

X Naučno/stručni simpozij sa međunarodnim učešćem  
"METALNI I NEMETALNI MATERIJALI" Bugojno, BiH, 24-25. april 2014.

**SIMULACIJA TERMIČKI INDUCIRANIH NAPREZANJA AlMgSi  
TRUPACA U ZONAMA PRIMARNOG I SEKUNDARNOG HLAĐENJA  
TOKOM DIRECT CHILL POSTUPKA LIJEVANJA**

**SIMULATION OF THE THERMALLY INDUCED STRESSES IN AlMgSi  
INGOTS IN THE AREAS OF PRIMARY AND SECONDARY COOLING  
DURING DIRECT CHILL CASTING PROCESS**

**Ana Beroš, dr. sc**  
**Univerzitet u Zenici,**  
**Fakultet za metalurgiju i materijale u Zenici**

**Ivica Buljeta, mr. sc**  
**Žepče**

**Kategorizacija rada:** Originalni naučni rad

**SAŽETAK**

*Tokom solidifikacije kontinuirano lijevanih trupaca, termički inducirana naprezanja generiraju ljevačke greške kao tople pukotine, krivljenje ili zaostala naprezanja. Kontrakcija i mehanizam skupljanja uslijed solidifikacije legure koja se nalazi u tjestastom stanju, pokreću nastanak navedenih grešaka. Simulacija termo - mehaničkih svojstava trupaca AlMgSi- legure u zonama primarnog i sekundarnog hlađenja, izvršena je software-om MAGMA 5.2.0. Rezultati simulacije po duljini i poprečnom presjeku trupca, prikazuju razvoj lokalnih naprezanja tokom solidifikacije u području bliskom solidusu legure i zaostala naprezanja nakon postupka lijevanja.*

**Ključne riječi:** termički inducirana naprezanja, AlMgSi trupci, MAGMA 5.2

**ABSTRACT**

*During the solidification of continuously cast ingots, thermally induced stresses generate casting errors as hot cracks, bending or residual stresses. Contraction mechanism and shrinkage due to solidification of the alloy which is in a pasty state induce occurrence of the above mentioned defects. Simulation of thermo - mechanical properties of AlMgSi-alloys in zones of primary and secondary cooling was performed using software MAGMA 5.2.0. The simulation results over the length and cross section of ingots, showing the development of local stresses during solidification in the area close to solidus and residual stresses after the casting.*

**Keywords:** thermally induced stresses, AlMgSi ingots, MAGMA 5.2

## 1. UVOD

Numeričke simulacije toplotnih naprezanja tokom solidifikacije su vrlo važne metode za predviđanje toplih i hladnih pukotina, zaostalih naprezanja i distorzije te unose olakšice u eksperimentalnu postavku. Njihovo korištenje vodi smanjenju eksperimentalnih pokušaja i grešaka na odljercima, a rezultat je povećanje učinkovitosti postupka. U svrhu simulacija nastanka toplih pukotina, postoje različiti pristupi za njihovo predviđanje. Metalurški pristup uzima u obzir metalurške karakteristike legure kao što su skrućivanje, segregacije, kemijski sastav, a u novije vrijeme fenomen poroznosti i nastanak inicijalnih mikropukotina. Drugi pristup je mehanički, koji pretpostavlja stanje kritične razine naprezanja ili postojanja zona koncentracije naprezanja, razvoj toplih napuklina smanjuje zaostala naprezanja u dijelovima odljevka.

Toplinska naprezanja su uglavnom inducirana nejednakim akumulacijama topline unutar odljevka i stanjem kalupa, jezgre ili komponenata odljevka. Gradijenti temperature opisuju lokacije generiranih toplotnih naprezanja kroz odljevak.

