Mr Vlado Radić,
major, dipl. inž.

OBLIKOVANJE EKSPLOZIJOM

Rezime:

U radu je prikazana primena energija eksplozije radi dobijanja specifičnih oblika, koji se drugim konvencionalnim metodama i tehnologijama ne mogu ostvariti, ili je njihovo dobijanje povezano sa velikim poteškoćama, skupom i složenom opremom.

Cilj rada je da ukaže na karakteristike kojima se tehnologija oblikovanja eksplozijom odlikuje i doprinese proširenju saznanja o mogućnostima dobijanja konkretnih delova u industriji prerade metala.

Ključne reči: energija eksplozije, vazdušno i podvodno oblikovanje, oblikovanje u matrici, operacije oblikovanja.

SHAPING BY EXPLOSION

Summary:

Presentation of application of explosion energy for the attainment of specific shapes which either cannot be obtained by application of existing conventional methods and technologies or can be obtained only with great difficulties and utilization of expensive and complex equipment.

The purpose of the article is to point out characteristics of the technology of shaping by explosion, and to make a contribution to enrichment of knowledge concerning the possibilities of obtaining concrete parts or elements in the metal working industry.

Key words: energy of explosion, air and underwater shaping, shaping in matrix, shaping techniques.

Uvod

Eksploziv se prvi put koristio za oblikovanje metala 1888. godine, kada je došlo do primene graviranja čelične ploče blokom eksploziva ili postavljanjem šablona između eksploziva i ploče. Sa izuzetkom nekoliko izdvojenih primena, oblikovanje eksplozijom bilo je malo zastupljeno sve do sredine pedesetih godina i napretka svemirske tehnologije, koja je promenila potrebe za delovima male zapremine kompleksnih

oblika. Često su delovi bili veliki i oblikovani od materijala koji su se konvencionalnim postupcima mogli teško obrađivati.

Oblikovanje eksplozijom omogućava izradu delova velikih gabarita bez investiranja u mašinsku opremu i kalupe (matrice) koji su skupi i zahtevaju određeno vreme za njihovu izradu. Zbog toga je u toku jedne decenije iskustvo u oblikovanju eksplozijom rapidno poraslo. Smanjenjem aktivnosti u razvoju kosmičke tehnike, ovakav

način obrade se manje primenjuje, ma-
da danas mnoge kompanije i vojne us-
tanove nastavljaju da koriste obliko-
vanje eksplozijom kao regularni (re-
dovni) proces.

Mehanička svojstva komponenata oblikovanih eksplozijom

Mehanička svojstva materijala po-
sle oblikovanja eksplozijom ne mogu se
opisati jednim generalnim (opštim) pri-
kazom. Međutim, poznato je da mnogi
materijali iskazuju povećanje čvrstoće
u odnosu na iste materijale koji su iz-
loženi ekvivalentnim deformacijama
ostvarenim konvencionalnim metoda-
ma. Većina običnih ugljeničnih i ner-
đajućih čelika, upravo se tako pona-
ša. Povećanje čvrstoće, uporedo sa uni-
formnom raspodelom naprezanja, obi-
čno karakteriše komponente oblikova-
ne eksplozijom.

Legure aluminijuma se pri obliko-
vanju eksplozijom praktično ne me-
njaju. Njihova otpornost na lom osta-
je nepromenjena, a povećanje granice
tečenja je vrlo malo.

Naglo ojačavanje nerđajućih čeli-
ka, koji su austenitni na sobnoj tempe-
raturi, a martenzitni kada se deformi-
šu, ima za posledicu porast otpornosti
na lom, kao i granice tečenja nakon ob-
likovanja eksplozijom. To povećanje
čvrstoće je još izrazitije kada se de-
formacija ostvaruje na kriogenim
(niskim) temperaturama.

