>Slika 3-2.</b> Oblikovanje metala kontaktnom metodom.....   | 12 |
| <b>Slika 3-3.</b> Oblikovanje metala kontaktnom metodom.....   | 13 |
| <b>Slika 3-4.</b> Primjena plastičnog eksploziva za rezanje metala .....   | 16 |
| <b>Slika 3-5.</b> Fragmentacija šesterokutne prizme s provrtom napunjenim eksplozivom.....                           | 16 |
| <b>Slika 3-6.</b> Linijski kumulativni naboj .....   | 17 |
| <b>Slika 3-7.</b> Konusni kumulativni naboj i perforacija nakon detonacije.....                                      | 18 |
| <b>Slika 3-8.</b> Zaostala deformacija i dijagram raspodjele zaostalih naprežanja .....                              | 19 |
| <b>Slika 3-9.</b> Postavljanje štapina u obliku sinusoide.....   | 20 |
| <b>Slika 3-10.</b> Paralelno postavljanje štapina .....  | 20 |
| <b>Slika 3-11.</b> Kompaktiranje prahova metodom udarnog klipa .....   | 21 |
| <b>Slika 3-12.</b> Kompaktiranje prahova primjenom cilindra.....   | 22 |
| <b>Slika 3-13.</b> Postavljanje eksploziva na obradak.....   | 23 |
| <b>Slika 3-14.</b> Pozicije mjerenja tvrdoće materijala .....  | 23 |
| <b>Slika 3-15.</b> Rezultati mjerenja tvrdoće materijala.....  | 24 |
| <b>Slika 4-1.</b> Proces zavarivanja metala eksplozivom.....   | 25 |
| <b>Slika 4-2.</b> Metalne ploče pod kutom .....  | 26 |
| <b>Slika 4-3.</b> Metalne ploče paralelne.....   | 27 |
| <b>Slika 4-4.</b> Spoj bakra i čelika nastao zavarivanjem metala eksplozivom.....                                    | 27 |
| <b>Slika 4-5.</b> Geometrijski odnos vektora brzina.....   | 28 |
| <b>Slika 4-6.</b> Utjecaj udaljenosti između dviju ploča na oblik spoja .....  | 30 |
| <b>Slika 4-7.</b> Tehnološki proces proizvodnje ploča zavarenih eksplozivom .....                                    | 33 |
| <b>Slika 4-8.</b> Platiranje vanjske cilindrične površine.....   | 35 |
| <b>Slika 4-9.</b> Platiranje vanjske cilindrične površine korištenjem dvaju eksplozivnih nabojaja .....              | 36 |
| <b>Slika 4-10.</b> Platiranje unutarnje površine cijevi .....  | 37 |
| <b>Slika 4-11.</b> Platiranje unutarnje površine cijevi velikog promjera.....  | 37 |
| <b>Slika 4-12.</b> Spajanje krajeva metalnih cijevi uz korištene prstenaste spojnice).....                           | 38 |
| <b>Slika 5-1.</b> Površina zavarivanja kod početnog kuta od 8°; (a) početni dio, (b) prijelazni dio, (c) završni dio | 40 |
| <b>Slika 5-2.</b> Lijevo je prikazana mikrostruktura spoja Al-mikrolegirani čelik, desno Al-dvofazni čelik           | 41 |
| <b>Slika 5-3.</b> Utjecaj udaljenosti između dviju ploča na oblik spoja .....  | 42 |

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I ODGOVARAJUĆIH SI JEDINICA

| <b>Simbol</b> | <b>Značenje</b>                 | <b>Jedinica</b> |
|---------------|---------------------------------|-----------------|
| $V_d$         | brzina detonacije               | (m/s)           |
| $V_u$         | brzina udara metala             | (m/s)           |
| $V_s$         | brzina točke sudara             | (m/s)           |
| $\beta$       | kut sudara (dinamički kut)      | (°)             |
| $\alpha$      | 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

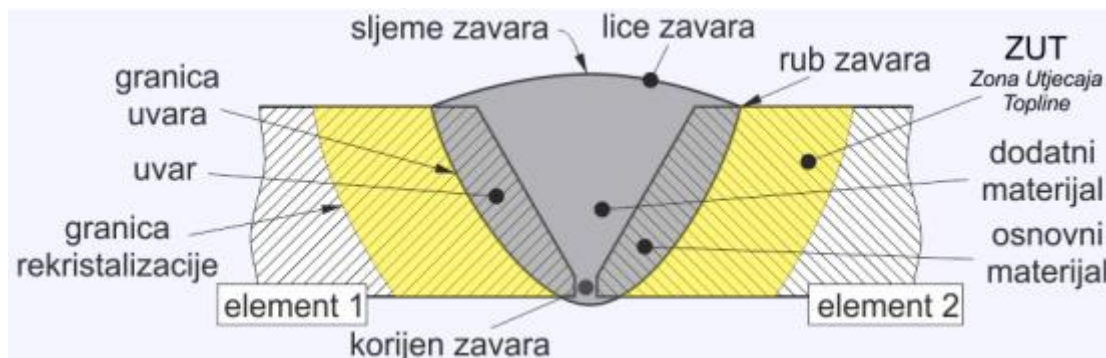
Detonacijom eksplozivnog naboja oslobađa se znatna količina energije u vrlo kratkom vremenskom periodu, a jedan od načina primjene energije eksploziva je obrada metala. Eksplozivno zavarivanje je procesa zavarivanja poznat po svojoj sposobnosti spajanja dvije metalne ploče sa sličnim ili različitim metalurškim svojstvima koje se ne mogu spojiti drugim konvencionalnim proizvodnim postupcima. To je postupak zavarivanja u čvrstom stanju u kojem se kontrolirana detonacija eksploziva koristi za stvaranje zavarene površine. Ovaj proces može spojiti velike površine metala zbog sposobnosti distribucije velike količine energije, dostupne u eksplozivu, preko područja zavarivanja. Istraživanje o primjeni eksploziva za obradu metala prvi je započeo Charles E. Munroe 1888. godine. On je primijetio da kada se eksplozivni blok s utisnutim imenom proizvođača detonira pored metalne ploče, natpis ostaje urezan u metalnu ploču. Po njemu je nazvan i Munroe-ov efekt: povećan prodor eksploziva u površinu uzrokovan oblikovanjem stožaste šupljine u prednjem kraju eksplozivnog naboja. Krajem pedesetih godina 20. stoljeća kreću značajnija istraživanja vezana za obradu metala eksplozivom koja su rezultirala različitim oblicima primjene energije eksploziva za obradu metala.

## 2 ZAVARIVANJE METALA

Zavarivanje je proces spajanja dvaju ili više, istorodnih ili raznorodnih materijala, pri kojem se dijelovi koje treba spojiti zavarivanjem (zavarivani dijelovi) na spojnom mjestu uglavnom zagriju do omekšalog, plastičnog stanja ili se rastale, a spajaju se staljivanjem, uz dodavanje ili bez dodavanja dodatnog materijala.

Zavareni spoj predstavlja cjelinu ostvarenu zavarivanjem koja obuhvaća skrtnuti dio metala šava stvoren taljenjem i rubne dijelove zavarenih komada. Temelji se na kohezijskim silama u zavaru, čime poslije zavarivanja zavareni spoj čini neraskidivu cjelinu. Zavareni spojevi su pogodni za: prijenos mehaničkih opterećenja, izvedu nepropusnih spojeva, jeftinu izradu višedijelnih sustava, ispunjavanje uvjeta lakog održavanje, spajanje elemenata koji se izlažu višim i visokim pogonskim temperaturama. Posebno su pogodni za sanaciju pukotina i lomova strojarskih elemenata nastalih tijekom pogona.

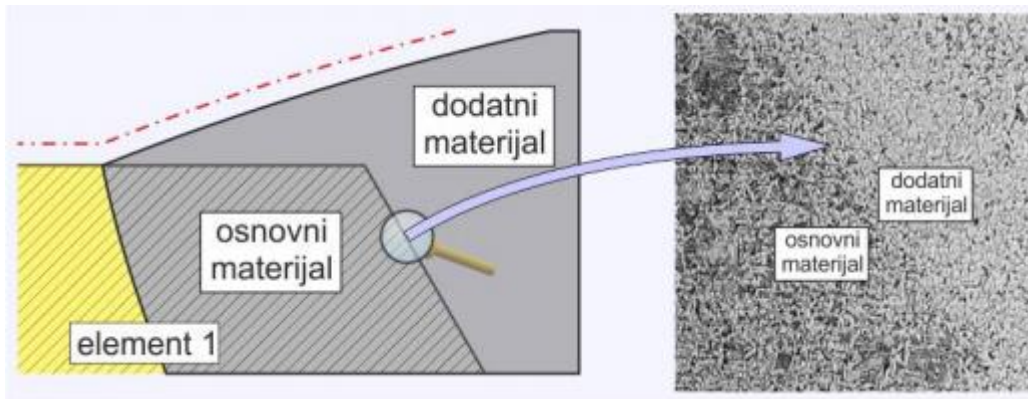
Na slici 2-1 je prikazan zavareni spoj nastao taljenjem i nazivi dijelova zavarenog spoja.



Slika 2-1. Zavareni spoj nastao taljenjem i nazivi dijelova zavarenog spoja

Osnovni materijal (OM) je materijal od kojeg je izrađen element, dodatni materijal (DM) se dodaje tijekom procesa zavarivanja. Područje zavarivanog elementa obuhvaćeno taljenjem se naziva uvar. Zona utjecaja topline (ZUT) je onaj dio OM koji se nije rastalio, ali čija su se mikrostruktura i svojstva izmijenili pod utjecajem topline zavarivanja.

Šav je dio zavarenog spoja nastao taljenjem samo osnovnog metala ili taljenjem osnovnog i dodatnog materijala u jednom ili više prolaza. Zavar je dio šava nastao u jednom prolazu zavarivanja. Zavari imaju manje više homogenu građu. Provedbom procesa zavarivanja sjedinjeni su materijali spajanih elemenata. Spoj materijala prikazan je na slici 2-2.



Slika 2-2. Spojevi materijala

## 2.1 Povijest zavarivanja

Većina postupaka zavarivanja otkrivena su u 20 stoljeću. Samo neki postupci kao što su zavarivanje kovanjem, zavarivanje lijevanjem i lemljenje bili su poznati već u starom vijeku, kada su se razvijali kao sastavni dio vještina kovača, zlatara i ljevača pri izradi oruđa za rad, oružja, posude itd.

Korištenje metala nije bilo moguće dok čovjek nije naučio izdvajati metale iz ruda taljenjem. Bakar se počeo koristiti 8000 g. pr. Kr, dok je 5000 g. pr. Kr u Afganistanu i Perziji započelo izdvajanje bakra iz rude taljenjem u vatri. Prvi tragovi izdvajanja željeza iz ruda datiraju oko 2500. g. pr. Kr. Željezni predmeti se počinju koristiti oko 1500. g. pr. Kr. Prvi zapisi o kovačkom zavarivanju željeza u staroj Grčkoj govore da je zavarivanje korišteno u 6. st. Pr. Kr. Dobivanje čelika počinje oko 1000 g. pr. Kr u Indiji.

Usporedno sa zavarivanjem razvijalo se i ljevačko zavarivanje. Lijevanjem su se spajali razni držači, oslonci i figure na već gotovo odliveno osnovno tijelo nekog predmeta. U srednjem vijeku razvijena je tehnika kovanja. Uz nju se veže i kovačko zavarivanje. Kovačko zavarivanje, jedan od najstarijih načina zavarivanja, izvodi se na način da se krajevi dva dijela koja želimo zavariti zagriju do usijanja te se spajaju udarcima čekića. Ukoliko je bilo potrebno, usijani dijelovi posipali su se određenim prahom ili pijeskom za „čišćenje“. Udaranjem spoja istiskivali bi se s dodirnih površina rastaljeni oksidi ili torskina, te se sučeljavaju čiste metalne ploče i dolazi do djelovanja međuatomskih sila dvaju dijelova te do čvrstog spoja. Najviše se koristilo kod izrade oružja (koplja, sjekire, mačevi, vrhovi strijela itd) i oklopa. Najbolji mačevi srednjeg vijeka izrađeni su od niskougličnog čelika, a na njihove rubove se zavaruju kovačkim zavarivanjem oštrice od visokougličnog čelika. Kovačko zavarivanje se primjenjivalo u

Grčkoj, Kini, Japanu, Indoneziji i Siriji. Lemljenje se nalazi kroz povijest na nakitima i figurama od početka primjene metala.

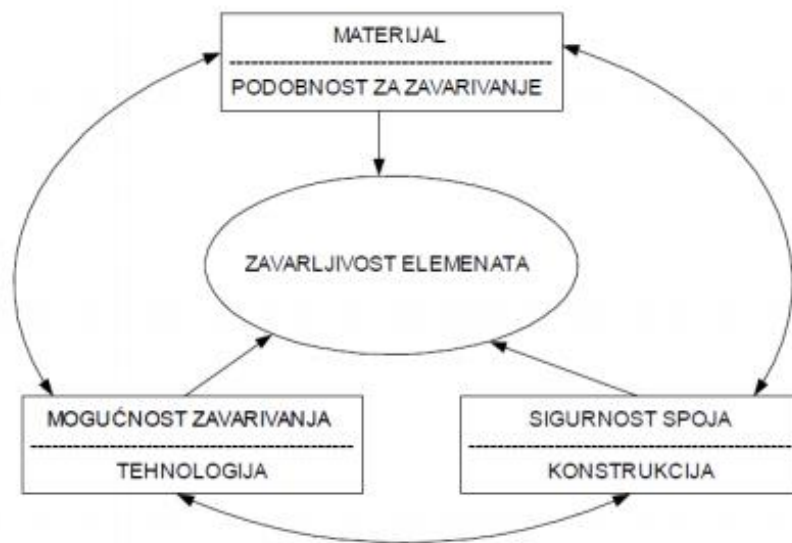
Današnji postupci zavarivanja započeli su 1856. godine kada je Joule prvi primijenio sučelno elektrootporno zavarivanje žica. Bernardos (Rusija) 1882. godine prvi koristi električni luk između ugljene elektrode i metala kao izvora energije za zavarivanje uz dodavanje žice u metalnu kupku. Usporedno s elektrolučnim zavarivanjem razvijalo se i elektrootporno zavarivanje. Godine 1895 počinje se koristiti aluminotermijsko zavarivanje za zavarivanje tračnica i za popravak odljevka. O. Kjellberg (Švedska) 1907. godine prvi patentira i primjenjuje obloženu elektrodu. Postupak zavarivanja u zaštitnoj atmosferi vodika otkriveno je 1925. godine. Hladno zavarivanje pod pritiskom počinje 1948. godine. MIG/MAG (Metal Insert Gas/Metal Active Gas) zavarivanje razvijeno je nakon Drugog svjetskog rata.