Tople napukline se pojavljuju u zonama visokih temperatura pri kraju solidifikacije kada je mali udio rastopa prisutan u prostoru između dendrita. U tom stadiju materijal se nalazi u tjestastom stanju i ne može se oduprijeti postojećim deformacijama. Pri koherentnoj temperaturi, dendritne grane srastaju i formira se dendritska mreža. U ovom slučaju, materijal je otporan i prenosi naprezanja. Iznad ove temperature, postotak rastopa je visok. Na nekim lokacijama, grane dendrita se trgaju, svježa talina dolazi i pukotina zarasta. U dubini tjestaste zone, propustljivost je vrlo mala, zbog vlačnih deformacija i odsustva dotoka tekuće faze, nekoherentna otvorena mreža dendrita ne može se nadomjestiti te se formiraju tople pukotine. Formiranje toplih napuklina je povezano sa nedostatkom napajanja u tjestastoj zoni gdje je mreža dendrita izložena posmičnim ili vlačnim naprezanjima [1].

Drugi fenomen, koji na kraju mijenja kvalitetu odljevka su zaostala naprezanja. U početku, toplinski generirane nejednolike brzine kontrakcije pojedinih dijelova odljevka se manifestiraju kao elastična naprezanja u odljevku.

Većina općih tehnika za određivanje veličine zaostalih naprezanja koriste numerički procesne modele. Izračunavanje naprezanja, bio je okvir mnogih znanstvenih studija 1990., i danas je veoma ustaljena tehnika. Podudaranje eksperimentalnih rezultata i izračunatih naprezanja na sobnoj temperaturi, ograničavaju postojeće tehnike mjerenja unutarnjih deformacija velikih odljevaka. Iako destruktivne metode za mjerenje zaostalih elastičnih deformacija mogu predvidjeti sve komponente tenzora elastičnih deformacija, sve više se koriste i relativno skupe metode poput X-zraka ili neutronske difrakcije (ND).

Zaostala naprezanja sirovih trupaca će uzrokovati dodatne greške na proizvodima tokom ekstruzije. Ispitivanja promjena u zaostaloj elastičnoj deformaciji u ravnotežnom stanju lijevanja trupca legure AA 6063, mjerene u funkciji radijalne pozicije izvedena korištenjem neutronske difrakcije, pokazuju da dobar termomehanički procesni model može reproducirati relativno dobro eksperimentalne rezultate, te mehanička svojstva na nižim temperaturama imaju puno veći utjecaj na zaostala naprezanja nego pri visokim temperaturama [2].

## 2. TERMIČKA NAPREZANJA

Tokom solidifikacije trupca, primarno i sekundarno hlađenje trupca formira solid koru koju deformira unutarnji tjestasti dio.

Generirano toplinsko naprezanje tokom solidifikacije može se javiti kao zaostalo naprezanje, ili se relaksirati kao puzanje, iniciranje pukotina i krivljenje:

$$\sigma_{th} = (\sigma_{HT} + \sigma_{SC} + \sigma_{DS}) + \sigma_{RS} \quad (1)$$

gdje je  $\sigma_{th}$  termičko naprezanje, a  $\sigma_{HT}$ ,  $\sigma_{SC}$ ,  $\sigma_{DS}$ ,  $\sigma_{RS}$  su naprezanja koja uzrokuju: tople pukotine, puzanje, distorziju i zaostala naprezanja.

Veličina termičkog naprezanja je povezana sa kontrakcijom legure tokom solidifikacije koja se može opisati slijedećom jednažbom:

$$\varepsilon_T = \int_{T_{\text{pour}}}^{T_{\text{liq}}} \left( \beta \frac{\Delta}{s} + \alpha_l(T) \right) dT + \int_{T_{\text{liq}}}^{T_{\text{trsh}}} \left[ \left( \beta \frac{\Delta}{s} + \alpha_l(T) \right) f_l(T) + \alpha_s(T) f_s(T) \right] dT + \int_{T_{\text{trsh}}}^{T_{\text{sol}}} f_s(T) \alpha_s(T) dT + \int_{T_{\text{sol}}}^{T_{\text{rem}}} \alpha_s(T) dT \quad (2)$$

gdje su  $\alpha_s$ ,  $\alpha_l$  koeficijenti ekspanzije solidna i tekuće faze legure,  $\beta$  je volumni koeficijent skupljanja,  $f_s$  i  $f_l$  su udjeli krute i tekuće faze. Temperatura (T) označava da  $\alpha$  i udjel krute faze imaju nelinearnu karakteristiku i mijenjaju se sa promjenom temperature materijala.