Izvršena je uporedna analiza efekta
oblikovanja eksplozijom i konvencio-
nalog oblikovanja tri materijala — ni-
skougljeničnog čelika, nerđajućeg če-
lika i niskougljeničnog mikrolegiranog
čelika. Da bi se dobila polusfera veli-
kog prečnika korišćena je ploča deb-
ljine 12 mm od navedenih materijala i
primenjeno hladno presovanje i obli-
kovanje eksplozijom. Nakon opširnih
ispitivanja izvedeni su sledeći zaključ-

ci za sva tri materijala posle oblikova-
nja eksplozijom:

— na spoljašnjoj površini eksplo-
zivno oblikovanih delova manifestuje
se povećanje naprezanja na sabijanje,
dok je pojava naprezanja na izvlačenje
prisutna samo na nekim mestima is-
presovanih delova;

— ekstremni rad ojačavanja pri-
sutan je po ivicama ispresovanih polu-
sfera, dok je rad ojačavanja po čitavoj
eksplozivno oblikovanoj polusferi rav-
nomerno distribuiran;

— žilavost je jednaka, kako za is-
presovane delove, tako i za delove ob-
likovane eksplozijom;

— koroziona otpornost i opadanje
žilavosti približno je jednako u oba
slučaja oblikovanja materijala.

Rezultati ispitivanja pokazuju da
su eksplozijom oblikovani delovi istih
mehaničkih svojstava potencijalno su-
periorniji u odnosu na hladno presova-
ne, jer imaju uniformniju raspodelu
naprezanja.

Sistemi za vazdušno i podvodno oblikovanje eksplozijom

Idealni sistem za oblikovanje ek-
splozijom predstavlja kombinaciju je-
dnostavnosti i lakoće izvršenja opera-
cije, što je odlika vazdušnih sistema, sa
prednostima u pogledu distribuiranja
energije, sigurnosti i kontroli zvuka
što je karakteristično za podvodne si-
steme.

Sistemi za vazdušno oblikovanje
primenjuju se kada je veličina eksplo-
zivnog punjenja mala, operacija se iz-
vodi u zoni udaljenoj od naseljenih me-
sta ili kada priroda operacija isključu-
je prisustvo vode. Vazdušni sistem je
detonaciona komora u kojoj se izvodi
operacija oblikovanja. Komora mora
biti izrađena tako da izdrži snagu ek-
splozije, izoluje od zvučnog talasa de-
tonacije i poseduje uređaj za odstrani-
vanje gasnih produkata eksplozije. U-

mesto komora mogu se koristiti nadzemni bunker i podzemne jame, pećine, i sl. Osnovni uslov jeste da komore moraju izdržati pritisak koji se generiše aktiviranjem eksplozivnog punjenja.

Maksimalni dinamički pritisak generisan u komori određuje se prema formuli:

$$P = \frac{W \cdot K}{V} \quad (1)$$

gde je:

- P — maksimalni pritisak u psi (6,894 MPa),
- W — masa eksploziva u lb (0,4536 kg),
- V — zapremina sfere oko punjenja u ft³ ($2,83 \cdot 10^{-2}$ m³),
- K — konstanta za upotrebljeni eksploziv (5000 do 15000 za eksplozive čija je brzina sagorevanja 2000 do 9000 m/s).

Treba napomenuti da je formula (1), kao i naredne formule preuzeta iz literature sa Zapada sa izvornim jedinicama koje nisu u Internacionalnom sistemu mernih jedinica. Zbog toga je potrebno izvršiti konverziju sa odgovarajućim koeficijentima, kojima se prelazi u SI sistem.

Ukoliko komora nije sfernog oblika, uzima se u obzir zapremina sfere čiji je radijus jednak rastojanju do najbližeg zida komore.

Ako to proizvodna oprema dozvoljava, povoljno je locirati operacije oblikovanja eksplozijom izvan naseljenih mesta. U tom slučaju operacija će biti izložena uticaju vremena kao meteorološkog činioca, i ne može se izvršiti ako vreme nije pogodno. Ova vrsta opreme je opravdana samo ako su eksplozije malog intenziteta.

Sistemi za podvodno oblikovanje zahtevaju veliku količinu vode (smestene u odgovarajućem rezervoaru), i sposobni su da izdrže ponovljeno dejstvo talasa generisanog eksplozijom.

Ovaj metod rada pogodan je za razne vrste operacija. Poteškoće stvara potreba za velikom količinom vode i mala efikasnost smanjenja intenziteta zvuka (kada je eksploziv potpuno potopljen u bazen sa vodom).

Projekat rezervoara za vodu ili bazena za oblikovanje mora biti pažljivo i detaljno analiziran, jer je poznato da se samo jedan deo energije eksplozije usmerava u pravcu dela koji se oblikuje, dok se preostali deo energije oslobađa u vodi kao udarni talas, koji se prostire radijalno od punjenja. Prilikom projektovanja rezervoara za podvodno oblikovanje eksplozijom koristi se faktor sigurnosti 4. Kao materijali za izradu rezervoara najčešće se koriste meki čelici.

