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

KARAKTERISTIKE DELOVA OD KOMPOZITNIH MATERIJALA DOBIJENIH ZAVARIVANJEM EKSPLOZIJOM

UDC: 621.791.1.052

Rezime:

Poslednjih dvadeset godina proizvodnja plakiranih ploča je komercijalizovana i neprestano se povećavala. Tokom tog perioda razjašnjeni su parametri značajni za dobijanje spojeva velikog integriteta većine kombinacija metala i legura, što je dovelo i do objašnjenja mehanizma zavarivanja.

Ključne reči: zavarivanje eksplozijom, plakiranje, metalne ploče, proizvodnja.

CHARACTERISTICS OF ELEMENTS OF COMPOSITE MATERIALS OBTAINED BY EXPLOSIVE WELDING

Summary:

Over the last twenty years the production of clad plate was exploited commercially and it continued to increase. During this period, important parameters for producing high integrity welds between most combinations of metals and alloys appear to have been well established although the welding mechanism itself has yet to be elucidated.

Key words: explosive welding, cladding, metal plates, production.

Uvod

Energija eksplozije primenjuje se za dobijanje kompozitnih materijala različitih kombinacija skoro 30 godina. Najpre se eksplozija koristila za ostvarenje bimetalnih spojeva metala u vazduhoplovnoj industriji i svemirskoj tehnici (otporni na visoke pritiske, temperature i ekstremna opterećenja). Dijapazon spojeva kasnije se povećavao u zavisnosti od toga gde su se koristili — u hemijskoj i petrohemijskoj industriji, elektrotehnici ili za specifične namene.

Kompozitni materijali sa metalnom osnovom mogu se dobiti na različite načine, od kojih je zavarivanje eksplozijom jedan od najekonomični-

jih. Na taj način moguće je spojiti i one metale koji se drugim tehnologijama ne mogu spojiti ili je to tehnički i tehnološki veoma otežano, a samim tim i neracionalno. Energija eksplozije pruža mogućnost ostvarenja visokih dinamičkih pritisaka (reda Mbar) u izuzetno kratkom vremenskom intervalu (reda μ s). Međutim kod konkretnih kombinacija metala u spoju (npr. aluminijum ili titan sa čelikom) dolazi do neregularnih procesa, otežavanja ili odsutnosti zavarivanja, defekata strukture i sl. Zato je razmatranje uslova i pojedinih svojstava kompozitnih materijala dobijenih eksplozijom veoma interesantno i obimno područje istraživanja.

Primena kompozitnih materijala u konstrukcijama zahteva ispunjenje postavljenih zahteva za dugoročan rad u različitim režimima. Kompozitni materijali, kombinovani na različite načine, ispunjavaju mnogobrojne uslove ukoliko se poznaju svojstva osnovnih materijala.

Analiza karakteristika kompozitnih materijala

Povećanje kapaciteta konstrukcija od različitih metala i legura, uz istovremeno povećanje njihovih tehničkih karakteristika i eksploatacione pouzdanosti, može se obezbediti procesom zavarivanja bimetalnih i kompozitnih ravnih ili cilindričnih konfiguracija eksplozijom [1, 2]. Prema spoju materijala moguće je, uslovno, izdvojiti dve grupe kombinovanih konstrukcija:

— sa spojevima međusobno »dobro« zavarljivih metala M_1 i M_2 (npr. čelici jedne strukturne klase, ali različitog legiranja),

— sa spojevima međusobno »loše« zavarljivih ili uopšte nezavarljivih metala i legura (čelik sa Al, Ti, Mg).

Zahtevani kvalitet spojeva prve grupe (spojevi od niskougljeničnih i hrommolibden čelika, austenitnih čelika koji imaju veći procenat nikla, sa nerđajućim čelikom i dr.), obezbeđuje se konstrukciono-tehnološkim, metalurškim i drugim sredstvima, uz primenu odgovarajućih preporuka [3]. Projektovanje i izrada zavarenih spojeva druge vrste po pravilu zahteva rešavanje principijelno novih naučnih i tehnoloških zadataka. Ne pretendujući da se iscrpno analiziraju, u ovom radu će biti razmotreni samo osnovni zadaci koji nastaju pri konstrukciji ravnih ili cilindričnih spojeva velikih gabarita, izrađenih od dva ili više bime-

talnih (kompozitnih) slojeva naknadnim spajanjem istorodnih metala $M_1 + M_1$ i $M_2 + M_2$. (slika 1).