Ako vlačno naprezanje na temperaturi blizu solidusa premašuje čvrstoću legure, topla pukotina će se generirati. Dakle, za utjecaj kontrakcije važi jednažba:

$$\Delta s_{HT} = \int_{T_{\text{trsh}}}^{T_{\text{trsh}}} f_s(T) \alpha_s(T) dT \quad (3)$$

gdje je  $\Delta s_{HT}$  efektivna kontrakcija kod tople pukotine,  $T_{tr}$  i  $T_{ts}$ , koherentna i solidus temperatura. Ako je temperaturni interval solidifikacije legura širok, *vruća mjesta (Hot Spot)* se zadržavaju duže vrijeme, te je temperaturni pad osjetljiva i kritična faza formiranja mikrostrukture.

Za ocjenjivanje termo-mehaničkog režima u tjestastom stanju, ključan parametar je koherentna temperatura pri kojoj dendritske grane počinju formirati solid mostove i prijenos naprezanja.

Faza prijelaza od tjestastog do stanja solid skeleta, odgovara udjelu od  $f_s \leq 0.95$ , je kritična (mogu nastati tople pukotine). Poslije ove temperature tjestasta zona odljevka dostiže čvrstoću srastanjem dendrita, što ima dvije posljedice: (1) povećanje vjerojatnosti nastanka toplih pukotina jer se naprezanja prenose kroz tjestastu zonu; (2) smanjenje vjerojatnosti nastanka toplih pukotina jer se porast čvrstoće može odvijati brže od porasta naprezanja. Toplinska naprezanja kao posljedica kontrakcije i povećanje čvrstoće materijala pri padu temperature, zbivaju se simultano. Količina termičkog naprezanja može se izraziti jednažbom:

$$\Delta s_{RS} = \int_{T_{\text{trsh}}}^{T_{\text{sol}}} f_s(T) \alpha_s(T) dT + \int_{T_{\text{sol}}}^{T_{\text{rem}}} \alpha_s(T) dT \quad (4)$$

gdje je  $\Delta s_{RES}$  je efektivna kontrakcija koja ima utjecaj na zaostala naprezanja. Usporedba između izraza 2 i 4 pokazuje da će se pojavljivanjem tople napukline osloboditi veliki dio naprezanja generiranih termičkom kontrakcijom, a iznos krajnjeg zaostalog naprezanja će biti smanjen.

### 3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

#### 3.1 Materijal

Odljevci su izrađeni od *AlMgSi* - legura, tehnikom *AirSlip* u ljevaonici "Aluminij" d.o.o. - Mostar specijaliziranoj za proizvodnju trupaca i ingota.

Za ispitivanje su korišteni trupci prečnika 203 mm legure EN AW6060. Iz šarže 822 723 su proizvedeni trupci čiji je kemijski sastav prikazan je u tablici 1.

**Tablica 1- Kemijski sastav legure EN AW 6060**

Broj šarže		Sastav(%)							
		Si	Fe	Cu	Zn	Mg	Mn	Ti	Cr
Zahtijevano	Min.	0,41				0,38		0,007	
	Max.	0,45	0.18	0,01	0,015	0,42	0,01	0,01	0,01
<b>822 723</b>		0,4259	0,1751	0,0013	0,0109	0,4302	0,0413	0,0085	0,0014

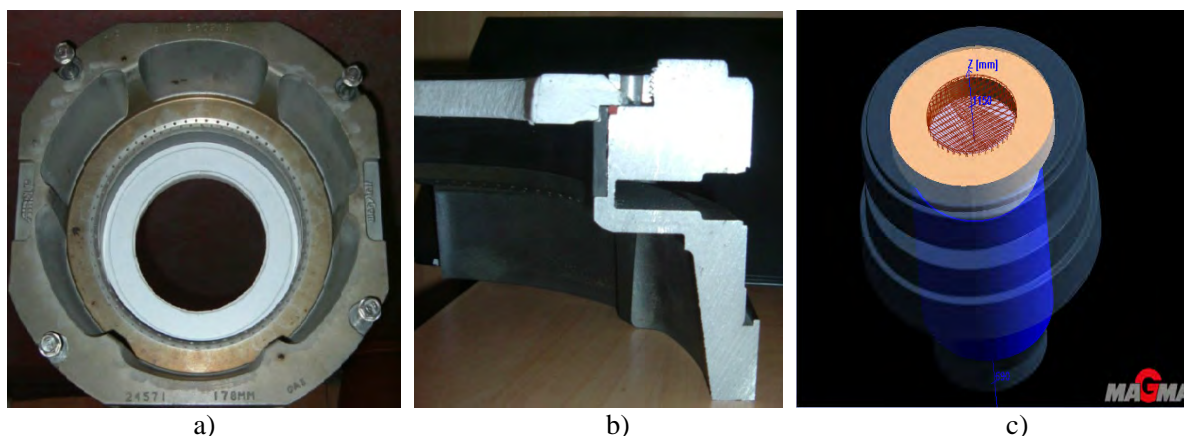
Prema recepturi za lijevanje 6060/6063, trupci se polukontinuirano liju sa zadanom radnom brzinom od 128 mm/min, protokom vode od 4450 l/min.

