

Optimizacija dizajna kalupa za ulivanje termitnog čelika kod aluminotermijskog zavarivanja železničkih šina softverskom simulacijom

ALEN Š. DELIĆ, TTU energetik d.o.o, Tuzla, Bosna i Hercegovina

VASO D. MANOJLOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,

Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

MIROSLAV D. SOKIĆ, Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd

MILORAD P. GAVRILOVSKI, Univerzitet u Beogradu,

Inovacioni centar Tehnološko-metalurškog fakulteta, Beograd

Stručni rad

UDC: 621.791:625.143

DOI: 10.5937/tehnika2203311D

Već više od jednog veka aluminotermijski postupak zavarivanja šina koristi se za spajanje železničkih šina. Prednosti ovog postupka su njegova fleksibilnost, kompaktnost spoja i jednostavnost izvođenja. Za njegovo izvođenje nije potrebno dovođenje energije spolja. Ona se obezbeđuje egzoternim efektom hemijskih reakcija komponenti koje čine aluminotermijsku smešu. Jedan od bitnih elemenata za izradu zavarenog spoja zahtevanog kvaliteta je i dizajn kalupa sa ulivnim sistemom koji treba da obezbedi ravnomerno ulivanje termitnog čelika, bez turbulencija, zatim ravnomerno odvođenje toplote, odnosno hlađenje u cilju dobijanja odgovarajuće mikro i makro strukture čelika, bez unutrašnjih i spoljašnjih grešaka. Zbog toga se dizajn kalupa neprestano razvijao, koristeći skupe eksperimentalne metode u industrijskim uslovima. Danas se primenjuju softverski paketi za simulaciju klasičnih procesa livenja koji se mogu primeniti i kod izlivanja termitnog čelika tokom izrade zavarenih spojeva železničkih šina čime se izbegavaju skupa i dugotrajna ispitivanja u industrijskim uslovima. U radu su prikazani rezultati simulacije livenja termitnog čelika u kalupnu šupljinu, odnosno u šav zavarenog spoja za šinu 49E1, koristeći softverski paket NovaFlow& Solid CV. Adekvatnost rezultata simulacije proverena je izradom probnih zavarenih spojeva u industrijskim uslovima i ispitivanjima njihovog kvaliteta, shodno EU 13740-1:2017 standardu.

Ključne reči: aluminotermijsko zavarivanje; simulacija; Novacast; zavareni spoj

1. UVOD

Simulacija livenja u klasičnoj tehnologiji livenja je inovativni alat koji u osnovi simulira punjenje kalupa metalom, kao i njegovo očvršćavanje i daje mogućnost simulacije proizvodnje odlivaka. Postupak simulacije u svakom slučaju smanjuje troškove proizvodnje i optimizuje tehnološki proces livenja [1]. Moguće je simulirati većinu komercijalnih metoda livenja, a takođe i metodu livenja termitnog čelika kod aluminotermijskog zavarivanja šina [2]. Simulacija vizualizira posledice specifičnih ulivnih kanala i sistema hranitelja. Optimizacijom dizajna ulivnog sistema i odušaka za gasove mogu se izbeći nedostaci u odlivcima, kao

što su makro i mikro uključici zbog prevelike turbulencije, hladni spojevi, skupljanje i poroznost [3-6].

Osnovni ulazni podaci u program za simulaciju je 3D CAD model za izradu kalupa. U program se zatim ubacuju osnovni parametri aluminotermijskog procesa, kao što su karakteristike termitnog čelika, kalupa, kao i karakteristike prenosa toplote metala, peščanog kalupa, temperature izlivanja, i dr.

Izlazni podaci uključuju animiranu vizualizaciju punjenja kalupa, očvršćavanje termitnog čelika i dalje hlađenje do sobne temperature. Simulacija punjenja kalupa pomaže u predviđanju ukupnog vremena punjenja, erozije kalupa, nepotpunog punjenja i zarobljavanja gasova.

Simulacija očvršćavanja za livenje pokazuje temperaturu, stopu hlađenja, koje se koriste za predviđanje lokacije poroznosti skupljanja zasnovane na Niyama i drugim kriterijumima. Dalje hlađenje do sobne temperature takođe može biti simulirano, što je

Adresa autora: Alen Delić, TTU energetik doo, Tuzla, 18. hrvatske brigade 25, Bosna i Hercegovina

e-mail: alen.delic@ttuenergetik.ba

Rad primljen: 10.06.2022.