Novi postupci zavarivanja pojavljuju se nakon 1950 godine: zavarivanje pod troskom (1951.), trenjem (1956.), snopom elektrona (1957.), ultrazvukom i laserom (1960.), plazmom (1961.). Tehnologija zavarivanja metala eksplozivom patentirana je 1964. godine. Prvo zavarivanje i toplinsko rezanje u svemiru izvedeno je 16. listopada 1969. u sovjetskom svemirskom brodu Sojuz 6.

U Hrvatskoj se prije Drugog svjetskog rata primjenjivalo plinsko zavarivanje, ručno elektrolučno s golim, s jezgrom i dijelom obloženim elektrodama. Konstrukcije su se uglavnom izvodile u zakovanoj izvedbi. Razvoj zavarivanja u Hrvatskoj postignut je uoči Drugog svjetskog rata kada je realizirano nekoliko većih objekata u zavarenoj izvedbi (npr. cestovni most preko rijeke Save). Od 1950 – 1960 napuštaju se zakovane konstrukcije i uvode se ostali postupci zavarivanja koji se i danas koriste.

## 2.2 Zavarljivost

Zavarljivost se može definirati kao sposobnost materijala da pri određenim povoljnim uvjetima zavarivanja ostvari homogeni zavareni spoj. Materijal je dobro zavarljiv ako se standardnom opremom i procedurom zavarivanja može ostvariti upotrebljiv spoj pri čemu je ponovljivost postupka vrlo visoka. Homogenost zavarljivog spoja ponajviše narušava pojavljivanje pukotina, stoga se zavarljivost metala često ocjenjuje na temelju sklonosti pojavi pukotina. Zavarljivost materijala ovisi o samom materijalu, mogućnostima zavarivanja (tehnologiji) i sigurnosti spoja, a njihova međusobna interakcija prikazana je na slici 2-3.



Slika 2-3. Međusobna interakcija svih faktora koji određuju zavarljivost materijala

Greške pri zavarivanju su česte, stoga u radu sa zavarenim spojevima treba imati na umu da svaki zavareni spoj može biti najslabije mjesto sustava („najslabija karika lanca“). Otkazi nekih zavarenih spojeva mogu dovesti do katastrofalnih posljedica.

## 2.3 Postupci zavarivanja

Zavarivanje metala se dijeli na dvije osnovne grupe, zavarivanje taljenjem i zavarivanje pritiskom (mehaničko zavarivanje).

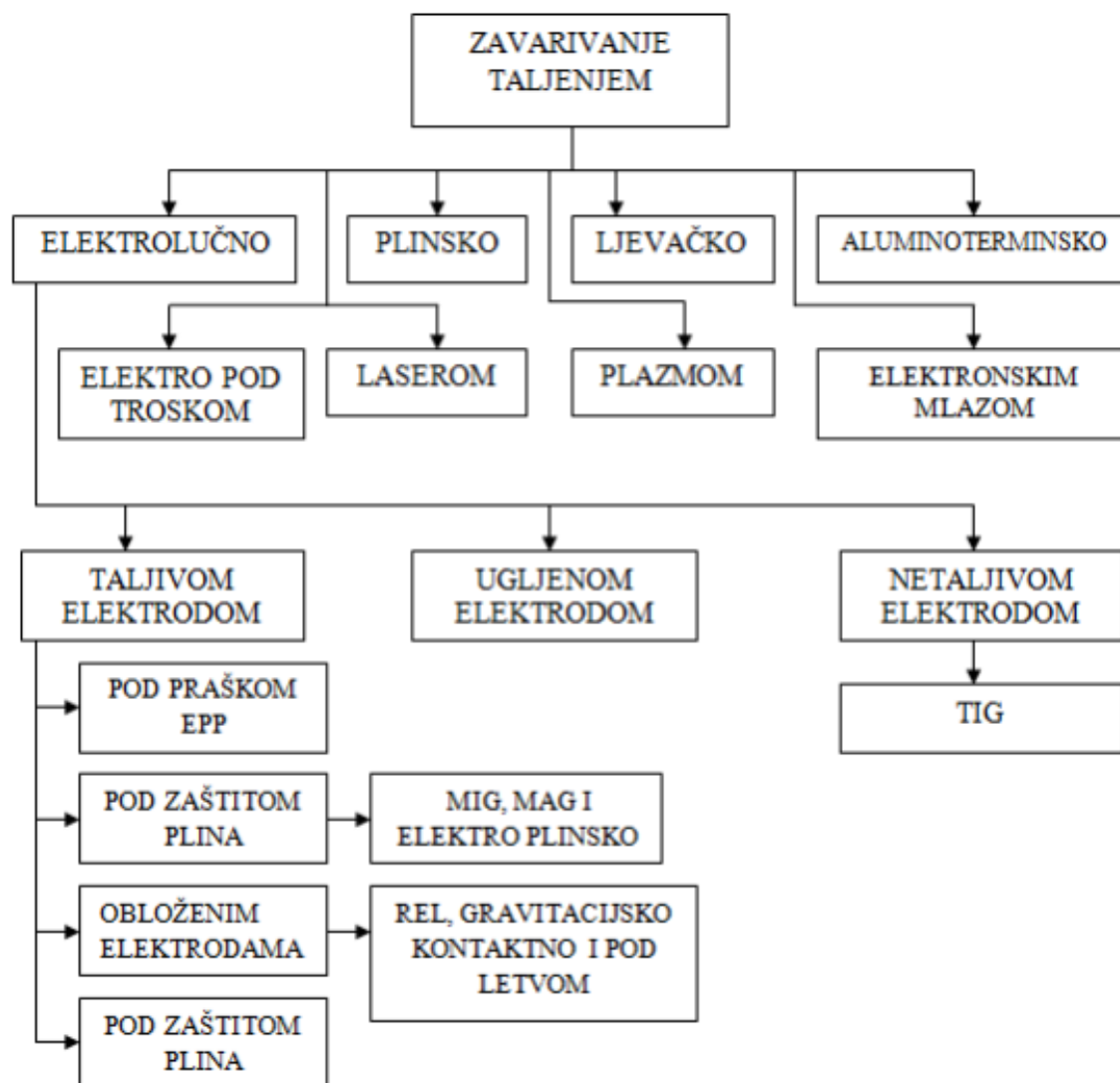
Kod zavarivanja s toplinskom energijom spajani dijelovi iz jednog materijala (i po potrebi dodatnog materijala) zagrijavaju se na temperaturu koja je viša od tališta materijala koji se zavaruju uslijed čega dolazi do spajanja materijala. Zavareni spoj nastaje zbog kohezijskih veza koje postoje među atomima nakon hlađenja zavara u čvrsto stanje. Materijal u zavarenom spoju ima strukturu lijevnice te, nakon potpunog otvrdnuća čini čvrst spoj između spojenih dijelova.

Zavarivanje pritiskom se još naziva i zavarivanje mehaničkom energijom. Kod ove vrste zavarivanja dijelovi se spajaju bez dodavanja materijala. Spajani materijali u području spoja izloženi su velikim plastičnim deformacijama, što dovodi do izmjene atoma i time do difuzije na dodirnim površinama, lokalne kristalizacije te nastanka adhezijskih i kohezijskih veza između dijelova koji se spajaju (Jelaska 2005).

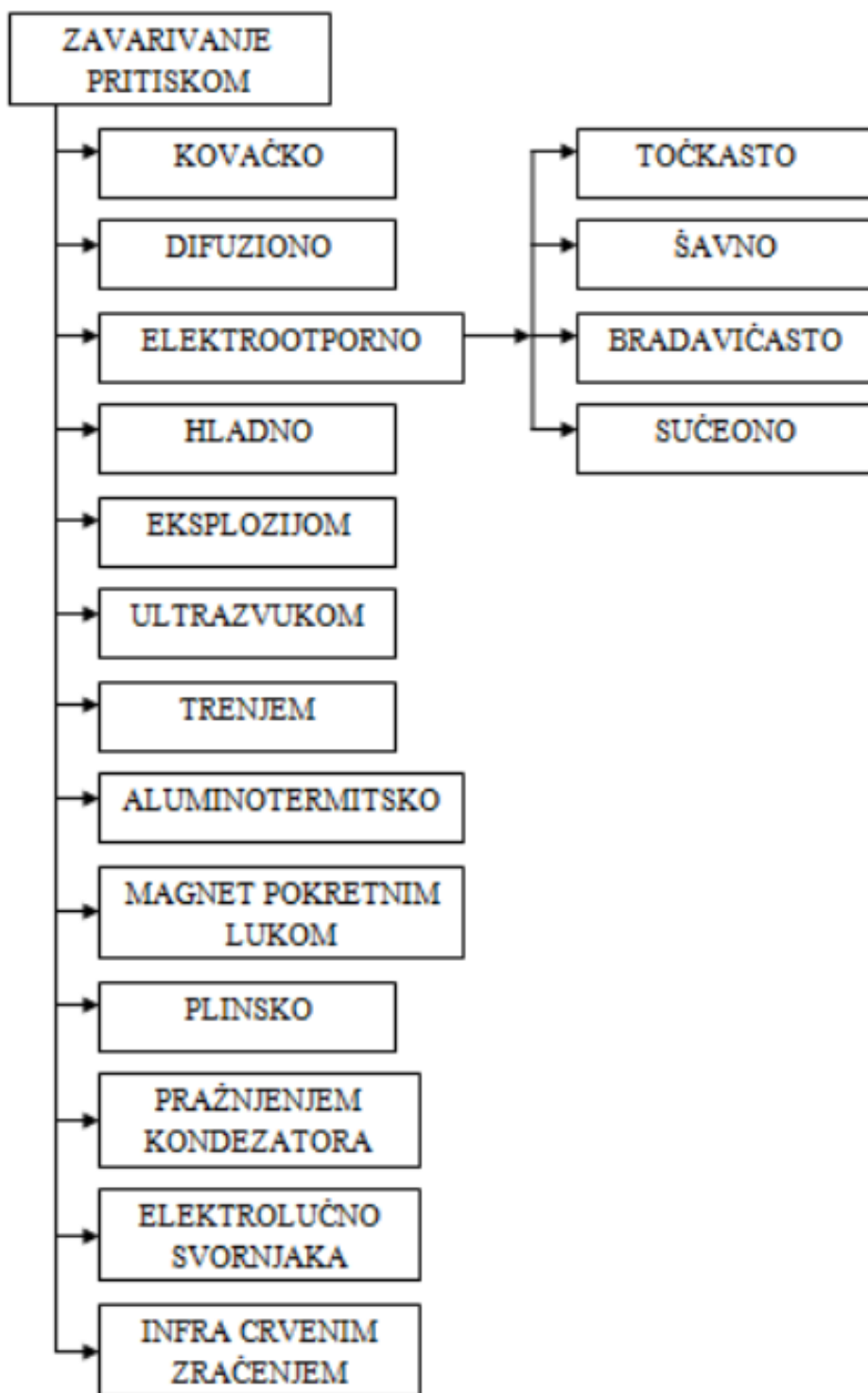
U Tablici 1 prikazana je osnovna podjela metoda zavarivanja, a na slikama 2-4, 2-5 i 2-6 detaljna podjela metoda zavarivanja.

**Tablica 1.** Osnovna podjela metoda zavarivanja (Pondt, 2015)

| <b>ZAVARIVANJE TALJENJEM</b> | <b>ZAVARIVANJE PRITISKOM</b> |
|------------------------------|------------------------------|
| Elektrolučno                 | Kovačko                      |
| Aluminotermijsko             | Plinsko                      |
| EPT Elektro pod troskom      | Difuziono                    |
| Elektrinskim mlazom          | Hladno                       |
| Ljevačko                     | Elektrootporno               |
| Laserom                      | Eksplozijom                  |
| Plazmom                      | Aluminotermijsko             |
| Elektrolučno                 | Trenjem                      |
| Plinsko                      | MPL Magnet pokretnim lukom   |
| Kisik acetilen               | VF visokofrekventnom strujom |
| Kisik propan                 | Elektrolučno svornjaka       |
| Kisik vodik                  | Infracrvenim zračenjem       |

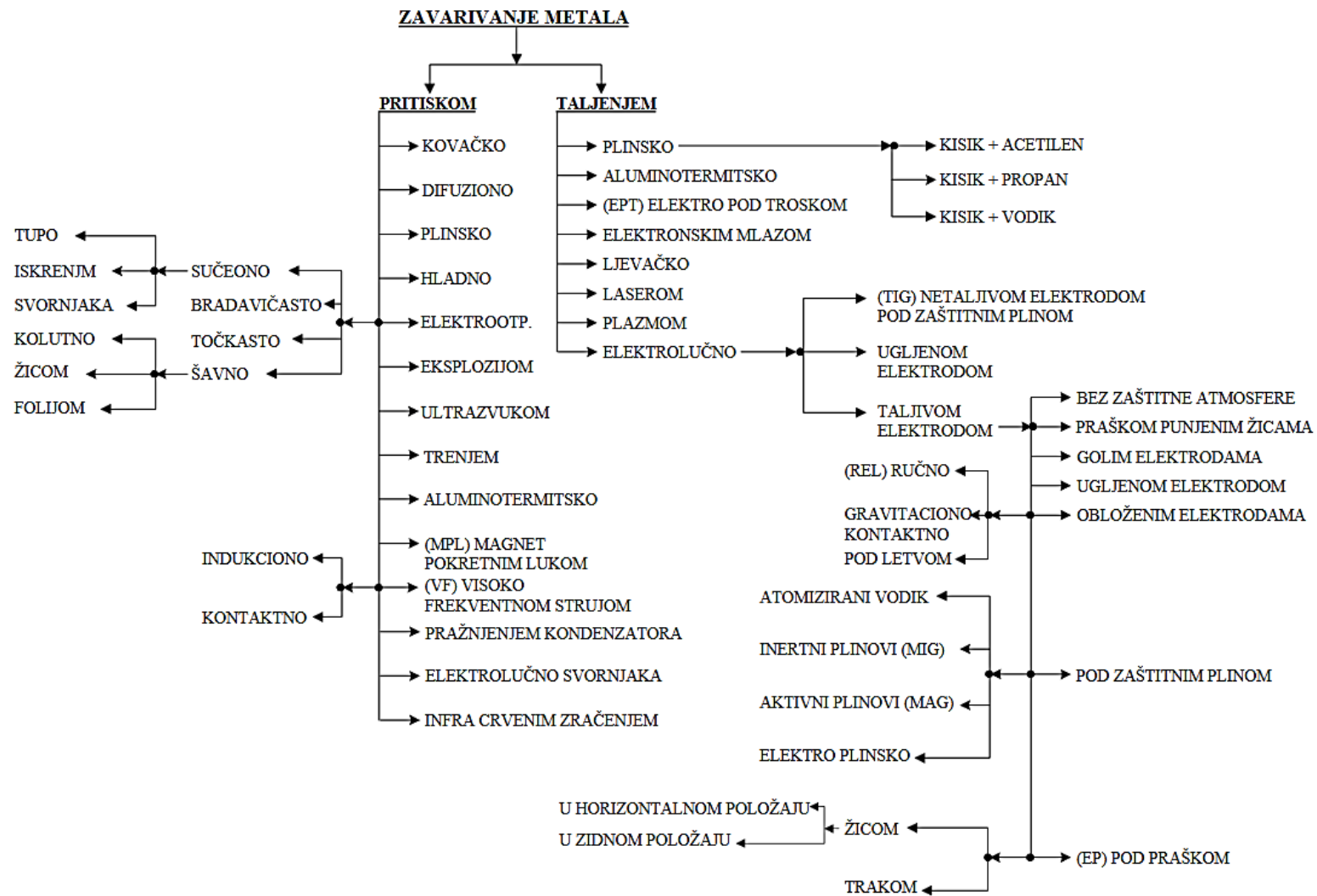


Slika 2-4. Podjela postupka zavarivanja taljenjem (Pondt, 2015)



Slika 2-5. Podjela postupka zavarivanja taljenjem (Pondt, 2015)





Slika 2-6. Detaljna podjela metoda zavarivanja (Pondt, 2015)

### 3 POSTUPCI OBRADJE METALA EKSPLOZIVOM

Postupke obrade metala eksplozivom možemo podijeliti s obzirom na pozicioniranje eksplozivnog naboja u odnosu na obradak:

- kontaktne metode, kod koji se eksploziv nalazi u kontaktu s obradkom
- nekontaktne metode, kod kojih se eksploziv nalazi na određenoj udaljenosti od obradka, a udarni valovi se prenose kroz različite medije poput vode, zraka, ulja itd.