### 3.2 Simulacija

Simulacija termički induciranih naprezanja izvedena je softverom MAGAMA 5.2, modul, *MAGMAstress*. Osnova simulacije raspodjela temperature solidifikacije, izračunavanje rezultata udjela solida i raspodjela termičkih naprezanja za određivanje područja koncentracije naprezanja.

#### 3.2.1 Priprema simulacije

Početak simulacije se fokusira na unos geometrije i generiranje mreže. Kompletna kokila (slika 1.a i b) sastoji se iz čelične obloge, grafitnog prstena i obloge tranzicione ploče. Prema dimenzijama kokile konstruiran je model kokile iz više solid dijelova spremljenih kao *stl*.datoteke u *SolidWorks*-u 2013. (slika 1.c).

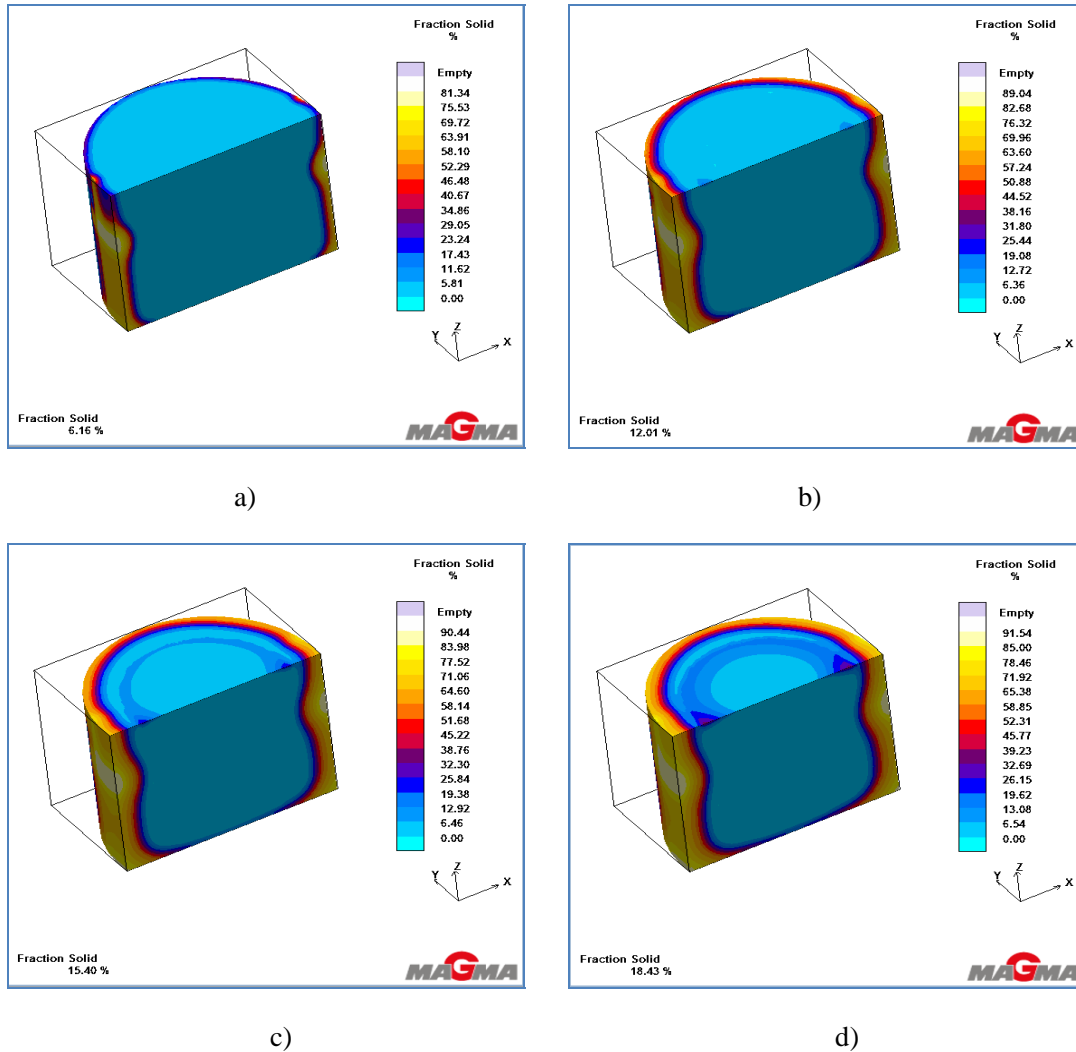


*Slika 1 – Kompletna čelična kokila sa pogledom odozdo (a), poprečnim presjekom (b) i konstruiranim modelom (c)*

Nakon toga je generiran model geometrije sklopa: kokila - trupac -startna glava u programa za simulacije *Magmasoft 5.2* te podešavanje osnovnih parametara simulacije. Materijal trupca je legura AlMgSi0,5 (650 – 585°C), duljine 150/1100 mm čiji je sastav usklađen