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

PRIMENA BIMETALNIH MATERIJALA KOD HABAJUĆIH ELEMENATA U INDUSTRIJI

UDC: 621.791.1

Rezime:

Razvoj novih materijala i proizvodnih procesa za dobijanje materijala koji koriste nekonvencionalne izvore energije postaje važan trend naučnog i tehničkog progresu. Sa tog aspekta vrlo su značajni proizvodni procesi za dobijanje novih materijala (bimetala i višeslojnih kompozicija) koji koriste izvore kao što su eksplozivi. Proces zavarivanja eksplozijom ostvaruje se kontrolisanom detonacijom eksploziva radi spajanja dva ili više metala pod visokim pritiskom. Ostvareni kompozitni sistem poseduje visoki kvalitet metalurškog spoja. Amplituda i frekvencija talasa formiranog pri zavarivanju eksplozijom mogu se kontrolisati sledećim osnovnim parametrima: brzinom detonacije eksploziva, opterećenjem eksplozijom i međusobnim rastojanjem između ploča koje se zavaruju. Kratko vreme odvijanja procesa zavarivanja eksplozijom i ekstremno visoki pritisci i temperature stvaraju mnoge probleme istraživačima i tehnolozima u kontroli procesa, kao i ostvarenju potpuno drugačijih svojstava materijala.

Ključne reči: zavarivanje eksplozijom, talasi, bimetal, industrija, habanje, održavanje.

APPLICATION OF BIMETALS ON WEARING ELEMENTS IN INDUSTRY

Summary:

The development of new materials and materials and energy-saving production processes utilizing nontraditional energy sources is an important trend of scientific and technical progress. From this point of view, production processes using rather new energy sources, namely, high explosives, to produce new materials as bimetal and multilayer compositions, are advantageous. Explosive welding is a solid state welding process that uses controlled explosive detonations to force two or more metals together at high pressure. The resultant composite system is joined with a high quality metallurgical bond. The amplitude and periodicity of the wave pattern formed during explosive welding can be controlled by adjusting three major parameters: explosive detonation velocity, explosive load and interface spacing. The short duration of explosive welding process and the extremely high pressures and temperatures create, on the one hand, many problems for investigators and technologists, as it is very difficult to control the process. On the other hand, the short duration of contact between the welded materials allows for the welding of metals having quite different properties, and being able to react and form intermetallic compounds.

Key words: explosive welding, waves, bimetals, industry, wear, maintenance.

Uvod

Savremeni razvoj različitih oblasti industrije zahteva materijale koji mogu

da se primenjuju u uslovima visokih pritisaka i temperatura, udarnih opterećenja, agresivnih sredina, itd. U takve materijale spadaju, na primer, višeslojni ma-

terijali, metali povišene čvrstoće, poboljšanih fizičko-mehaničkih i eksploatacionih svojstava. U tom smislu naglašava se potreba dobijanja materijala sa posebnim svojstvima i osvajanje novih tehnoloških procesa njihove proizvodnje. Izrada delova velikih gabarita i složenih oblika, od novih materijala tradicionalnim metodom obrade metala pritiskom i zavarivanjem, praktično je nemoguća, ili zahteva glomaznu i skupu opremu i instalacije.

U poslednje tri decenije u obradi metala se sve više primenjuju eksplozivne materije. Korišćenje energije eksplozije omogućava znatno proširenje dijapazona primene obrade metala pritiskom. Posredstvom eksplozije moguće je generisati pritiske u rasponu od nekoliko bara do Mbara. Visoki pritisci određuju posebne uslove deformacije metala i promenu njihovih svojstava (čvrstoće, strukture, gustine, tvrdoće, itd.), omogućavaju da se deformišu i oni materijali koji nisu obradivi pod pritiskom pri uobičajenim brzinama deformacije, omogućavaju zavarivanje raznorodnih materijala čija je razlika u temperaturama topljenja velika, kao i dobijanje proizvoda sa zadatim mehaničkim svojstvima.

