

PRIMJENA ENERGIJE EKSPLOZIVA PRI OBRADI METALA

APPLICATION OF EXPLOSIVE ENERGY IN METALWORKING

VJEČISLAV BOHANEK, MARIO DOBRILLOVIĆ, VINKO ŠKRLEC

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: Eksploziv, obrada metala eksplozivom

Key words title: Explosive, explosive metalworking

Sažetak

Detonacijom eksplozivnog naboja oslobodi se znatna količina energije u vrlo kratkom vremenskom periodu. Energija, oslobođena na ovaj način, primjenjuje se za obavljanje različitih vrsta korisnog rada. Najviše eksploziva se utroši za dobivanje mineralne sirovine u rudarstvu te za potrebe različitih iskopa za potrebe građevinske industrije.

Jedno od posebnih područja primjene energije eksploziva je područje obrade metala energijom eksploziva. Primjenom energije eksploziva metal se zavaruje, oblikuje, reže, povećava mu se čvrstoća itd. U radu je dan pregled postojećih postupaka obrade metala energijom eksploziva. Pojedini postupci su objašnjeni te su dane komparativne prednosti u odnosu na konvencionalne načine obrade metala.

Abstract

When an explosive charge is detonated, considerable amount of energy in a very short period of time is released. Energy, released in this way, is used for performing various kinds of useful work. Most explosives are consumed to obtain mineral raw materials in the mining industry and for various excavations in the construction industry. One of the specific areas of application explosive energy is an area of explosive metalworking. Using energy of explosive metal is welded, formed, cuts, hardened etc. This paper presents an overview of the existing explosive metalworking methods. Methods are explained and comparative advantages in comparison to conventional metalworking methods are given.

1. Uvod

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. Najveći doprinosi razvoju pojedinih metoda obrade metala nalaze se u raketnoj i zrakoplovnoj industriji koje su bile glavni investitori u ovo područje. Mnogi od postupaka obrade metala eksplozivom koriste se kao komercijalni postupci u proizvodnji, dok su pojedini u stadiju istraživanja mogućnosti primjene.

Postupke obrade metala eksplozivom moguće je podijeliti s obzirom na pozicioniranje eksplozivnog naboja u odnosu na obradak. Podjelom su metode razvrstane u dvije skupine:

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

Druga podjela, koja je više u upotrebi, je podjela postupaka obrade metala s obzirom na namjenu postupka. Podjela razlikuje 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.

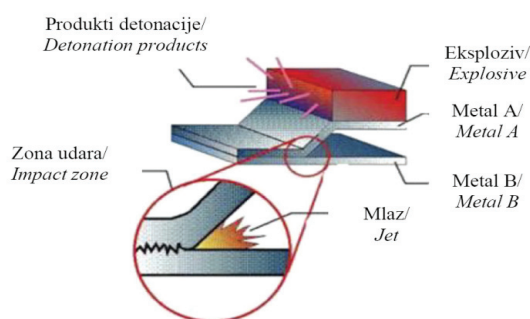
2. Zavarivanje metala eksplozivom

Za vrijeme Prvog svjetskog rata primijećeno je da metalne dijelovi tijela granate nakon detonacije ostaju zalijepljeni za metale koji se nalaze u okolini. Ova pojava je prethodila pronalasku tehnologije zavarivanja metala eksplozivom. L.R. Carl je 1944. godine dokumentirao svoja istraživanja o zavarivanju metala upotrebom eksploziva. Prikazan je niz eksperimenata zavarivanja metala energijom eksploziva, pri kojima je najčešće korištena bronca. „DuPont Chemical“ je prva kompanija koja je razvila i patentirala tehnologiju zavarivanja metala eksplozivom.

Patent je objavljen 1964 godine (Young 2004). Danas se zavarivanje metala eksplozivom koristi kao standardni komercijalni postupak zavarivanja u različitim granama industrije.

2.1. Proces zavarivanja metala eksplozivom

Pri procesu zavarivanja metala eksplozivom razlikujemo dvije metalne ploče, jedna je, u pravilu stacionarna, odnosno nepomična (metal B) i može biti bilo koje debljine. Druga ploča (metal A) ubrzava se detonacijom eksplozivnog punjenja i zavaruje na metal B. Proces zavarivanja metala eksplozivom prikazan je slikom 1.



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

Figure 1. Explosion bonding process (Akbari Mousavi & Al-Hassani 2008)

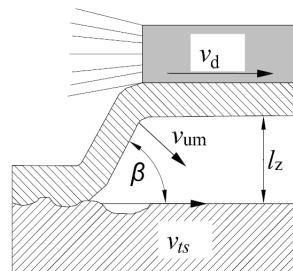
Zavarivanje metala eksplozivom uzrokovano je detonacijom eksplozivnog naboja i vremenski gledano se odvija u vrlo kratkom vremenu reda veličin u μs . Proces se može podijeliti u tri faze:

1. detonacija eksplozivnog punjenja,
2. deformacija i ubrzanje metala A i
3. spajanje (zavarivanje) metala (metali A i B).

Detonacijom eksplozivnog punjenja ubrzava se metal A u pravcu metala B. Za zavarivanje se koriste dvije osnovne konfiguracije, odnosno tehnike. U prvoj konfiguraciji metalna ploča koje se ubrzava je paralelna sa metalnom pločom na koju se zavaruje, a u drugoj konfiguraciji se nalazi pod određenim kutom u odnosu na ploču na koju se zavaruje. Ukoliko se koristi kutna metoda metalna ploča se postavlja pod kutom koji iznosi od 2° do 10° .

