Dr Vlado Radić,
potpukovnik, dipl. inž.
Vojnotehnički institut VJ,
Beograd

UTICAJ ZAKRIVLJENOSTI CEVI NA OSLOBAĐANJE ENERGIJE U ZONI SPOJA PRI ZAVARIVANJU EKSPLOZIJOM

UDC: 621.791.1.051

Rezime:

Zavarivanje eksplozijom osnosimetričnih komponenti, generalno u cevastom cilindričnom obliku, varira od mono i višemetalnih dupleks ili tripleks cilindara, preko ostalih sistema do sofisticiranih kompozita u pogledu materijala i geometrije. Te komponente se primenjuju od antikorozivnih i termički otpornih sistema koji se koriste u hemijskoj i petrohemijskoj industriji, nuklearnim postrojenjima, u avioindustriji, do lakih i čvrstih menjivača toplote, kontejnera pritiska, itd.

Ključne reči: zavarivanje eksplozijom, cevi, energija, spoj.

INFLUENCE OF TUBES CURVE ON ENERGY DELIVERING IN BONDING REGION DURING EXPLOSIVE WELDING

Summary:

Explosively welded axisymmetric components generally in the tubular cylindrical form, vary from mono- and multi-metallic duplex and triplex cylinders, through other systems, to materially and geometrically sophisticated composites. Applications of these components range from anti-corrosive and heat resisting systems used in chemical industry, oil installations and nuclear plants, to light and strong heat exchangers and pressure containers.

Key words: explosive welding, tubes, energy, bond.

Uvod

Zahtevi za materijalima koji mogu da podnesu visoke pritiske, temperature i izuzetno visoka dinamička opterećenja opredelili su primenu mnogih novih tehnologija, a među njima i zavarivanja eksplozijom. Ovom tehnologijom moguće je ostvariti spojeve skoro svih vrsta materijala, i ostvariti takve kombinacije koje će adekvatno odgovoriti nameni za koju su specificirane. To se posebno odnosi na bimetalne i višeslojne kompozicije aluminijuma, bakra, titana i ostalih metala sa čelikom.

Zavarivanje eksplozijom može se uslovno svrstati u dve grupe — zava-

rivanje ravanskih elemenata (ploča) i zavarivanje cilindričnih pripremaka (cevi). Obe grupe zasnivaju se na primeni eksplozije u spajanju dve ili više metalnih površina, koriste se isti zakoni i matematičke formule za proračun konkretnih veličina (napon, deformacije, pritisci, temperature, brzine), ali je konfiguracija pripremaka vrlo značajan činilac uspešnosti tehnologije. U ravanskoj konfiguraciji metalna ploča se, pod uticajem generisanih produkata detonacije, ubrzava i (ili) odbacuje prema drugoj nepokretnoj ploči, dovodeći dva metalna elementa u dinamičko stanje kontakta i sudara. Spajanje se ostvaruje u formi talasa konkretnih parametara — amplitude i

dužine. Dobijeni spojevi ploča ograničeni su samo količinom potrebnog eksploziva za ostvarenje spajanja. U slučaju zavarivanja cevi cilindrična konfiguracija priprema unosi određena ograničenja, i postupak spajanja nije potpuno istovetan kao kod ploča. Naime, koaksijalnost elemenata vrlo je bitna, jer u slučaju razlika u zazoru između dve cevi dolazi i do neregularnih stanja pri zavarivanju. Inicijacija mora da se ostvari osnosimetrično u odnosu na pripreme, bez obzira na prečnike. Ograničavajući faktor pri zavarivanju cevi je, svakako, prečnik cevi koje treba zavariti. On je ograničavajući kako sa aspekta količine eksploziva koji se može smestiti između dve cevi, tako i energije koju može preneti na spoljne i unutrašnje zidove cevi (u zavisnosti koja se cev ubrzava ili odbacuje). Radi toga priprema postupka je detaljnija, a ostvareni rezultati samo potvrđuju celishodnost primene tehnologije.

