



Z. Odanović, V. Grabulov, B. Katavić

## OSVAJANJE TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA DVOSLOJNIH Cr-Mo-Ni ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE

### DEVELOPMENT OF WELDING TECHNOLOGY FOR HIGH STRENGTH DUAL HARDNESS Cr-Mo-Ni STEEL

**Stručni rad / Professional paper**

**UDK / UDC:** 621.791:669.15'26'28'24

**Rad primljen / Paper received:**

April 2008.

**Ključne reči:** Dvoslojni čelici, tehnologija zavarivanja, mehaničke osobine, mikrostruktura.

#### **Izvod**

Višeslojni metalni materijali su nastali kao rezultat specifičnih potreba ili sa ciljem dobijanja kvalitetnog, a jeftinijeg materijala. Posebnu grupu čine višeslojni čelici, koji su našli primenu za izradu sečiva u grafičkoj industriji, u hemijskoj industriji za izradu delova postrojenja, kao i u vojnoj industriji. O problematici zavarivanja višeslojnih čelika ima relativno malo podataka i oni se uglavnom odnose na zavarivanje kombinacije višeslojnih niskolegiranih i nerđajućih čelika, dok o zavarivanju višeslojnih čelika visoke čvrstoće skoro i da nema raspoloživih podataka. U radu su prikazani rezultati istraživanja sa ciljem osvajanja tehnologije zavarivanja dvoslojnih čelika visoke čvrstoće i dobijanja kvalitetnog zavarenog spoja sa optimalnim mehaničkim i strukturnim osobinama. Ispitivanja su vršena na dvoslojnim čelicima, debljina 8 i 11mm, tvrdoća 60 i 45 HRc, sa odnosom deljina tvrdog i plastičnog dela 40:60. U okviru obavljenih istraživanja definisani su optimalni parametri elektrolučnog zavarivanja i dodatni materijal i izvršena je strukturno mehanička karakterizacija zavarenih spojeva.

**Adresa autora / Author's address:**

Zoran Odanović, Vencislav Grabulov,  
Institut za ispitivanje materijala, Vojvode Mišića 43,  
Beograd, Srbija

Boris Katavić,  
Institut Goša, Milana Rakića 35, 11000 Beograd, Srbija

**Keywords:** Dual hardness steel, welding technology, mechanical properties, microstructure.

#### **Abstract**

Multi layer metal materials, are developed as a result of specific requirements or/and to obtain lower price metal material with high performances. Special group of multilayer materials are multilayer steels which are applied for cutters in graphical industry, in chemical industry for process equipment and for military purposes. Process data about technologies for welding of multilayer steels, are very exceptional in literature. Most data are treated welding of clad carbon steels with stainless steel. For welding high strength dual hardness steels, technology data practicality not exists in literature. In the paper are presented results of investigation of welding technologies development for high strength dual hardness steels with aim to obtain high quality welded joint with optimal mechanical and structural properties. Investigations were performed on two layer steel plates of 8 and 11 mm in thickness, with dual hardness of 60 and 45 HRc and thickness ratio of 40:60. The optimal welding parameters for arc welding process were defined. Testing of mechanical and structural properties of welded joint was performed.

#### **UVOD**

Višeslojni metalni materijali, posebno višeslojni čelici su nastali kao rezultat specifičnih potreba ili sa ciljem uštede u slučaju skupih, specijalnih i visokolegiranih čelika. Višeslojni čelici našli su primenu u različitim oblastima i to: za izradu reaktora i kolona isparivača u hemijskoj industriji; digestora, mešača u prehrambenoj industriji; sečiva u grafičkoj industriji, vakuumskih destilatora, izmenjivača toplote u naftnoj industriji, noževa, kvačila hidromotora u mašinskoj industriji, kao i u vojnoj industriji za balističku zaštitu. Spajanje pri izradi dvoslojnih čelika obavlja se toplim valjanjem, kovanjem, eksplozivnim spajanjem ili postupkom pretapanja pod troškom [1-7]. Oblikovanje i zavarljivost dvoslojnih čelika je vrlo problematično.

Analiza raspoložive literature pokazala je da o problematici zavarivanja višeslojnih metalnih materijala ima relativno malo podataka i oni se uglavnom odnose na zavarivanje kombinacije višeslojnih niskolegiranih i nerđajućih čelika, dok o zavarivanju višeslojnih čelika visoke čvrstoće nema raspoloživih podataka, jer se verovatno takvi podaci čuvaju kao tehnološka tajna. U ovakvim slučajevima, kada se zahteva razvoj odgovarajuće tehnologije zavarivanja, kada je na raspolaganju vrlo mala i ograničena količina za ispitivanja, izbor optimalne tehnologije mora se zasnivati na prethodnim iskustvima na čelicima sličnih karakteristika i na vrlo ograničenom broju eksperimenata.