Rad prihvaćen: 22.06.2022.

korisno za predviđanje mikrostrukture, mehaničkih svojstava, zaostalih naprezanja i uvijanja.

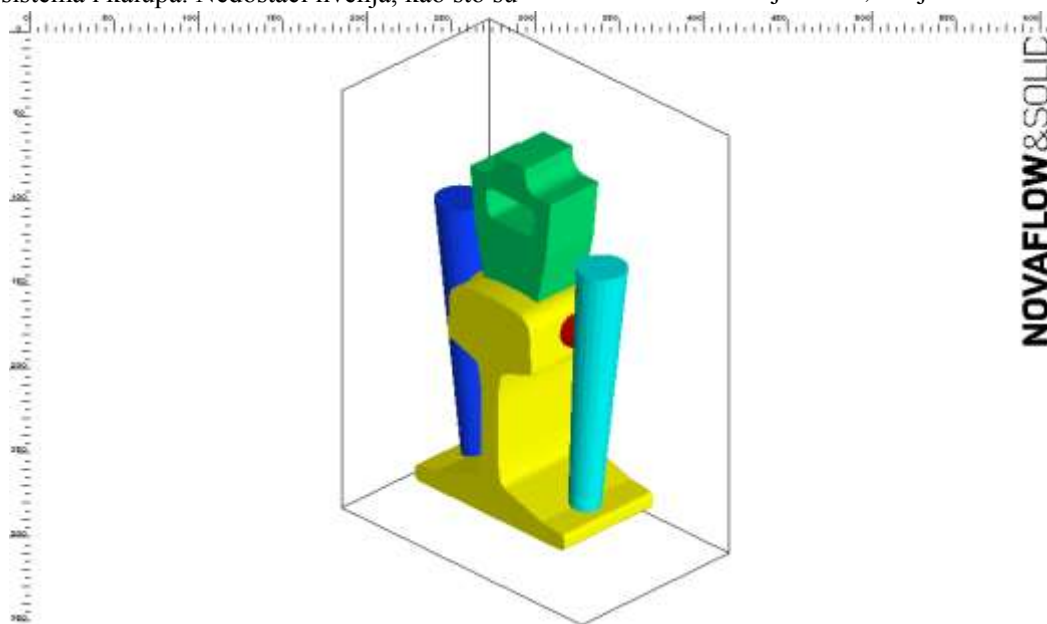
U ovom radu prikazan je primer upotrebe simulacije livenja kod aluminotermijskog zavarivanja, čime je izbegnuta metoda praktične probe i greške. Rezultati simulacije ukazuje na homogenost zavarenog spoja i pomažu kod optimizacije geometrije kalupa. Simulacije vizuelno prikazuju posledice specifičnog dizajna ulivnog sistema i kalupa. Nedostaci livenja, kao što su

oksidni uključci zbog preterane turbulencije, podhlađivanja, skupljanja i inkluzije troske, mogu se izbeći pomoću optimizacije dizajna ulivnog sistema, hranitelja i ventilacije.

2. METODE I MATERIJALI

2.1. Simulacija aluminotermijskog zavarivanja šina

Šema kompletnog sistema zavarivanja koji je korišćen u simulaciji izrade, dat je na slici 1.



Slika 1 - 3D model aluminotermijskog zavarivanja šina

Za simulaciju se koristi softverski paket Nova-Flow & Solid CV (kompanije Novacast, Švedska) [2]. Umesto metode konačnih elemenata, korišćen je metod konačnih zapremina.

Podešavanjem parametara mreže model je podeljen u male heksagonale (kocke), kombinovane sa ivičnim ćelijama, što predstavlja matematičku

aproksimaciju koja potpuno odgovara originalnom modelu. U tom slučaju veličina ćelija nije više tako kritična, pa je bilo moguće koristiti i veće ćelije (ukupan broj ćelija 495261). Za podešavanje parametara simulacije prvo je izabran tip livenja, odnosno gravitaciono livenje. Nakon toga su podešeni parametri koji su prikazani u tabeli 1.