Analiza oslobađanja energije u zoni spoja

Pri zavarivanju eksplozijom bimetalnih cevi i ploča, sa jednakim brzinama sudara V_c i brzinama kontakta V_k , u zoni spoja cevi primećuju se znatno veće dimenzije talasa i količina otopljenog metala nego u pločama. Tome doprinose različiti energetske uslovi formiranja zavarenog spoja [1]. Jedan od činilaca koji doprinosi pojavi tih razlika može biti zakrivljenost cevi.

Istraživanja su izvršena upoređivanjem oslobađanja energije u zoni spoja cevi različite zakrivljenosti i ploča, pri čemu su ploče razmatrane kao granični slučaj cevi sa nultom zakrivljenošću. Debljina koaksijalnih i ravnih elemenata iznosila je 4 mm. Identičnost uslova kočenja cevi koja se ubrzava i (ili) odbacuje eksplozijom i ploča pri zavarivanju obezbeđena je korišćenjem nepokretne ploče debljine 60 mm. Upoređujući izrazi podeljeni su

na parove cev — ploča. Pri zavarivanju svakog para uzoraka, kinetičke energije elemenata koji se ubrzavaju, u trenutku sudara, bile su jednake, što je obezbeđeno jednakošću:

— brzina detonacije eksploziva (što je obezbeđivalo jednake brzine V_k pri zavarivanju cevi i ploča);

— odnosa masa eksploziva i elemenata koji se ubrzava;

— odnosa pomeranja kontaktne površine sa produktima detonacije prema visini eksploziva h/H .

Uslovi pri kojima su izvršeni eksperimenti dati su u tabelama 1 i 2.

Odnos mase eksploziva i elemenata koji se ubrzavaju, kako pri zavarivanju cevi, tako i pri zavarivanju ploča, u svim eksperimentima iznosio je 1,734. Prečnik cevi koja se ubrzavala iznosio je 105 mm.

U drugoj seriji cev koja se ubrzavala imala je spoljni prečnik 32 mm. U svim serijama odnos mase eksploziva i elemenata koji se ubrzavaju iznosio je 1,434.

Oslobađanje energije pri zavarivanju koaksijalnih i ravnih spojeva određuje se na osnovu amplitude generisanog talasa.

$$a = K \frac{W_2}{\rho V_k^2} = 4,75 \left(1 - \frac{2\sigma_v}{\rho V_s^2} \right) \frac{\delta_1 \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \frac{V_s^2}{C^2} \left(\frac{C^2}{V_k^2} - 1 \right) \quad (1)$$

gde je:

- a — amplituda generisanog talasa u zoni spoja (mm),
- W_2 — energija koja se utroši na plastičnu deformaciju pri zavarivanju eksplozijom (MJ/m^2),
- σ_v — statička granica na kidanje metala koji se zavaruju (MPa),
- ρ — gustina metala koji se zavaruje (g/cm^3),
- δ_1 i δ_2 — odgovarajuće debljine elemenata koji se ubrzavaju i (ili)

odbacuju i nepokretnog ele- C — brzina zvuka u metalima koji
menta (mm), se zavaruju (m/s).

Tabela 1.

Tehnološki i kinematski parametri režima zavarivanja eksplozijom bimetalnih cilindara i ploča od čelika Č.7400 + Č.0361

Broj uzorka	1	2	3	4	5	6
Ploče						
Zazor h (mm)	0,7	2,7	3,3	4,7	5,3	7,3
Visina eksploziva H _e (mm)	60	60	60	60	60	60
Odnos h/H _e	0,012	0,045	0,055	0,078	0,088	0,122
Brzina kontakta V _k (m/s)	2520	2520	2520	2490	2500	2510
Brzina odbacivanja V _M (m/s)	320	473	502	542	555	590
Bimetalni cilindri						
Pomeranje spoljne površine cevi koja se odbacuje h ₁ (mm)	0,46	1,85	2,30	3,22	3,70	5,03
Visina eksploziva H _e (mm)	41,5	41,5	41,5	41,5	41,5	41,5
Odnos h ₁ /H _e	0,011	0,045	0,055	0,078	0,089	0,121
Brzina kontakta V _k (m/s)	2540	2520	2550	2570	2550	2540