S obzirom na namjenu postupka razlikujemo slijedeće postupke obrade metala eksplozivom:

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

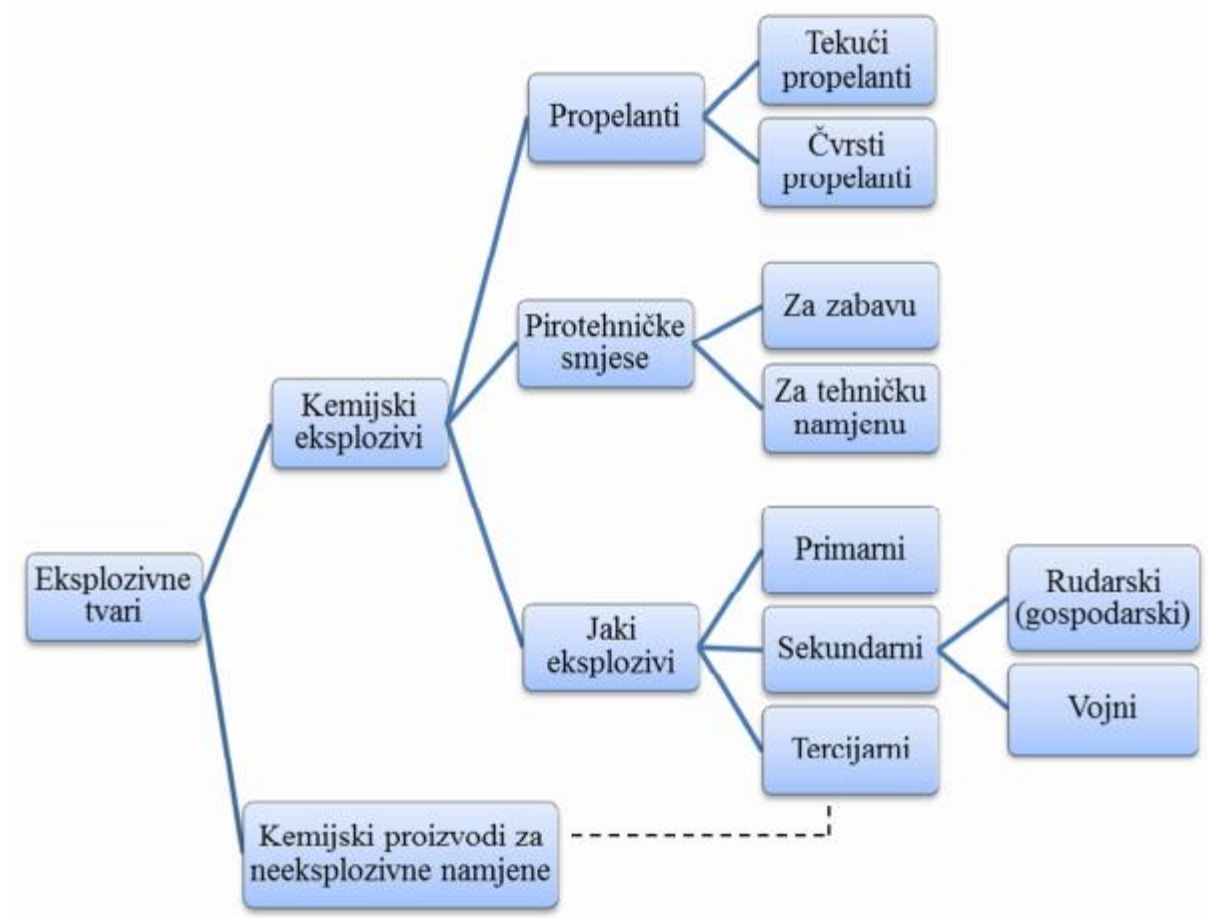
#### 3.1 Eksplozivne tvari

Eksplozivne tvari ili eksplozivi su kemijski spojevi ili smjese koje imaju sposobnost da pod utjecajem vanjskog energetskog impulsa detoniraju, odnosno da se kemijski razlažu u vrlo kratkom vremenu i pritom oslobađaju znatnu količinu topline i plinova (Krsnik 1989). Trenutačno oslobađanje energije i produkata reakcije pri visokom tlaku za vrijeme brze kemijske reakcije prouzrokuju nastanak tlačnih valova. Ti su valovi nazvani detonacijskim ili udarnim valovima (Ester 2005).

Trenutno je poznat veliki broj eksploziva koji se razlikuju po sastavu, fizičko-kemijskim i eksplozivnim svojstvima, stoga se nameće potreba za racionalnom klasifikacijom eksploziva (Petruskov 2009).

S obzirom na veliki broj karakteristika prema kojima se eksplozivne tvari razlikuju postoji više različitih podjela eksplozivnih tvari predloženih od više autora.

Prema Dobriloviću, opća podjela eksplozivnih tvari prikazana je na slici 3-1



Slika 3-1. Opća podjela eksplozivnih tvari (Dobrilović 2008)

Upotrebe eksploziva su mnogostruke. Eksploziv se koristi u vojne svrhe, u strojarstvu, automobilskoj i avio industriji, čak i u medicini. Najviše eksploziva se koristi u rudarstvu i građevinarstvu (Ester 2005).

### 3.2 Oblikovanje metala eksplozivom

Tehnologija oblikovanja i obrade metala deformiranjem je skupina metoda izrade proizvoda ili poluproizvoda zasnovanih na plastičnoj deformaciji (Povržanović 1996). Plastična deformacija kontinuuma je proces koji rezultira trajnom promjenom oblika i pozicija strukturalnih djelova relativno u odnosu na prvobitne pozicije i oblik. Proces plastične deformacije je ireverzibilan, a materijal zadržava kontinuitet i kompatibilnost, s izuzetkom promjena u mikrostrukturi (Math 1999).

Za oblikovanje metala eksplozivom koristi se energija eksplozivnih naboja koja generira udarne valove u nekom mediju, koji se usmjeravaju prema obradku i deformiraju ga vrlo velikim

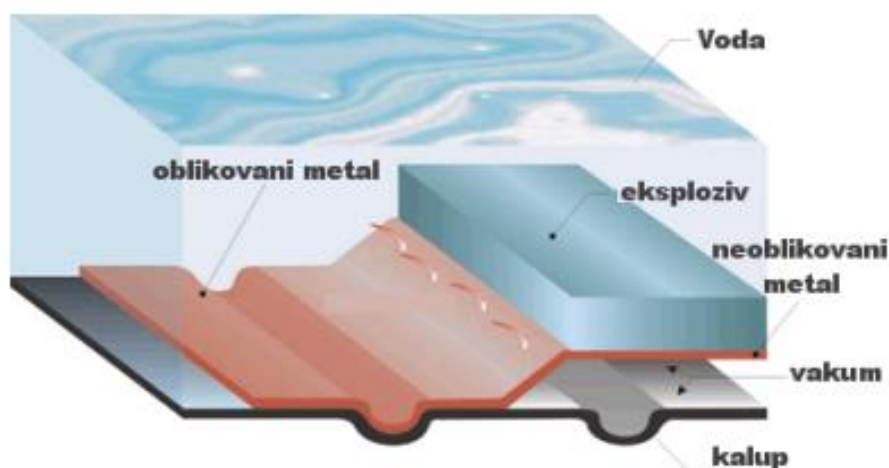
brzinama. Osnovna razlika između ove i konvencionalne metode oblikovanja je upotreba eksplozivnog naboja i vrlo kratko vrijeme oblikovanja. Konvencionalne metode oblikovanja deformiranjem postižu brzinu deformiranja od 10 m/s, dok brzine deformiranja kod metala oblikovanog eksplozivom iznosi od 100 m/s do 300 m/s (Sućeska 2001).

S obzirom na prostorni odnosi između eksploziva i metala koji se oblikuje razlikujemo oblikovanje kontaktnom metodom i oblikovanje nekkontaktnom metodom.

Prema sustavu koji se koristi za oblikovanje metala imamo zatvoreni i otvoreni sustav oblikovanja metala. Pored ova dva sustava, u kojima se metal formira prema obliku kalupa, postoji i sustav oblikovanja metala bez upotrebe kalupa. Ovim sustavom se oblikuju sferni (kuglasti) oblici tanjeg lima (Tonge t al 2008). Sustav se zasniva na kuglastom širenju udarnog vala u vodi.

### 3.2.1 Kontaktna metoda oblikovanja

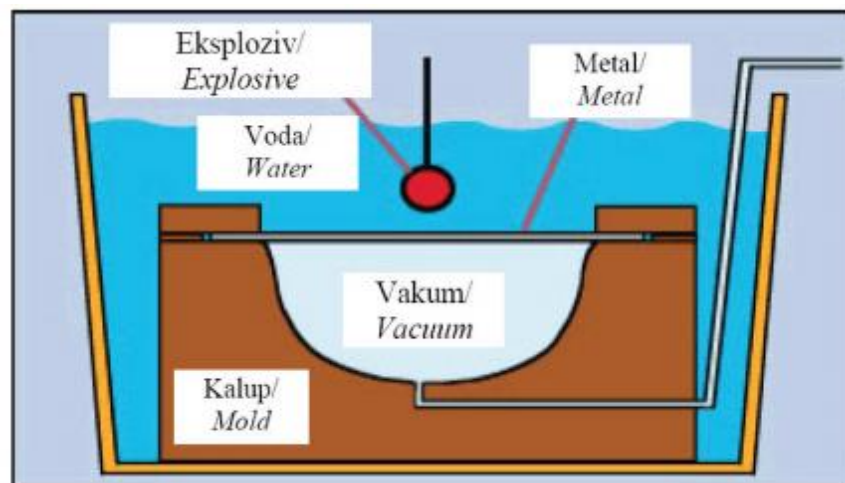
Eksploziv se nalazi u direktnom kontaktu s metalom koji se oblikuje, zbog čega se koriste eksplozivi koji imaju manju brzinu detonacije. Kod ove metode češće su pogreške i odstupanja od zahtijevanih dimenzija te postoji mogućnost oštećenja obradka, zbog čega se ova metoda znatno manje koristi u odnosu na nekkontaktnu metodu. Pravilnim odabirom eksploziva sprječavaju se mogući nastanci štete na obradku. Oblikovanje metala kontaktnom metodom prikazano je na slici 3-2.



Slika 3-2. Oblikovanje metala kontaktnom metodom (Bohanek i sur., 2013)

### 3.2.2 Nekontaktna metoda oblikovanja

Eksploziv se nalazi na određenoj udaljenosti koja je prilagođena masi i vrsti eksploziva, materijalu obradka i mediju kroz koji se udarni val prenosi. Nakon eksplozije udarni val napreduje kuglasto a prati ga ekspanzija mjehurića. Ako mjehurići dođu do površine medija prije no što djeluju na obradak izgubit će značajan dio energije. Oblikovanje metala nekontaktnom metodom prikazano je na slici 3-3.



Slika 3-3. Oblikovanje metala nekontaktnom metodom (Bohanek i sur., 2013)

### 3.2.3 Zatvoreni sustav oblikovanja

Naziv zatvorenog sustav oblikovanja dolazi od načina postavljanja eksploziva. Eksploziv je smješten u zatvorenom prostoru unutar dvodijelnog kalupa. Ovaj sustav se primjenjuje za oblikovanje cijevi tankih stijenki i prilikom postojanja strogih zahtjeva za odstupanje dimenzija proizvoda. Prednost ovog sustava je bolje korištenje energije eksploziva, dok je nedostatak sustava ograničenje veličine proizvoda s obzirom na izvedbu kalupa. Prilikom detonacije eksploziva u zatvorenom sustavu kalup je izložen značajnim dinamičkim udarima i zato mora biti značajno većih dimenzija u odnosu na otvoreni sustav. Ako kalup nije dovoljno dimenzioniran može doći do pucanja kalupa. Zbog toga se ovaj sustav rijetko upotrebljava. Sustav je s vremenom modificiran i danas postoje otvori na kalupu koji imaju ulogu sigurnosnih ventila i sprečavaju mogućnost fragmentiranja kalupa uslijed djelovanja detonacije eksplozivnog naboja.

### **3.2.4 Otvoreni sustav oblikovanja**

Kod otvorenog sustava oblikovanja eksploziv nije zatvoren s obje strane kalupom. Postoji samo jedna strana kalupa i ona je po svojim dimenzijama i masi manja od jedne polovine kalupa zatvorenog sustava. Kalup predstavlja najskuplji dio proizvodnje. U ovom sustavu manji dio energije eksploziva se troši na oblikovanje metala što nije nedostatak jer je udio cijene eksploziva u konačnoj cijeni zanemariv.