sa komponentama prema konačnoj analizi taline šarže 822723. Rubni uvjeti vezani za pojedine koeficijente prijenosa topline (talina - grafitni prsten, grafitni prsten – kokila, trupac – startna glava, itd.) korišteni su iz MAGMA baze podataka i literature [3]. Kokila ima velik broj malih otvora za vodu (slika 1.a) čijom se konstrukcijom pod kutom sudaraju mlazovi vode, te ona klizi po površini trupca. Konstrukcija takvih malih otvora u modelu kokile je izostavljena. Stoga je za hlađenje trupca konstruiran volumen geometrije u obliku ovojnice trupca koji uzima u obzir samo hlađenje konvekcijom.

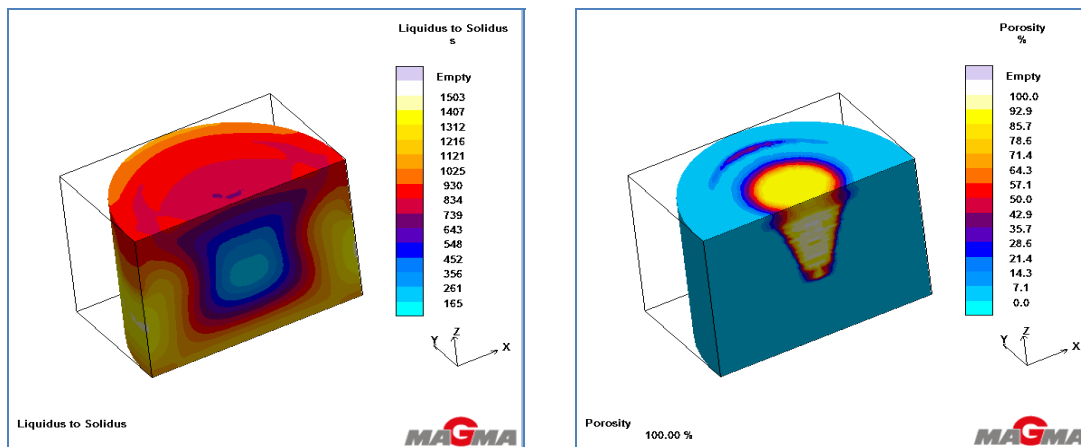
### 3.2.2 Rezultati simulacije solidifikacije

Tokom simulacije solidifikacije, kriterij udjela solida je bio izračunat i koristi se pri demonstriranju formiranja kore trupca. Tek solidificirana kora pri kontrakciji legure tlači unutrašnjost trupca (slika 2. a - d). U prvoj verziji simulacije promatrana je solidifikacija trupca duljine 150 mm gdje je uključena osim zone primarnog hlađenja i kratka zona sekundarnog hlađenja vodom.