Za uspješan proces zavarivanja nužan je nastanak mlaza u točki spoja dvaju metala. Nastajanje mlaza i prethodi spajanju dva metala. Mlaz u procesu zavarivanja djeluje dvojako; ispred zavara uklanja oksidni sloj sa metalne površine te uzrokuje boranje materijala i spoja metala prilikom sudara. Za nastajanje spoja nužno je djelovanje tlaka dovoljnog iznosa unutar određenog vremenskog perioda. Visoki tlak uzrokuje lokalne plastične deformacije u zoni spoja.

Proces zavarivanja može se opisati odnosom vektora brzina i geometrijskim značajkama postava zavarivanja. Na slici 2 dan je geometrijski odnos vektora brzina koji vrijedi ukoliko se za zavarivanje koristi paralelna konfiguracija.



Kazalo:

- v_d - brzina detonacije / velocity of detonation (m/s),
- v_{um} - brzina udara metala / impact velocity of metal (m/s),
- v_{ts} - brzina točke spoja / velocity of collision point (m/s),
- β - kut sudara / impact angle ($^\circ$) i
- l_z - udaljenost između ploča / stand off distance (m).

Slika 2. Odnos između vektora brzina (Akbari Mousavi & Al-Hassani 2005)

Figure 2. Relationship between velocity vectors (Akbari Mousavi & Al-Hassani 2008)

Veza između kuta sudara β , brzine detonacije eksploziva, brzina gibanja točke sudara i brzina udara metalne ploče za paralelnu konfiguraciju se matematički može izraziti jednadžbom (Akbari Mousavi et al. 2008):

$$v_{um} = 2v_{ts} \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad (1)$$

gdje je:

- v_{um} - brzina udara metala pri zavarivanju (m/s),
- v_{ts} - brzina gibanja točke sudara (m/s) i
- β - kut sudara (dinamički kut) ($^\circ$).

Brzina gibanja točke sudara je pri paralelnoj konfiguraciji jednaka brzini detonacije eksploziva. 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:

$$v_{um} = v_{ts} \frac{\sin \beta}{\cos\left(\frac{\beta-\alpha}{2}\right)} \quad (2)$$

gdje je:

- α - kut između dvije ploče ($^\circ$).

3.1.2. Čimbenici koji utječu na uspješnost zavarivanja metala eksplozivom

Brzina detonacije eksploziva je ključni parametar u procesu zavarivanja metala eksplozivom. O brzini i tlaku detonacije ovisi kako i koliko će se ubrzati metalna plo-

ča kojom se zavaruje, te njezina brzina u trenutku udara. O vrsti eksploziva, specifičnoj masi naboja 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 zvuka u metalima koji se koriste, brzina iznosi od 1500 m/s do brzine zvuka u metalu,
- ukoliko se koriste tanki slojevi eksploziva, eksploziv mora imati stabilnu detonaciju i
- eksploziv mora biti siguran za rukovanje, jeftin, postojanih svojstava i ne smije biti štetan za okolišnu (Petrushkov 2009).

Komercijalni eksplozivi velikih brzina detonacije rijetko se koriste zbog mogućnosti oštećenja metala koji se spajaju. Najviše se koriste ANFO eksplozivi koji su pogodni s obzirom na brzinu detonacije, jednostavnu proizvodnju, cijenu i sigurnosne parametre. ANFO eksploziv se prilikom zavarivanja obično stavlja u drvene kutije. Budući da ANFO eksploziv nije osjetljiv na inicijalni impuls 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 po jedinici mase metala i konfiguraciji koja se koristi. Brzina materijala kojim se zavaruje u točki sudara trebala bi iznositi od 200 m/s do 500 m/s. Brzina gibanja točke sudara ovisi o vrsti eksploziva i konfiguraciji koja se koristi

Prema iskustvenim podacima smatra se da kut koji zavaravaju dvije metalne površine u točki udara iznosi od 2° do 25°. Ukoliko se koristi kutna metoda zavarivanja, kut između dvije ploče iznosi od 2° do 10°

Udaljenost između dvije 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 (l_z). Prema iskustvenim podacima minimalna udaljenost pogodna za zavarivanje iznosi 0,5. Empirijski izvedena formula za određivanje optimalne udaljenosti glasi :

$$l_z = 3k d_e C / M \quad (3)$$

gdje je:

l_z - udaljenost između ploča (mm),

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

d_e - debljina sloja eksploziva (m),

C - masa eksploziva (kg) i

M - masa metala koji se ubrzava (kg).

3. Oblikovanje metala eksplozivom

Tehnologija oblikovanja i obrade metala deformiranjem je u biti skupina metoda izrade proizvoda ili polu-

proizvoda zasnovanih na plastičnoj deformaciji (Povrzanović 1996). Plastična deformacija kontinuuma je proces koji rezultira trajnom promjenom oblika i promjenom pozicija strukturalnih dijelova relativno u odnosu na originalne tj. prvobitne pozicije i oblik. Proces plastične deformacije je ireverzibilan, a materijal zadržava kontinuitet i kompatibilnost, sa izuzetkom promjena u mikrostrukтури (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 ovog i konvencionalnih metoda oblikovanja je u upotrebi eksplozivnog naboja i vrlo kratkom vremenu oblikovanja.