Tabela 1. Parametri rastopa u simulaciji livenja

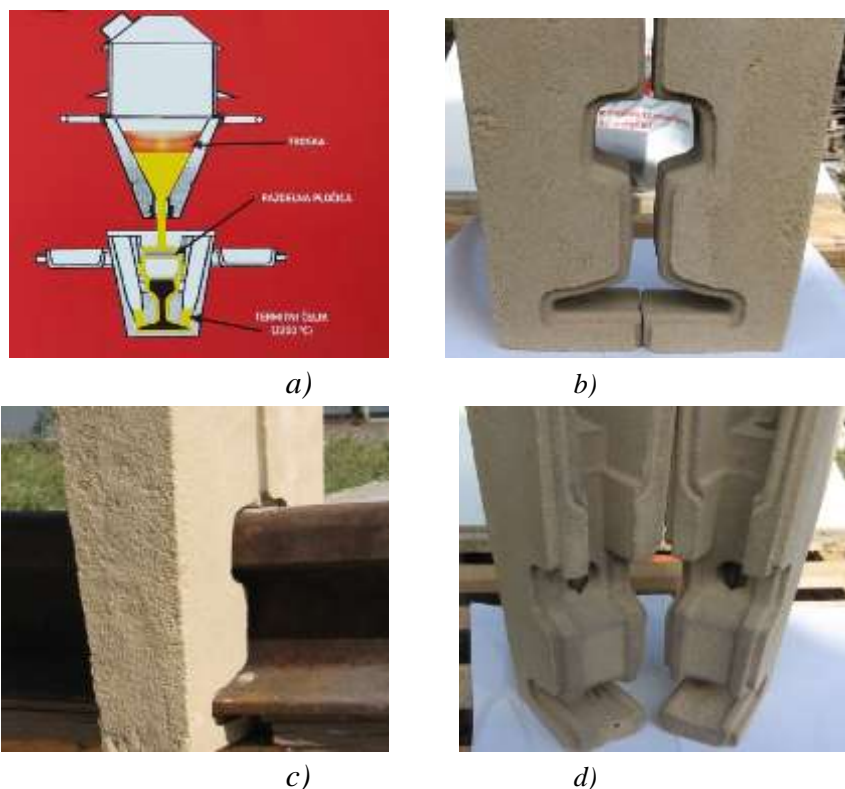
Temperatura rastopa	2200 °C
Masa odlivka	5,928 kg
Dužina mlaza	300 mm
Vreme izlivanja iz lonca	5,255 s (1,128 kg/s)
Temperatura kokile	950 °C

2.2. Tehnologija zavarivanja i geometrija kalupa

U cilju provere adekvatnosti simulacije izvršena su ispitivanja zavarenog spoja u realnim uslovima na dva izrađena zavarena spoja, koristeći dizajn kalupa koji je dobijen simulacijom. Tip šine je 49E1 u kvalitetu R260 (prema tome hemijski sastav AT čelika odgovara

ovom kvalitetu). Korišćena je AT smeša firme Pyrkonit. Ispitivanja su sprovedena shodno standardu EN14730-1:2017 [8].

Na slici 2 prikazana je tehnologija direktnog ulivanja koja je primenjena za simulaciju, kao i konačan dizajn kalupa.



Slika 2 - a) Šematski prikaz tehnologije aluminotermijskog ulivanja metala u kalup, b) dizajn kalupa, c) po stavljanje kalupa na šine, d) geometrija kalupne šupljine

Makro struktura uzdužnih i poprečnog preseka AT zavarenog spoja šine 49E1 u kvalitetu R260 pregledana prema zahtevima tačke 7.4.1.2. standarda SRPS EN14730-1 [8].

Ispitivanje tvrdoće zavarenog spoja izvršeno je prema standardu SRPS EN 14730-1:2006, odnosno SRPS EN ISO 6507: 2011, metodom po Vickersu, HV10 [9].