Danas se ojačavanje metala eksplozijom (povećanje eksploatacionih svojstava polufabrikata ili gotovih proizvoda) sa uspehom primenjuje u različitim oblastima industrije. Dalje proširenje primene tog procesa povezano je sa razvojem teoretskih osnova koje omogućavaju razradu različitih tehnoloških metoda, i kvantitativno ocenjivanje stepena ojačanja i karakter njegove raspodele, kao i stepen deformacije nastale pod dejstvom opterećenja generisanog udarnim talasima. Posebno mesto zauzima zavarivanje eksplozijom različitih metala i dobijanje višeslojnih materijala. Mogućnosti zavari-

vanja metala eksplozijom, radi dobijanja bimetalnih i višeslojnih materijala, nisu ograničene. Praktično, moguće je zavariti različite metale bilo kojih gabarita. Čvrstoća zavarenih spojeva, po pravilu, prevazilazi čvrstoću zavarenih metala. Osvojeno je i zavarivanje eksplozijom delova različitih konfiguracija. Danas se, na primer, veoma uspešno primenjuje plakiranje eksplozijom cilindričnih delova (cevi, šipki). U nekim oblastima industrije koristi se energija eksplozije za dobijanje kompozitnih vlaknastih materijala, kada se osnovni materijal armira vlaknima povećane čvrstoće.

U ovom radu prikazan je segment istraživanja primene bimetalnih (dvoslojnih) materijala za tehničke sisteme koji su izloženi habanju.

Neki aspekti zavarivanja eksplozijom

Primena različitih vrsta i oblika sklopova, agregata, uređaja i opreme koja radi u specifičnim sredinama dovodi do realizacije ekonomičnijih postupaka proizvodnje sa aspekta vrste materijala i energije. Kombinacija dobre korozijske otpornosti i zadovoljavajućih mehaničkih svojstava omogućena je proizvodnjom bimetalna i višeslojnih kompozicija različitih metala. Razvijeno je i više postupaka proizvodnje plakiranih materijala. Najpoznatiji od njih su „sendvič“ valjanje, topla metalizacija, elektroforetičko plakiranje, plakiranje metalnim parama, elektroplakiranje tantalom, plakiranje navarivanjem. Svakako, treba ukazati i na visoke troškove (energije i materijala) koje podrazumeva njihova primena.

Kao alternativa navedenim tehnologijama zavarivanja i plakiranja javlja se

zavarivanje eksplozijom, čija je osnovna prednost vrlo kratko trajanje postupka. Spajanje materijala na površinama u kontaktu pri zavarivanju eksplozijom odvija se brzinom oko 2500 m/s, tj. spoj može da se dobije, u zavisnosti od gabarita ploča koje se plakiraju, za manje od jedne sekunde. Bilo koji drugi postupak, čak i ako se automatizuje, zahteva znatno duže vreme (npr. 4 časa za ploču površine 2 m² primenom manuelnog elektrolučnog postupka). Ovako velika razlika u trajanju operacija zavarivanja eksplozijom i drugih uobičajenih postupaka proporcionalno odgovara i znatno većim troškovima rada i energije. Kada se u obzir uzme primena različitih vrsta materijala, prednost ima, takođe, zavarivanje eksplozijom. Što je veća površina koja se plakira, kao i debljina plakiranja prednosti zavarivanja eksplozijom su izraženije.

Postojeći konvencionalni materijali ne obezbeđuju navedene uslove rada, tako da je njihova supstitucija manje skupim i dostupnim materijalima pitanje ekonomske i tehnološke orijentacije. Sve više se primenjuju materijali koji se dobijaju nekonvencionalnim tehnologijama, a njihova svojstva (mehanička, fizička, strukturna, hemijska, optička i dr.) ispunjavaju postavljene zahteve.

Prednosti korišćenja energije eksplozije ogledaju se u mogućnosti dobijanja različitih spojeva dva i više metala, sa zahtevanim mehaničkim i drugim svojstvima, koja obezbeđuju maksimalne performanse delova i sklopova od kojih su izrađeni.