Dok se konvencionalne metode oblikovanja metala deformiranjem odlikuju brzinama deformiranja od 10 m/s, brzine deformiranja kod oblikovanja metala eksplozivom iznose od 100 m/s do 300 m/s (Sućeska 2001).

S obzirom na prostorni odnos između eksploziva i metala koji se oblikuje oblikovanje metala može se podijeliti na:

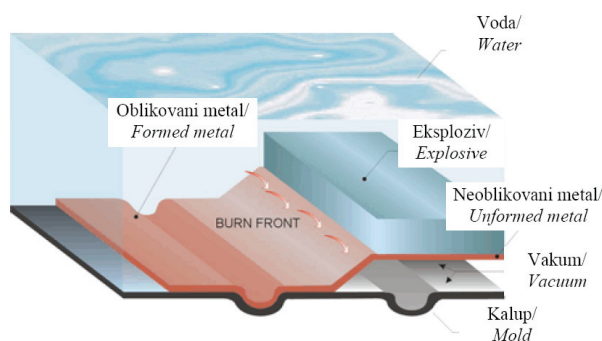
- oblikovanje kontaktnom metodom i
- oblikovanje nekontaktnom metodom.

Prema sustavu koji se koristi oblikovanje metala eksplozivom može se podijeliti na:

- zatvoreni sustav oblikovanja metala i
- otvoreni sustav oblikovanja metala.

3.1. Metode i sustavi oblikovanja metala eksplozivom

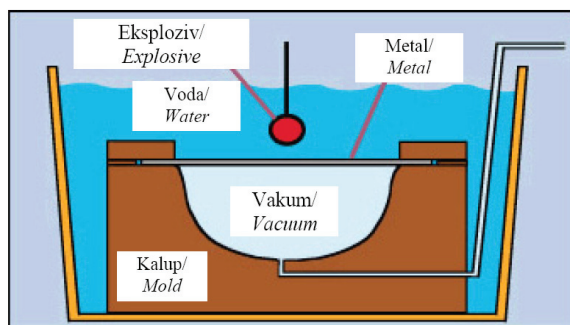
Kontaktna metoda oblikovanja - eksploziv se nalazi u direktnom kontaktu sa metalom koji se oblikuje. Zbog nepostojanja odmaka između eksploziva i metala koriste se eksplozivi koji imaju manju brzinu detonacije. Pravilnim izborom eksploziva sprječavaju se mogući nastanci štete na obradku. Pri upotrebi kontaktne metode češće su pogreške i odstupanja od zahtijevanih dimenzija obradka te postoji mogućnost oštećenja obradka. Zbog toga je ova metoda znatno manje u upotrebi u odnosu na nekontaktnu metodu. Shematski prikaz oblikovanja metala eksplozivom upotrebom kontaktne metoda prikazan je na slici 3.



Slika 3. Oblikovanje metala kontaktnom metodom

Figure 3. Contact method of metalforming

Nekontaktna metoda oblikovanja - eksplozivni naboj se nalazi na određenoj udaljenosti od obradka. Udaljenost je prilagođena masi i vrsti eksplozivnog naboja, materijalu obradka i mediju kroz koji se udarni val prenosi. Nakon aktivacije eksplozivnog naboja udarni val napreduje kuglasto, a prati ga ekspanzija mjehurića. Ukoliko mjehurići dođu do površine medija prije no što djeluju na obradak izgubiti će se značajan dio energije. Shematski prikaz oblikovanja metala eksplozivom upotrebom nekontaktne metode prikazan je slikom 4.



Slika 4. Oblikovanje metala nekontaktnom metodom

Figure 4. Standoff method of metalforming

Zatvoreni sustava oblikovanja - naziv sustava dolazi od načina postavljanja eksplozivnog punjenja. Ono je smješteno u zatvorenom prostoru unutar dvodijelnog kalupa. Sustav se primjenjuje za oblikovanje cijevi tankih stijenki i prilikom postojanja strogih zahtjeva za odstupanje dimenzija proizvoda. Prednost sustava je bolje iskorištenje energije eksploziva. Nedostatak sustava je ograničenje veličine proizvoda s obzirom na izvedbu kalupa. Prilikom detonacije eksploziva u zatvorenom sustavu kalup je izložen značajnim dinamičkim udarima te zbog toga mora biti značajno većih dimenzija u odnosu na otvorenih sustav. U slučaju da kalup zatvorenog sustava nije dovoljno dimenzioniran može doći do pucanja kalupa te se on ponaša kao granata. Iz navedenih razloga zatvoreni sustav je rijetko u upotrebi. Sustav se s vremenom modificirao i danas postoje otvori na kalupu koji imaju ulogu sigurnosnih ventila i sprečavaju mogućnost fragmentiranja kalupa uslijed djelovanja detonacije eksplozivnog naboja.

Otvoreni sustav oblikovanja - eksploziv nije zatvoren s obje strane kalupom. Postoji samo jedna strana kalupa koja je po svojim dimenzijama i masi manja od jedne polovine kalupa zatvorenog sustava. S obzirom na ekonomičnost sustava kalup predstavlja najskuplji dio proizvodnje. Kod otvorenog sustava manji dio energije eksploziva utroši se za oblikovanje metala što nije nedostatak jer je udio cijene eksploziva u cijeni konačnog proizvoda zanemariv.