### **3.2.5 Čimbenici koji utječu na oblikovanje metala eksplozivom**

Uspješnost oblikovanja metala eksplozivom ovisi o svojstvima kalupa, medija za prijenos energije i eksplozivnog naboja. Materijali za izradu kalupa su: visoko čvrsti alatni čelici, plastika, beton itd. Materijal mora biti otporan na dinamička naprezanja izazvana detonacijom eksploziva, primjeren broju primjerka koji se izrađuju, pogodan za oblikovanje i prihvatljivu cijenu. Uslijed detonacije eksploziva na kalup djeluju većinom tlačne sile što je povoljno s obzirom na višestruko veće vrijednosti vlačnih čvrstoća materijala u odnosu na tlačne čvrstoće. Kalupi manje čvrstoće koriste se za male proizvodne serije i izradu obradka kod kojih je dozvoljeno veće odstupanje dimenzija. Uz dovoljnu čvrstoću, materijal kalupa ne smije imati izraženu hrapavost koja uzrokuje nepravilnu i hrapavu površinu obradka.

Energija eksploziva se djelomično pretvara u udarni val koji se kroz medij prenosi na obradak. Iznos tlaka udarnog vala ovisi o vrsti i masi eksploziva dok prigušenje ovisi o svojstvima medija. Porastom gustoće medija raste učinkovitost sustava oblikovanja. U početku se kao medij koristio zrak. U zraku se formira visoki vršni tlak udarnog vala koji traje jako kratko, nekoliko milisekundi. Upotrebom vode kao medija masa eksploziva potrebnog za oblikovanje smanjuje se do 80% (Bohanek, 2013).

Kod dimenzioniranja eksploziva važna su dva parametra: vrsta eksploziva i oblik eksplozivnog naboja. Vrsta eksploziva izvodi se na osnovi empirijskih podataka dok se oblik eksplozivnog naboja prilagođava dimenzijama i obliku obradka. Udaljenost eksploziva od obradka bitan je parametar o kojem ovisi iznos vršnog udarnog tlaka kojim se djeluje na obradak.

Formula za proračun vršnog iznosa tlaka, ukoliko se voda koristi kao medija glasi

$$p = k \left( \frac{C^{2/3}}{R} \right)^a$$

gdje je:

$p$  – iznos tlaka u (Pa)

$k$  – konstanta koja ovisi o eksplozivu

$C$  – masa eksploziva (kg)

$R$  – udaljenost (m)

$a$  – konstanta (koja obično iznosi 1,15)

Željeni iznos tlaka postiže se usklađivanjem mase eksploziva i udaljenosti od obradka. S obzirom da se kao medij koristi voda, koriste se vodootporni eksplozivi ili detonirajući štapin.

Metoda oblikovanja metala eksplozivom je primjenjiva za oblikovanje većine materijala. Tehnologiju je moguće primijeniti za oblikovanje metalnih limova, ploča, konusa i cijevi u proizvode različitih oblika i namjena. Metoda se često koristi pri izradi obradaka većih dimenzija.

### **3.3 Rezanje metala eksplozivom**

Rezanje metala eksplozivom možemo podijeliti u tri glavne kategorije; rezanje upotrebom kontaktnih (nalijepljenih) eksplozivnih naboja, rezanje udarnim valovima induciranim eksplozivnim punjenjem i rezanje upotrebom kumulativnih eksplozivnih naboja.

Rezanje metala upotrebom kontaktnih eksplozivnih naboja poteklo je iz potreba u području vojne primjene. Proračun mase i oblika eksplozivnog naboja temelji se na iskustvenim postavkama. Proračuni se odnose na potrebnu masu trinitrotoulena (TNT). U slučaju upotrebe druge vrste eksploziva, masa eksploziva se usklađuje ekvivalentom TNT-a. Eksplozivni naboj se postavlja direktno na metal koji se reže. Može se postaviti s jedne ili obje strane metalnog obradka. Prostori između eksploziva i metala, ispunjeni zrakom, vodim ili nekim drugim materijalom imaju negativan učinak na postupak rezanja. Dimenzije i masa eksplozivnog naboja ovise o dimenzijama metalnog obradka koji se reže. Primjena plastičnog eksploziva za rezanje metala prikazana je na slici 3-4.



**Slika 3-4.** Primjena plastičnog eksploziva za rezanje metala (Bohanek i sur., 2013)

Nakon detonacije eksplozivnog naboja u kontaktu s metalom oslobađa se velika količina energije koja se u obliku impulsa udarnog vala prenosi kroz metal. Udarni valovi mogu djelovati destruktivno ili pozitivno na metal. Poznavanjem udarnih valova, njihova ponašanja i učinka moguće je koristiti različite sustave metala i eksploziva za rezanje metala s visokim stupnjem točnosti. Na slici 3-5 se nalazi promjer šesterokutne prizme s provrtom napunjenim eksplozivom koja se nakon detonacije fragmentira u šest jednakih elemenata.



**Slika 3-5.** Fragmentacija šesterokutne prizme s provrtom napunjenim eksplozivom (Bohanek i sur., 2013)

Kumulativni eksplozivni naboji razlikuju se od ostalih jer omogućuju usmjeravanje energije oslobođene detonacijom. Energija detonacije usmjerava se izradom kumulativnog prostora



pravilnih dimenzija i oblika u eksplozivnom punjenju. Kumulativni prostor se oblaže tankim slojem materijala, uglavnom metala, čime se dodatno pojačava djelovanje kumulativnog naboja na ciljani objekt. Metalna obloga izvor je teških molekula i povećava djelovanje kumulativnih eksplozivnih naboja koje se bazira na kinetičkoj energiji ubrzane metalne obloge. Eksplozivni kumulativni naboji dijele na konusne kumulativne eksplozivne naboje ili perforatori i linijske (linearne) kumulativne naboje ili rezače. Na slici 3-6 prikazana je primjena linijskih kumulativnih naboja.



**Slika 3-6.** Linijski kumulativni naboj (Bohanek i sur., 2013)

Prednosti linijskih kumulativnih rezača za rezanje u odnosu na konvencionalni način rezanja metala eksplozivom su: definirana dubina reza, precizno rezanje, znatno manja masa potrebnog eksploziva, mogućnost miniranja kompliciranih uravnoteženih sustava poput dizalica, kranova itd.

Perforatori su namijenjeni za perforiranje ciljanog materijala. Obloga kumulativnog prostora je u obliku konusa. Energija detonacije je usmjerena na točku. Linijski kumulativni rezači namijenjeni su za rezanje. Obloga je izdužena u pravcu dulje osi te je energije detonacije usmjerena u pravac. Sposobnost djelovanje perforatora definirane je dubinom perforacije u materijalu, dok je sposobnost djelovanja rezača definirana maksimalnom debljinom materijala koji rezač može presjeći. Na slici 3-7 prikazan je konusni kumulativni naboj i perforacija nakon detonacije.

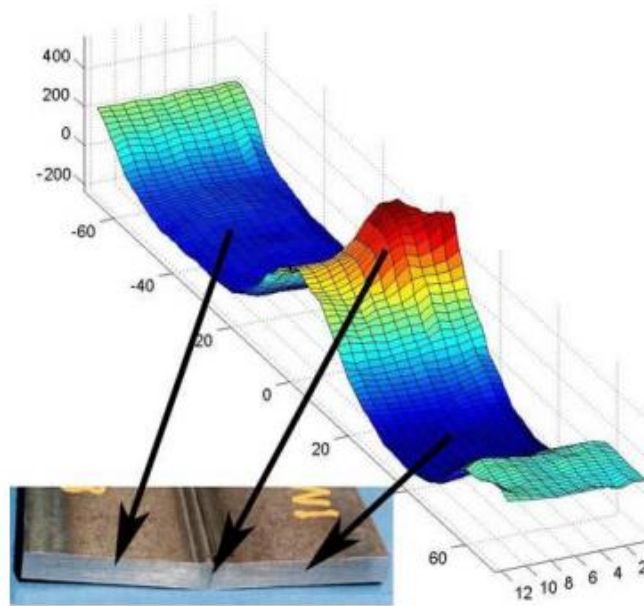


**Slika 3-7.** Konusni kumulativni naboj i perforacija nakon detonacije (Bohanek i sur., 2013)

### **3.4 Popuštanje zaostalih naprezanja eksplozivom**

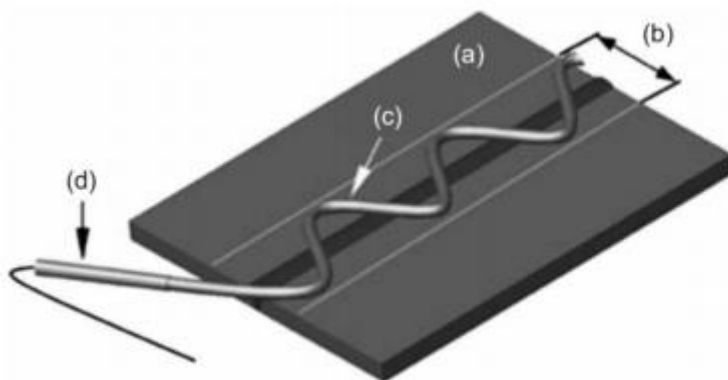
Prilikom zagrijavanja i hlađenja materijala nastaju deformacije. Kod nejednoliko zagrijanog metala dolazi do širenja toplog dijela, hladni dio materijala se tome opire, uslijed čega nastaje plastična deformacija toplog dijela. Zagrijani dio nakon hlađenja se skraćuje uslijed čeg dolazi do zaostalih naprezanja i deformacije. Lokalno zagrijavanje metala uzrokuje plastičnu deformaciju kada toplinska dilatacija nadilazi veličinu elastičnog produljenja. Deformacije se pojavljuju u svim procesima zavarivanja. Može se smatrati da će se lokalno zagrijano područje stegnuti pri hlađenju i izazvati deformacije prema unutra (Duspara at al. 2011).

Zaostala naprezanja i deformacije se ne mogu u potpunosti spriječiti niti otkloniti, ali određenim metodama prije, tijekom i nakon zavarivanja može se smanjiti razina njihova djelovanja (Duspara at al. 2011). Metode smanjivanja zaostalih naprezanja nakon zavarivanja dijele se na toplinske metode i mehaničke metode. Na slici 3-8. možemo vidjeti obradak nastao zavarivanjem na kojemu je vidljiva zaostala deformacija i dijagram raspodjele naprezanja.



**Slika 3-8.** Zaostala deformacija i dijagram raspodjele zaostalih naprezanja (Bohanek i sur., 2013)

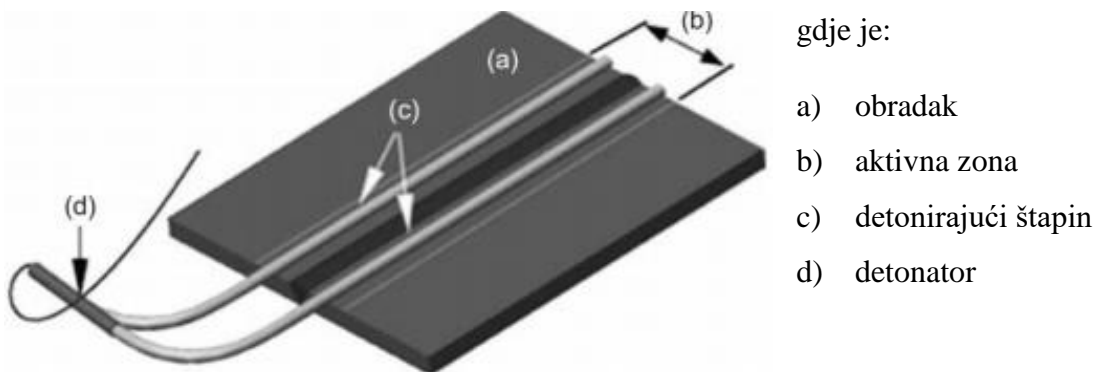
Popuštanje zaostalih naprezanja eksplozivom spada u mehaničke metode. Do popuštanja naprezanja primarno dolazi uslijed udarnog djelovanja udarnog vala, iako na obradak djeluje i toplina nastala detonacijom. Prednost ove metode je jednostavnost. Najviše se koristi za obradke velikih dimenzija. Eksplozivni naboj postavlja se na spoju dva metala i okolicu spoja. Područje na kojem je postavljen eksploziv zove se aktivna zona. Širina aktivne zone dobiva se kao zbroj širina zona plastičnih i elastično-plastičnih deformacija. Nakon izračuna aktivne zone bira se način postavljanja eksplozivnog naboja. Eksplozivni naboj se koristi u trakama ili detonirajućim štapinima. Kad se koriste trake prekriva se čitava aktivna zona. Kad se koristi detonirajući štapin moguća su dva načina postavljanja štapina s obzirom na spoj: štapin se postavlja u obliku sinusoide ili se postavlja paralelno što je prikazano na slikama 3-9 i 3-10.



gdje je:

- a) obradak
- b) aktivna zona
- c) detonirajući štapin
- d) detonator

**Slika 3-9.** Postavljanje štapina u obliku sinusoide (Garcia-Kacomino et al 2010)



**Slika 3-10.** Paralelno postavljanje štapina (Garcia-Kacomino et al 2010)

### 3.5 Kompaktiranje metalnih prahova eksplozivom

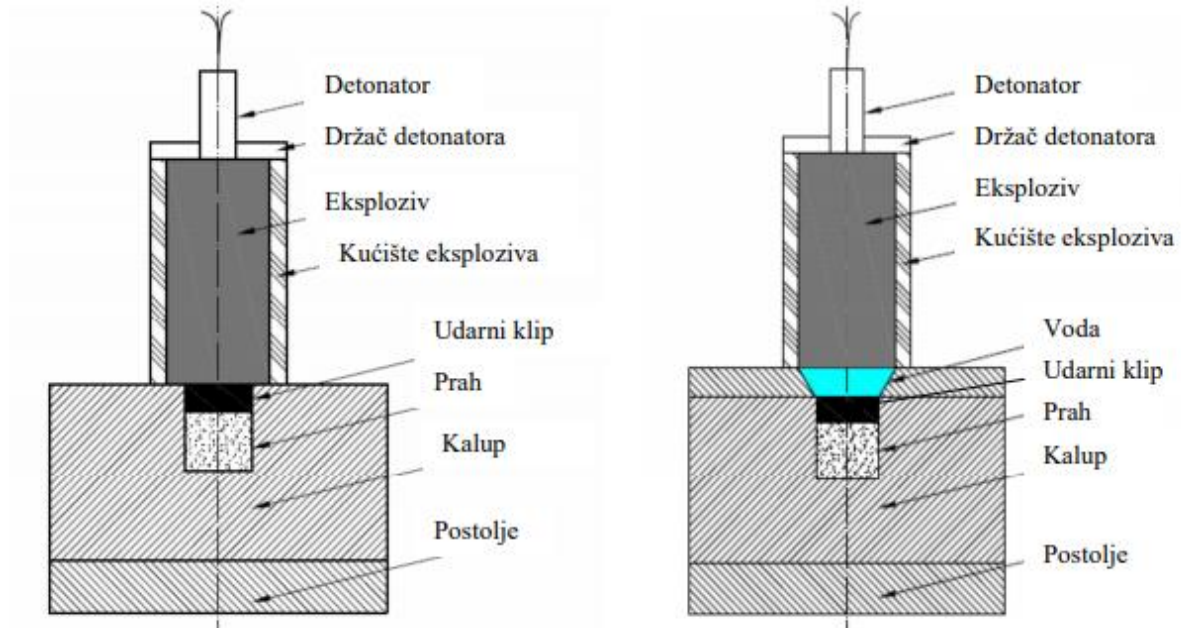
Kompaktiranje praha energijom eksploziva je postupak u kojem se prahovi zbijaju u traženi element primjenom energije eksploziva. Potrebno je uskladiti karakteristike i masu praha koji se obrađuje s masom eksploziva. Uslijed udarnog vala dolazi do smanjenja početnog volumena praha čime mu se povećava gustoća. Uspješnost kompaktiranja može se izraziti kao odnos između postignute gustoće zbijenog praha i maksimalne teoretske gustoće. Gustoća praha kompaktiranog eksplozivom približna je maksimalnoj teoretskoj gustoći, svojstva metala se poboljšavaju. Za pojedine metale ova metoda je jedini način za poboljšanje fizičko mehaničkih svojstava. Prednost ove metode nalazi su u brzini i ekonomičnosti procesa. Veća učinkovitost kompaktiranja upotrebom eksploziva u odnosu na klasičnu metalurgiju praha očituje se u većoj postignutoj gustoći i tvrdoći obradka. Postoje dvije metode, kompaktiranje primjenom udarnog klipa i kompaktiranje primjenom cilindra.