Oblikovanje u matrici i bez matrice

Kada se razmatra oblikovanje eksplozijom, eksplozivno punjenje se koristi za ubrzavanje metalne ploče radi ostvarenja kontakta sa matricom za preoblikovanje. Ova vrsta oblikovanja postala je popularna i verovatno je najviše korišćena. Međutim, koncept slobodnog oblikovanja ili oblikovanja bez

Sl. 1 — Oblikovanje eksplozijom u zatvorenoj matrici

- 1 — rezervoar, 2 — eksplozivno punjenje,
- 3 — držač, 4 — pripremak, 5 — matrica,
- 6 — vakuum

matrice ima, takođe, određenu zastupljenost, a koristi se kada se ne traži velika tačnost izrađenih delova.

Oblikovanje korišćenjem matrice šematski je prikazano na slici 1. Matrica se izrađuje prema delu koji treba oblikovati. Metalni pripremak se postavlja iznad matrice, a udubljenje (šupljina) ispod priprema je prazno kako bi se eliminisala adijabatska kompresija, koja može rezultirati oštećenjem priprema i matrice. Matrica i pripremak su potopljeni u medijum (sredstvo) kojim se izvršava transfer energije, a to je najčešće voda. Eksplozivno punjenje se postavlja na unapred određenu distancu (rastojanje) iznad sklopa. Eksplozivno punjenje, aktiviranjem generiše udarni talas i gasni mehur. Udarni talas, koji je osnovni izvor energije, stvara snažan impuls pritiska u vremenskom intervalu od 5 do 10 μ s. Impuls pritiska prenosi opterećenja na pripremak, koji se kreće ka matrici. Fotografska posmatranja su pokazala da se pripremak oblikuje za 1 do 2 μ s. Držač je potreban radi sprečavanja ugaonih (ivičnih) nabora i deformacija, kada deformisani pripremak počinje kretanje ka matrici.

Oblikovanje u zatvorenim maticama rezultira velikom tačnošću izrađenih simetričnih delova. Tolerancije delova proizvedenih na ovaj način jednake su ili bolje nego tolerancije sličnih delova oblikovanih konvencionalnim metodama.

Oblikovanje bez matrice, sa punjenjem na *stand-off* rastojanju, obično se naziva »slobodno oblikovanje«, a primenjuje se kada se ne zahteva velika tačnost simetričnih delova. Oblikovanjem bez matrice konačni oblik dela determinisan je veličinom i položajem eksplozivnog punjenja, zajedno sa otpornošću uzorka prema deformaciji. Slobodno oblikovanje šematski je prikazano na slici 2.

Oblikovanje se obavlja preko šupljine, čija je funkcija samo da kontro-

liše ivičnu formu oblikovanog dela. Držači se moraju koristiti radi sprečavanja nabiranja i deformacije na krajevima gde se pripremak izdužuje. Ova vrsta oblikovanja pogodna je za eliptične, sferne ili hiperbolične oblike. Ona

Sl. 2 — Eksplozivno slobodno oblikovanje u otvorenoj matrici

1 — rezervoar, 2 — eksplozivno punjenje, 3 — pripremak, 4 — držač, 5 — matrica

se, takođe, koristi za preoblikovanje teških ploča pre mašinske obrade, tako da je potrebno odstraniti manju količinu materijala kako bi se dobio traženi oblik.

Drugi metod oblikovanja bez matrice ili slobodno oblikovanje koristi eksplozivno punjenje koje je u bliskom kontaktu sa pripremkom. Metod je definisan preko količine, oblika, vrste i distribucije punjenja, u vezi sa faktorima medijuma koji određuju veličinu, distribuciju i vreme dejstva ulazne energije na pripremak.

Slobodno oblikovanje korišćenjem eksplozivnog punjenja u bliskom kontaktu sa pripremkom šematski je prikazano na slici 3.

U ovom slučaju nema potrebe za držačima jer eksploziv, postavljen preko ivica priprema, »izvršava« njihovu funkciju. Eksplozivno punjenje je

razmešteno preko priprema i varira u količini i rastojanju, kako bi se ostvario specifičan ulaz energije za ostvarenje zahtevane deformacije.