Neke od karakteristika, koje omogućavaju da se zavarivanje eksplozijom primeni umesto tradicionalnog, jesu:

- spojevi velike čvrstoće stvaraju se ne samo pri zavarivanju homogenih metala i metala koji stvaraju rastvore i jedi-

njenja, nego i metala koji se ne spajaju topljenjem i difuzionim zavarivanjem;

- zavarivanjem eksplozijom moguće je spojiti materijale sa različitim temperaturama topljenja, npr. aluminijum ($T_{\text{top}} = 660^{\circ}\text{C}$) i tantal ($T_{\text{top}} = 2996^{\circ}\text{C}$);

- eksplozijom se mogu uspešno zavariti metali sa čvrstim površinskim prevlakama, npr. nerđajući čelici sa hrom-molibdenovim čelicima;

- kratko vreme prisustva visokih temperatura u zoni spoja omogućava da se zavarivanje eksplozijom koristi za spajanje materijala koji stvaraju krte intermetalne međuslojeve, kao npr., čelik-titan, čelik-aluminijum, bakar-aluminijum;

- debljina materijala koji se plakira može da se menja u vrlo širokom dijazonu (0,03–30 mm);

- zavarivanje eksplozijom može se ostvariti na površinama koje su ograničene samo gabaritima i količinom eksploziva.

Najteži zadatak zavarivanja, ne samo eksplozijom, jeste zavarivanje metala koji obrazuju hemijska jedinjenja pri uzajamnom dejstvu. Nastanak takvih intermetalnih spojeva na granici između materijala dovodi do povećanja krtosti i znatnog snižavanja svojstava čvrstoće dobijenog bimetala.

Uporedo sa zahtevima specifičnih oblasti primene, razvijaju se i metode dobijanja bimetala. Takođe, treba naglasiti izražene ekonomske prednosti i racionalnost primene energije eksplozije u dobijanju pouzdanih i kvalitetnih bimetala različitih kombinacija. Proizvodi tehnologije obrade metala eksplozijom primenjuju se u različitim oblastima:

- mašinskoj industriji (noževi za obradu na alatnim mašinama, cilindri za rad pod visokim pritiscima, rezervoari, lopatice turbina, komponente cevovoda, izmenjivači toplote);

Sastav i svojstva materijala koji se zavaruju eksplozijom

Materijal	Debljina lima (mm)	Hemijski sastav (%)				Zatezna čvrstoća (MPa)
		C	Si	Mn	Cr	
Č.3134	8	0,42	0,24	1,65	0,13	632
Č.0561	4	0,14	0,21	0,43	–	572

- brodogradnji (bimetali i trimetali za izradu brodova, čamaca, platformi);
- petrohemijskoj industriji (tornjevi, linije za destilaciju, sudovi, rezervoari);
- hemijskoj industriji (cisterne, ekstraktori, apsorberi za skladištenje agresivnih tečnosti i gasova, hemijski reaktori);
- prehrambenoj industriji (posuđe za domaćinstvo, mešaći, transporter);
- građevinarstvu, elektroindustriji, rudarstvu, železnici, itd.

Proizvodni procesi u bilo kojoj grani industrije praćeni su trošenjem materijala, energije i sredstava za rad (opreme, alata i pribora). Utrošak energije i sredstava rada u velikoj meri su izazvani habanjem usled trenja.

Na vek trajanja nekog mašinskog elementa ili sklopa, koji je u tehničkom sistemu izložen habanju, utiče i selekcija materijala, pa ovoj aktivnosti treba posvetiti posebnu pažnju. Poznato je, takođe, da u ukupnim troškovima održavanja opreme troškovi materijala predstavljaju značajnu stavku, što dodatno ukazuje na značaj istraživanja i optimizacije u primeni materijala.