Pored otvorenog i zatvorenog sustava u kojima se metal formira prema obliku kalupa postoji i sustav oblikovanja metala eksplozivom bez upotrebe kalupa. Ovim sustavom se oblikuju sferni (kuglasti) oblici od tanjeg lima

(Tong at al. 2008). Sustav se temelji na kuglastom širenju udarnog vala u vodi.

3.2. Čimbenici koji utječu na oblikovanje metala eksplozivom

Uspješnost postupka oblikovanja metala eksplozivom ovisi o svojstvima:

- kalupa,
- medija za prijenos energije i
- eksplozivnog naboja.

Materijali koji se koriste za izradu kalupa su: visoko čvrsti alatni čelici, plastike, beton itd. Materijal kalupa mora biti otporan na dinamička naprezanja izazvana detonacijom eksploziva, primjeren broju primjeraka koji se izrađuju, pogodan za oblikovanje i imati prihvatljivu cijenu. Prilikom detonacije eksploziva na kalup djeluju uglavnom tlačne sile, što je povoljno obzirom na višestruko veće vrijednosti vlačnih čvrstoća materijala u odnosu na tlačne čvrstoće. Uz dovoljnu čvrstoću, materijal kalupa ne smije imati izraženu hrapavost koja uzrokuje nepravilnu i hrapavu površinu obradka. Kalupi manje čvrstoće koriste se za male proizvodne serije i za izradu obradka kod kojih su dozvoljena veća odstupanja dimenzija. Za veće serije obradka koriste se materijali veće čvrstoće.

Energija eksploziva se djelom pretvara u udarni val koji se kroz medij prenosi na obradak. Iznos tlaka udarnog vala ovisi o masi i vrsti eksplozivnog naboja, a prigušenje o svojstvima medija. S porastom gustoće medija raste i učinkovitost sustava oblikovanja (Strohecker at all 1964). U prvim pokušajima oblikovanja metala eksplozivom korišten je zrak. U zraku se formira visok vršni tlak udarnog vala koji traje vrlo kratko vrijeme, obično nekoliko mikrosekundi. Zbog kratkog djelovanja, ukupan impuls raspoloživ za oblikovanje obradka je manji nego kod korištenja tekućeg medija. Upotrebom vode masa eksploziva potrebnog za oblikovanje smanjuje se do 80%. Oblikovanje energijom eksploziva, uz bolje rezultate može se izvoditi u parafinu i glicerinu. Međutim voda je najzastupljeniji medij zbog niske cijene, raspoloživosti i zadovoljavajućih rezultata oblikovanja.

Kod dimenzioniranja eksplozivnog naboja dva su važna parametra; vrsta eksploziva i oblik eksplozivnog naboja. Odabir vrste eksploziva izvodi se na osnovi empirijskih podataka, a oblik eksplozivnoga naboja se prilagođava dimenzijama i obliku obradka S obzirom na potrebnu energiju za oblikovanje u zatvorenim sustavima koriste se uglavnom eksplozivi manje brzine detonacije dok se u otvorenim sustavima koriste eksplozivi veće brzine detonacije. Za veće obradke je nepraktično koristiti koncentrirani točkasti eksplozivni naboj, već se u tim slučajevima koristi punjenje oblikovano u skladu sa oblikom obradka. Udaljenost eksplozivnog naboja od obradka je bitan parametar jer o njemu ovisi iznos vršnog udarnog tlaka kojim se djeluje na obradak. Formula za proračun vršnog iznosa tlaka ukoliko se koristi voda kao medij glasi:

$$p = k \left[\frac{c^{2/3}}{R} \right]^a \quad (4)$$

gdje je:

p - iznos tlaka u (Pa)

k - konstanta koja ovisi o eksplozivu,

c - masa eksploziva (kg),

R - udaljenost (m) i

a - konstanta, uobičajeno iznosi 1,15.

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

4. Rezanje metala eksplozivom

Primjena eksploziva za rezanje metala može se podijeliti u nekoliko kategorija s obzirom na razlike u dinamici procesa rezanja. Podjela podrazumijeva tri glavne kategorije:

- rezanje upotrebom kontaktnih (nalijepljenih) eksplozivnih naboja,
- rezanje udarnim valovima induciranim eksplozivnim punjenjem i
- rezanje upotrebom kumulativnih eksplozivnih naboja (Rinehart and Pearson 1963).

U praksi se najviše primjenjuje rezanje upotrebom kontaktnih eksplozivnih naboja i rezanje upotrebom kumulativnih eksplozivnih naboja.

4.1. Rezanje upotrebom kontaktnih eksplozivnih naboja

Rezanje metala upotrebom kontaktnih eksplozivnih naboja poteklo je iz potreba i zahtijeva u području vojne primjene, a kasnije se postupak koristio i za civilne namjene. Proračun mase i oblika eksplozivnog naboja baziran je na iskustvenim postavkama. Svi proračuni se odnose na potrebnu masu trinitrotoulena (TNT). Ukoliko se koristi bilo koji drugi eksploziv masa eksploziva se usklađuje ekvivalentom TNT-a. Proračuni se dostupni u vojnoj literaturi. Eksplozivni naboj se postavlja direktno u kontakt sa metalom koji se reže. Pri tome šupljine, odnosno prostori između eksploziva i materijala, ispunjeni zrakom, vodom ili drugim materijalom imaju negativan učinak na postupak rezanja. Eksplozivni naboji mogu biti smješteni s jedne ili obje strane metalnog obradka. Dimenzije i masa eksplozivnog naboja ovise o dimenzijama elemenata čelične konstrukcije koji se režu. Na slici 5 prikazana je primjena plastičnog eksploziva kao kontaktni naboj za rezanje metala.



