

## **PREDGOVOR**

Metalni predmeti komercijalne namene su gotovo bez izuzetka dobijeni očvršćavanjem rastopa, bilo u vidu finalnih proizvoda, odlivaka, bilo u vidu poluproizvoda, koji se zatim različitim postupcima prerađuju u finalne proizvode. Uticaj očvršćavanja na svojstva i kvalitet proizvoda je najočigledniji kada je livenje završna operacija prerade. Međutim, efekat očvršćavanja može se takođe videti i u finalnim proizvodima nakon dalje prerade različitim postupcima, obzirom da se struktura očvršćavanja i sa njom povezani defekti, kada su već jednom stvoreni, teško eliminišu. U tom pogledu, teorija očvršćavanja je vrlo značajna, obzirom da stvara osnove za promenu mikrostrukture, a otuda i osnove za poboljšanje kvaliteta livenih proizvoda.

Istorijski posmatrano, jednostavni liveni predmeti od bakra prvi put su se pojavili 4000 godina pre nove ere i bili su bez sumnje predmet grnčarske veštine. Proizvodnja bronzanih odlivaka u Kini počela je 1600 godina, a livenje gvožđa 500 godina pre nove ere. Livene Fe-C legure u Evropi su se pojavile tek u XVI veku, i bile prihvaćene kao konstrukcioni materijal u XVIII veku u Engleskoj.

Veliko zakašnjenje u upotrebi livenih materijala verovatno je posledica nerazumevanja prirode fenomena očvršćavanja i dobijenih mikrostrukture. U odsustvu jedne adekvatne slike procesa očvršćavanja, smatralo se da je livenje pre zanat nego nauka. Zahtevi fizike poluprovodnika jako su uticali na razvoj teorije očvršćavanja. Tako, tokom poslednjih 60-70 godina očvršćavanje je evoluiralo od čisto tehnološkog, empirijskog polja do nauke.

Postignuta svojstva i kvalitet odlivaka su određeni tokom očvršćavanja, koje počinje stvaranjem nukleusa, i nastavlja se njihovim rastom iz rastopa. Pri očvršćavanju legura iz homogenog rastopa nastaje uobičajeno nehomogena raspodela elemenata u očvrslim mikrostrukturnim konstituentima i

odgovarajuće morfološke tvorevine, karakteristične za liveno stanje. Često se formira više kristalnih faza. Razumevanje toka očvršćavanja pretpostavlja poznavanje stanja metalnog rastopa, raspodele rastvorljivih atoma, toka materije pri hlađenju u području likvidus-solidus, kristalizacijskih uslova i dijagrama stanja legura.

Osnovna znanja iz ove oblasti omogućavaju razumevanje kompleksnih promena koje se dešavaju u toku očvršćavanja, koje ima važnu ulogu u mnogim procesima, počev od dobijanja kontinuirano livenih proizvoda, preko proizvodnje visokolegiranih odlivaka složene konfiguracije, pa do visoko čistih monokristala. S jedne strane, razumevanje mehanizma nukleacije i rasta, a sa druge strane, poznavanje matematičke analize promena koje se dešavaju na granici čvrsto/tečno, omogućava projektovanje precizno definisanih mikrostruktura očvršćavanja.

Autor

## Sadržaj

1	FAKTORI KOJI UTIČU NA PROCES OČVRŠĆAVANJA .....	1
1.1	Razlike u strukturi i svojstvima tečne i čvrste faze	1
1.2	Odvođenje toplote	4
1.3	Mikrostrukture očvršćavanja	5
1.4	Raspodela rastvorljive komponente	11
1.5	Efekti kapilarnosti	12
2	TRANSFER TOPLOTE U TOKU PROCESA OČVRŠĆAVANJA ...	17
2.1	Transfer toplote unutar čvrsto-tečnog metalnog sistema	18
2.2	Transfer toplote na granici metal-kalup	20
2.3	Transfer toplote kroz kalup	24
2.4	Protok toplote u kontrolisanim uslovima očvršćavanja	28
3	TRANSFER ATOMA NA GRANICI ČVRSTO – TEČNO .....	33
3.1	Nukleacija	34
3.2	Uslovi nukleacije	35
3.3	Homogena nukleacija	37
3.4	Heterogena nukleacija	42
3.4.1	Model za heterogenu nukleaciju sa nukleusom u obliku kalote	42
3.4.2	Model za heterogenu nukleaciju sa nukleusom u obliku diska	44
3.4.3	Uticaj hemijskog sastava	48
3.5	Brzina formiranja nukleusa	50
3.6	Struktura granice	52
4	MORFOLOŠKA NESTABILNOST GRANICE ČVRSTO-TEČNO..	63
4.1	Nestabilnost granice u čistim supstancama	64
4.2	Nagomilavanje rastvorljive komponente na granici čvrsto-tečno	66
4.3	Granična nestabilnost u legurama	68
4.4	Analiza poremećaja	73
5	ĆELIJSKI I DENDRITNI RAST .....	81
5.1	Očvršćavanje legura sa planarnom granicom čvrsto-tečno	82
5.2	Prinudan i neprinudan rast	82
5.3	Morfologija i kristalografija ćelija i dendrita	85

5.4	Polje difuzije na vrhu igličastog kristala	93
5.5	Radius vrha igličastog kristala	98
5.6	Rastojanje između dendritnih grana	106
5.6.1	Rastojanje između primarnih dendritnih grana posle usmerenog rasta	106
5.6.2	Rastojanje između sekundarnih dendritnih grana nakon usmerenog i ekvaksijalnog rasta	110
6	EUTEKTIČKI I PERITEKTIČKI RAST.....	121
6.1	Vrste eutektikuma	122
6.2	Rast udvojenom difuzijom	124
6.3	Efekti kapilarnosti	130
6.4	Eutektička međufazna rastojanja	132
6.5	Konkurentan rast dendritne i eutektičke faze	137
6.6	Peritektički rast [10,42-49]	140
7	RASPODELA RASTVORLJIVE KOMPONENTE.....	143
7.1	Balans mase u toku usmerenog očvršćavanja	144
7.2	Početno prelazno stanje	145
7.3	Postojano stanje	148
7.4	Krajnje prelazno stanje	149
7.5	Brzina difuzije u sistemu sa malom količinom tečne faze	149
7.6	Mikrosegregacija	154
7.7	Efekti konvekcije	159