Slika 2 - Kriterij solidifikacije - udjel solida

Za predviđanje toplih pukotina, treba uzeti u obzir termo-mehanička svojstva modela u kritičnom području između  $t_s$  i  $t_f$ , t.j područje koje zadnje solidificira. Sukladno jednačbi (3), to je osjetljivo područje u kojem se tople pukotine pojavljuju, a kriterij koji prikazuje područja daje slika 3.a.



a)

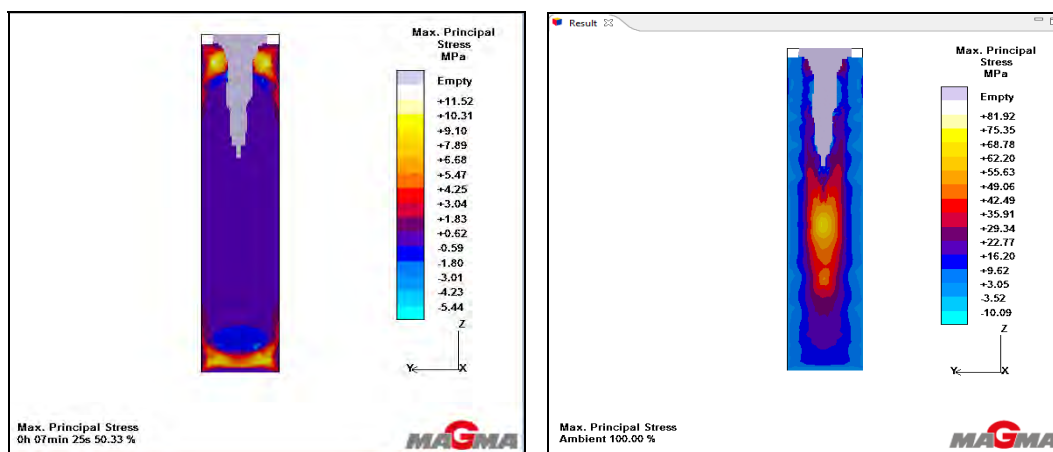
b)

Slika 3. - Kriterij - solid /likvid i poroznost

Također kriterij poroznosti (slika 3.b) pokazuje da je centar trupca osjetljiv na iniciranje pukotina.

### 3.2.3 Rezultati simulacije napreznaja

MAGMAstres modulom je izračunato razvijanje napreznaja i deformacija tokom solidifikacije i hlađenja. Simulacija napreznaja je bazirana na distribuciji temperature u trupcu koja se koristi kao ulazna vrijednost za izračunavanje termički induciranih deformacija odgovornih za nastajanje napreznaja i distorzije. U drugoj verziji simulacije, izvršena je simulacija razvoja deformacija i napona za trupac duljine 1100 mm. Postavljeno je ukupno 10 kontrolnih točki (Control Point) za izračunavanja u aksijalnom smjeru trupca. Prikazani su rezultati napreznaja na početku trupca (CP 32 - stopa trupca), u sredini (CP 35) i kraju trupca (CP 40 - glava trupca).



a)