Materijali i ispitivanja

Materijali na kojima je ispitivano zavarivanje eksplozijom su čelici Č.0561 i Č.3134, čija su mehanička i ostala svojstva poznata (tabela 1). Čelik Č.0561 spada u opšte konstrukcione čelike koji su nelegirani i niskolegirani, sa naglašenim osnovnim karakteristikama – zateznom čvrstoćom i naponom tečenja na sobnoj temperaturi. Primenuje se za izradu zavarenih konstrukcija i cevovoda, konstrukcija spojenih vijcima i zakovicama (mostogradnji, visokogradnji, hidrogradnji i mašinogradnji) ili za dalju

preradu hladnim presovanjem, vučenjem, vrućim kovanjem ili valjanjem. Čelik Č.3134 je otporan na habanje. Kod ove kategorije čelika hemijskim sastavom i strukturom postiže se dobra otpornost na habanje po čitavom preseku. Poznato je više vrsta međusobno različitih habanja, tako da ne postoji čelik koji je otporan na sve vrste habanja. Najpoznatiji čelik otporan na habanje je visokolegirani manganski čelik, koji sadrži do 1,2% ugljenika i 12,5% mangana. Njegova otpornost na habanje najveća je u slučaju ojačavanja u hladnom stanju, tj. kada je čelik u eksploataciji izložen većem pritisku. Manganski čelici se upotrebljavaju za izradu transportnih uređaja, šinskih

Sl. 1 – Šema ispitivanja bimetalne epruvete na savijanje

delova, delova bagera i drobilica. Čelik Č.3134 se upotrebljava u slučajevima kada se visokolegirani manganski čelik, zbog loše obradivosti, ne može primeniti ili kada pri upotrebi čelika nema hladnog ojačavanja.

Kombinacijom ova dva materijala ostvaruje se potreban uslov da „noseći“ materijal može izdržati povećano habanje delova koji su izloženi udarima, cikličnim opterećenjima i abraziji.

Za eksperimente je korišćena bimetalna ploča zavarena eksplozijom. U za-

Sl. 2 – Šema ispitivanja na zatezanje

Sl. 3 – Šema ispitivanja na smicanje

Sl. 4 – Šema ispitivanja žilavosti

merna mesta za odredjivanje tvrdoće uzorka

Sl. 5 – Šema ispitivanja distribucije tvrdoće po uzorku

varenom stanju izvršeno je ispitivanje mikrostrukture u zoni spoja, ispitivanje makroskopskih grešaka bez razaranja, ispitivanje na savijanje (slika 1), zatezanje (slika 2), smicanje (slika 3), žilavost (slika 4), kao i merenje raspodele tvrdoće (slika 5).

Posle mekog žarenja i kaljenja ispitivana je raspodela tvrdoće i mikrostruktura u zoni spoja, kao i homogenost

zavarenog spoja u pogledu makroskopskih grešaka.

Nakon otpuštanja izvršena su ispitivanja mikrostrukture, ispitivanja bez razaranja na savijanje, zatezanje, smicanje, žilavost, kao i merenje distribucije tvrdoće u zoni spoja.

Metalografska ispitivanja

Mikrostruktura u zavarenom stanju u zoni uticaja toplote odgovara termodeformacionim uslovima pri zavarivanju eksplozijom i uslovima hlađenja.

Tipičan oblik linije zavarenog spoja je talasast, sa talasima povijenim u smeru dejstva sile izazvane eksplozijom i sa međusobnim zadiranjem jednog metala u drugi, praćenim visokim stepenom plastične deformacije. U zonama aktiviranja eksplozije i ostvarenja neadekvatnog režima zavarivanja javljaju se neprovari, zaostali oksidi, prsline i zone mešanja oba metala na oko 20% površine spoja.

Jedna od karakteristika zavarivanja eksplozijom jeste generisanje talasaste kontaktne površine, koja doprinosi povećanju čvrstoće spoja i, u izvesnoj meri, služi kao potvrda pouzdanosti zavarivanja. Na površini kontakta stvara se regularni talas određene dužine i amplitude. Ako se zavaruju dva metala jednakih karakteristika čvrstoće, tada su talasi sinusoidalni i relativno simetrični u odnosu na horizontalnu ravan kontakta. Ako se zavaruju dva metala različitih karakteristika čvrstoće, talas je zaoštren u stranu mekšeg metala, nezavisno od toga koji je od metala nepokretan.