Sl. 1 — Šema sučeonog spajanja bimetalnih ravnih i cilindričnih elemenata

Za ostvarivanje prelaza zadatog radijusa potrebno je razraditi metodologiju procene maksimalnih deformacija bimetalnih pojaseva, radi sprečavanja njihove destrukcije po granici $M_1 - M_2$ u procesu spajanja, valjanja ili presovanja. Radi obezbeđenja eksploatacione pouzdanosti prelaza potrebno je ostvariti racionalnu konstrukciju bimetalnog spoja na osnovu određivanja bezopasnih temperaturno-vremenskih uslova zagrevanja granice spoja $M_1 - M_2$.

Takođe, za određivanje nosećih sposobnosti mehanički heterogenog spoja sa mekim međuslojem potrebno je razraditi bar približnu metodologiju procene njihove čvrstoće.

Za rešenje zadatka o maksimalno dozvoljenom radijusu prevoja bimetalnih traka poslužiće šema prikazana na slici 2.

Sl. 2 — Šema savijanja bimetalne ploče

Usvajanjem oznaka sa slike, ugao no smicanje određuje se preko izraza:

$$\Gamma = \frac{u_1 - u_2}{\delta} \quad (1)$$

a veličina temperaturnog naprezanja

$$\tau = G\Gamma = G \frac{u_1 - u_2}{\delta} \quad (2)$$

gde je G modul smicanja zone spoja.

Procenjuje se raspodela temperaturnih naprezanja, koristeći princip nezavisnosti dejstva i uz pretpostavku da je $u_2 = 0$. Tada se dobija da je

$$\tau_1 = \frac{G}{\delta} u_1 \quad (3)$$

$$\tau = \tau_1 - \tau_2 \quad (4)$$

Uzimajući u obzir uzajamnost veze smicajnih (τ) i normalnih naprezanja (σ), kao i uslove ravnoteže elementarnog dela dx sa slike 2, određuje se da je $bhd\sigma = b\tau dx$, iz čega proizlazi da je

$$\frac{d\sigma}{dx} = \frac{\tau}{h} \quad (5)$$

Primenom linearnog zakona ojačanja [5], dobija se da je

$$\sigma = \left(1 - \frac{E_T}{E}\right) \sigma_T + E_T \epsilon \quad (6)$$

gde su E_T , σ_T — modul i granica tečenja materijala.

Diferenciranjem jednačine (6) po x i uvrštavanjem u izraz (5) dobija se

$$E_T \frac{d^2 u_1}{dx^2} = \frac{G}{h\sigma} u_1 \quad (7)$$

Uvođenjem da je

$$\lambda^2 = \frac{G}{\delta h E} \quad (8)$$

dobija se da je

$$\frac{d^2 u}{dx^2} - \lambda^2 u = 0 \quad (9)$$

Rešenje ove jednačine ima oblik

$$u_1 = A \sinh \lambda x + B \cosh \lambda x \quad (10)$$

Konstante A i B određuju se iz sledećih graničnih uslova:

$$— x=0, \sigma=0$$

$$— x=1, \sigma=\sigma_1.$$

Ako se pretpostavi da je $u_1=0$, nalazi se rešenje za u_2 i τ_2 . Opšte rešenje ima oblik

$$\tau = \tau_1 - \tau_2 = -\frac{\sigma_1 h}{l} \frac{\lambda_1 l}{\sinh \lambda_1 l} \cosh \lambda_1 x - \frac{\sigma_2 h}{l} \frac{\lambda_2 l}{\sinh \lambda_2 l} \cosh \lambda_2 x \quad (11)$$

Izraz (11) se može uprostiti razmatranjem dva krajnja slučaja:

I — λ veliko ($\lambda \geq 1$). U tom slučaju tangencijalno naprezanje se povećava

od sredine nojasa ka krajevima po zakonu hiperboličkog kosinusa (slika 3), a maksimalna veličina dostiže se pri $x=1$:

$$\tau_{\max} = h(\sigma_1 \lambda_1 - \sigma_2 \lambda_2) \quad (12)$$

Sl. 3 — Uslovi ravnoteže elementa dx

Pri većim λ , $ch\lambda l = sh\lambda l$, i kada je $hl \approx 1$, dobija se da je $\tau_{\max} = \sigma_1 - \sigma_2 \leq \sigma_m$ ($G \approx E$, $h^2 \approx \delta h$).