Sl. 3 — Eksplozivno slobodno oblikovanje korišćenjem punjenja u bliskom kontaktu

1 — rezervoar, 2 — eksplozivno punjenje, 3 — pripremak, 4 — matrica

Kada se eksplozivom oblikuju homogeni radni delovi (pripremcu) jednake debljine, konačan oblik zavisi od sledećih činilaca:

- količine eksploziva,
- vrste eksploziva,
- oblika eksplozivnog punjenja,
- položaja eksploziva,
- medijuma (sredstva) koji se koristi za transfer energije.

Količina eksploziva, zajedno sa medijumom, određuje ukupnu energiju koja će delovati na pripremak. Zbog uticaja pet različitih navedenih činilaca ne postoji odgovarajuća formula koja će pomoći u preciznom određivanju količine eksploziva za korektno slobodno oblikovanje konkretnog dela. Zbog toga se moraju izvršiti eksperimenti kako bi se dobila zahtevana ekspanzi-

ja. Prema tome, količina eksploziva direktno će zavisiti od ostala četiri faktora. Relativna snaga i brzina sagorevanja određeni su vrstom eksploziva. Zajednička karakteristika brizantnih eksploziva je brzina sagorevanja od 2600 do 8060 m/s, i generisanje pritiska od 12 do 25 GPa.

Oblik eksplozivnog punjenja pomaže da se odredi profil fronta energije koji se predaje površini radnog dela, pa na taj način doprinosi dobijanju konačnog oblika.

Položaj eksploziva, koji podrazumeva stand-off rastojanje, takođe određuje oblik i veličinu fronta energije koja se predaje površini radnog dela. Ova promenljiva se, više nego ostale, može koristiti za efikasno ostvarivanje različitih profila u slobodnom oblikovanju.

Za transfer energije eksplozije veliki značaj ima medijum u kojem se ostvaruju potrebni uslovi oblikovanja. To je, najčešće, voda, ali se vrlo uspešno mogu koristiti i druge tečnosti, vazduh i čvrsta tela, kao što je plastika ili vosak (parafin).

Analiza konačnog oblika u slobodnom oblikovanju eksplozijom

Kao što je navedeno, konačna forma radnih delova dobijenih slobodnim oblikovanjem eksplozijom zavisi od pet činilaca. Najuticajniji od njih jeste položaj eksplozivnog punjenja. Mnogo je eksperimenata izvršeno da bi se proučio taj parametar oblikovanja, a forme dobijene slobodnim oblikovanjem sa variranjem *stand-off* rastojanja prikazane su na slici 4.

Profili slobodno oblikovanih delova očigledno su različiti kada se varira *stand-off* rastojanje. Kao primer kontrole konačnog oblika dela može poslužiti oblikovanje posude korišćenjem tehnike eksplozivnog punjenja u

bliskom kontaktu sa uzorkom. Pripremak je izrađen u obliku ploče od ugljeničnog čelika dužine 2,5 m i širine 0,8 m. Debljina ploče u centru, pre oblikovanja, iznosi 25 mm i bila je ma-

tokom oblikovanja ne deluju sile sužavanja koje su posledica poremećaja matrice.

Parametri i analiza oblika matrice

Eksplzivno oblikovanje je ekonomično zbog toga što je potrebna samo jedna komponenta — matrica. Ta komponenta mora se pažljivo projektovati kako bi izdržala opterećenje koje se prenosi na deo koji se oblikuje. Zbog toga što energija udarnog talasa dovodi do vrlo velikih naprezanja uzorka, zajedno sa materijalom matrice, oštri uglovi ili zarezi moraju se eliminisati. Faktor sigurnosti 4 je obično dovoljan za prevenciju oštećenja izazvanih udarnim talasima.

Selekcija materijala je, takođe, vrlo bitna. Korišćenje materijala sa vrlo velikim vrednostima naprezanja na sabijanje (pritisak) ili izvlačenje, optimiziraće performanse i smanjiti troškove.

Kada se određuje čvrstoća matrice najpre se mora proračunati ili proceniti maksimalni pritisak potreban za oblikovanje komponente. Ako se zna maksimalni pritisak, konvencionalnim metodama analize čvrstoće mogu se odrediti dimenzije matrice.

U projektovanju matrice i kasnijim analizama važna je i vrsta opterećenja koje će podneti matrica. Opterećenje se ispoljava preko oblika dela koji treba oblikovati i načina na koji se postavlja eksplozivno punjenje.