#### 3.5.1 Kompaktiranje primjenom udarnog klipa

Kompaktiranja primjenom udarnog klipa energija detonacije prenosi se na udarni klip koji zbija prah u kućištu. Ova metoda se koristi za proizvodnju diskova velike gustoće. Može se koristiti jedan ili dva klipa, odnosno zbijanje materijala može biti jednostrano ili dvostrano. Uglavnom se koristi postav s jednim klipom.

Loša strana ovog načina zbijanja je mogućnost nastanka pukotina uslijed jakog udarnog vala, što se može spriječiti dodavanjem elementa s vodom. Ovaj način se zove podvodno

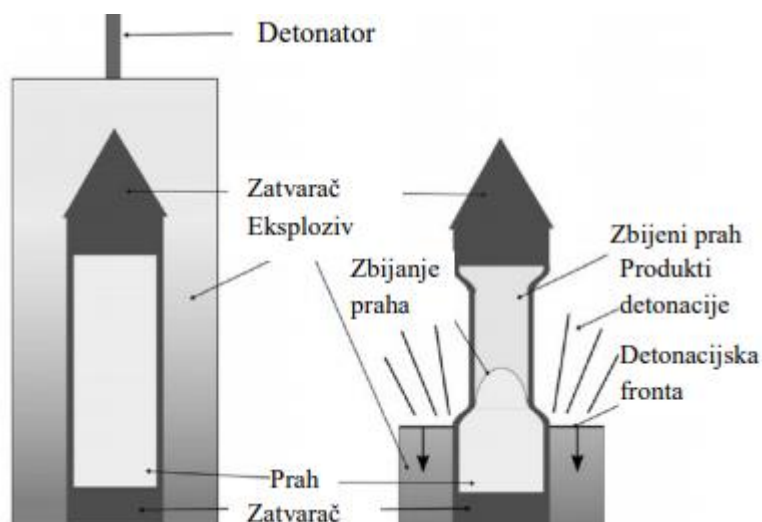
kompaktiranje. Na slici 3-11 prikazan je shematski princip kompaktiranja prahova primjenom udarnog klipa i podvodnog kompaktiranja.



Slika 3-11. Kompaktiranje prahova metodom udarnog klipa (Zohoor & Mehdipoor 2009)

### 3.5.2 Kompaktiranje primjenom cilindra

Kod kompaktiranja primjenom cilindra imamo sustav koji se sastoji od cilindra izrađenog od rastezljivog materijala u koji se zatvori metalni prah s obje strane. Cilindar se obloži eksplozivom koji se inicira s jednog kraja čime se postiže simetrična putanja udarnog vala s obzirom na uzdužnu os cilindra. Uslijed udarnog vala cilindar se sabija prema centralnoj osi uzrokujući zbijanje praha. Na slici 3-12 dan je shematskih prikaz zbijanja upotrebom cilindra.



Slika 3-12. Kompaktiranje prahova primjenom cilindra (Farinha et al. 2009)

### 3.6 Povećanje tvrdoće materijala eksplozivom

Uslijed djelovanja udarnog vala eksplozivnog naboja dolazi do promjena u mikrostrukтури i mehaničko fizičkim svojstvima materijala što se očituje i u povećanju tvrdoće materijala. U većini postupaka obrade metala eksplozivom dolazi do povećanja tvrdoće metala kao dodatno povoljno svojstvo primarnog djelovanja eksploziva, a može biti i primarni učinak (Reinhart & Person 1963).

Povećanje tvrdoće metala i dubina povećanja tvrdoće ovisi o svojstvu materijala i konfiguraciji eksplozivnog naboja. Povećanje tvrdoće materijala ovom metodom se postiže na dva načina. U prvom slučaju eksplozivni naboj nalazi se u kontaktu s metalom. U drugom slučaju koriste se eksplozivom ubrzane metalne ploče čija energija udara povećava tvrdoću materijala. Druga metoda se koristi kad je potrebno postići veće vrijednosti tlakova koji djeluju a metal.

Uobičajeno korištena metoda povećanja tvrdoće metala izvodi se kontaktnom metodom upotrebom tankih traka eksploziva. Koristi se plastični eksploziv visoke gustoće i velike brzine detonacije. Tlakovi koji djeluju da metal kreću se od 10 GPa do 20GPa (Petrushkov 2009). Za postizanje većih tlakova potrebno je koristiti metodu s ubrzanim pločama. Učinak eksploziva na metal očituje se povećanjem tvrdoće materijala. Učinak ovisi o iznosu tlaka kojim eksplozivni naboj djeluje i o impulsu tlaka, odnosno vremenu djelovanja. Veličina promjene tvrdoće značajno se razlikuju s udaljenosti od eksplozivnog naboja, odnosno po dubini materijala. Povećanje tvrdoće u odnosu na tlak kojim se na metal djeluje može se izraziti jednadžbom

$$\Delta HV = 0,48HV_0(pG^{-1})^{0,5}$$



gdje je:

$\Delta HV$  – porast tvrdoće po Vickersu

$HV_0$  – tvrdoća po Vickersu izmjerena prije otucavanja eksplozivnog naboja

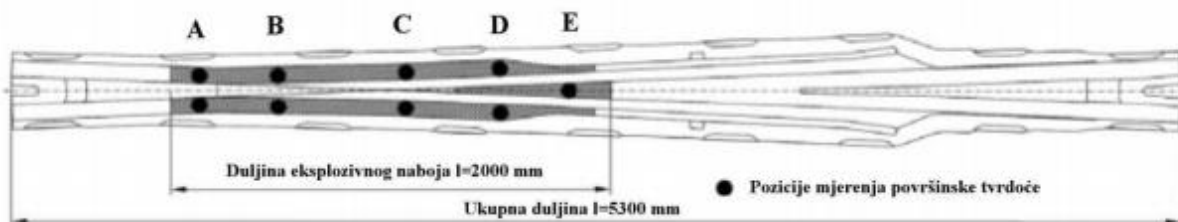
$p$  – tlak kojim se djeluje na metal (Pa)

$G$  – modul smicanja (Pa)

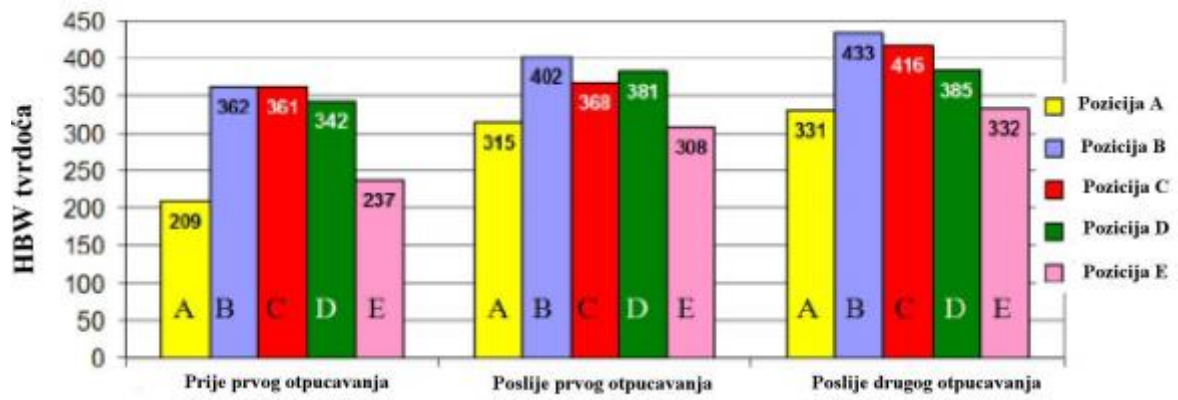
Povećanje tvrdoće metala eksplozivom prikazano je na primjeru prelaznog dijela skretnice željezničke pruge. Za postupak je korišten plastični eksploziv Semtex 10SE, koji se u obliku traka postavljao na obradak. Na slici 3-13 prikazano je postavljanje eksploziva. Postupak je ponovljen dva puta. Tvrdoća materijala je Brianelovim testom tvrdoće mjerena na pet poziciji prije i nakon svakog otpucavanja. Pozicije mjerenja tvrdoće prikazane su na slici 3-14, a rezultati mjerenja su prikazani na slici 3-15.



**Slika 3-13.** Postavljanje eksploziva na obradak (Havliček & Nesvadba 2011)



**Slika 3-14.** Pozicije mjerenja tvrdoće materijala (Havliček & Nesvadba 2011)



Slika 3-15. Rezultati mjerenja tvrdoće materijala (Havliček & Nesvadba 2011)

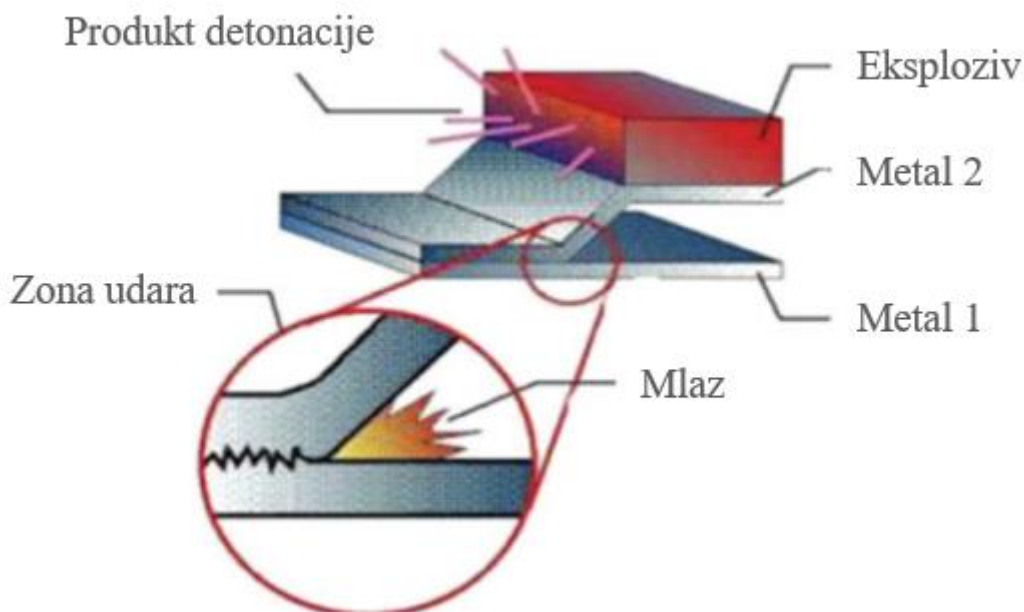


## 4 ZAVARIVANJE METALA EKSPLOZIVOM

Za vrijeme Prvog svjetskog rata primijećeno je da metalni dijelovi granate nakon detonaciju ostaju spojeni za metali nađene u okolinu. Ta pojava prethodila je pronalasku tehnologije zavarivanja metala eksplozivom. L. R. Carl 1944. godine dokumentira svoja istraživanja o zavarivanju metala upotrebom eksploziva. Prikazao je niz eksperimenata zavarivanja metala energijom eksploziva, pri kojima je najčešće korištena bronca. „DuPont Chemical“ je prva kompanija koja je patentirala tehnologiju zavarivanja metala eksplozivom. Patent je objavljen 1964. godine. Danas se zavarivanje metala eksplozivom koristi kao standardni komercijalni postupak zavarivanja u različitim granama industrije.

### 4.1 Proces zavarivanja metala eksplozivom

Kod proces zavarivanja metala eksplozivom spajaju se dvije metalne ploče. Metalna ploča 1 je u pravilu stacionarna, odnosno nepomična i može biti bilo koje debljine. Metalna ploča 2 ubrzava se detonacijom eksplozivnog punjenja i zavaruje se na metalnu ploču jedan. Proces zavarivanja metala eksplozivnim punjenjem prikazan je na slici 4-1.