Slika 5. Primjena plastičnog eksploziva za rezanje metala

Figure 5. Application of plastic explosive for metal cutting

4.2. Rezanje upotrebom kumulativnih eksplozivnih naboja

Kumulativni eksplozivni naboji razlikuju se od ostalih naboja u mogućnosti usmjeravanja energije oslobođene detonacijom. Energiju detonacije moguće je usmjeriti izradom kumulativnog prostora pravilnih dimenzija i oblika u eksplozivnom punjenju. Ukoliko se kumulativni prostor obloži tankim slojem materijala, u pravilu metala, dodatno se pojačava djelovanje kumulativnog naboja na ciljani objekt. Metalna obloga je izvor teških molekula i povećava djelovanje kumulativnih eksplozivnih naboja koje se zasniva na kinetičkoj energiji ubrzane metalne obloge. Dodatno povećanje djelovanja kumulativnih naboja postiže se odmicanjem kumulativnog naboja na određenu udaljenost od ciljanog materijala.

Eksplozivni kumulativni naboji mogu se podijeliti s obzirom na oblik, način usmjeravanja produkata detonacije i funkciju na:

- konusne kumulativne eksplozivne naboj ili perforatore i
- linijske (linearne) kumulativne naboj ili rezače.

Konusni naboji ili perforatori namijenjeni su za perforiranje ciljanog materijala, obloga kumulativnog prostora je u obliku konusa, a energija detonacije je usmjerena u točku. Linijski kumulativni rezači namijenjeni su za rezanje, obloga je izdužena u pravcu dulje osi, a energija detonacije je usmjerena u pravac. Sposobnost djelovanja konusnog kumulativnog naboja definirana je dubinom perforacije u materijalu, a sposobnost djelovanja linijskog kumulativnog naboja sa maksimalnom debljinom materijala koji rezač može presjeći.

Za razliku od ostalih vrsta rezanja, u ovom slučaju masa materijala mete prije i poslije rezanja ostaje nepromijenjena. Karakteristike reza kumulativnih rezača:

- precizne geometrijske značajke reza,
- lokalno rezanje, materijal u okolini reza nije poremećen i
- izostanak odbacivanja dijelova konstrukcije zbog rezanja.

Prednosti linijskih kumulativnih rezača za rezanje metala u odnosu na konvencionalni način rezanja metala eksplozivom su:

- definirana dubina reza,
- precizno rezanje,
- znatno manja masa potrebnog eksploziva i
- mogu se minimirati komplicirani uravnoteženi sustavi poput čeličnih dizalica, kranova itd. (Hopfe 2001).

Čelična cijev prerezana primjenom primjenom linijskih eksplozivnih nabojâ prikazan je slikom 6.

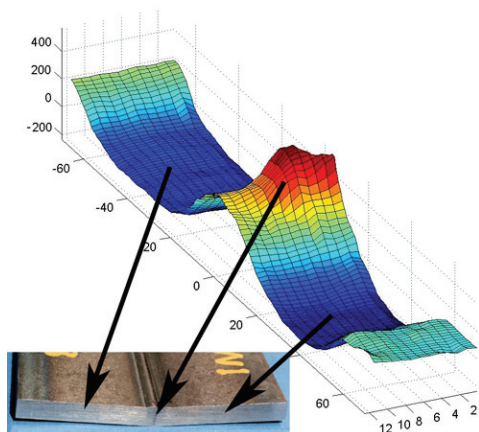


Slika 6. Čelična cijev prerezana primjenom linijskog kumulativnog rezača
Figure 6. Steel pipe cut using linear shaped charge

5. Popuštanje zaostalih napreznja eksplozivom

Deformacije nastaju prilikom zagrijavanja i hlađenja materijala. Kod nejednoliko zagrijanog metala dolazi do širenja toplog dijela, dok se hladni dio tome opire, uslijed čega nastaje plastična deformacija toplog dijela. Nakon hlađenja zagrijani dio se skraćuje, što izaziva zaostala napreznja i deformacije. Lokalno zagrijavanje metala izaziva plastičnu deformaciju kada toplinska dilatacija premašuje veličinu elastičnog produljenja. Deformacije prate sve procese zavarivanja. Općenito se može smatrati da će se lokalno zagrijano područje stegnuti pri hlađenju i izazvati deformaciju prema unutra (Duspara et al. 2011).

Na slici 7 prikazan je obradak nastao zavarivanjem na kojemu je vidljiva zaostala deformacija i dijagram raspodjele napreznja.