Tabela 2

Tehnološki i kinematski parametri zavarivanja eksplozijom bimetalnih cilindara i ploča Č.4580 + Č.1330

Broj uzorka	1	2	3	4	5
Ploče					
Zazor h (mm)	1,0	2,0	3,1	4,1	6,1
Visina eksploziva H _e (mm)	51	51	51	51	51
Odnos h/H _e	0,0196	0,0392	0,0608	0,0804	0,1196
Brzina kontakta V _k (m/s)	2650	2610	2640	2680	2670
Brzina odbacivanja V _M (m/s)	360	444	493	530	572
Bimetalni cilindri					
Pomeranje spoljne površine cevi koja se odbacuje h ₁ (mm)	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0
Visina eksploziva H _e (mm)	25	25	25	25	25
Odnos h ₁ /H _e	0,02	0,04	0,06	0,08	0,12
Brzina kontakta V _k (m/s)	2600	2640	2630	2630	2670

Rezultati eksperimenata predstavljani su na slikama 1 i 2.

Očigledno je da su rezultati zavarivanja u identičnim uslovima bimetalnih cevi prečnika 105 mm i ploče u zadovoljavajućoj saglasnosti sa proračunom talasa prema zavisnosti (1).

Pri zavarivanju druge serije, gde je prečnik cevi koja se ubrzava 32 mm, slična saglasnost se ne opaža. Amplituda talasa, kao i odgovarajuća energija W_2 pri zavarivanju cevi, pokazala se znatno većom nego pri zavarivanju ploča. Ukoliko su kinetičke energije u trenutku sudara jednake, razlog uo-

Sl. 1 — Zavisnost amplitude talasa u zoni spoja bimetalnih cilindara prečnika 105 mm i ploča od energije plastične deformacije

Sl. 2 — Zavisnost amplitude talasa u zoni spoja bimetalnih cilindara prečnika 32 mm i ploča od energije plastične deformacije

čenih razlika mora se tražiti u uticaju kinetičke energije na plastičnu deformaciju pri zavarivanju koaksijalnih i ravanskih spojeva. Jedini parametar koji se menjao u drugoj seriji eksperimenata, bio je naglo povećanje zakrivljenosti cevi koja se ubrzava. Razmotriće se uticaj zakrivljenosti cevi na rezultate zavarivanja.

Pri zavarivanju ploča, kada je zakrivljenost površina koje se spajaju nulta, kinetička energija u trenutku sudara utiče na plastičnu deformaciju na površini koja je jednaka početnoj površini ploče. Pri zavarivanju cevi ta ista kinetička energija utiče na plastičnu deformaciju na površini jednakoj bočnoj površini plakirajuće cevi ili unutrašnjoj površini cevi koja se ubrzava u trenutku sudara. Odnos površina ploče i širine koja je jednaka dužini omotača srednjeg prečnika cevi F'_{pl} i plakirane cevi F'_c , izražen preko polaznog unutrašnjeg poluprečnika cevi R_{10} , debljine njenog zida δ_0 i zazoru h_0 , moguće je napisati u obliku:

$$\frac{F'_{pl}}{F'_c} = \frac{2R_{10} + \delta_0}{2(R_{10} - h_0)} \quad (2)$$

Pri tome razmatra se površina elemenata koji se zavaruju sa jedinačnom dužinom u pravcu zavarivanja. Prema tome, specifična energija sudara pri zavarivanju cevi uvek je veća nego pri zavarivanju ploča. Odnos među njima moguće je napisati u obliku:

$$\frac{W_{kc}}{W_{kpl}} = \frac{F'_{pl}}{F'_c} = \frac{2R_{10} + \delta_0}{2(R_{10} - h_0)} \quad (3)$$

gde je:

W_{kc}, W_{kpl} — energije koje se odnose na jedinicu površine sudara pri zavarivanju cevi i ploča.