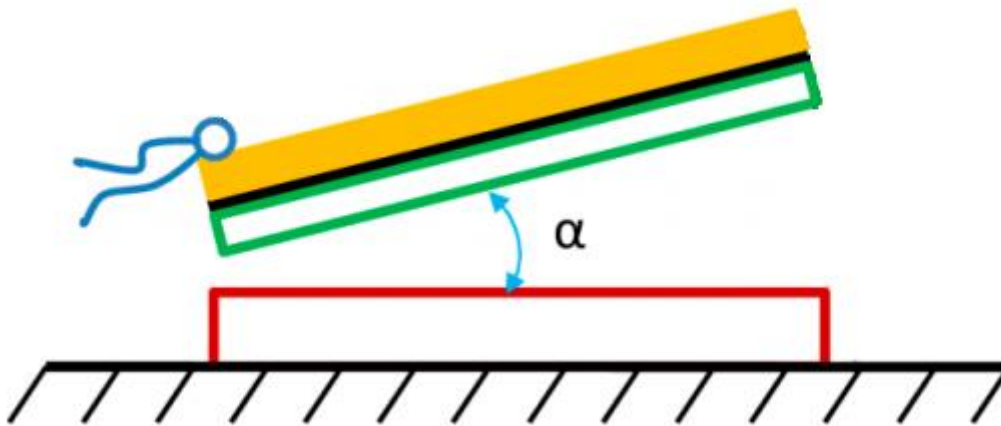


Slika 4-1. Proces zavarivanja metala eksplozivom (Akbari-Mousavi, Al-Hassani, 2008)

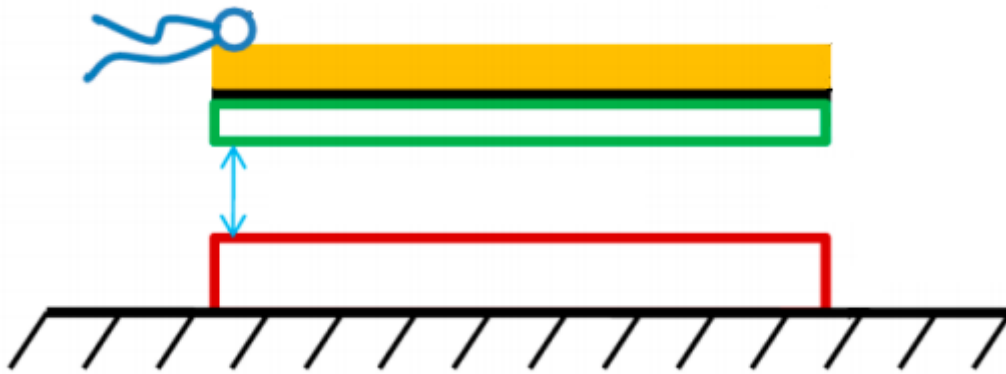
Zavarivanje metala eksplozivom uzrokovano je detonacijom eksplozivnog naboja. Vremenski gledano, odvija se u vrlo kratkom vremenu reda veličine  $\mu\text{s}$  (mikrosekunda). Proces zavarivanja metala eksplozivom možemo podijeliti u tri faze

- 1) detonacija eksplozivnog punjenja
- 2) deformacija i ubrzanje metala 2
- 3) spajanje (zavarivanje) metala (metali 1 i 2)

Detonacijom eksplozivnog punjenja ubrzava se metalna ploča koji nije stacionarna (metal 2) u stacionarnu metalnu ploču (metal 1). Za zavarivanje se koriste dvije metode. U prvoj metode metalna ploča koja se ubrzava paralelna je s metalnom pločom na koju se zavaruje (Slika 4-3). U drugoj metodi metalna ploča koja se zavaruje nalazi se pod određenim kutom u odnosu na ploču na koju se zavaruje. Ako se koristi kutna metoda zavarivanja, metalna ploča se postavlja pod kutom od  $2^\circ$  do  $10^\circ$  (Slika 4-2).



**Slika 4-2.** Metalne ploče pod kutom (Bohanek i sur., 2013)



**Slika 4-3.** Metalne ploče paralelne (Bohanek i sur., 2013)

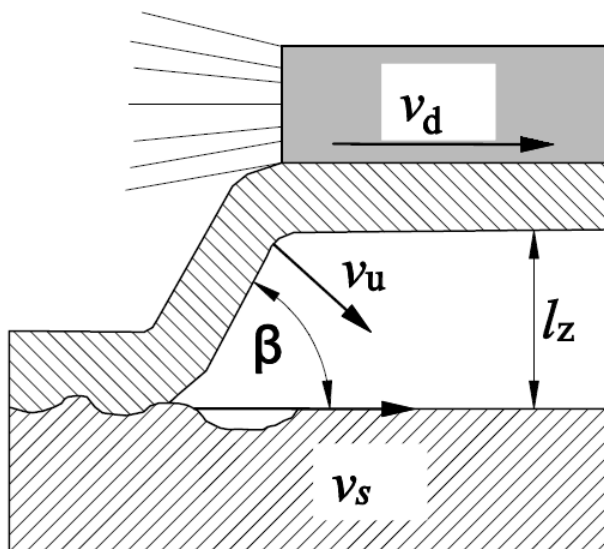
Da bi proces zavarivanja metala eksplozivom bio uspješan, nužan je nastanak mlaza u točki spoja dvaju metala. Nastajanje mlaza prethodi spajanju metalnih ploča. Mlaz ispred sebe čisti oksidni sloj s metalne površine ostavljajući za sobom čistu površinu, čime lakše dolazi do ostvarivanja spoja dvaju metala prilikom sudara uslijed djelovanja tlaka detonacije. Mlaz također uzorkuje i boranje materijala i spoja metala prilikom sudara.

Kako bi se spoj ostvario, nužno je da tlak bude dovoljno velik i djeluje dovoljno dugo. Visoki tlak uzrokuje plastične deformacije u zoni spoja. Spoj bakra i čelika nastao zavarivanjem metala eksplozivom prikazan je na slici 4-4.



**Slika 4-4.** Spoj bakra i čelika nastao zavarivanjem metala eksplozivom (Akbari-Mousavi, Al-Hassani, 2008).

Zavarivanje metala eksplozivom može se opisati odnosom vektora brzine i geometrijskim značajkama postava zavarivanja. Na slici 4-5 prikazan je geometrijski odnos vektora brzina koji vrijedi ukoliko se za zavarivanje koristi metoda paralelnih metalnih ploča.



Gdje je:

$v_d$  - brzina detonacije eksploziva

$v_u$  - brzina udara pri zavarivanju

$v_s$  - brzina gibanja točke sudara

$\beta$  - kut sudara (dinamički kut)

$l_z$  - udaljenost između ploča

Slika 4-5. Geometrijski odnos vektora brzina (Akbari-Mousavi i sur., 2008)

Veza između kuta sudara  $\beta$ , brzine detonacije eksploziva  $v_d$ , brzina gibanja točke sudara  $v_s$  i brzina udara metalne ploče  $v_u$  može se izraziti jednadžbom

$$v_u = 2v_s \sin\left(\frac{\beta}{2}\right)$$

Brzina gibanja točke sudara  $v_s$  je u ovom sustavu jednaka brzini detonacije eksploziva  $v_d$ . Ako za zavarivanje eksplozivom koristimo metodu u kojoj se ploča koja se zavaruje nalazi pod kutom  $\alpha$  u odnosu na ploču na koju se zavaruje, jednadžba onda glasi

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

Gdje je

$\alpha$  - kut između dvije ploče

## 4.2 Čimbenici koji utječu na uspješnost zavarivanja metala eksplozivom

Ranije smo naveli da do zavarivanja metala eksplozivom može doći samo prilikom nastanka mlaza. Da bi mlaz nastao potrebno 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
- $\beta$  - kut sudara (dinamički kut)
- $l_z$  - udaljenost između ploča

Ključni parametar u procesu zavarivanja metala eksplozivom je brzina detonacije eksploziva. Ubrzanje metalnih ploča koje se zavaruju ovisi o brzini i tlaku detonacije. Uspješnost procesa zavarivanja eksplozivom ovisi o izboru eksploziva i udaljenosti metalnih ploča. Eksplozivi koji se koriste pri zavarivanju eksplozivom moraju imati sljedeće karakteristike:

- Brzina detonacije mora biti manja od brzine prolaza zvuka u metalima koji se koriste (brzina se uglavnom kreće od 1500 m/s do brzine zvuka u metalu)
- Kod korištenja tankih slojeva eksploziva, eksploziv mora imati stabilnu detonaciju
- Eksploziv mora biti siguran za rukovanje, jeftin, postojanih svojstava i ne smije biti štetan za okolinu

ANFO eksplozivi su pogodni za zavarivanje metala eksplozivom s obzirom na brzinu detonacije, jednostavnost proizvodnje i cijenu, stoga se najviše i koriste. Ovaj eksploziv se prilikom zavarivanja metala eksplozivom stavlja u drvene kutije. Obzirom da je ovaj eksploziv neosjetljiv na RK 8, za iniciranje se uz detonator koristi i pojačnik. U slučaju da je brzina ANFO eksploziva prevelika za zavarivanje, eksploziv se miješa s inertnim materijalima poput perlita i pijeska kako bi mu se smanjila brzina detonacije. Komercijalni eksplozivi s velikim brzinama detonacije rijetko se koriste zbog mogućnosti oštećenja materijala.

Brzina udara pri zavarivanju metala eksplozivom ovisi o brzini detonacije korištenog eksploziva, masi eksploziva, masi metala i metodi koja se koristi (paralelne ploče ili ploče pod kutom). Ubrzani materijal bi trebao postići brzinu u točki udara u drugi materijal u iznosu od 200 m/s do 500 m/s.

Prema empirijskim podacima smatra se da kut koji zatvaraju dvije metalne površine u točki udara iznosi od 2° do 25°. Ukoliko se koristi metoda kada su ploče od kutom, kut između dvije ploče iznosi od 2° do 10°.

Udaljenost između dvije metalne ploče mora biti takva da metalna ploča kojom se zavaruje postigne brzinu koja je potrebna za proces zavarivanja. Udaljenost se izražava u odnosu na debljinu ploče kojom se zavaruje. Iskustvo je pokazalo da minimalna udaljenost pogodna za zavarivanje metala eksplozivom 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

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

$d_e$  - debljina sloja eksploziva

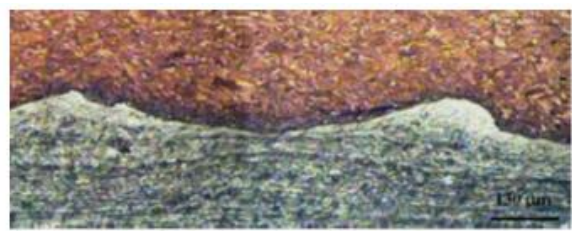
$C$  - masa eksploziva

$M$  - masa metala koji se ubrzava

Ispitivanja su provedena kako bi se odredilo kako udaljenost između dviju metalnih ploča utječe na kvalitetu vara prilikom zavarivanja bakra i čelika (Durgutlu i sur., 2008). Udaljenosti dviju ploča mijenjani su u rasponu od  $0,5 d_{pz}$  do  $3 d_{pz}$ . Rezultati ispitivanja su prikazani na slici 4-6



$l_z = 0,5 d_{pz}$



$l_z = d_{pz}$



$l_z = 2 d_{pz}$



$l_z = 3 d_{pz}$

**Slika 4-6.** Utjecaj udaljenosti između dviju ploča na oblik spoja (Durgutlu i sur., 2008).

Iz slika vidimo sljedeće:

- Kada je udaljenost premala ne dolazi do razvijanja valovite površine poprečnog presjeka spoja dvaju metala
- Udaljenost između valova i amplituda valova raste s povećanjem udaljenosti
- U slučaju kad je udaljenost prevelika izgled spoja postaje sličan onom kad je udaljenost premala zbog velikom međusobnog razmaka pojedinih valova

### **4.3 Primjena metode zavarivanja metala eksplozivom**

Primjena metode zavarivanja eksplozivom je rasprostranjena. Ovom metodom mogu se spojiti različite vrste metala koje se ne mogu spojiti niti jednom drugom metodom. U tablici 2 prikazana je procjena zavarivanja raznorodnih materijala eksplozivom.

**Tablica 2.** 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  |    |    | 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 |    |

Kazalo:

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 se zavarivanje obavlja uz posebno uvjete

N – parovi za koje nema podataka

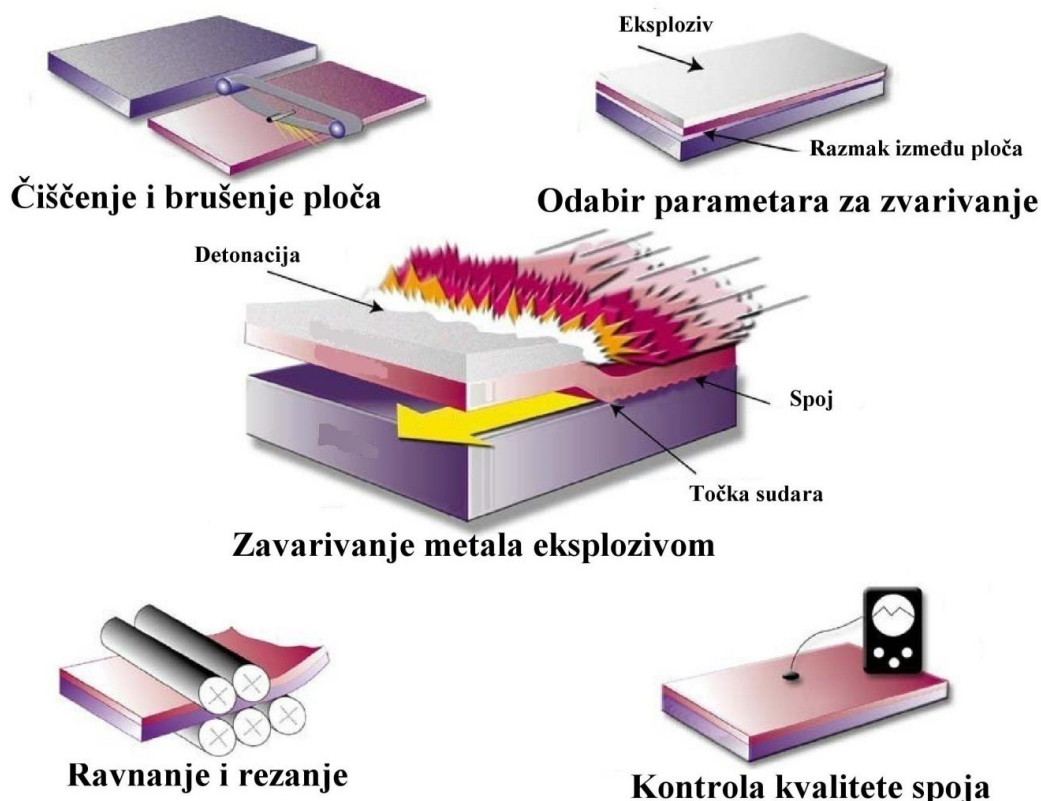
Obradak s obzirom na veličinu varira od vrlo malih obradaka do obradaka velikih dimenzija.

Proizvodi nastali zavarivanjem metala eksplozivom koriste se u različitim granama industrije.



### 4.3.1 Zavarivanje metalnih ploča eksplozivom

Prije postupka zavarivanja metalnih ploča eksplozivom potrebno je površine metala očistiti i pripremiti za zavarivanje. U pravilu su površine metala presvučene tankim slojem koji uglavnom uključuje okside metala i apsorbirane plinove. Proces zavarivanja metalnih ploča eksplozivom odvija se vrlo brzo i ne postoji mogućnost utjecanja na karakteristike vara za vrijeme trajanja procesa. Zbog toga je potrebno sve parametre uskladiti prije početka zavarivanja. Provjeravaju se karakteristike metala i eksploziva. Kod ulaznih parametara eksploziva kontrolira se brzina detonacije eksploziva. Nakon pripreme površina koje se spajaju slijedi proces zavarivanja. Uslijed tlaka detonacije dolazi do iskrivljenja metalnih ploča. Nakon zavarivanja spojene metalne ploče se ravnaju. Nakon ravnjanja, ploče se režu na željene dimenzije. Ako je potrebno, provodi se oslobađanje stresa na varovima koje se također izvodi pomoću eksploziva. Na kraju se provodi kontrola kvalitete spoja. Kvaliteta spoja kontrolira se nedestruktivnim metodama i mehaničkim testiranjem. Tehnološki proces proizvodnje ploča zavarenih eksplozivom prikazan je na slici 4-7.