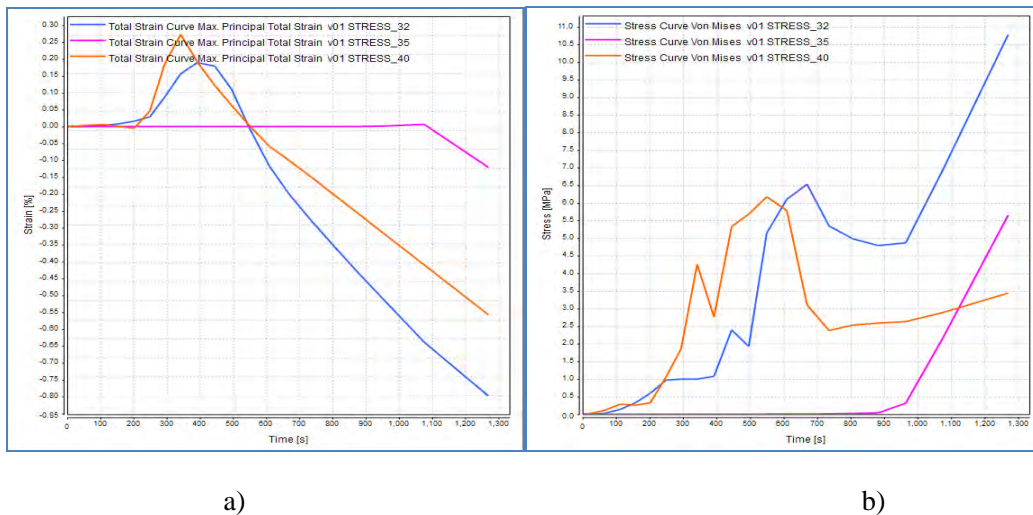
b)

Slika 4. - Maksimalna glavna zaostala napreznaja pri solidifikaciji od 50% (a) i 100%

Kako se maksimalni glavni naponi uglavnom identificiraju kao vlačna napreznaja, dok su minimalna visoka tlačna napreznaja. Stanje maksimalnih napona tokom radne faze, (slike 4), a na slici 4.b pri

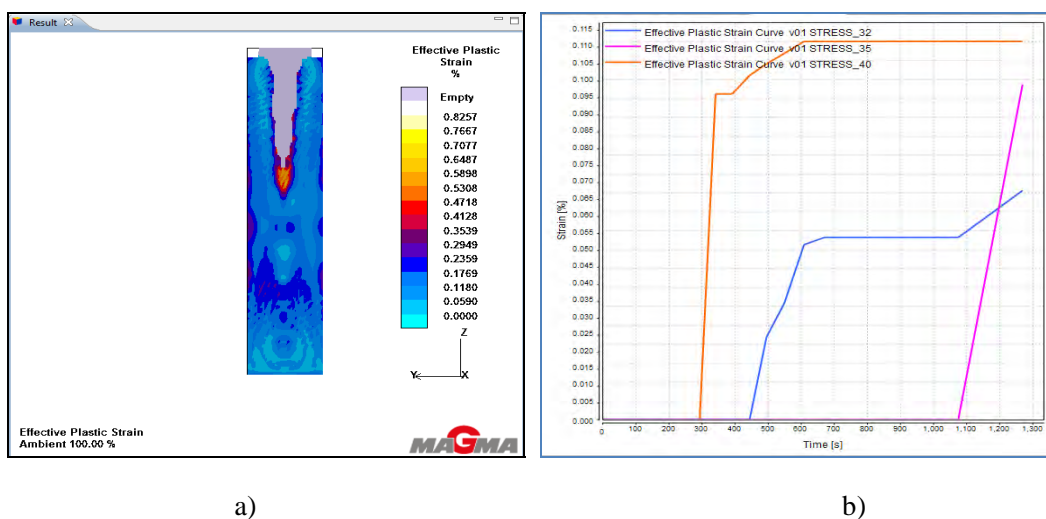
temperaturi okoline u srednjem dijelu trupca još uvijek su visoke vrijednosti zaostalih napreznja nakon završetka lijevanja.

Krive napreznja na slici 4.a pokazuju da maksimalna glavna napreznja u ranoj fazi lijevanja ( stopa trupca) i završnoj fazi lijevnja (glava trupca) imaju najveće vrijednosti, što je uobičajeno u ovim fazama lijevanja i stoga može rezultirati unutarnjim pukotinama.