U zavisnosti od režima sudara, oblici tečenja materijala su: laminarno, vrtložno i turbulentno. Parametri talasa bitno zavise od parametara sudara. Za izbor kriterijuma za generisanje talasa potrebno

je analizirati režim sudara pri kojem je generisanje talasa nestabilno, tj. pri maloj promeni bilo kojeg parametra sudara ono iščezava. Takvi režimi generisanja talasa nazivaju se kritičnim, a njihovo određivanje izaziva velike teškoće.

Generisanje talasa je, pre svega, proces nepovratne deformacije na površini sudara. Zbog toga je očigledno da pritisak koji se generiše pri sudaru mora prevazići dinamičku granicu čvrstoće materijala koji se sudaraju. Kriterijum generisanja talasa moguće je napisati u obliku $p > p_{kr}$, gde je: p – pritisak koji se generiše sudarom, p_{kr} – kritičan pritisak koji zavisi od materijala.

Mnogobrojni eksperimenti sa sudarom ploča pokazuju da pojava pritiska, sama po sebi, nije dovoljan uslov za generisanje talasa. Pri ravnom sudaru (brzina tačke kontakta $U = \infty$) ne primećuje se generisanje talasa, čak i pri veoma visokim pritiscima. Proračuni brzine tačke kontakta pokazali su da se generisanje talasa javlja samo u slučajevima kada brzina tačke kontakta ne prelazi brzinu zvuka u pločama ($U < c$). Kudinov je, na primer, ostvario talas u slučaju kada je brzina tačke kontakta prevazišla brzinu zvuka u pločama koje se sudaraju, ali je ugao sudara γ bio veći od γ_{kr} . Konstatovanje generisanja talasa u tim uslovima dosta je složeno, jer se podudara sa korišćenjem režima sa velikim brzinama sudara, a ploče se posle toga, po pravilu, razaraju.

Za kvalitativnu analizu procesa generisanja talasa potrebno je uvesti neke brojčane pokazatelje. Veličinu talasa bitno karakterišu dužina talasa λ i amplituda a . Da bi se uprostila analiza kvalitativnih karakteristika talasa, izvršena su merenja njihovih amplituda i dužina za različite režime generisanja talasa i razli-

čite materijale. Konstatovano je da se odnos a/λ menja u relativno uskom dijapazonu od 0,15 do 0,3. Mali broj eksperimentalnih tačaka koje se nalaze izvan ovog dijapazona odnose se na kritične režime sudara.

Kriterijumi generisanja i neka svojstva talasa omogućavaju pretpostavku da je generisanje talasa moguće ostvariti prema zakonima hidrodinamike. Dužina talasa je funkcija parametara sudara – brzine ploče koja se ubrzava, brzine tačke kontakta, ugla sudara, debljine i gustine ploče koja se ubrzava i osnovne (bazne) ploče ili svojstva čvrstoće materijala ploča. Kriterijum generisanja talasa omogućava pretpostavku da u prvoj aproksimaciji nije moguće uzeti u obzir kompresibilnost materijala, tako da tečenje u okolini tačke kontakta mora biti subsonično.

Pošto je eksperimentalno i teoretsko objašnjenje procesa generisanja talasa u spoju dva i više metala otežano, postoje mnogobrojne koncepcije kojima se nastoje objasniti uslovi i način generisanja talasa i strujanja. Prva od njih je koncepcija Abrahamsona, koju su sledile koncepcije Bahranija, Bleka i Kroslanda, a kasnije i koncepcija Hanta.

Poseban interes predstavlja određivanje granice generisanja talasa. Maksimalne brzine tačke kontakta, pri kojima se još mogu generisati talasi, određuju se iz graničnih uslova generisanja strujanja. Batoraev, Deribas i Moglijevski precizno su odredili da granice generisanja talasa zavise ne samo od mehaničkih svojstava materijala nego i od njegove strukture.