Slika 4-7. Tehnološki proces proizvodnje ploča zavarenih eksplozivom (Bohanek i sur., 2013)

Kod zavarivanja metalnih ploča jedna ploča je veće debljine i naziva se osnovna ploča. Na tu ploču se zavaruje druga ploča manje debljine. Materijali osnovne ploče uglavnom su razne čelične legure, aluminiji, ugljični čelik i nehrđajući čelik, a na njih se najviše zavaruju aluminij, legure bakra, legure nikala, nehrđajući čelici, tantal, titan i cikronij. U tablici 3 prikazani su parametri koji utječu na uspješnost zavarivanja ploča.

**Tablica 3.** Parametri koji utječu na zavarivanje metalnih ploča

| Polje                  | Parametar                | Bitno | Nebitno |
|------------------------|--------------------------|-------|---------|
| Osnovna ploča          | Tip i razred             | •     |         |
|                        | Debljina                 | •     |         |
|                        | Toplina tretiranja       | •     |         |
| Ploča koja se zavaruje | Tip i razred             | •     |         |
|                        | Debljina                 | •     |         |
|                        | Toplina tretiranja       | •     |         |
| Dimenzije ploče        | Aktivna površina         |       | •       |
|                        | Omjer debljina ploča     | •     |         |
|                        | Dužina i širina          |       | •       |
| Ostali parametri       | Razmak                   | •     |         |
|                        | Eksploziv, masa/površina | •     |         |
|                        | Tip eksploziva i sastav  | •     |         |
|                        | Površinsko stanje        | •     |         |
|                        | Tip i točka paljenja     |       | •       |
|                        | Odstojnici               |       | •       |
|                        | Konačna masa eksploziva  |       | •       |
|                        | Brzina detonacije        | •     |         |
|                        | Usporivači               | •     |         |

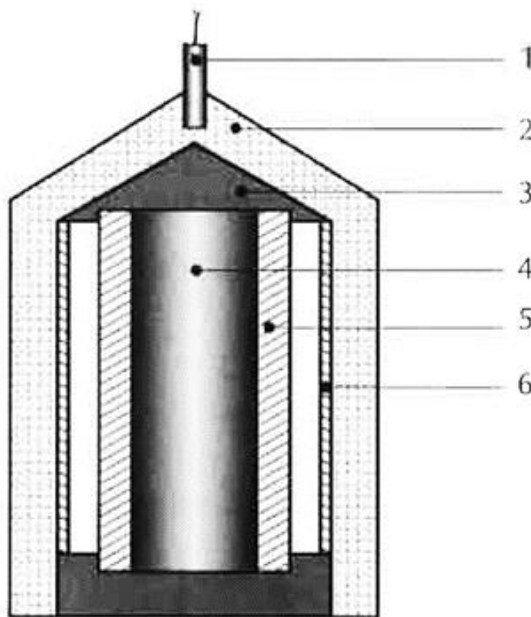
#### 4.3.2 Zavarivanje metalnih cijevi eksplozivom

Temeljne zakonitosti koje vrijede za zavarivanje metalnih ploča eksplozivom vrijede i za zavarivanje cijevi eksplozivom. Zavarivanje cijevi odlikuje se nizom specifičnosti. U praksi razlikujemo dva osnovna postupka zavarivanja metalnih cijevi:

- 1) Platiranje ili oblaganje cijevi
- 2) Spajanje ili zavarivanje cijevi

### 4.3.2.1 Platiranje

Platiranjem se naziva proces nanošenja metalnih prevlaka (obloga) na podlogu (jezgru) postupcima plastičnog deformiranja. U postupku se djelovanjem visokih tlakova postiže tečenje pokrivnog, a ponekad i osnovnog materijala, pri čemu na međupovršini nastaje tanak sloj legure koji osigurava prijanjanje uslijed prožimanja prevlake i podloge. Platiranjem se izrađuju bimetalni elementi različitih dimenzija, od nekoliko milimetara pa do nekoliko metara. Mogu se platirati vanjske i unutarnje površine cijevi. Način platiranja vanjskih cilindričnih površina prikazan je na slici 4-8.



gdje je:

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

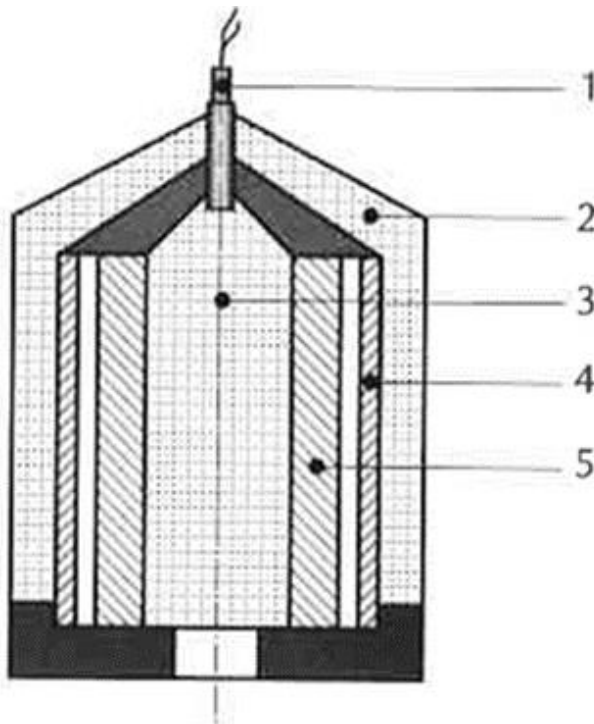
Slika 4-8. Platiranje vanjske cilindrične površine (Sućeska 2001)

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

Asimetrija pri suradanju, koja je uvijek moguća, rezultira koncentriranjem čestica na pojedinim dijelovima površine 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 postavlja tvrda metalna jezgra (trn). Između cijevi i jezgre ostavlja se mjesto za zazor koji se ispunjava vodom ili nekim lako taljivim materijalom. Nakon što proces zavarivanja eksplozivom završi taj materijal se uklanja čime se omogućuje lako razdvajanje cijevi i unutarnje metalne jezgre.

Platiranje vanjske cilindrične površine moguće je i korištenjem dvaju eksplozivnih naboj. Vanjski naboj postavljen je na površinu platirajuće (vanjske) cijevi, unutarnji naboj postavljen je na površinu cijevi koja se platira (unutarnja cijev). Sinkroniziranim iniciranjem oba navoja pomoći generatora cilindričnog udarnog vala osigurava se istodobno „ispaljivanje“ obje cijevi jedne u susret drugoj i njihovo spajanje. Ovaj postupak prikazan je na slici 4-9.



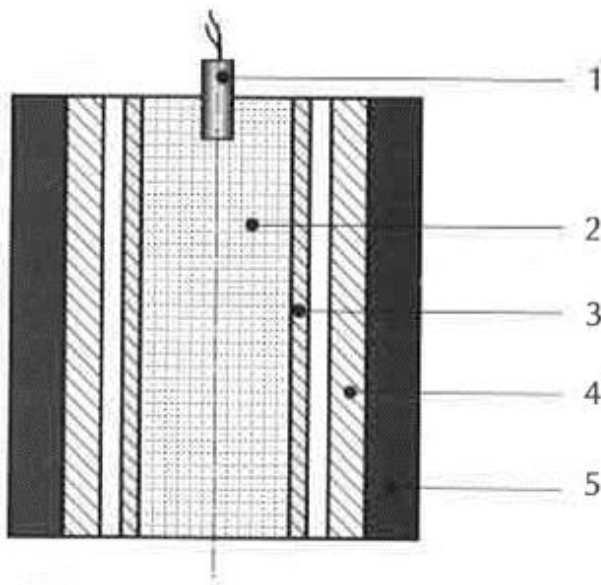
gdje je:

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 4-9.** Platiranje vanjske cilindrične površine korištenjem dvaju eksplozivnih naboj (Sućeska 2001)

Primjenom ovog načina platiranja cijevi nije potrebno korištenje vanjskih okova (matrica) kojima se sprječava deformiranje cijevi pri platoranju.

Platiranje unutrašnje površine metalne cijevi može se izvesti na način prikazan na slici 4-10.



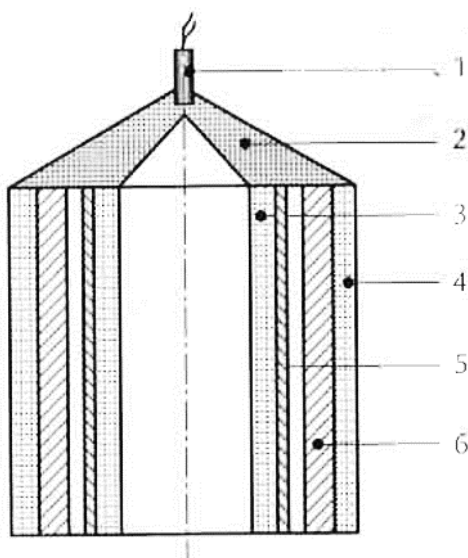
gdje je:

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

Slika 4-10. Platiranje unutrašnje površine cijevi (Sućeska 2001)

Platirajuća odnosno unutrašnja cijev pomoću eksplozivnog naboja se ispaljuje prema cijevi čija se unutrašnja površina platira (vanjska cijev). Vanjska cijev se pri platiranju stavlja u matricu odnosno okov koji pri detonaciji naboja preuzima dio opterećenja kako ne bi došlo do deformiranja vanjske cijevi.

Platiranje unutrašnje površine cijevi velikog promjera prikazano je na slici 4-11.



gdje je:

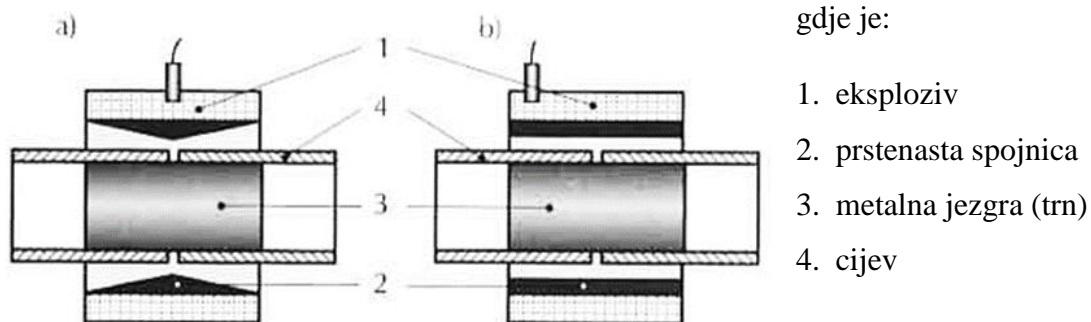
1. detonator
2. generator cilindričnog udarnog vala
3. unutarnji naboj
4. vanjski naboj
5. platirajuća cijev
6. cijev čija se unutrašnja površina platira

Slika 4-11. Platiranje unutrašnje površine cijevi velikog promjera (Sućeska 2001)

Kod platiranja unutarnje površine cijevi velikog promjera koristi se eksplozivni naboj u obliku šupljeg cilindra a umjesto vanjskog okova (matrice) koristi se eksplozivni naboj na vanjskoj površini cijevi koja se platira. Unutarnje platiranje cilindričnih elemenata koristi se pri izradu kliznih ležajeva. Ova tehnologija omogućuje bitno poboljšanje svojstva ležajeva i ekonomičnije trošenje obojenih metala. Platiranjem unutrašnjih površina velikih posuda izrađenih od konstrukcijskih čelika slojem nehrđajućeg čelika, titana, tantala ili nekog drugog materijala dobiva se posuda s površinom otpornom na koroziju (Sućeska 2001).

#### 4.3.2.2 Spajanje krajeva metalnih cijevi

Postoji mnogo načina spajanja metalnih cijevi. Metoda spajanja ovisi o mnogo parametara: jesu li krajevi cijevi istog promjera, jesu li cijevi izrađene od istog materijala, kakvih su dimenzija itd. Uobičajen način spajanja dviju cijevi od istog materijala i istog promjera uz korištenje prstenaste spojnice prikazan je na slici 4-12.



Slika 4-12. Spajanje krajeva metalnih cijevi uz korištene prstenaste spojnice (Sućeska 2001)

Kod „a“ primjera na slici 4-12 prikazuje se način spajanja krajeva metalnih cijevi eksplozivom kod kojeg se iniciranje eksplozivnog naboja vrši na njegovom središnjem dijelu, tako da se detonacijski val širi prema krajevima naboja i spojnice, paralelno s osi cijevi. Kod primjera „b“ imamo metodu spajanja kod koje se inicijacija naboja vrši na jednom od njegovih krajeva.

## 5 EKSPLOZIVNO ZAVARIVANJE ISTOVRJNIH I RAZLIČITIH MATERIJALA

Spajanje istih metala (npr. željezo i željezo) i različitih metala (npr. željezo i aluminij) imaju različite utjecaje čimbenika na kvalitetu rezultirajućeg spoja kao što su udaljenost između ploča, količina eksploziva i kut sudara (dinamički kut).

### 5.1 Čelik na čelik

Parametre za eksplozivno zavarivanje čeličnih dijelova i njihov utjecaj na mikrotvrdoću i čvrstoću na smicanje istraživali su Acarer i suradnici (Acarer M, Gulenc B, Findik F. Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength. Mater Des 2003). U tom radu korištena su različita sučelja za zavarivanje (ravna, valovita i kontinuirano očvršćena/rastopljena) u kombinaciji s različitim parametrima za eksplozivno zavarivanje. Spajanje materijala je istraženo i kod termički obrađenih i neobrađenih materijala. U tablici 4 prikazan je sažeti prikaz rada.

Prikazano je da se sučelje za zavarivanje mijenja iz ravne u valovitu strukturu kada se poveća udaljenost između metalnih ploča i količina eksploziva. Kod valovitih sučelja kada se povećala količina eksploziva, povećala se duljina vala i amplituda. Rezultati ispitivanja vlačnih smicanja i savijanja pokazala da toplinski obrađeni uzorci imaju veću čvrstoću od neobrađenih uzoraka. Prema rezultatima ispitivanja vlačnih smicanja, ravno i valovita sučelja imala su sličnu snagu. Termički neobrađeni uzorci su kod testiranja na savijanje u zoni savijanja pokazali pukotine.

