

Večfizikalni in večnivojski brez mrežni simulacijski sistem za polkontinuirno ulivanje aluminijevih zlitin

Božidar Šarler^{1,2,*} – Tadej Dobravec² – Gašper Glavan¹ – Vanja Hatić^{1,2} – Boštjan Mavrič^{1,2} –
Robert Vertnik² – Peter Cvahte³ – Filip Gregor³ – Marina Jelen³ – Marko Petrovič³

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Slovenija

²Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Slovenija

³IMPOL 2000, d.d., Slovenija

V članku je opisan eksperimentalno validiran brez mrežni simulacijski sistem, ki opisuje fizikalne pojave pri polkontinuirnem ulivanju (PU) aluminijevih zlitin pod vplivom nizkofrekvenčnega elektromagnetnega polja. Nizkofrekvenčno elektromagnetno ulivanje (NFEU) je proces, ki omogoča znatno izboljšanje kvalitete izdelkov v primerjavi s klasičnim PU. Modeliranje in projektiranje NFEU je zelo pomembno zaradi velikih stroškov eksperimentov med proizvodnim procesom. Simulacijski sistem je razdeljen na štiri poglavne module. V prvem, makroskopskem termofluidnem modulu se rešujejo enačbe za ohranitev mase, gibalne količine, energije in sestavin. Za modeliranje interakcije med trdno in kapljevito fazo se uporablja formulacija volumskega povprečenja, linearizirani evtektični fazni diagram ter vzvodno pravilo. V drugem modulu se induksijska elektromagnetna enačba uporabi za izračun vektorskega magnetnega potenciala in Lorentzove sile. Lorentzova sila je vključena v enačbo za ohranitev gibalne količine kot volumska sila. Tretji, termomehanski modul, je formuliran v približku majhnih deformacij za elasto-viskoplastičen material. Viskoplastični del deformacije je določen z Garafalovim zakonom. Termične deformacije so določene iz temperaturnega polja. Napetostno in deformacijsko polje sta uporabljena za izračun kriterijev za pojav vročega trganja. Za določitev slednjega se uporablja Lahaie-Bouchardov in Suyitno-Kool-Katgermanov model. Namen četrtega, mikrostrukturnega modula, je napoved mikroizcejanja in velikosti dendritskih zrn pri strjevanju večsestavinskih zlitin. Model opiše nukleacijo in rast dendritskih zrn v odvisnosti od temperaturnega polja in koncentracijskih polj izračunanih na makroskopskem nivoju. Za opis gostote nukleacije v odvisnosti od podhladitve se uporabi normalno porazdelitev. Hitrost rasti posameznega zrna se izračuna glede na temperaturne in koncentracijske razmere na njegovem medfaznem robu. Snovne lastnosti za poljubno aluminijevo zlitino so pridobljene s programom JmatPro.

Termofluidni in termomehanski model sta formulirana v Eulerjevem sistemu, mikrostrukturni model pa pridobiva podatke iz termofluidnega modela v Lagrangeovem sistemu in izračunava mikrostrukturo dela zlitine 3 mm x 3 mm na robu ter v notranjosti droga. Vse parcialne diferencialne enačbe se rešujejo z brez mrežnimi metodami. V izračunih sta uporabljena dva različna lokalna brez mrežna pristopa; metoda difuzijskih približkov in metoda lokalne kolokacije z radialnimi baznimi funkcijami. Temperatura, tlak, hitrost in delež kapljevite faze se izračunajo v termofluidnem modelu in se uporabijo kot vhodni podatki za izračun termomehanskega modela. Vhodni podatki za mikrostrukturni model so temperatura, gradient temperature in koncentracija sestavin vzdolž tokovnic, ki so izračunane s termofluidnim modelom. Fizikalni model za nukleacijo in rast trdne faze je rešen z metodo točkovnih avtomatov, ki je sestavljena iz dveh korakov; prvi korak je naključna postavitev točk in določitev soseščine vsaki točki. V drugem koraku so določena možna stanja in pravila za prehod med stanji. Pravila opisujejo nukleacijo in rast trdne faze v odvisnosti od temperature in koncentracije legirnih elementov na makroskopskem nivoju.

V članku so prikazni rezultati celotnega simulacijskega sistema za tipične parametre pri polkontinuirnem ulivanju drogov iz aluminijevih zlitin. Prikazani rezultati vključujejo: temperaturo, makroizcejanje, primerjavo tokovnih struktur v primeru PU in NEFU, plastično deformacijo, obodne napetosti, napoved poroznosti, napoved vročega trganja, mikrostrukturo zrn in mikroizcejanje. Sistem je bil validiran na podlagi številnih eksperimentov med proizvodnjo (meritve temperature, položaja medfaznega roba in EM polja) in v laboratoriju (mikroizcejanje, makroizcejanje). Predstavljeni simulacijski sistem omogoča izpeljavo virtualnih eksperimentov s parametri ulivanja, sestavo zlitine, geometrijo ulitka in projektom livne naprave. Sistem je unikaten, saj omogoča sklopitev termofluidnih, elektromagnetnih in termomehanskih pojavov na makroskopskem nivoju (~1 m) s pojavi na mikroskopskem nivoju (~0.1 mm). Na ta način je možno na ekonomičen način preučevati in optimirati vpliv vseh vplivnih parametrov na kvaliteto izdelkov in ekonomičnost procesa.

Ključne besede: polkontinuirno ulivanje, aluminijeve zlitine, računalniška dinamika tekočin in trdnin, večfizikalno modeliranje, večnivojsko modeliranje, brez mrežne metode, metoda točkovnih avtomatov

*Naslov avtorja za dopisovanje: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za dinamiko fluidov in termodinamiko, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija, bozidar.sarler@fs.uni-lj.si