Za određivanje maksimalnog pritiska, sile koje se generišu od eksplozivnog punjenja mogu se proceniti iz osnovnih zakona fizike. Problem sa primenom tih zakona jeste što kratko vreme odvijanja procesa onemogućava ili otežava merenje parametara koji određuju primenu zakona. U eksperimentima je konstatovano da se pritisak,

Sl. 4 — Oblici dobijeni korišćenjem identičnog eksplozivnog punjenja, ali sa promenom stand-off rastojanja

1 — eksplozivno punjenje, 2 — izgled slobodnog oblikovanja elementa

šinski zakošena na 6 mm od ivice. Najveća dubina posude bila je u centru i iznosila je 114 mm. Posuda je u svim tačkama bila sferična, sa radijusima preseka sfere koji su varirali od 34 do 310 mm. Za dobijanje zahtevanog oblika, eksplozivno punjenje je precizno pozicionirano iznad uzorka.

Distribucija deformacija u eksplozivno slobodno oblikovanom delu vrlo je uniformna, pre svega zbog toga što

generisan pri podvodnoj eksploziji, smanjuje na regularan način sa promenom brzine sagorevanja i rastojanja. Ta pojava za tačkasto punjenje, može se opisati sledećom jednačinom:

$$P = \sqrt{6,9 V} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1,13} \cdot 10^2 \quad (2)$$

gde je:

- P — maksimalni pritisak u psi (6,894 MPa),
- V — brzina sagorevanja eksploziva (m/s),
- W — masa eksploziva u lb (0,4536 kg),
- R — *stand-off* rastojanje u ft (0,3048 m).

Mada se mnoge metode za određivanje maksimalnog početnog pritiska baziraju na zahtevima energije, jednačina Stroheckera omogućava da se dobije zadovoljavajuća korelacija u odnosu na iskustveni rad u operacijama slobodnog oblikovanja:

$$d = \sqrt{D \left(\frac{E}{2St} \right)} \quad (3)$$

gde je:

- d — dubina izvlačenja u in (0,0254 m),
- D — prečnik posude koja se izvlači u in (0,0254 m),
- E — energija po jedinici površine u psi (6,894 MPa),
- S — dinamička granica tečenja materijala priprema u psi (6,894 MPa),
- t — debljina polaznog materijala u in (0,0254 m).

Jednačina (3) daje potrebnu osnovu projektantu i tehnologu za oblikovanje, a precizno određivanje veličine eksplozivnog punjenja obavlja se eksperimentalnim putem.

Površine matrice treba da budu kvalitetno obrađene, što je zahtev i za površine konačnog dela, jer se površina matrice reprodukuje u svakom detalju na konačnom delu. Kada se koristi držač, on mora imati dovoljnu čvrstoću kako bi onemogućio nabiranje uzorka na krajevima.

Poslednji parametar koji se detaljno razmatra u projektovanju matrice jeste selekcija materijala, gde su važni zahtevi tačnosti, obrađenosti, postojanosti i jednostavnosti rukovanja. Tamo gde se zahteva dug vek, velika tačnost i kvalitetna završna obrada, najbolji rezultati postižu se primenom termički obrađenih legiranih čelika. Čelici za matrice se termički obrađuju do maksimalne vrednosti tvrdoće od 50 HRC.

Kirksite, legura na bazi cinka koja se topi na 380°C, ima široku primenu u izradi matrica za eksplozivno oblikovanje. Ova legura ima vrednost kritičnog naprezanja na istezanje 241 MPa, i kritično naprezanje na sabijanje je 517 MPa. Koristi se kada je nivo opterećenja na matricu mali i kada produkcija ne prelazi 100 komada. Materijal se koristi prvenstveno zbog dobrih karakteristika na niskim temperaturama.

Drugi materijali koji se uspešno koriste za izradu matrica su ojačani beton — za delove male zapremine i male tačnosti i gips — kada se izrađuje samo jedan komad. Matrice od kompozitnog materijala, kao što su epoksi obloge na betonu i legiranom čeliku, takođe se vrlo uspešno primenjuju.

Oblikovanje kupola i elemenata sfernih oblika

Mnogi radovi bili su usmereni ka dobijanju kupolnih i sfernih oblika eksplozijom, uglavnom zbog simetrije delova. Između brojnih pretpostavki

kako to ostvariti, najvažnije su sledeće:

- oblikovanjem kružnih priprema u zatvorenoj matrici,
- slobodnim oblikovanjem kružnih priprema korišćenjem jednostavnih podupirača na ivicama,
- kalibrisanjem.