Prema tome, za obezbeđenje istih vrednosti specifičnih kinetičkih energija pri sudaru cevi i ploča treba povećati debljinu ploče koja se ubrzava

δ_{pl} , dok brzina sudara V_c ostaje nepromenjena. Debljina ploče koja se ubrzava je:

$$\delta_{pl} = \delta_0 \frac{2R_{10} + \delta_0}{2(R_{10} - h_0)} \quad (4)$$

Radi provere izvršeni su eksperimenti sa zavarivanjem ploča. Nepokretne ploče izrađene su od čelika i imale su debljinu 60 mm, a ploče koje se ubrzavaju izrađene su, takođe, od čelika. Ako se rezultati zavarivanja eksperimentalne serije uporede sa rezultatima zavarivanja cevi prečnika 32 mm, debljine ploča koje se ubrzavaju proračunavaju se na osnovu podataka iz eksperimenata sa zavarivanjem cevi (tabela 2) i korišćenjem zavisnosti (4).

Pri izboru identičnih kinematskih parametara ubrzavanja ispunjeni su uslovi:

$$r_c = r_{pl} ; \frac{h_1}{H_c} = \frac{h}{H_{pl}} ; D_c = D_{pl} \quad (5)$$

gde su:

r_c, r_{pl} — odgovarajući odnosi mase eksploziva i mase elementa koji se ubrzava pri zavarivanju cevi i ploča,

D_c, D_{pl} — brzine detonacije odgovarajućih eksplozivnih punjenja.

Ispunjenje uslova (5), polazeći od zavisnosti jednomernog ubrzavanja tela produktima detonacije [4], obezbeđuje jednake kinematske parametre sudara upoređivanih uzoraka. Uslovi izvršenja eksperimenata dati su u tabeli 3.

Odnos mase eksploziva i mase elemenata koji se ubrzavaju u svim eksperimentima bio je u granicama 1,423—1,434. Na taj način, brzine kretanja ploča u eksperimentima praktično su identične brzinama navedenim u tabeli 2.

Rezultati eksperimenata, prikazani na slici 3, svedoče o podudarnosti energetskih uslova formiranja zavare-

na energetske uslove obrazovanja zavarenog spoja pri zavarivanju eksplozijom.

Tabela 3

Tehnološki i kinematski parametri zavarivanja ploča

Broj uzorka	1	2	3	4	5
Debljina ploče koja se ubrzava (mm)	4,9	5,3	5,7	6,1	8,0
Zazor h (mm)	1,25	2,7	4,3	6,2	12,2
Visina eksploziva H_e (mm)	62	67	72	78	102
Odnos h/H_e	0,0202	0,0403	0,0597	0,0795	0,120
Brzina kontakta V_k (m/s)	2700	2640	2640	2610	2670
Brzina odbacivanja V_M (m/s)	366	445	495	520	575

nog spoja pri zavarivanju bimetalnih cevi serije 2, i ploča ekvivalentnih po specifičnoj kinetičkoj energiji na jedinicu površine sudara (tabela 3).

Na osnovu izvršenih ispitivanja razrađena je metodologija proračuna optimalnih režima zavarivanja eksplozijom bimetalnih koaksijalnih spojeva.

a, mm

○ - cilindri ; Δ - ploče ; — - proračun po formuli (1)

Sl. 3 — Zavisnost amplitude talasa u zoni spoja ekvivalentnog po W_{kud} bimetalnih cilindara prečnika 32 mm i ploča od energije plastične deformacije

Na taj način, eksperimentalno je dokazana pravilnost izvedene analize uticaja zakrivljenosti zavarenih cevi

Polazni podaci za proračun obično su spoljni, unutrašnji i srednji prečnici zavarenih cevnih priprema, kao i kombinacija metala koji se zavaruju.