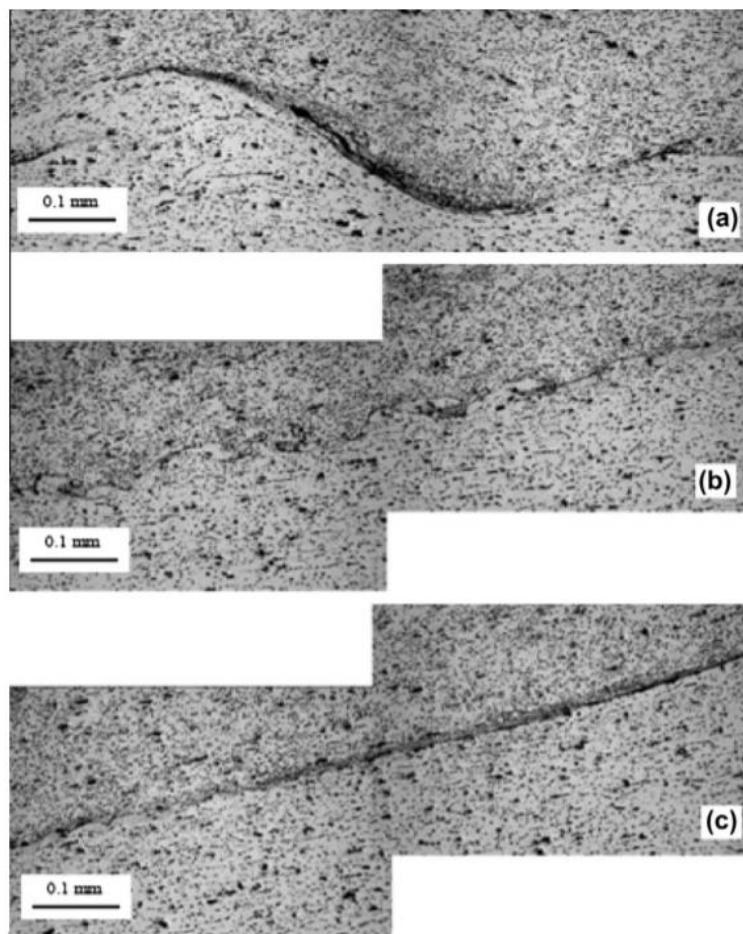
**Tablica 4.** Sažeti prikaz eksperimentalnih parametara s raznim eksplozivima (Findik, 2011).

| Materijal | Debljina (mm) | Debljina eksploziva (mm) | Udaljenost (mm) | Izmjerena brzina udara pri zavarivanju $v_u$ (m/s) | Izmjerena brzina detonacije eksploziva $v_d$ (m/s) | Dinamički kut $\beta$ (°) | Omjer eksploziva |
|-----------|---------------|--------------------------|-----------------|--|--|---------------------------|------------------|
| Titaniј   | 6             | 107                      | 6               | 460  | 2050   | 12.96                     | 2.1              |
| Titaniј   | 6             | 153                      | 6               | 532  | 2150   | 14.32                     | 3                |
| Titaniј   | 6             | 80                       | 6               | 348  | 2000   | 10                        | 1.57             |
| Čelik     | 6             | 107                      | 3               | 195  | 2050   | 4.97                      | 1.138            |
| Čelik     | 6             | 107                      | 6               | 255  | 2050   | 6.5                       | 1.138            |
| Čelik     | 6             | 107                      | 9               | 294  | 2050   | 7.5                       | 1.138            |
| Čelik     | 6             | 107                      | 12              | 324  | 2050   | 8.28                      | 1.138            |
| Čelik     | 12            | 235                      | 24              | 237  | 2100   | 6.48                      | 1.25             |
| Čelik     | 12            | 235                      | 18              | 310  | 2100   | 8.5                       | 1.25             |
| Čelik     | 12            | 235                      | 12              | 358  | 2100   | 9.81                      | 1.25             |
| Čelik     | 12            | 235                      | 6               | 394  | 2100   | 10.81                     | 1.25             |
| Titaniј   | 3             | 107                      | 3               | 488  | 2050   | 12.45                     | 3.928            |
| Titaniј   | 3             | 107                      | 6               | 630  | 2050   | 17.9                      | 3.928            |
| Čelik     | 3             | 107                      | 3               | 280  | 2050   | 7.85                      | 2.277            |
| Čelik     | 3             | 107                      | 6               | 365  | 2050   | 10.26                     | 2.277            |

## 5.2 Aluminij na aluminij

Rezultate eksplozivnog zavarivanja aluminija na aluminij u svom radu je prikazao Grignon (Grignon F, Benson D, Vecchio KS, Meyers MA. Explosive welding of aluminum to aluminum). Eksperimentalno opažanje optičkim mikroskopom na eksplozivno zavarenim uzorcima pokazala su da odnos  $v_u$  (brzina udara pri zavarivanju) i  $\beta$  (kut sudara) nije konstantan tijekom postupka zavarivanja budući da je, u svim slučajevima, područje valovitog zavara bilo praćeno glatkim zavarom. Treba napomenuti da debljina materijala utječe na postupak zavarivanja i posljedično na kut sudara  $\beta$ .

Pokusi su provedeni pod početnim kutovima od  $4^\circ$ ,  $6^\circ$ ,  $8^\circ$ ,  $10^\circ$ ,  $12^\circ$  i  $14^\circ$ . Zavarivanje je započelo u gornjem lijevom kutu i završeno u donjem desnom. Morfologija zavara je u početku bila valovita (prva trećina zavara) da kasnije prešla u glatku. Na slici 5-1 vidimo detalje zavara početnog, srednje i završnog dijela kod početnog kuta od  $8^\circ$ . Isti uzorak opažen je i za ostale vrijednosti početnog kuta.

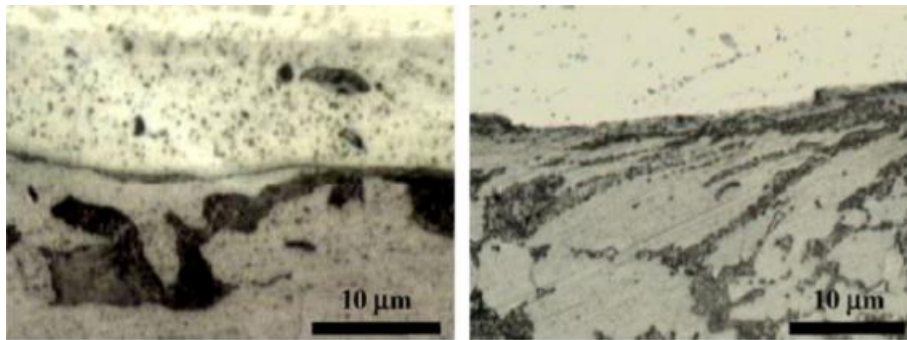


**Slika 5-1.** Površina zavarivanja kod početnog kuta od  $8^\circ$ ; (a) početni dio, (b) prijelazni dio, (c) završni dio (Findik, 2011).



### 5.3 Aluminij na čelik

Eksperimentalno istraživanje eksplozivnog zavarivanja aluminija na čelik istraživao je znanstvenik Raghukandan K. (Analysis of the explosive cladding of Cu–low carbon steel plates. J Mater Process Technol). Cilj ovog rada bio je ispitivanje mikrostrukture i odnos aluminij-mikrolegirani čelik i aluminij-dvofazni čelik. Nakon eksplozivnog zavarivanja, oba spoja (aluminij-mikrolegirani čelik i aluminij-dvofazni čelik) imali su ravno zavareno sučelje s ponekim valom. Između eksplozivnih zavarenih materijala mogu se stvoriti ravna i valovita sučelja. Povećanje količine eksploziva povećalo je energiju udara što je uzrokovalo prijelaz iz ravnog u valoviti oblik. Čvrstoća popuštanja i vlačna čvrstoća dvofaznog i mikrolegiranog čelika bile su 405,810 i 330,505 MPa. Iste veličine prikazani su na njihovim eksplozivno zavarenim uzorcima. Dvofazna mikrostruktura značajno je poboljšala čvrstoću, što se i vidi na slici 5-2.

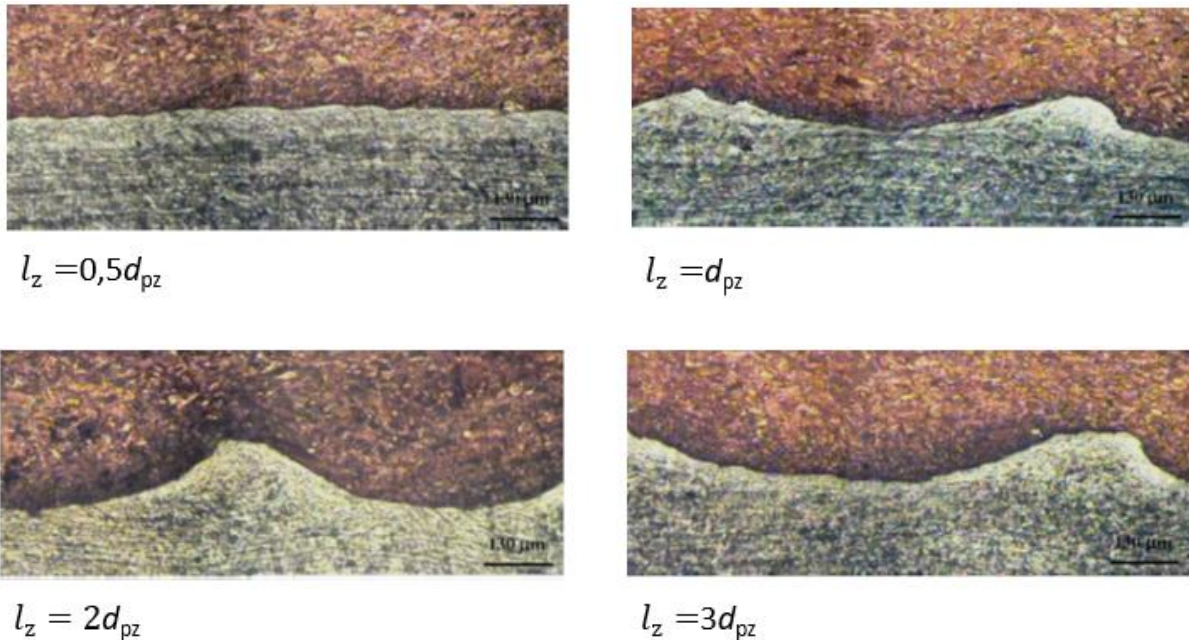


**Slika 5-2.** Lijevo je prikazana mikrostruktura spoja Al-mikrolegirani čelik, desno Al-dvofazni čelik (Findik, 2011).

### 5.4 Bakar na čelik

Eksperimentalne studije su pokazale da eksplozivno zavarivanje bakra i čelika može stvoriti spoj dobrih svojstava. Uočeno je da, kada se poveća omjer eksploziva i udaljenost, sučelje zavara prelazi iz glatkog u valovito. S povećanjem omjera eksploziva i udaljenosti, amplituda i valna duljina vala su povećane. Utvrđeno je da je tvrdoća spoja i vanjske strane ploča porasla zbog deformacija koje potječu od učinka udara. Ukupna površina sučelja povećana je kao rezultat valovitosti sučelja koje je uzrokovano povećanjem omjera eksploziva i udaljenosti. Osim toga, valovita sučelja nisu se odvojila nakon ispitivanja vlačnog smicanja. Koristila se metoda zavarivanja gdje su metalne ploče paralelne jedna s drugom. Bakar je odabran kao stacionarna metalna ploča.

Ispitivanja su provedena kako bi se odredilo kako udaljenost između dviju metalnih ploča utječe na kvalitetu vara prilikom zavarivanja bakra i čelika (Durgutlu i sur., 2008). Udaljenosti dviju ploča mijenjani su u rasponu od  $0,5 d_{pz}$  do  $3 d_{pz}$ . Rezultati ispitivanja su prikazani na slici 5-3.



**Slika 5-3.** Utjecaj udaljenosti između dviju ploča na oblik spoja (Durgutlu i sur., 2008).

Iz slika je vidljivo

- Kada je udaljenost premala ne dolazi do razvijanja valovite površine poprečnog presjeka spoja dvaju metala
- Udaljenost između valova i amplituda valova raste s povećanjem udaljenosti
- U slučaju kad je udaljenost prevelika izgled spoja postaje sličan onom kad je udaljenost premala zbog velikom međusobnog razmaka pojedinih valova

## 6 ZAKLJUČAK

Iz primjera navedenih u ovom radu može se zaključiti:

Iako eksplozivna detonacija proizvodu toplinu, proces je toliko brz da nema vremena za prijenos topline na metalne površine zbog čega ne dolazi do značajnog porasta temperature u metalima, a također dolazi i do vrlo male difuzije sučelja. Brzina detonacije proporcionalna je gustoći eksploziva, a obrada površine spajanih materijala igra veliku ulogu u određivanju jačine razvijene metalurške veze

Eksplozivno zavarivanje je učinkovita metoda spajanja ploča istih ili raznovrsnih materijala, koji s tehničkog i ekonomskog aspekta nisu prikladni za nijednu drugu vrstu spajanja. Veoma slični materijali kao što su čelik na čelik, aluminij na bakar i različiti materijali kao što su čelik na bakar, titanij na aluminij i njihove legure se uspješno mogu spojiti korištenjem eksplozivnog zavarivanja.

## 7 LITERATURA

- Acarer M, Gulenc B, Findik F. , 2003. Investigation of explosive welding parameters and their effects on microhardness and shear strength. Mater Des.
- 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.
- Bohanek V., Dobrilović M., Škrlec V., 2013. Zagreb, Primjena energije eksploziva pri obradi metala, str. 29-37.
- 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/> (22.09.2021)
- Grignon F, Benson D, Vecchio KS, Meyers MA. Explosive welding of aluminum to aluminum.
- Jelaska D., 2005. Elementi strojeva. Skripta. Split: Fakultet Elektrotehnike Strojarsva i Brodogradnje
- 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.)
- Sućeska, M., 2001. Eksplozije i eksploziv - njihova mirnodopska primjena, 305 pp. Zagreb: Brodarski institut.
- 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.
- Tehnička enciklopedija, 1993. svezak 13, Zagreb, str. 583.
- 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.



KLASA: 602-04/21-01/243  
URBROJ: 251-70-11-21-2  
U Zagrebu, 23.09.2021.

**Matej Medvidović, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/243, URBROJ: 251-70-11-21-1 od 22.09.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### ZAVARIVANJE METALA EKSPLOZIJOM

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Mario Dobrilović nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Mario Dobrilović

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Doc.dr.sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)