Osnovni cilj sprovedenih istraživanja bio je osvajanje tehnologije zavarivanja dvoslojnog čelika visoke



čvrstoće debljina 8 i 11mm, tvrdoća 60 i 45 HRC, sa odnosom deljina tvrdog i plastičnog dela 40:60. Rađeno na rešavanju problema izbora optimalnih parametara elektrolučnog zavarivanja i dobijanja kvalitetnog zavarenog spoja dvoslojnih čelika sa optimalnim mehaničkim i strukturnim osobinama.

## EKSPERIMENT

### Osnovni materijal

Dve vrste Cr-Mo-Ni čelika označenih sa A i B, su izrađene u elektrolučnoj peći, zatim su liveni u ingote. Hemijski sastav svakog pojedinačnog čelika prikazan je u Tabeli 1.

Prethodno izrađeni ingoti čelika A i B, toplo su valjani do ploča debljina 100mm od čelika A i do 150mm od čelika B. Širina ploča iznosila je 1100mm, a dužina 2100mm. Temperature valjanja iznosile su 1230°C, odnosno 1200°C. Nakon hlađenja, ploče su pripremane za spajanje brušenjem, a zatim su zavarivane po obodu. Time je dobijen paket ukupne debljine 250 mm, koji je išao na spajanje. Ploče su spajane toplim valjanjem na temperaturi od 1250°C. Pre spajanja odnos debljina ploča iznosio je 42:58, a nakon valjanja je bio A:B=45:55. Uzrok razlike u odnosima debljina je različita deformabilnost čelika A i B. Ploče dvoslojnog

čelika su valjane do debljina od 8 mm i 11 mm. Nakon valjanja ploče su ultrazvučno pregledane i konstatovano je da je spoj homogen. Ploče su zatim kaljene u ulju sa 1000°C i otpuštane 2 sata na temperaturi od 200°C [8].

### Eksperimenti zavarivanja

Eksperimenti elektrolučnog zavarivanja vršeni su na pločama dimenzija 150 x 300mm i debljine 8mm i 11mm, s tim da je duža strana normalna na pravac valjanja. Ivice ploča su pripremljene za zavarivanje, tako što je brušenjem napravljen "V" žljeb pod uglom od 60°, sa zatupljenjem korena žljeba od 1 - 2 mm. Zavarivanje je izvedeno poluautomatski elektrolučnim postupkom sa topivom elektrodnom žicom u atmosferi zaštitnog gasa Ar (MIG). Sastav gasa je 99% Ar i 1% O<sub>2</sub>. Protok gasa tokom procesa iznosio je 16 dm<sup>3</sup>/min. Kao topiva elektrodna žica korišćena je žica MIG 20/9/7 Ti. Prečnik žice je bio  $\phi$  1.2 mm, a hemijski sastav je prikazan u tabeli 2.

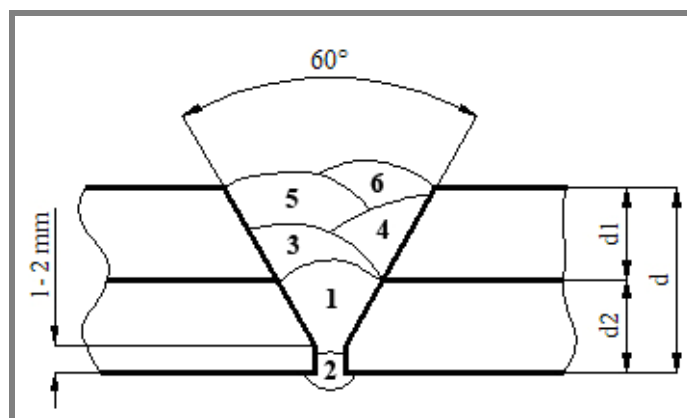
Pre zavarivanja vršeno je predgrevanje ploča na 150°C, a temperatura medjuprolaza je bila 175°C. Redosled prolaza prikazan je na slici 1. Primenjeni parametri zavarivanja prikazani su u tabeli 3.