Izbor metoda zavisi od sledećih činilaca:

- zahteva dimenzionalne tačnosti,
- sposobnosti oblikovanja materijala,
- raspoloživosti objekata za izvršenje operacije.

Kupole male dubine eliptičnog, sfernog ili drugih oblika, sa velikom dimenzionalnom tačnošću, mogu se izrađivati u zatvorenim matricama. Takav sistem matrica prikazan je na slici 1. Za postavljanje eksploziva koristi *stand-off* metod. Oblikovanje se može izvršiti iz jednog koraka ukoliko ukupna deformacija uzorka nije veća od granice loma. Ako je deformacija veća, kupola se može oblikovati u većem broju koraka sa termičkom obradom između svakog koraka. Metod zatvorenih matrica koristi se u situacijama kada se delovi izrađuju sa velikom dimenzionalnom tačnošću.

Slobodno oblikovanje korišćenjem jednostavnih podupirača na ivicama, prikazano na slici 2, najčešće je korišćen metod eksplozivnog oblikovanja eliptičnih i sfernih kupola. Na taj način dobijaju se delovi manje dimenzionalne tačnosti ali različitih oblika, što je vrlo važno za mnoge oblasti primene. Taj metod se, takođe, koristi za preoblikovanje kupola velike debljine, koje se kasnije konačno obrađuju kako bi se ostvarile zahtevane tolerancije. Kao i kod oblikovanja u zatvorenim matricama, deo se može oblikovati u jednom ili više koraka.

Korišćeno eksplozivno punjenje i njegov položaj su kritični kada se ku-

pole slobodno oblikuju, konačan oblik dela zavisi od oblika eksplozivnog punjenja i *stand-off* rastojanja.

Metodom eksplozivnog punjenja u bliskom kontaktu sa pripremkom moguće je, verovatno, postići najtačniji oblik dela. Rezultujući oblik može se kontrolisati preciznim postavljanjem eksploziva. Tim metodom eliminiše se potreba za mehaničkim držačima na ivicama uzorka.

Sledeći metod eksplozivnog oblikovanja sfernih kupola veće dubine sastoji se u preoblikovanju u cilindrične, konusne ili ravne odlomke (sekcije), kao što je prikazano na slici 5. Prednost ovog metoda je u mogućnosti da se dobiju kupole veće dubine.

Sl. 5 — Oblikovanje sfernih kupola preoblikovanjem u segmente

1 — matrica, 2 — eksplozivno punjenje, 3 — preoblikovani segmenti, 4 — donji disk

Metod koji je razvio Patel pogodan je za oblikovanje hemisferičnih ili sferičnih rezervoara od pojedinačnih umetaka koji imaju jednaku zakrivljenost. Umeci se mogu međusobno spajati zavarivanjem ili zakivanjem kako bi se oblikovala čitava sfera, što je prikazano na slici 6.

Ovakav način proizvodnje dozvoljava da se eksplozivno oblikuju vrlo velike sferne kupole. Rezultati izvršenih eksperimenata pokazali su da sferni rezervoar za tečnosti — prirodni gas

poluprečnika 18 m, može da se dobije ovim metodom od legure aluminijuma (američka oznaka 6061-T6).

Sl. 6 — Sferna kupola sastavljena iz segmenata

Oblikovanje cevastih komponenti

Pored oblikovanja kupola ovim postupkom se često dobijaju posebni oblici ispupčenja na tačno određenim delovima cevi, što se izvodi u zatvorenim matricama, jer se tako mogu ostvariti uske tolerancije. Sistem za eksplozivno oblikovanje — zavarivanje cevi prikazan je na slici 7.

Kada se cevi eksplozivno oblikuju, eksplozivno punjenje se postavlja duž osne linije cevi, što je vrlo kritično. Ako je punjenje veće dužine, postavljaju se određeni odstojnici od tankog materijala na malim rastojanjima, kako bi osigurali centričnost punjenja unutar cevi. Kada je eksplozivno punjenje centrirano, cev se popunjava izabranim medijumom koji prenosi energiju (najčešće voda).

Mada slobodno oblikovanje cilindara nije praktično za proizvodnju jednostavnih sistema, neki duplex ili složeniji sistemi zahtevaju korišćenje slo-

bodnog oblikovanja. Kritični parametri, kao što su maksimalna deformacija loma, eksplozivno punjenje, brzina deformacije i ostali parametri procesa, mogu se odrediti rendgenografskim posmatranjem cilindara izrađenih od različitih materijala.