U zavarenom spoju ploča od čelika mikrokonstituent kod Č.3134 je pretežno globularni perlit, a kod Č.0561 ferit sa malim udelom perlita. Nije zapažena promena oblika, raspodele i udela perlita i karbidne faze čelika Č.3134 izazvana za-

varivanjem eksplozijom, izuzev što se u toj zoni uočavaju linije klizanja izazvane plastičnom deformacijom u oba metala.

Posle mekog žarenja mikrokonstituent kod Č.3134 je zrnasti perlit, a kod Č.0561 ferit sa malim udelom perlita.

Posle kaljenja i otpuštanja čelika Č.0561 u zoni uticaja toplote zapaža se igličasta Vidmanštetenova struktura, dok je kod Č.3134 za ovo stanje termičke obrade karakteristična mikrostruktura i primenjeni režim otpuštanja.

Distribucija tvrdoće

Distribucija tvrdoće u zoni eksplozijom zavarenog spoja čelika Č.3134 i Č.0561 prikazana je na slikama 6 do 9, a u zavarenom stanju na slici 6. Zapaža se relativno mali porast tvrdoće izazvan zavarivanjem eksplozijom u oba metala u blizini zone spoja. Pretpostavlja se da je porast tvrdoće posledica plastične deformacije pri zavarivanju. Posle žarenja po režimu za Č.3134 dobijena je distribucija tvrdoće prikazana na slici 7.

Sl. 6 – Distribucija tvrdoće u zoni eksplozijom zavarenog spoja Č.3134 i Č.0561

Kod uzoraka kaljenih po većini primenjenih režima ostvarena je nešto veća tvrdoća čelika Č.3134 u neposrednoj bli-

zini zone spoja, što može biti posledica sitnoznaste mikrostrukture u toj zoni posle žarenja (slika 8).

Sl. 7 – Distribucija tvrdoće u zoni eksplozijom zavarenog spoja – stanje: meko žareno

Sl. 8 – Distribucija tvrdoće u zoni eksplozijom zavarenog spoja – stanje: kaljeno

Sl. 9 – Zavisnost distribucije tvrdoće u zoni eksplozijom zavarenog spoja od temperature otpuštanja: stanje kaljeno na 800°C u ulju i otpušteno

Posle otpuštanja uglavnom je kod oba metala ostvarena ujednačena distribucija tvrdoće po celom preseku. Na slici 9 prikazana je distribucija tvrdoće posle niskog otpuštanja i posle otpuštanja po režimima koji se najčešće zahtevaju u praktičnoj primeni za Č.3134 ($T = 425-550^{\circ}\text{C}$).

Mehanička i tehnološka ispitivanja izvršena su prema šemama i uzorcima – epruvetama prikazanim na slikama 1 do 5, a rezultati su navedeni u tabeli 2.

Tabela 2

Metode i stanja ispitivanja eksplozijom zavarenog bimetalnog spoja

Stanje	Metoda ispitivanja				
	Zatezanje (kN)	Smicanje (kN)	Savijanje		Udar na žilavost (J)
			(kN)	ugao savijanja ($^{\circ}$)	
Zavareno	93	15,2	18,3	14	24,6
Žareno	119	12,0	20,0	90° bez prslina	78,0
Kaljeno na 800°C u ulju i otpušteno na 180°C	133	16,8	17,5	16	43,2

Ispitivanjima bez razaranja metodom magnetofluksa, ultrazvuka i penetrirajućih tečnosti u zavarenom spoju, konstatovane su pojedinačne prsline koje su nastale iz neprovara u zonama spoja u kojima je primenjen neadekvatan režim zavarivanja eksplozijom. Utvrđeno je da, u nekim slučajevima, posle kaljenja dolazi do širenja prethodnih prslina kod čelika Č.3134.