Tabela 1: Hemijski sastav čelika

Hemijski sastav (mas. %)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Fe
Čelik A	0.53	0.83	0.48	0.010	0.010	4.64	0.12	1.19	0.33	Ostatak
Čelik B	0.34	0.15	0.45	0.010	0.017	1.78	4.32	0.37	0.05	Ostatak

Tabela 2: Hemijski sastav elektrodne žice

Hemijski sastav (mas. %)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti
0.10	0.40	6.92	0.020	0.016	19.57	9.91	0.26



Slika 1: Redosled prolaza pri zavarivanju dvoslojnih čelika (d - ukupna debljina dvoslojnog čelika, d1 - debljina čelika A, d2 - debljina čelika B)



Tabela 3: Parametri zavarivanja

Br. prolaza	Struja A	Napon V	Brzina zavarivanja cm/min	Energija zavar. kJ/cm
1	150	20	22	8
2	200	20	31	7.7
3	200	20	31	7.7
4	200	20	31	7.7
5	200	20	31	7.7
6	200	20	31	7.7

### Ispitivanja

Ispitivanje zateznih osobina osnovnog metala (dvoslojnog čelika) vršeno je na epruvetama merne dužine 200mm i prečnika 4mm, a ispitivanje energije udara vršeno je na epruvetama ISO - V, na po tri uzorka. Radi provere mehaničkih osobina zavarenih spojeva od dvoslojnih čelika, osobina dodatnog materijala i primenjenog postupaka zavarivanja, ispitane su zatezne mehaničke osobine i tvrdoća u spoju. Ispitivanje je vršeno na epruvetama sa udubljenim i paralelnim bokovima.

Izvršeno je i ispitivanje energije udara, s tim da je V zarez, nanošen po debljini limova, u metalu šava i ZUT-u, i to na svakom od pojedinačnih slojeva.

Obavljena je i metalografska analiza osnovnog metala i zavarenih spojeva na svetlosnom mikroskopu. Priprema anliziranih površina vršena je klasičnim metodama, brušenjem i poliranjem i nagrizanjem u 3% nitalu.

### REZULTATI I DISKUSIJA

#### Zatezne osobine i energija udara osnovnog materijala

Mehaničke osobne svakog pojedinog čelika, kao i dvoslojnog čelika su ispitane nakon termičke obrade i

rezultati su prikazani u tabeli 4. Rezultati pokazuju visoke vrednosti zatezne čvrstoće i tvrdoće, što je i očekivano. Uočava se da je tvrdoća dvoslojnog čelika nešto niža od predviđene, ali je zadovoljavajuća. Energija udara spojenog čelika iznosi 16J i manja je od od vrednosti za čelik B. Smicajna čvrstoća spoja iznosila je 400 do 500 MPa, što je u skladu sa podacima iz literature, da ona treba da iznosi 25% od zatezne čvrstoće čelika B.

#### Zatezne osobine i energija udara zavarenog spoja

Za zavarivanje probnih čelika primenjeno je elektrolučno zavarivanje u zaštitnoj atmosferi sa elektrodnom žicom, kao pogodan postupak za zavarivanje dugih varova u više prolaza, sa relativno velikom brzinom ispune, što je posebno važno kod zavarivanja limova veće debljine.

Za dodatni materijal izabrana je žica MIG 20/9/7, obzirom na osobine metala šava koje daje, kao i njenu primenu za zavarivanje sličnih čelika za poboljšanje visoke čvrstoće.

Rezultati ispitivanja zavarenih spojeva prikazani su u tabelama 5. i 6. Ispitivanja su vršena na limovima debljine 8 i 11 mm.

Tabela 4: Mehaničke osobine ispitivanih čelika

Čelik	Termičko stanje	Zatezna čvrstoća, Rm	Izduženje A5	Tvrdoća	Energija udara KV300/2
		MPa	%	HRc	J
A	meko žareno	966	10.5	23	/
	kaljeno	2330	/	59	/
	otpušteno	2488	/	57	24
B	meko žareno	1083	10.6	28	59
	kaljeno	2057	6.2	53.3	25
	otpušteno	1735	7.8	48	41
A/B	otpušteno	/	/	53/46	16

**Tabela 5:** Zatezne osobine zavarenih spojeva dvoslojnih čelika

Uzorak	Debljina lima, mm	Rm, MPa	Oblik epruvete	Mesto loma	Napomena
1.1	11	679	PB	MŠ	/
1.2	11	785	UB	MŠ	krupnozrnost u korenu
2.1	11	488	PB	OM	lom van repera sa inicijalnom prs.
2.2	11	746	UB	MŠ	/
3.1	8	641	PB	MŠ	5% neprovar
3.2	8	520	UB	MŠ	/