Slika 3 - Ispitivanja savijanjem zavarenog spoja na dva oslonca

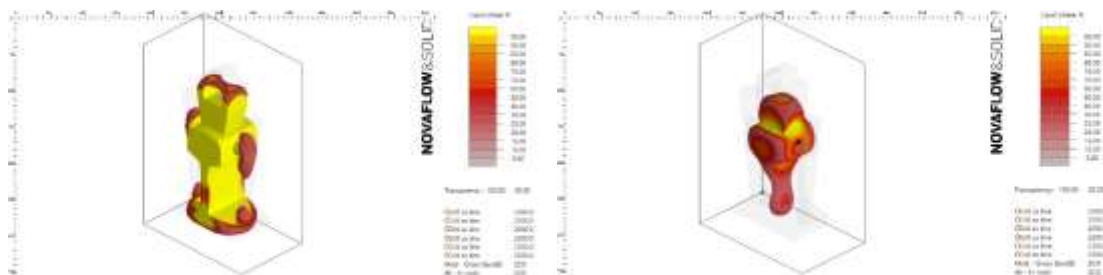
Ispitivanje na savijanje je izvršeno u akreditovanoj laboratoriji za ispitivanje konstrukcija Instituta za ispitivanje materijala, na presi AMSLER opsega 960 kN, slika 3. Ispitivanje je vršeno shodno EN 14730-1:2017, do maksimalne sile savijanja od 800 kN, koju zavareni spoj treba da izdrži [8].

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Simulacija aluminotermijskog zavarivanja šina

Rešavanje problema optimizacije livenja metodom simulacije koristi se uglavnom za odlivke koji imaju neuobičajeno visok ili neočekivan nivo unutrašnjih defekata ili lošu iskoristivost, kao što je slučaj sa

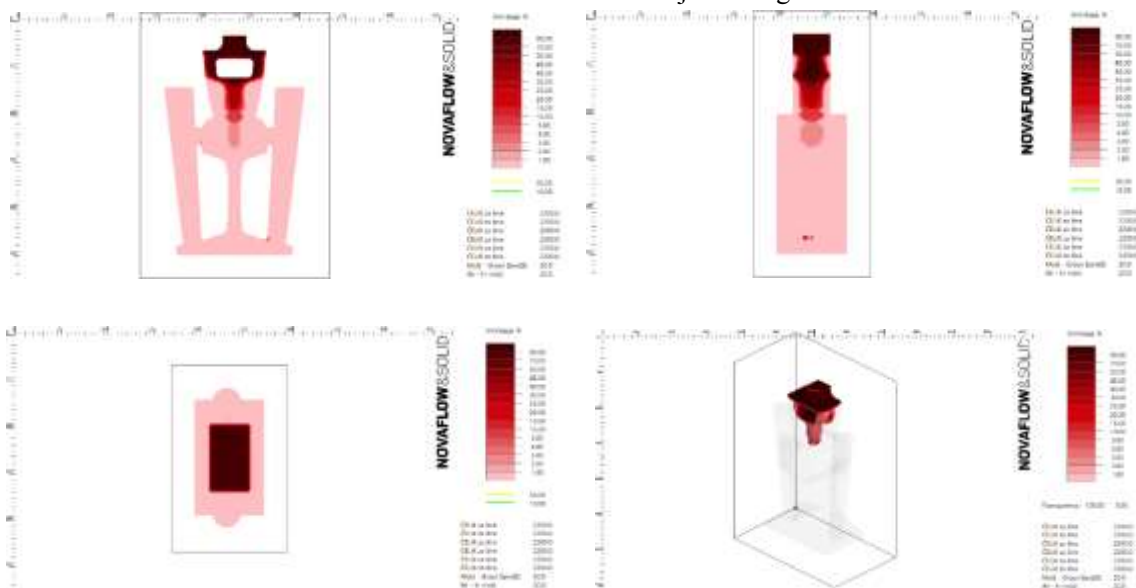
aluminotermijskim zavarivanjem. Metoda optimizacije je korisna i za postojeće odlivke i za one koji se razvijaju po prvi put, jer se na taj način eliminišu probe livenja. Na slici 4. šematski je prikazano poređenje između probnog i virtualnog livenja. Dizajn metoda (orijentacija livenja, raspored kalupa, hranitelja i ulivnika) se modifikuje na računaru, a simulira se da bi se proverila eventualno nastala oštećenja. Ponavlja se uzastopno nekoliko puta sve dok se ne postigne željeni kvalitet i iskoristivost. Čak i manja poboljšanja postojećih odlivaka koja se proizvode u velikom broju, mogu dovesti do značajnih poboljšanja u korišćenju materijala, energije, opreme i resursa.