Zaključak

U mnogim granama industrije neprekidno se povećava potreba za materijalima koji objedinjavaju visoka mehanička

svojstva sa povećanom otpornošću u agresivnim sredinama ili povećanom otpornošću na habanje. Za rad u takvim uslovima najbolji su višeslojni ili kompozitni materijali, kod kojih je osnovni metal od, na primer, jeftinih konstrukcionih čelika, a sloj (ili slojevi) izložen povećanom habanju od visokolegiranog čelika.

Za dobijanje bimetalnih i višeslojnih materijala u praksi se već dugo i sve češće primenjuje zavarivanje eksplozijom. To je proces u kojem se eksploziv koristi za generisanje visokog pritiska kratkovremenog dejstva, pri čemu se metalne ploče dovode u direktan kontakt i zavaruju delovanjem međuatomskih sila rešetke. Tako formiran bimetal poseduje izuzetna termomehanička svojstva i pogodan je za dalje klasične postupke prerade, obrade i zavarivanja.

Nova generacija materijala odgovara naraslim zahtevima novih konstrukcionih rešenja i predstavlja značajnu supstituciju skupih i deficitarnih materijala. Postupak dobijanja bimetala eksplozijom vrlo je ekonomičan i brz, a čvrstoća metalne veze osnovnog i plakiranog metala je veća od čvrstoće manje kvalitetnog metala u spoju. Čvrsti spoj pri zavarivanju eksplozijom stvara se posle niza pojava – plastične deformacije metala (koja obezbeđuje ostvarenje fizičkog kontakta različitih metala), generisanja strujanja, mešanja, toplotnih pojava, itd. Toplota koja se oslobađa pri deformaciji usled velike brzine procesa, uopšte ne izaziva razvoj uzajamne difuzije metala, ili je stepen difuzije neznatan.

U prelaznom sloju javljaju se strukturne promene hemijske heterogenosti, spojevi sa ograničenom ili potpunom rastvorljivošću, međuslojevi hemijskih jedinjenja između metala, smeše koje uzajamno ne deluju sa metalima, difuzija u

čvrstom i tečnom stanju. Osim toga, sve ove pojave ostvaruju se istovremeno.

Promene strukture mogu biti izazvane faznim transformacijama koje se dešavaju pri visokom pritisku, prisustvom impulsnog povećanja temperature i brzog hlađenja. Efekti vezani za strukturne promene pri zavarivanju eksplozijom, u zavisnosti od određenog dela, mogu biti korisni (na primer, ojačavanje) ili štetni (na primer, pojava krte faze).

Dobijanje visokokvalitetnog spoja eksplozijom moguće je pri ispunjenju određenih parametara – pritiska u zoni sudara, dužine njegovog dejstva i brzine detonacije eksploziva. Pritisak u zoni sudara obezbeđuje potrebnu plastičnu deformaciju metala. Njegova veličina mora biti veća od kritičnog minimuma, koji je karakterističan za svaki metal. Pritisak sudara određen je odgovarajućom brzinom sudara, veličinom zazora između ploča koje se zavaruju, gustinom i visinom eksploziva, gustinom i debljinom ploče koja se ubrzava, kao i brzinom detonacije eksploziva.

Povećanjem dužine dejstva pritiska sudara povećava se kvalitet zavarenog spoja, tako da je smanjena verovatnoća njegove destrukcije pod dejstvom reflektovanog talasa. Značaj ovog parametra povećava se sa povećanjem debljine ploče koja se ubrzava. Najvažniji parametar zavarivanja eksplozijom jeste brzina zavarivanja, koja je jednaka brzini detonacije eksploziva. Ona mora biti manja od brzine zvuka u metalu, jer se pri većim brzinama zavarivanja čvrstoća spoja smanjuje.

Analiza mogućnosti zavarivanja odabrane dve vrste čelika imala je za cilj da se pokaže koliki stepen supstitucije može da se ostvari primenom konstrukcionog čelika u delovima koji su izloženi povećanom

nom habanju. Debljina ploče od čelika sa većim udelom mangana sposobna je da podnese udarna opterećenja i da produži vek konkretnog proizvoda. Poznata je tehnologija ojačavanja delova sa visokim sadržajem mangana, primenom energije eksplozije i njeni efekti na delove koji su izloženi habanju, abraziji i eroziji. Istraživanja mogućnosti supstitucije skupih materijala nastavljaju se na konkretnim problemima u rudarstvu, građevinarstvu i saobraćaju (železnici).