Primedba: PB - paralelni bokovi, UB - udubljeni bokovi, MŠ - metal šava, OM - osnovni metal

**Tabela 6:** Energija udara zavarenih spojeva dvoslojnih čelika

Uzorak	Debljina lima, mm	Dimenzije epruveta, mm	Energija udara, izmerena KV 350/2, J	Energija udara, svedena na stand. KV 350/2, J	Napomena
1.1	11	10x9.65x55	5.0	5.2	osnovni metal
2.1	11	10x9.65x55	8.75	9.0	zarez na gornjoj ploči u ZUT
2.2	11	10x9.65x55	12.6	13.1	zarez na donjoj ploči u ZUT
2.3	11	10x9.65x55	36.3	37.6	zarez u MŠ
3.1	8	10x6.88x55	4.8	7.0	zarez u ZUT

Rezultati ispitivanja zateznih osobina osnovnog materijala u zavarenom spoju pokazuju vrednosti koje su ispod nivoa osobina koje su dobijene pri ispitivanju osnovnog materijala (Tabela 4), međutim one su na očekivanom nivou za primenjeni dodatni materijal. Rezultati ispitivanja energije udara pokazuju u slučaju osnovnog metala zavarenog spoja, niže vrednosti od vrednosti koje su dobijene za dvoslojni čelik. Razlog može biti, različita termička istorija, uslovljena periodom razoja i eventualnih odstupanja od predviđene termičke obrade, kao i veličine komada koji su podvrgavani termičkoj obradi. Podaci o energiji udara kada je zarez lociran u ZUT u gornjoj (tvrđoj) ploči i donjoj (mekšoj) ploči su za očekivanje, odnosno energija udara je niža (9 J) kada je zarez u gornjoj ploči, a viša (13 J), kada je zarez u donjoj ploči. Apsolutne vrednosti energije udara u ZUT su više, u odnosu na osnovni metal, što je verovatno rezultat zahvatanja metala šava pri nanošenu zarezu i time njegovim učešćem u ukupnoj energiji potrebnoj za prelom epruvete. Ovakvi rezultati su, moguće je i posledica otpuštanja u ZUTu tokom višeslojnog zavarivanja. Treba napomenuti da je energija udara metala šava daleko viša u odnosu na osnovni metal, što je i očekivano obzirom na izabrani i primenjeni dodatni materijal.

#### Raspodela tvrdoća u zavarenom spoju

Raspodela tvrdoća kroz zavareni spoj dvoslojnih čelika prikazana je na slici 2 i u tabeli 7.

Merenje je vršeno metodom Vickers (HV1) na po dva nivoa na svakom od čelika iz dvoslojnog čelika.

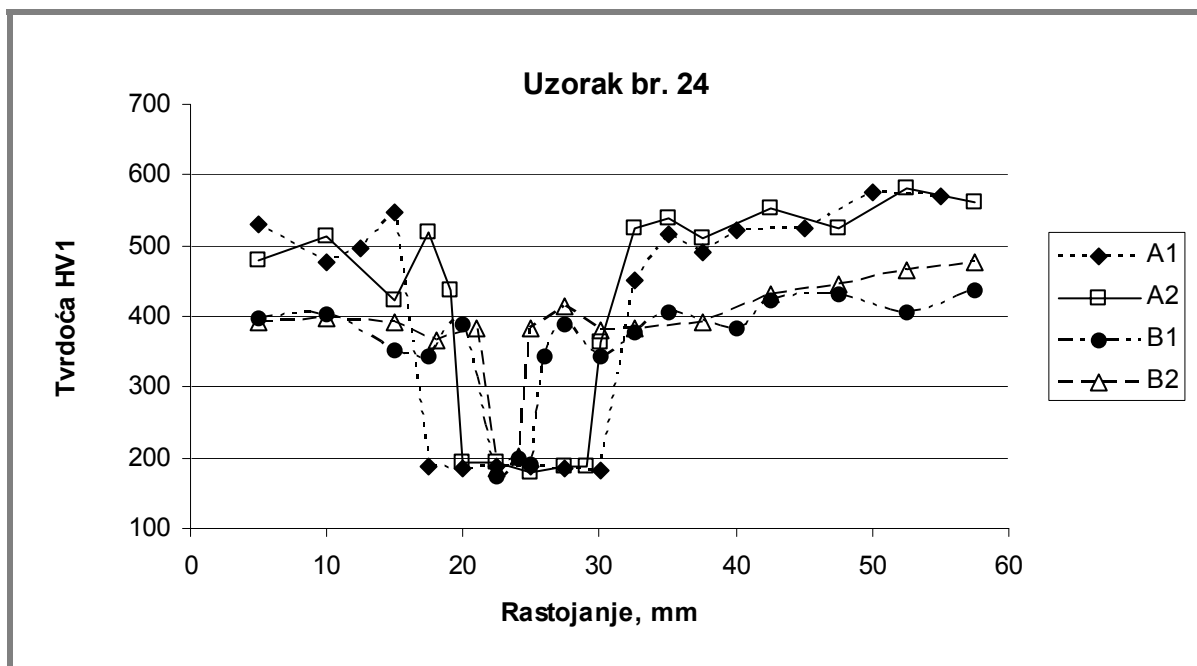
Rezultati merenja tvrdoća u zavarenim spojevima dvoslojnog čelika u tvrđem sloju - A se kreću 580 - 450 HV1, u metalu šava od 200 - 170 HV1, a u mekšem sloju - B, od 350 - 450 HV1. Uočava se pad tvrdoće u oblastima ZUT, što se podudara i sa relativnim porastom vrednosti energije udara u ZUT, što potvrđuje da je došlo do lokalnog otpuštanja usled višeprolaznog zavarivanja.