Ovakav proces oblikovanja omogućava da se ostvari visokokvalitetna proizvodnja. Druga primena oblikovanja cevi, koja se široko koristi, jeste za ekspanziju krajeva cevi izmenjivača toplote. Postupak su opisali Berman i Schroeder, i kategorisan je kao dalja

Sl. 7 — Oblikovanje cevastih komponenti eksplozijom

1 — detonator, 2 — detonacioni front, 3 — matrica, 4 — detonirajući štapin, 5 — oblikač, 6 — zavarena i oblikovana duplex cev, 7 — oblikovana cev

aplikacija oblikovanja eksplozivnim punjenjem u bliskom kontaktu, pošto se rezultujući oblik može regulisati položajem eksplozivnog punjenja i oblikom medijuma.

Medijum koji se često koristi je polietilen, a eksploziv je detonirajući štapin. Eksploziv prenosi lokalnu energiju celokupnom medijumu, odakle se dalje lokalno prenosi na cev. Polietilen je izabran kao medijum za tu vrstu oblikovanja zbog toga što ostavlja mali talog, fleksibilan je i može se prilagoditi velikim deformacijama bez preloma, efikasno ublažava udarni talas, sprečava lom cevi i ima veliku gustinu, što je važno za prenos pritiska na cev. Detonirajući štapin se koristi kao eksploziv zbog njegove otpornosti, niske cene i sigurnog rukovanja.

Ovaj proces uspešno je korišćen u industriji za proširenje krajeva cevi u izmenjivačima toplote. Snažna ekspanzija uglavnom se ostvaruje zbog minimalne hladne deformacije cevi.

Eksplozivno oblikovanje se koristi za dobijanje konusnih oblika cevovodnih reduktora. Reduktori se izrađuju tako da se poprečni presek cevovoda postepeno menja na odgovarajućoj dužini. Eksplozivno oblikovanje tih delova predstavlja ekonomičnu alternativu, pošto je posebno pogodna za koroziorno postojane legure, gde porast zrna i segregacije konstituenata predstavljaju potencijalne probleme. Oblikovanje reduktora eksplozijom slično je oblikovanju ostalih cevastih delova.

Iz obavljenih eksperimenata može se zaključiti da eksplozivno oblikovanje reduktora cevi cevovoda ima ekonomske prednosti tamo gde se zahteva relativno nizak kvalitet i kada je polazni materijal skup. Materijali koji poseduju dovoljnu dinamičku duktilnost pogodni su za konusno oblikovanje. Različitost konfiguracija koje se mogu ostvariti oblikovanjem iz cevni pripremaka uglavnom je ograničena. Op-

rema koja se zahteva za ovu vrstu eksplozivnog oblikovanja vrlo je jednostavna.

Različite operacije oblikovanja

Postoje brojne aplikacije eksplozivnog oblikovanja koje se ne koriste često, ali zaslužuju određenu pažnju. Jedna od tih operacija jeste eksplozivno autofretovanje, koje se može primeniti u proizvodnji cevi topa. Pri ovom postupku energija eksplozije koristi se za ekspanziju čelične cevi centrirane unutar cevi topa. Voda služi kao medijum za prenos impulsa pritiska, a za rad se može koristiti eksploziv tipa *slurry*.

Slična primena eksplozivnog oblikovanja je u proizvodnji dupleks cevi velikog prečnika. Za izvršenje nuklearnih eksperimenata bilo je potrebno napraviti dupleks cev spoljašnjeg prečnika 127 mm. Cevi u sklopu imale su debljinu zidova 9,5 mm, a kompletna cev bila je dugačka 12 m. Zahtevano je da između cevi postoji radijalni zazor do 0,076 mm po čitavoj dužini. Proizvodnja eksplozijom je odabrana zbog toga što je deformacija na hladno minimalna, očuvaju se svojstva materijala i što je cena drugih metoda za izradu zahtevanih dupleks sklopova bila mnogo veća. Dupleks cev oblikovana je tako što je unutrašnja cev umetnuta u spoljašnju i takav sklop postavljen vertikalno. Pre spajanja eksplozijom, cevi su spolja zavarene na donjem kraju, a unutrašnja cev je napunjena vodom. Eksplozivno punjenje detonirajućeg štapina centrirano je čitavom dužinom unutrašnje cevi, a eksplozija je inicirana sa gornje strane sklopa.