Literatura:

- [1] Deribas, A. A.: Fizika upročnenija i svarki vzrivom, Nauka, Novosibirsk, 1980.
- [2] Murr, L. E.: Shock Waves for Industrial Applications, Noyes Publications, New Jersey, 1988.
- [3] Blazynski, T. Z.: Materials at High Strain Rate, Elsevier Science Publishing Co., London, 1987.
- [4] Radić, V.: Doktorska disertacija, Beograd, 1995.
- [5] Radić, V.: Svojstva i primena bimetalnih materijala dobijenih eksplozijom, Naučni skup Mehanika, materijali i konstrukcije, SANU, Beograd, 1995.
- [6] Radić, V.: Višeslojni materijali dobijeni eksplozijom, Konferencija Novi materijali, Herceg Novi, 1995.
- [7] Radić, V.: Karakteristike procesa zavarivanja eksplozijom i uslovi kvaliteta, Konferencija Zavarivanje, Beograd, 1996.
- [8] Radić, V.: Održavanje tehničkih sistema i tehnologija zavarivanja eksplozijom, XXIII Jugoslovenski majski skup Održavanje tehničkih sistema, Kragujevac, 757–762.
- [9] Radić, V.: Sistemi i parametri zavarivanja cevi eksplozijom, PROCESING '98, Bečići, Procesna tehnika, 4, 1998, 35–37.
- [10] Radić, V.: Formiranje spoja pri zavarivanju eksplozijom, 27. Međunarodno savetovanje proizvodnog mašinstva, Niš, compact disc.
- [11] Radić, V.: Modeliranje i simulacija odziva materijala na dejstvo eksplozije, Naučnotehnički pregled, 4, 1998, 48–57.
- [12] Radić, V.: Analiza naponskog stanja eksplozijom spojenih cevi primenom MKE, IRMES '98, Beograd, 431–436.
- [13] Radić, V.: Pouzdanost mašinskih elemenata dobijenih zavarivanjem eksplozijom, IRMES '98, Beograd, 425–430.
- [14] Radić, V.: Explosive Consolidation of Aluminium Nitride Powders, IX Round Table of Conference SINTERING, Beograd, 1998, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 489–496.
- [15] Radić, V.: Explosive Welding of Multilaminates, I International Conference Chemical Sciences in Industry, Solun, Zbornik apstrakata, 623.
- [16] Radić, V.: Karakteristike delova od kompozitnih materijala dobijenih zavarivanjem eksplozijom, Vojnotehnički glasnik, 5, 1998, 594–599.
- [17] Radić, V.: Uticaj zakrivljenosti cevi na oslobađanje energije u zoni spoja pri zavarivanju eksplozijom, Vojnotehnički glasnik, 6, 1998, 673–680.
- [18] Radić, V.: Parametri procesa oblikovanja eksplozijom i primena u obradi materijala, JUPITER, Beograd, 1999, 3.135–3.140.
- [19] Radić, V.: Izvlačenje eksplozijom danaca velikih gabarita, PROCESING '99, Beograd, 1999, Procesna tehnika, 3, 224–228.
- [20] Radić, V.: Methods of Evaluating the Strengths of Welds Made by an Explosion, The International Autumn Seminar on Proppelants, Explosives and Pyrotechnics, 1999, Beijing, China, Zbornik radova.
- [21] Radić, V.: Selekcija parametara zavarivanja eksplozijom u ravanskoj geometriji, Konferencija Zavarivanje '99, Beograd.
- [22] Radić, V.: Applications of Explosive Hardening and Strengthening, III Međunarodna konferencija Teška mašinogradnja – TM99, Kraljevo, 1999, Zbornik radova.