#### Mikrostrukturalna i makrostrukturalna ispitivanja

Mikrostrukture pojedinačnih čelika i spoja dvoslojnog čelika, pri različitim uvećanjima, prikazane su na slikama 3 a i 3 b. Mikrostrukturu svakog pojedinačnog čelika čini martenzit.

Rezultati izvršenih ispitivanja makrostrukture zavarenih spojeva dvoslojnih čelika prikazani su na slikama 4 a i 4 b za ploče debljina 8 mm i 11 mm

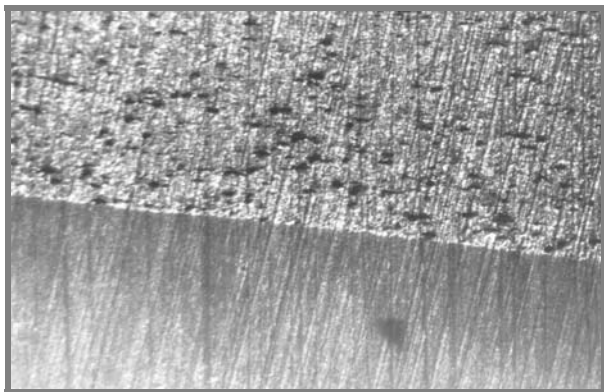
Ispitivanja su pokazala da nisu uočeni nespojeni delovi između slojeva čelika A i B. Oblik ZUT je karakterističan, obzirom da linija ZUT nije kontinualna, već da postoji prekid na liniji spajanja slojeva A i B, a što je rezultat različitih toplotnih provodljivosti i specifičnih toplota svakog od pojedinačnih spojenih čelika u dvoslojnom čeliku.



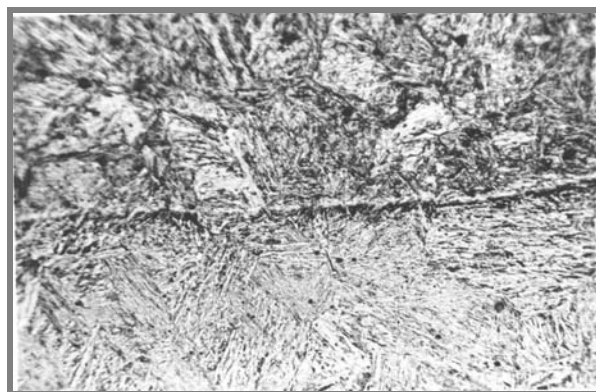
**Slika 2:** Raspodela tvrdoća HV1 kroz zavareni spoj dvoslojnog čelika

**Tabela 7:** Raspodela tvrdoća HV1 kroz zavareni spoj dvoslojnog čelika

Oznaka	Tvrdoća HV1						
	Rezultati merenja						
Čelik A, linija 1	531	477	497	547	189	185	187
	189	185	181	451	515	491	521
	524	576	571				
Čelik A, linija 2	480	512	422	518	436	193	193
	180	187	187	363	524	540	509
	554	524	582	561			
Čelik B, linija 1	398	403	353	344	388	173	199
	190	344	390	344	378	405	382
	422	432	405	436			
Čelik B, linija 2	392	396	392	365	384	185	202
	382	413	380	384	392	432	446
	466	477					