U prvoj etapi proračuna određuje se brzina V_c koja obezbeđuje dobijanje čvrstog spoja. To je moguće uraditi po metodologiji opisanoj u literaturi [5—8], kao i na osnovu eksperimentalnih podataka. Treba imati u vidu da, pri savijanju cevi, brzina odbacivanja predstavlja brzinu unutrašnje površine cevi koja se odbacuje, u trenutku sudara sa plakirajućom cevi.

Brzina kontakta V_k bira se u granicama koje iznose 0,2—0,35 od najmanje brzine zvuka u metalima koji se zavaruju. U drugoj etapi proračuna, posle određivanja vrednosti V_c , određuje se kinetička energija cevi sa jediničnom dužinom:

$$W'_{ke} = \pi \rho R_u^2 V_u^2 \ln \left(1 + \frac{\delta_k}{R_u} \right) \quad (6)$$

gde je:

ρ — gustina materijala cevi (g/cm^3),
 R_u — unutrašnji prečnik cevi u trenutku sudara (mm),

V_u — brzina unutrašnje površine cevi koja se odbacuje u trenutku sudara (jednaka V_c) (m/s),

δ_k — debljina zida cevi koja se odbacuje u trenutku sudara (mm).

Nakon određivanja vrednosti W'_{kc} određuje se energija plastične deformacije W_2 pri zavarivanju ploča:

$$W_2 = \frac{W'_{kc}}{\pi(2R_{10} + \delta_0)} \eta_e \quad (7)$$

gde je:

η_e — energetska koeficijent [9].

Pri tome vrednost W_2 mora biti veća ili jednaka kritičnoj vrednosti koja obezbeđuje jednaku čvrstoću spoja osnovnog metala [10]:

$$W_{2kr} = 0,606 + 0,184 \ln \frac{H}{\delta} \quad (8)$$

Četvrta etapa proračuna jeste određivanje brzine odbacivanja ploča V_c :

$$V_c^e = V_c \sqrt{\frac{2R_u^2 \ln(1 + \delta_k/R_u)}{\delta_k(2R_u + \delta_k)}} \quad (9)$$

ili

$$V_c^e = \sqrt{\frac{W'_{kc}}{\pi \rho_{pl} \delta_{pl} (2R_u + \delta_k)}} \quad (10)$$

gde je:

W'_{kc} — kinetička energija cevi određena u drugoj etapi.

Peta etapa proračuna jeste određivanje tehnoloških parametara zavarivanja eksplozijom ploča i odgovarajućih cevni priprema:

$$\frac{h_1}{H_{uc}} = \frac{h}{H_{upl}} ; r_c = r_{pl} ; D_c = D_{pl} \quad (11)$$

gde se indeksi c i pl odnose na cevi i ploče.

Pri tome, potrebno je uzeti u obzir promenu debljine zidova cevi pri njenom naprezanju eksplozijom (zavisnost 12), i karakteristike proračuna odnosa r pri zavarivanju cevi (zavisnost 13) [2]:

$$h_1 = R_0 - \sqrt{R_u^2 + \frac{F}{\pi}} \quad (12)$$

gde je:

R_0 — polazni spoljni prečnik cevi (mm),

$$r_c = \frac{\rho_u H_u}{\rho_c \delta_0} \frac{2R_0 + H_u}{2R_0 - \delta_0} \quad (13)$$

δ_0 — polazna debljina zidova cevi (mm)

ρ_c i ρ_u — gustine materijala cevi i eksploziva (g/cm^3).