Slika 7. Zaostala deformacija i dijagram napreznja
Figure 7. Residual deformation and strain diagram

Zaostala napreznja i deformacije nije moguće u potpunosti spriječiti i otkloniti ali se određenim metodama prije zavarivanja, u toku zavarivanja i poslije zavarivanja mogu smanjiti njihova djelovanja tj. razina. (Duspara et al. 2011)

Metode za smanjivanje zaostalih napreznja nakon procesa zavarivanja mogu se podijeliti na:

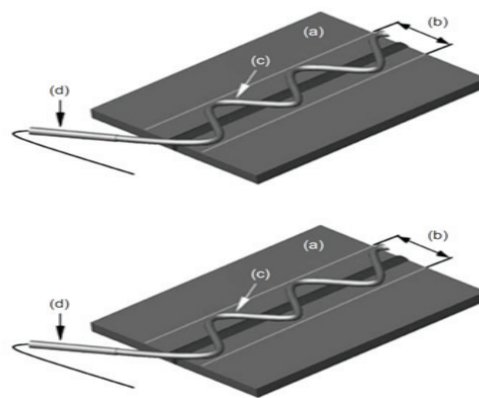
- tretiranje obradka toplinom, toplinske metode i
- mehaničko tretiranje obradka ili mehaničke metode.

Popuštanje zaostalih napreznja eksplozivom, svrstava se u mehaničke metode jer do popuštanja napreznja primarno dolazi uslijed udarnog djelovanja udarnog vala eksplozivnog punjenja, iako na obradak djeluje i detonacijom nastala toplina. Prednost metode je jednostavnost i najviše se koristi za obradke velikih dimenzija.

Eksplozivni naboj postavlja se na spoj dvaju metala i okolicu spoja. Područje na koje se eksploziv postavlja naziva se aktivna zona. Širina aktivne zone se dobiva kao zbroj širina zone plastičnih i elastično plastičnih deformacija. Nakon proračuna aktivne zone izabire se jedan od nekoliko mogućih načina postavljanja eksplozivnog nabojâ. Koristi se eksploziv u trakama ili detonirajući štapin. Pri upotrebi eksploziva u trakama, eksplozivom se prekrije čitava aktivna zona. Kad se koristi detonirajući štapin moguća su dva načina postavljanja štapina s obzirom na spoj:

- a) štapin se postavlja u obliku sinusoide i
- b) štapin se postavlja paralelno.

Mogućći postavi štapina s obzirom na spoj prikazani su slikom 8.



a) metal / metal, b) aktivna zona / active zone,
c) detonirajući štapin / detonating cord, d) detonator / detonator

Slika 8. Načini postavljanja detonirajućeg štapina (Garcia-Jacomino et al. 2010)

Figure 8. Methods of placing detonating cord (Garcia-Jacomino et al. 2010)

6. Kompaktiranje metalnih prahova eksplozivom

Metalurgija prahova je tehnologija proizvodnje metalnih izradaka načinjenih od prahova. Pri tome se razlikuju dva postupka:

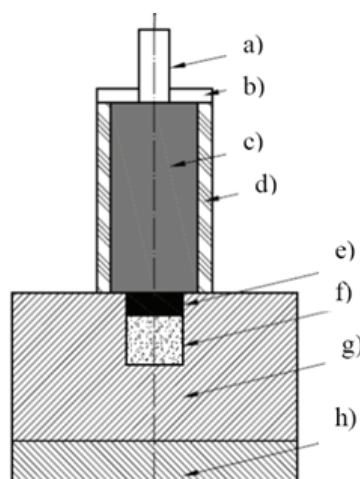
- kompaktiranje - zbijanje prahova i
- sintetiziranje - povezivanje prahova.

Kompaktiranje praha energijom eksploziva je postupak kojim se prahovi zbijaju u traženi element primjenom energije eksploziva. Pri tome je potrebno uskladiti masu eksploziva i masu te karakteristike praha koji se obrađuje. Djelovanjem udarnog vala detonacije eksploziva, smanjuje se početni volumen praha čime mu se povećava gustoća. Uspješnost procesa kompaktiranja se može izraziti kao odnos između postignute gustoće zbijenog praha ρ_p i maksimalne teoretske gustoće ρ_{MTP} koju metal prema proračunu može imati. Gustoća praha kompaktiranog eksplozivom približna je maksimalnoj teoretskoj gustoći, a svojstva metala se poboljšavaju. Za pojedine materijale to je jedini način poboljšanja fizičko mehaničkih svojstva. Za razliku od klasičnih postupaka metalurgije praha, prednost kompaktiranja eksplozivom nalazi se 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. Mogućnost primjene pojedine metode kompaktiranja određena je vrstom praha. Općenito, kompaktiranje prahova izvodi se slijedećim metodama:

- kompaktiranje primjenom udarnog klipa i
- kompaktiranje primjenom cilindra (Rinehart & Pearson 1963).

6.1. Kompaktiranje primjenom udarnog klipa

Primjenom udarnog klipa energija detonacije eksploziva prenosi se na udarni klip koji zbijaju prah u kućištu. Metoda se koristi za proizvodnju diskova velike gustoće prilikom čega se mogu koristiti jedan ili dva klipa, odnosno zbijanje materijala može biti jednostrano ili dvostrano. Ukoliko se primjenjuju dva klipa potrebna su i dva istovremeno inicirana eksplozivna punjenja. Češće se koristi postav sa jednim klipom. Negativna pojava ovog načina zbijanja je mogućnost nastanka pukotina uslijed djelovanja jakog udarnog vala u materijalu. Nastanjenje pukotina može se spriječiti dodavanjem elementa s vodom. Energija detonacije se u tom slučaju ne prenosi direktno na klip, nego preko vode. Taj način se naziva i podvodno kompaktiranje. Na slici 9 je prikazan shematski princip kompaktiranja prahova primjenom udarnog klipa.