Mogućnost dobijanja tripleks prstenova, koji se najpre eksplozivno plakiraju, a zatim primenom oblikovanja

eksplozijom prevode u zahtevani oblik i dimenzije prikazana je na slici 8.

Razvijena je i tehnika transformacije austenitne kristalne strukture ne-

Sl. 8 — Oblikovanje ili izvlačenje eksplozijom hemisferičnih oblika iz eksplozivno plakirane tripleks ploče

1 — eksplozivno punjenje, 2 — multilaminatni (triplex) pripremak, 3 — multilaminatni prsten isečen nakon oblikovanja eksplozijom

rđajućih čelika u vrlo čvrste martenzitne materijale, deformisanjem pomoću eksplozivnog oblikovanja. Austeni-

tni nerđajući čelik je duktilan materijal u termički neobrađenom stanju, lako se zavaruje i oblikuje. Deformacija kojom se transformiše metastabilni austenit u vrlo čvrsti martenzit zavisi od hemijskog sastava materijala i temperature njegove transformacije. Berman je opisao eksperimente u kojima su od nerđajućeg čelika izrađeni cilindri tankih zidova, prečnika oko 150 mm. Cilindri su eksplozivno slobodno oblikovani na kriogenim temperaturama, posle čega su postavljeni u matricu na temperaturi okoline. Ukupna deformacija tokom eksperimenata varirala je od 12,8 do 20,3%. Cilindri su testirani na lom hidrauličkim pritiskom, gde su postignuti vrlo dobri rezultati.

Taj metod je pogodan za proizvodnju cilindara male mase ili sudova pod pritiskom. Takođe, moguće je koristiti ovu tehniku i za dobijanje panela velike čvrstoće, oblikovanjem ravnih ploča.

Zaključak

U ovom radu razmatran je samo jedan deo mogućnosti budućeg korišćenja eksplozivnog oblikovanja gde je na raspolaganju gotovo neograničena energija. Adekvatno budućim potrebama povećavaće se i potrebe za novim, unikalnim proizvodnim tehnikama — tehnologijama. Ne treba se nadati da će oblikovanje eksplozijom postati dominantan metod u proizvodnji, ali nastaviće se popunjavanje praznina u potrebama za ograničenim brojem komponentata koje se oblikuju na nekonvencionalan način.

Budućnost operacija obrade materijala primenom energije eksplozije zavisice, kao i dosada, od kreativnosti korisnika. Za *stand-off* operacije, koje su alternativa konvencionalnim procesima, projektanti traže prednosti u smanjenju vremena i troškova izrade,

kao i mogućnosti dobijanja kvalitetnijih proizvoda unikalnih konfiguracija i osobina. Kontaktne operacije nisu vi-

še samo alternativne metode, već omogućavaju aktivnosti koje se ponekad i ne mogu drugačije izvesti.

Literatura:

- [1] Zernov, L.: High Velocity Forming of Metals, Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc., 1964.
- [2] Van Wely, F. E.: Comparison between the Influence Formability of Metals, ASTM Report No. SP62-09, 4th International Conference of the Center for High-Energy Forming, Vail, Colorado, 1973.
- [3] Blazynski, T. Z.: Explosive Welding, Forming and Compaction, Applied Science Publishers, London and New York, 1983.
- [4] Murr, L. E.: Shock Waves for Industrial Applications, Noyes Publications, New Jersey, 1988.
- [5] Rinehart, J. S., Pearson, J.: Behavior of Metals Under Impulsive Loads, Amer. Soc. Metals, Cleveland, Ohio, 1954.
- [6] Meyers, M., Murr, L. E.: Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals, Plenum, New York, 1981.
- [7] Alimov, O. D., Manžosov, V. K., Eremjanc, V. E.: Udar. Rasprostranenie voln deformacije v udarnyh sistemah, Nauka, Moskva, 1985.
- [8] High Velocity Deformation of Solids, IUTAM Symposium, Tokyo, Springer Verlag, Berlin, 1978.
- [9] Mechanical Behavior of Materials Under Dynamic Loads, Springer Verlag, Berlin, 1968.
- [10] Turuta, N. U., Lučko, I. A., Poplavskij, V. A.: Vzryv i ego mirnie professii, Naukova dumka, Kiev, 1982.