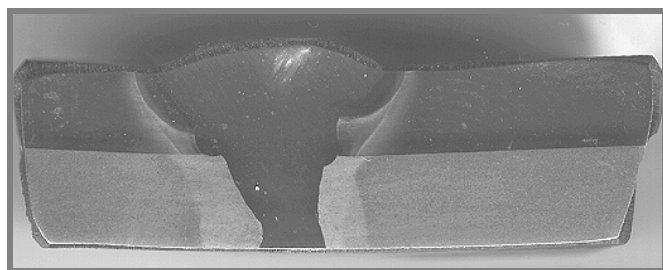


a)

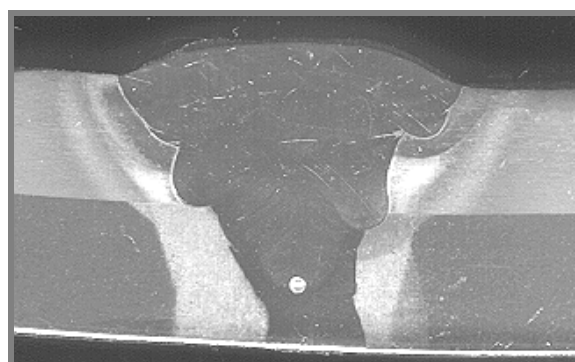


b)

**Slika 3:** Mikrostrukture spoja čelika A i B, a) uvećanje 50 x, b) uvećanje 500 x, nagriženo u Nitalu



a) ploča debljine 8mm



b) ploča debljine 11mm

**Slika 4:** izgled zavarenih spojeva dvoslojnog čelika, nagrivanje u Nitalu

## ZAKLJUČAK

U okviru izvršenih istraživanja definisani su osnovni parametri tehnologije zavarivanja i izabran je dodatni materijal za dvoslojni čelik visoke čvrstoće debljina 8 i 11 mm i izvršena su strukturno - mehanička ispitivanja zavarenih spojeva.

Rezultati ispitivanja osvajanja tehnologije zavarivanja, pokazuju da se ovi čelici, uz izvesna ograničenja vezana za njihove karakteristike visoke čvrstoće, mogu uspešno zavarivati, čime se otvaraju mogućnosti njihovog oblikovanja i šire komercijalne primene.

Interesantno bi bilo, u daljem radu, razviti ili iskoristiti postojeće probe za ispitivanje zavarljivosti i detaljnije definisati zavarljivost ove vrste čelika. Takođe bi bilo interesantno probati i druge postupke zavarivanja koji se mogu primeniti na dvoslojne čelike.

## ZAHVALNICA

Rad je uradjen u okviru realizacije projekta 19023 "Osvajanje novih tehnologija reparaturnog zavarivanja za interventne remonte termoenergetskih postrojenja" i projekta 19061: "Istraživanje optimalnog sastava metalnih komponenti i niskomolekularnih hidrofobnih jedinjenja za razvoj novog metalurškog kvaliteta" koji su

sufinansirani i od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] J. S. Montgomery, M. G. H. Wells, JOM, 1997. 45-47.
- [2] T. Obikawa, M. Yoshino, J. Shinozuka, "Sheet steel lamination for rapid manufacturing" - Journal of Materials Processing Technology (Netherlands), 1999 - csa.com
- [3] AJ Polito, RE Bailey, WW Timmons, RH Bell - US Patent 5,749,140, 1998
- [4] R.C.Liable "Ballistic Materials and Penetration Mechanics", Ed., Elsevier Publishing Company, Amsterdam, 1980., p.73-168.
- [5] B. W. Cotterman and R.D. French, "Trends in Armor Materials Development", Army Res. Dev. & Acquis. Mag., br. 2, 1985., p.24-26.
- [6] M. Hewish and R.Pengelly, "Tomorrow's Shield", International Defense Review, p.1996., 34.
- [7] S.J. Sawage, "New Armour Materials: Metal Matrix Composites", NTIS No.:PB 94-189131/HDM, Feb. 1994., p.23.
- [8] Z. Odanović, V. Grabulov: "Razvoj tehnologije izrade dvoslojnih pancirnih čelika", Konferencija OTEH 2005, Beograd.