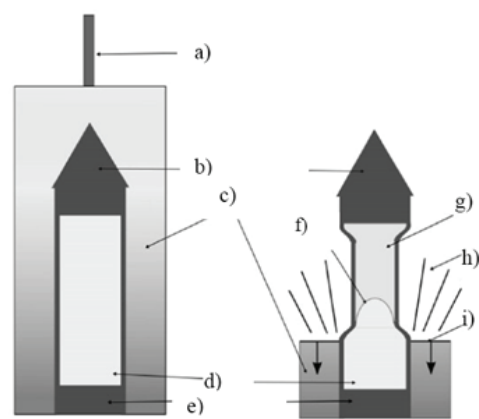
a) detontor / detonator, b) držač detonatora / detonator holder, c) eksploziv / explosive, d) kućište / case, e) klip/piston, f) prah / powder, g) kalup / mold, h) postolja / pedestal

Slika 9. Kompaktiranje praha primjenom klipa (Zohoor & Mehdipoor 2009)

Figure 9. Powder compacting with piston (Zohoor & Mehdipoor 2009)

6.2. Kompaktiranje primjenom cilindra

Sustav se sastoji od cilindra izrađenog od rastezljivog metala u koji se zatvori metalni prah s obje strane. Cilindar se oblaže slojem eksploziva, koji se inicira sa jednog kraja. Time se postiže simetrična putanja udarnog vala s obzirom na uzdužnu os cilindra. Uslijed detonacijskog udarnog vala cilindar se sabija prema centralnoj osi uzrokujući zbijanje praha. Na slici 9 dan je shematski prikaz zbijanja metalnih prahova primjenom cilindra.



a) detontor / detonator, b) gornji zatvarač / upper plug, c) eksploziv / explosive, d) prah / powder, e) donji zatvarač / lower plug, f) udarna fronta / shock front, g) zbijeni prah / compacted powder, h) produkti detonacije / detonation product, i) detonacijska fronta / detonation front.

Slika 10. Kompaktiranje praha primjenom cilindra (Farinha et al. 2009)

Figure 10. Powder compacting with cylinder (Farinha et al. 2009)

7. Povećanje tvrdoće materijala eksplozivom

Djelovanjem udarnog vala eksplozivnog naboja dolazi do promjena u mikrostrukturi i mehaničko fizičkim svojstvima metala koji se očituju i u povećanju tvrdoće metala. 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). Iznos povećanja tvrdoće metala i dubina povećanja tvrdoće ovisi o svojstvu metala i konfiguraciji eksplozivnog naboja. Povećanje tvrdoće metala djelovanjem eksplozivnog naboja postiže se na dva načina. U prvom slučaju eksplozivni naboj nalazi se u kontaktu sa metalom, a u drugom slučaju se koriste eksplozivom ubrzane metalne ploče čija energija udara povećava tvrdoću metala. Ubrzane metalne ploče koriste se kad je potrebno postići veće vrijednosti tlakova koji djeluju na metal.

Povećanje tvrdoće materijala djelovanjem eksploziva najviše se koristi za austenitni manganski čelik ili Hadfieldov čelik. Standardni Hadfieldov čelik sadrži od 1,0 do 1,4% C i od 10-14% Mn, a novije varijante u svom sastavu imaju i Cr (Hutchinson & Ridley 2006). Jedinstven je po kombinaciji visoke žilavosti i istezanja, s značajnom mogućnošću povećanja tvrdoće, te dobrom otpornosti na trošenje. Čelik se koristi u području građevinarstva, rudarstva, željeznice, naftnoj industriji, za izradu dijelova drobilica, mlinova, bagera, željezničkih pragova itd.

Uobičajeno korištena metoda povećanja tvrdoće metala izvodi se kontaktnom metodom upotrebom tankih traka eksploziva. Koristi se plastični eksploziv velike brzine detonacije i visoke gustoće. Tlakovi koji djeluju na metal iznose od 15 GPa do 20 GPa (Petrushkov 2009). Za veće iznose tlakova nužno je koristiti metodu s ubrzanim pločama. Učinak eksploziva na metal se očituje u povećanju tvrdoće materijala. Učinak ovisi o iznosu tlaka kojim eksplozivni naboj djeluje i vremenu djelovanja, odnosno o impulsu tlaka. Veličina promjene tvrdoće se značajno razlikuju sa udaljenosti od eksplozivnog naboja odnosno po dubini metala. Povećanje tvrdoće u odnosu na tlak kojim se na metal djeluje može se izraziti jednadžbom (Petrushkov 2009):

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

Gdje je :

ΔHV - porast tvrdoće po Vickersu,

HV_0 - tvrdoća po Vickersu izmjerena prije otucavanja eksplozivnog naboja,

p - tlak kojim se djeluje na metal (Pa) i

G - modul smicanja (Pa).

Na slici 11 prikazano je postavljanje eksploziva u svrhu povećanja tvrdoće metala.