Primenom linearnog zakona ojačanja i uvažavajući da je $\epsilon = b/2R$ (slika 2), dobija se proračunska formula za dozvoljeni radijus prevoja:

$$R \geq \frac{bE_{T1} \left(1 - \frac{E_{T2}}{E_{T1}}\right)}{2 \left[\sigma_m - \sigma_T \left(\frac{E_{T2}}{E_2} - \frac{E_{T1}}{E_1} \right) \right]} \quad (13)$$

Kao primer razmatrana je bimetalna ploča titan-čelik, sa sledećim karakteristikama: $\delta = 5$ mm, $E_{T1} = 0,07$ E_1 , $E_1 = 2 \cdot 10^5$ MPa, $\sigma_m = 200$ MPa, $E_{T2}/E_{T1} = 0,5$. Proračunom po izrazu (13) dobija se da je radijus prevoja $R \geq 88$ mm. Izvršeni eksperimenti potvrdili su zadovoljavajuću konvergenciju proračunskih i eksperimentalnih vrednosti R .

II — λ malo. U tom slučaju $sh\lambda_1 l \approx \lambda_1 l$, $sh\lambda_2 l \approx \lambda_2 l$, $ch\lambda x \approx 1$, pa se dobija da je:

$$\tau = \frac{h}{l} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (14)$$

Može se primetiti da je tangencijalno naprezanje manje i ravnomerno je raspoređeno u zoni spoja (slika 4).

Sl. 4 — Raspodela tangencijalnih napreznja po dužini ploče:
1 — λ veliko, 2 — λ malo

Proračunska formula za radijus prevoja tada ima oblik:

$$R \geq \frac{bhE_T}{2l\sigma_m} \quad (15)$$

Visokotemperaturna zagrevanja mogu smanjiti čvrstoću i pogoršati strukturu eksplozijom zavarenih spojeva druge grupe [6, 7]. Za eliminisanje pregrevanja biraju se temperaturno-vremenski uslovi zagrevanja, tako da se moraju nalaziti u bezopasnoj zoni. Naveden je primer sučeljenog spoja od eksplozijom zavarenih bimetalnih ploča titan — čelik.

Konstatovano je da se konvencionalno zavarivanje ne ostvaruje, a kontaktno zavarivanje istorodnih metala titan-čeličnih pojaseva preseka $2 \cdot (10 + 20)$ mm obezbeđivalo je kvalitetno formiranje spoja iza granica nekih zona, bliže granici prekida raznorodnih metala. U toj zoni primećuje se intenzivno mešanje titana sa čelikom, koje se, po pravilu, sprovodi ispljusivanjem produkata uzajamnog dejstva i stvaranjem defektnih zona nepravilnih koncentričnih oblika u vidu krtoг rastopa tvrdoće $H_{50} = 950 - 1000$, sa lunckerima i mikropreskotinama. Da bi se

taj defekt izbegao i realizovao spoj jednake čvrstoće, prvobitno se izvršilo zavarivanje titana i nerđajućeg čelika u »sigurnoj« zoni, a zatim njihovo lemljenje srebrnim lemom u »opasnoj« zoni, koja se nalazi blizu granice raznorodnog spoja (slika 5).

Sl. 5 — Šema sučeonog spajanja titana i čelika

Veličine tih zona određene su eksperimentima u kojima su, pri zavarivanju na optimalnim režimima, delovi bimetalnog uzorka od čelika i titana generisali prekid strujnog luka, saglasno slici 6, uz istovremenu registraciju temperature i vremena zagrevanja granice spoja titan — čelik na dvanaesto-kanalnom pisaču. Na svakom uzorku izvršeno je merenje u 6 prolaza, tako da su tačke od granice prekida metala naizmenično rasle od 0 do 2,5 mm, sa intervalom 0,5 mm. Posle zavarivanja spoj titan — čelik podvrg-

Sl. 6 — Šema određivanja temperature pri zavarivanju bimetalna titan-čelik:

1 — šav, 2 — ploča od bakra, 3 — granica prekida titana sa čelikom

nut je metalografskim ispitivanjima i ispitivanjima na kidanje. Dobijeni rezultati su ukazali na to da se struktura zavarenog bimetala ne pogoršava i ne smanjuje početna čvrstoća.

Kao rezultat objašnjenja eksperimentalnih podataka, navedenih na slici 7, konstatovano je da se pri zadatoj geometriji uzoraka i izabranom režimu zavarivanja kvalitet spoja titan — čelik zadržava na početnom nivou ukoliko prekidi elektronskog luka na strani čelika nisu manji od 2 mm, a na strani titana — ne manji od 1,5 mm. Pri tome je utvrđeno da maksimalna temperatura na granici čelik — titan ne prelazi 800°C u intervalu od 0,05 s, što je dozvoljeno prema temperaturno-vremenskim uslovima formiranja intermetala.

Sl. 7 — Temperaturno-vremenska zavisnost obrazovanja intermetala u spoju titan-čelik

Realizacija hermetičnosti i jednake čvrstoće bimetalnog spoja obezbeđuje se naknadnom obradom »opasne« zone srebrnim lemom po ivicama.