U šestoj etapi proračuna izvodi se određivanje pretpostavljenih svojstava koaksijalnih spojeva prema rezultati-

ma zavarivanja ploča. Uslovi ekvivalentnosti rezultata su sledeći:

— masa nepokretne ploče je višestruko veća od mase ploče koja se ubrzava i(ili) odbacuje, što pri istoj brzini kontakta V_k obezbeđuje približno jednake vrednosti η_e pri zavarivanju cevi i ploča;

— brzina kontakta V_k pri zavarivanju ploča jednaka je brzini kontakta V_k pri zavarivanju cevi;

— brzina sudara V_c pri zavarivanju ploča jednaka je brzini sudara V_c pri zavarivanju cevi;

— vrednosti energije W_{kud} pri zavarivanju cevi i ploča međusobno su jednake.

Zajedničko ispunjenje poslednja dva uslova ekvivalentnosti obezbeđeno je time što se koristi ploča koja se ubrzava i(ili) odbacuje sa debljinom proračunatom prema zavisnosti (4).

Na taj način, rezultati zavarivanja bimetalnih cevi mogu se odrediti na osnovu poznatih parametara za zavarivanje ploča ili eksperimentalnim putem. Pri nedovoljnoj čvrstoći spoja (veća količina ostataka otopljenog metala) potrebno je preći na slojevito plakiranje sa smanjenjem debljine svakog plakiranog sloja.

Provera predložene metodologije proračuna izvršena na bimetalnim cevima kombinacija metala, kao što su čelik — cirkonijum, čelik — titan, čelik — čelik, čelik — aluminijum, čelik — mesing, pri poluprečnicima cevi 32—480 mm, debljinama zidova do 14 mm, govori o njenoj visokoj pouzdanosti.

Zaključak

Energija koja se troši na plastičnu deformaciju pri zavarivanju cevi eksplozijom proporcionalna je specifičnoj kinetičkoj energiji sudara. Veličina specifične kinetičke energije sudara, pri konstantnim tehnološkim parametrima, zavisi od zakrivljenosti cevi (smanjuje se sa smanjenjem zakrivljenosti) i približava se vrednosti kao pri zavarivanju ploča. Obezbeđenje identičnih energetske uslova za formiranje zavarenog spoja pri zavarivanju cevi i ploča može se postići povećanjem debljine ploče koja se ubrzava i(ili) odbacuje bez promene brzine odbacivanja. Razrađena metodologija proračuna optimalnih režima zavarivanja cevi eksplozijom omogućava da se sa visokom tačnošću prognoziraju svojstva koaksijalnih spojeva, prema poznatim podacima za ravanske spojeve istih metala.

Literatura:

- [1] Busalae, I. D.: Nekotorie osobenosti svarki trub, Volgograd, Znanie, 1979, s. 24—25.
- [2] Kotov, V. A.: Račun skorosti dviženija trubnih oboloček metaemjih naružnim koljcevim zarjadom, Volgograd, Znanie, 1976, s. 61—67.
- [3] Tehnologija proizvodstva svarnih i pajalnih konstrukciji, Mežvuzovski tematičeski sbornik trudov, Kujbišev, 1980, s. 66—75.
- [4] Baum, F. A., Orlenko, L. P., Stanjukovič, K. P., Čelišev, V. P., Šehter, B. I.: Fizika vzriva, Moskva, Nauka, 1975.
- [5] Volčkov, V. M., Pavlov, A. I., Paškov, P. O.: Ob odnom slučaju realizacii teoretičeskoj pročnosti, Volgograd, Znanie, 1965, s. 319—323.

- [6] Deribas, A. A., Zaharenko, I. D.: Fizika gorenia i vzriva, 1975, T. 10, s. 409—421.
- [7] Kudinov, V. M., Koroteev, A. Ja.: Svarka vzrivotom u metalurgiji, Moskva, Metalurgija, 1976.
- [8] Ionov, V. M., Ogibalov, P. M.: Naprjaženija u telah pri impulsivnom nagruženii, Moskva, Visšaja škola, 1975.
- [9] Busalae, I. D., Sedjih, V. S., Smeljanski, V. Ja.: Puti ocenki toplovjidelenia u zone soedinenia metallov pri svarki vzrivotom, Volgograd, Znanie, 1980.