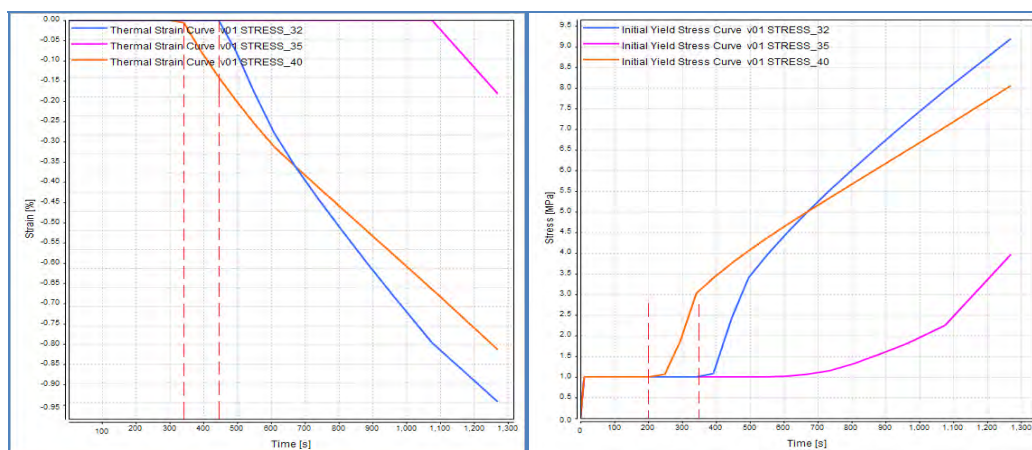


Slika 4.- Ukupna maksimalna glavna (a) i b) von Misess-ova napreznja

Za otkrivanje sklonosti pukotinama tokom solidifikacije i hlađenja ili procesa obrade korištenjem simulacija lijevanja, referentna napreznja se uspoređuju sa vlačnom ili tlačnom čvrstoćom materijala. MAGMAstress modulu von Mises-ov kriterij tečenja (vom Mises yield criterion) se koristi za duktilne materijale (slika 4.b). Kriterij efektivne plastične deformacije prikazan na slici 5.a na temperaturi okoline dodatno služi za vizualizaciju početka i kretanja ovog mehanizma u vremenu po kontrolnim točkama tj . u aksijalnom pravcu trupca (5.b).



Slika 5. - Efektivna plastična deformacija za kraju (a) i tokom solidifikacije (b)



a)

b)

Slika 6. - Deformacije uzokovane hlađenjem (a) i početno naprezanje tečenja

Dodatno, kako je ranije navedeno, zadnja područja koja solidificiraju osjetljiva su na tople pukotine s obrazloženjem da brzina porasta termičkog naprezanja postaje veća nego brzina kojom raste čvrstoća. Iz dijagrama na slici 6.a vidljiv je nagli pad krive deformacija uzrokovanih hlađenjem u rasponu od ~350 s za stopu i ~450 s za glavu trupca (područje obilježeno okomitim isprekidanim linijama.(350 - 450 sekundi). Na slici 6.b, legura u ranoj fazi povećava granicu tečenja (prije opadanja vrijednosti termičkih naprezanja), čime se smanjuje mogućnost pojave unutarnjih pukotina (područje od 200 - 350 sekundi). Rezultati sa slike 5.a i 6.a pokazuju brze promjene mehaničkih svojstva glave i stope trupca, pri smanjenom djelovanju termičkih naprezanja, na nižim nego pri višim temperaturama.

#### 4. ZAKLJUČAK

Termički inducirana naprezanja generiraju ljevačke greške kao tople pukotine, krivljenje ili zaostala naprezanja. Kontrakcija i mehanizam skupljanja uslijed solidifikacije su mehanički aspekti, koji uzrokuju navedene greške. Simulacija termo - mehaničkih svojstava trupca AlMgSi - legure pokazuje zone glavnih naprezanja i deformacija u srednjem dijelu glave i stope trupca. Modul MAGAMastress izračunava razvoj naprezanja tokom faze lijevanja i zaostala naprezanja nakon lijevanja. Također navedeni kriteriji unose vremenski period za nastanak unutarnjih grešaka uzrokovanih hlađenjem trupca.

#### 5. LITERATURA

- [1] Ali Shams, Hassan Farhangi, Alireza Darvish, The temperature range in the simulation of residual stress and hot tearing during investment casting Saeid Norouzi, World Academy of Science, Engineering & Technology, 2009.
- [2] J.-M. Drezet and A.B. Phillion As-Cast Residual Stresses in an Aluminum Alloy AA6063 Billet: Neutron Diffraction Measurements and Finite Element Modeling The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International, 2010.
- [3] Suyitno, Hot tearing and deformation in direct-chill casting of aluminum alloys, ISBN 90-9019393-6, 2005