Zbog različitih proračunskih modela i složenog naponsko-deformacionog stanja, za sada nema mogućnosti za objašnjenje metodologije teoretske procene čvrstoće kompozicija od raznorodnih metala (slika 5). Zbog toga je pokušano da se iskoristi grafoanalitički model ČPI, predložen u [8] za procenu čvrstoće u praksi važnih spojeva titan — čelik, koji posle zavarivanja imaju čvrstoću na kidanje

350—400 MPa. Parametri vara su: debljina mekog međusloja — δ_m , širina — b i dužina — l . Opterećenje je usmereno po normali prema varu. Kao

Sl. 8 — Zavisnost čvrstoće δ_m spoja titan-čelik od relativne debljine mekog međusloja (κ)

rezultat proračuna i dobijanja dijagrama (slika 8) konstatovano je da je pri $\sigma_m = 250$ MPa spoj titana i čelika određen njihovom čvrstoćom.

Zaključak

U analizi pouzdanosti i kvaliteta konstrukcije potrebno je izvršiti detaljnu proveru njenog kapaciteta, tj. mogućnosti da ispunjava konkretne zahteve u određenom vremenskom ili radnom režimu. Nepovoljni radni re-

žimi (udarna opterećenja, povećano habanje, visoki pritisci i temperature, koroziono delovanje), neregularna stanja i pojave, otkazi i sl. samo su neki od činilaca koji utiču na smanjenje planiranog kapaciteta konstrukcije. Zato se primena novih tehnologija pokazala svrsishodnom.

Jedna od takvih metoda i tehnologija jeste zavarivanje eksplozijom, kojim je moguće zavariti skoro sve postojeće kombinacije metala i legura, uz mnogo manje troškove, postizanje zahtevanog kvaliteta spoja, kao i zadovoljavajućih mehaničkih i drugih svojstava. Bimetalne i višeslojne kombinacije ispunjavaju stroge zahteve pouzdanosti i kvaliteta, tako da je primena zavarivanja eksplozijom u dobijanju bimetala tipa čelik-titan, na primer, koji se višestruko primenjuje u industriji i tehnici, više nego izvesna, a tehnički i ekonomski opravdana.

Za određivanje deformacione sposobnosti bimetala zavarenog eksplozijom, u radu je razrađen proračunski metod procene graničnog radijusa prevoja, uz uvažavanje čvrstoće spoja, geometrijskih veličina i mehaničkih svojstava spojenih metala. Dokazana je konstrukciona i racionalna povezanost tehnoloških operacija dobijanja bimetalnog sučeonog spoja kompozicije titan — čelik eksplozijom, koji poseduje hermetičnost i čvrstoću jednaku osnovnim materijalima.

Literatura:

- [1] Bakši, O. A., Sedjih, V. S., Trjakov, Ju. P.: O racionalnom projektovanju svarnih sudov i trub iz raznorodnih materialov, Svaročnoe proizvodstvo, 1973, № 9, str. 3—6.
- [2] Lisuh, G. P., Kazak, N. N., Trjakov, Ju. P.: Rabotosposobnost bimetalličeskikh stal'alumini-evjkh perehodnikov polučeni svarkoi vzrivom, Svaročnoe proizvodstvo, 1970, № 10, str. 20—22.
- [3] Zemzin, V. N.: Svarnie soedinjenja raznorod-nih stalei, Moskva, Mašinostroenie.
- [4] Ržanjcin, A. R.: Stroitel'naja mehanika, Mo-skva, Viššaja škola, 1982.
- [5] Malinin, N. N.: Prikladnaja teorija plastičnosti i polzučesti, Moskva, Mašinostroenie, 1975.
- [6] Bakuma, S. F., Belousov, V. P., Sedjih, V. S., Trjakov, Ju. P.: Polučenie listovih kompozicii s pomoću svarki vzrivom i promežutočnoi pro-katki, Cvetnie metalli, 1972, № 2, str. 58—62.
- [7] Sahnovskaja, E. B., Sedjih, V. S., Trjakov, Ju. P.: Svoistva soedinenii austenitnoi stali s ali-minievim splavami pri svarke vzrivom, Sva-ročnoe proizvodstvo, 1971, № 7, str. 34—36.
- [8] Bakši, O. A., Piksaev, B. P., Kuljnevič, T. V.: Ocenka pročnosti svarnih soedinenij iz termo-upročnajemjih stalei, Voprosi svaročnogo pro-izvodstva, Čeljabinsk, 1968.