Slika 11. Postavljanje eksploziva na metal (Havliček & Nesvadba 2011)

Figure 11. Powder compacting with cylinder (Havliček & Nesvadba 2011)

8. Zaključak

Energiju oslobođenu detonacijom eksplozivnog naboja moguće je uspješno primjeniti pri obradi metala eksplozivom. Većina nabrojanih postupaka se uspješno komercijalno primjenjuju. Neki od postupaka služe samo kao alternativa već postojećim konvencionalnim metodama obrade metala dok drugi postupci, poput zavarivanja pojedinih metala energijom eksploziva ili kompaktiranja pojedinih metalnih prahova nemaju alternativu i jedini su mogući način obrade pojedinih metala i metalnih prahova. Prednost ovih postupaka u odnosu na konvencionalne metode obrade metala je cijena koštanja samog postupka. Naime pri obradi metala eksplozivom nisu potrebni skupi alati i strojevi, a eksploziv kao izvor energije ima malu cijenu..

Postupci obrade metala eksplozivom se konstantno unapređuju i usavršuju. Povećava se broj metala koje je moguće obraditi, dimenzije metalnih obradaka su sve veće, a gotovi proizvodi ili poluproizvodi udovoljavaju strogim zahtjevima koji se odnose na čvrstoću i kvalitetu spoja spoja, oblik i dimenzije obradka ili karakteristike metala. Shodno tome primjena energije eksploziva pri obradi metala bilježi stalni rast te je sve veći broj industrijskih područja koja, za svoje potrebe, uspješno koriste jednu ili više metoda obrade metala primjenom energije eksploziva.

Received: 11.04.2013.

Accepted: 13.06.2013.

9. 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*, 202, 224-239.
- Akbari-Mousavi, S. A. A. & Al-Hassani, S.T.S. (2005): Numerical and Experimental Studies of the Mechanism of the Wavy Interface Formations in Explosive/Impact Welding, *Journal of The Mechanics and Physics of Solids*, 53, 2501-2528.
- Duspara, M., Mijušković, G., Kopač, J., Pavić, M. & Stoić A. (2011): Popuštanje zaostalih naprezanja metodom vibracija, 6. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje SBZ 2011, Slavonski Brod, 251-258.
- Farinha A.R., Mendesb. R., Barandab J., Calinasa R. & Vieira M. T.(2009): Behaviour of Explosive Compacted/Consolidated of Nanometric Copper Powders, *Journal of Alloys and Compounds*, 483, 235-238.
- Garcia-Jacomino J. L., Burgos Sola J., Cruz-Crespo A., Alvarez Luna M. & Garcia Arteaga J. (2010): Use of Explosives in the Reduction of Residual Stresses in the Heated Zone of Welded Joints, *Welding International* 24, (12), 920-925.
- Hatt M., (2003): Explosives Techniques Applied to Demolition. *The Journal of Explosives Engineering*, 29(3), 13-17.
- Havliček, P. & Nesvadba, P. (2011): Application of Explosive Hardening on Railway Infrastructure Parts, *Metal* 2011. 18. - 20. 5. 2011, Brno, Czech Republic
- Hopfe, M. (2001): Blasting Steel Constructions with Cutting Charges in Germany, *Sprenginfo* 2, 13-19.
- Hutchinson, B. & Ridley, N (2006): On Dislocation Accumulation and Work Hardening in Hadfield Steel, *Scripta Materialia* 55, 299-302.
- Math, M. (1999): Uvod u tehnologiju oblikovanja deformiranjem, FSB Zagreb, 183 pp., Zagreb.
- Petrushkov V.G (2009): Explosion and its Applications In Metalworking, Nova Science Publisher, 696 pp., New York.
- Povržanović, A.(1996): Oblikovanje metala deformiranjem, FSB Zagreb, 262 pp., Zagreb.
- Rinehart J.S. & Pearson. J. (1963): Explosive Working of Metals, Pergamon Press Ltd, 345pp., London.
- Strohecker, D.E., Carlson R. J., Porembka S.W. & Boulger, F. W.(1964): Explosive Forming of Metals. DMIC 203, Defence Metal Information Centre , 68 pp, Columbus, Ohio.
- Sučeska, M. (2001): Eksplozije i eksploziv - njihova mirnodopska primjena, Brodarski institut, 305 pp, Zagreb.
- Tong, Z., Li. Z., Cheng, B. & Zhang R.(2008): Precision Control of Explosive Forming for Metallic Decorating Sphere, *Journal of Materials Processing Technology*, 203, 449-453.
- Zohoor, M. & Mehdipoor, A.(2009): Explosive Compaction of Tungsten Powder Using a Converging Underwater Shock Wave, *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 4201-4206.
- Young G. (2004): Explosion Welding, Technical Growth and Commercial History, *Stainless Steel World* 2004 © 2004 KCI Publishing BV.

APPLICATION OF EXPLOSIVE ENERGY IN METALWORKING

When an explosive charge is detonate, considerable amount of energy in a very short period of time is released. Energy, released in this way, is used for performing various kinds of useful work. Most explosives are consumed to obtain mineral raw materials in the mining industry and for various excavations in the construction industry.

One of the specific areas of application explosive energy is an area of explosive metalworking. Most used metal working methods are:

- explosive metal welding,
- explosive metal forming,
- explosive metal cutting or perforating,
- explosive residual stress relieving,
- explosive powder compaction and,
- explosive metal hardening.

Most of the listed methods are successfully commercially applied.

This paper presents an overview of the existing explosive metalworking methods. Methods are explained and comparative advantages in comparison to conventional metalworking methods are given.