Slika 6 - Očvršćavanje rastopljenog metala unutar kalupne šupljine: a) 80 vol.%, b) 40 vol.%

Na slici 7 se vidi skupljanje materijala u procentima nakon očvršćavanja iz raznih perspektiva, u 2D i 3D.

Cela korisna šupljina (odlivak) je oslobođena od skupljanja, odnosno celi proces skupljanja završava u hranitelju iznad glave šine.



Slika 7 - Prikaz 2D skupljanja nakon očvršćavanja (tečna faza 0 vol.%), različite perspektive

3.2. Aluminotermijsko zavarivanje na probnim uzorcima

Uzorci AT zavarenih spojeva su pregledani vizuelno. Na dostavljenim uzorcima nisu uočene

površinske greške ili bilo koje druge nepravilnosti (slika 8).



Slika 8 - Izgled šina nakon aluminotermijskog zavarivanja



Slika 9 - Makro pregled poprečnog i uzdužnog preseka AT zavarenog spoja

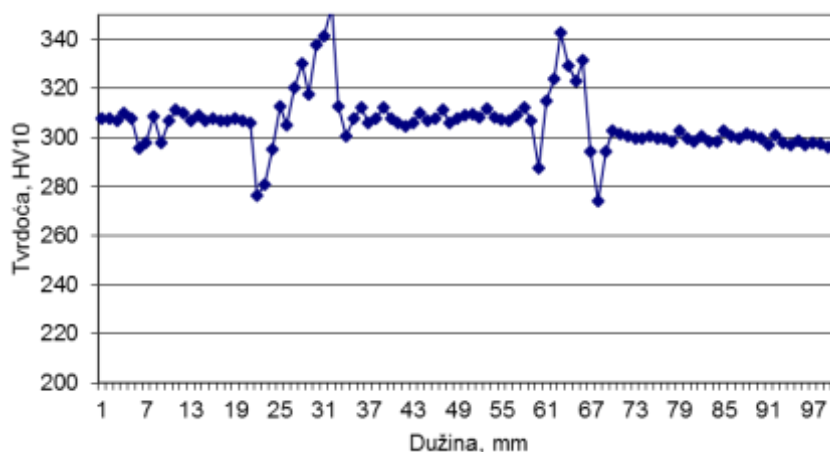
Makro struktura uzdužnih i poprečnog preseka AT zavarenog spoja šine je bez ikakvih uočenih grešaka, (slika 9). Hemijski sastav metala šava prikazan je u Tabela 2. Rezultati hemijskog sastava metala šava, mas. %

Br. uzorka	C	Si	Mn	P	S	Cu	Sn	V	Al
1	0,55	0,36	1,05	0,024	0,21	0,11	0,001	0,10	0,35
2	0,54	0,35	1,07	0,025	0,20	0,11	0,001	0,11	0,31

tabeli 2. Hemijski sastav materijala šava (termitni čelik) ukazuje da osnovni elementi ne prelaze standardnom predviđene vrednosti.

Merenja tvrdoće su izvršena na gazećoj površini AT zavarenog spoja, a rezultati su prikazani na slici 10. Rezultati ispitivanja tvrdoće su pokazali da su

izmerene vrednosti uobičajene za ovu vrstu zavarivanja, gde se jasno razlikuje zona uticaja toplote (zona gde tvrdoća odstupa od tvrdoće metala šine i šava).



Slika 10 - Rezultati merenja tvrdoće po gaznoj površini zavarenog spoja

Tabela 3. Rezultati ispitivanja na savijanje AT spoja šine 49E1

Oznaka uzorka	Brzina priraštaja sile	Maksimalna sila	Ugib	Napomena
1	1 kN/s	800 kN	12,4 mm	Bez loma
2	1 kN/s	800 kN	11,9 mm	Bez loma

Dobijeni rezultati ispitivanja na savijanje AT spoja prikazani su u tabeli 3.

Ispitivanja probnim opterećenjem je pokazalo da nije došlo do loma zavarenih spojeva pri maksimalnoj sili od 800 kN. Vrednost ugiba pri ispitivanju probnim opterećenjem kod oba uzorka u potpunosti zadovoljava standarde.

4. ZAKLJUČAK

U ovom radu pokazano je da program NovaFlow&Solid CV uspešno simulira alumino-termijski proces zavarivanja železničkih šina i da može znatno doprineti optimizaciji tehnno-ekonomskih parametara procesa. Takođe, može doprineti poboljšanju kvaliteta zavarenih spojeva predviđanjem grešaka u šavu, kao i na kontaktu dodatnog i osnovnog materijala. Njegova adekvatnost dokazana je izradom probnih zavarenih spojeva, na kojima su postignute

karakteristike kvaliteta zadate simulacijom na programu, u konkretnom slučaju kod zavarivanja šine tipa 49E1 260, čime su izbegnuta visoka ulaganja izrade velikog broja eksperimentalnih zavarenih spojeva.

5. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Ugovori broj: 451-03-68/2022-14/200135 i 451-03-68/2022-14/200023) na finansijskoj podršci.

LITERATURA

- [1] T. Filetin, „Neki trendovi razvoja i primjene materijala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, HAZU, 2003.
- [2] NovaCast Systems AB: *NovaFlow&Solid 6.0, Ronneby*, 2015.

- [3] Ravi B. Casting simulation and optimisation: benefits, bottlenecks and best practices, *Indian Foundry Journal* 54, no. 1 (2008): 47.
- [4] Ravi B. *Casting simulation–best practices*. Transactions of 58th IFC 1, no. 11 (2010).
- [5] A. Delić, *Istraživanje odnosa između mikrostrukture i svojstava vatrootpornog austenitnog čelika HK30 modificiranog niobijem u cilju poboljšanja svojstava na visokim temperaturama*, Doktorska disertacija, Fakultet za metalurgiju i materijale, Univerzitet u Zenici, 2018.
- [6] Delić, Alen, Mirsada Oruč, Milenko Rimac, Almajda Gigović-Gekić, and Raza Sunulahpašić. The influence of solution annealing on microstructure and mechanical properties heat-resistant cast Steel HK30 modified by Niobium. *Metallurgical and Materials Engineering* 25, no. 3 (2019): 237-245.
- [7] Mutton Peter John and E. F. Alvarez. Failure modes in aluminothermic rail welds under high axle load conditions, *Engineering Failure Analysis* 11, no. 2 (2004): 151-166.
- [8] EN 14730-1:2017 *Track - Aluminothermic welding of rails - Part 1: Approval of welding process*
- [9] EN 14730-1:2006 *Railway applications - Track - Aluminothermic welding of rails - Part 1: Approval of welding processes*

SUMMARY

OPTIMIZATION OF MOLD DESIGN FOR ALUMINOTHERMIC WELDING OF RAILWAY TRACKS BY SOFTWARE SIMULATION

The aluminothermic welding process of rail welding has been used to join railway rails for more than a century. The benefits of this procedure include its flexibility, compactness of the weld, and ease of execution. It is not necessary to bring in outside energy to complete the process. It is provided by the exothermic effect of the chemical reactions of the aluminothermic mixture's constituents. The design of the mold with the pouring system, which should ensure even pouring of thermal steel, without turbulence, then even heat dissipation or cooling in order to obtain appropriate micro and macro structure of steel, without internal and external defects, is an important element for making a welded joint of the required quality. As a result, the mold's design was constantly evolving, requiring the use of costly experimental methods in industrial settings. Today, software packages are used to simulate traditional casting processes that can be used in the casting of thermite steel during the manufacture of welded railway joints, thereby avoiding costly and time-consuming industrial tests. The simulation of casting thermite steel in the mold cavity, i.e. in the weld joint for the 49E1 rail, using the NovaFlow & Solid CV software package, is presented in this paper. The simulation results were validated by establishing test welded joints in industrial settings and testing their quality in accordance with the EU 13740-1: 2017 standard.

Key Words: *aluminothermic welding; simulation; Novacast; welded joint*