

ORIGINALNI NAUČNI RAD

R. Kovač*

ANALITIČKI METOD ODREĐIVANJA KRIVE HLADJENJA ODLIVKA
KORIŠĆENJEM TEMPA KRISTALIZACIJE LEGURE

Rezime

Polazeći od jednačine toplotnog bilansa sistema odlivak-kalup i tempa kristalizacije legure, kao poznate veličine u intervalu temperatura krsistalizacije, određen je opšti izraz koji definiše krivu hladjenja rastopa u procesu očvršćavanja odlivka. Izraz dat u analitičkom obliku međusobno povezuje parametre legure i kalupa, što ga čini pogodnim za analizu procesa očvršćavanja odlivka.

THE ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINATION OF THE COOLING
CURVE DURING SOLIDIFICATION OF CASTING

Summary

According to the equations for conservation of energy in system casting -die and the derivation of the solid fraction ψ of a given volume element during a drop in temperature dt of an alloy, the general relation that defines the curve of cooling in the interval of solidification is determined. The relation given in analytical form connects parameters of die and casting, what makes it convenient for analyses of the process of solidification.

1. UVOD

U dugoj istoriji svoga postojanja livački procesi oslanjali su se na eksperimentalna istraživanja, sužena na uzak broj pitanja podvrgnutih analizi. I na današnjem nivou razvoja nauke, ova disciplina uveliko koristi empirijske korelacije, uspostavljajući na taj način relacije između pojedinih parametara procesa. Može se slobodno reći da su livački procesi i danas u fazi empirije i verovatno je da će još dugo ostati.

*Dr Risto Kovač, dipl.ing., vanr.prof. Fakulteta tehničkih nauka. Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 Novi Sad, V.Perića-Valtera 2.

Tendencija današnjih istraživanja, u ovoj oblasti, zasnovana je na analitičkim i numeričkim metodama analize procesa. Analitički prilaz proučavanja problema podrazumeva njegovo opisivanje jednačinama i iznalaženje rešenja. Tako dobijena rešenja međusobno povezuju parametre procesa (kalupa i legure) i omogućavaju analizu uticaja jednog ili više parametara na sam proces.

2. JEDNAČINA TOPLOTNOG BILANSA SISTEMA ODLIVAK-KALUP

Jednačina toplotnog bilansa sistema odlivak-kalup pri zapreminskom očvršćavanju odlivka oblika ploče, prema /1/, ima oblik:

$$\frac{dQ}{d\tau} = L \cdot \rho \frac{dV}{d\tau} + c \cdot \rho' \cdot V_0 \frac{d(\Delta T)}{d\tau} \quad (1)$$

$\frac{dQ}{d\tau}$ - određuje količinu toplote koja se odvede od odlivka u kalup u jedinici vremena τ

$L \cdot \rho \cdot \frac{dV}{d\tau}$ - količina toplote koja se oslobadja obrazovanjem čvrste faze (skivena toplota kristalizacije) u jedinici vremena τ

gde je: L - srednja vrednost toplote kristalizacije legure u J/kg
 ρ - gustina čvrste faze legure u kg/m³
 V - zapremina čvrste faze u m³

$c \cdot \rho' \cdot V_0 \frac{d(\Delta T)}{d\tau}$ - količina toplote koja se odvede iz rastopa usled pothladjenja ΔT , u jedinici vremena τ .

gde je: c - srednja vrednost specifične toplote legure dvofazne oblasti u J/kgK
 ρ' - srednja vrednost gustine legure u intervalu temperature kristalizacije u kg/m³
 V_0 - početna zapremina tečne faze u m³
 $\Delta T = (T_{kr} - T)$ - pothladjenje u K
 T_{kr} - temperatura kristalizacije, u K
 T - temperatura, u K.

Ako se odnos čvrste i tečne faze u intervalu temperatura kristalizacije označi sa ψ , tj. $\psi = \frac{V}{V_0}$, tada prethodna jednačina glasi:

$$\frac{dQ}{d\tau} = L \cdot \rho \cdot V_0 \frac{d\psi}{d\tau} + c \cdot \rho' \cdot V_0 \frac{d(\Delta T)}{d\tau} \quad (2)$$

Hladjenjem odlivka toplota iz bilo kog njegovog dela mora prvo biti dovedena u njegov površinski sloj, a zatim predata kalupu. Količina toplote odve-

dena s površine odlivka u kalup, pri malom padu temperature po preseku odlivka, određena je (prema zakonu Njutna) izrazom /3/:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \alpha (T - T_s) \cdot S \quad (3)$$

gde je: α - koeficijent prelaza toplote u sistemu odlivak-kalup, u W/m^2K
 T_s - temperatura okolne sredine, u K
 S - površina sa koje se toplota odaje u okolnu sredinu, u m^2

Da bi se jednačina (2) mogla rešiti, a zatim rešenja prikazati grafički, potrebno je za određenu leguru poznavati funkciju $\psi (\psi = V/V_0)$ i fizičke veličine legure koje egzistiraju u jednačini.

3. TEMPO KRISTALIZACIJE

Relativna količina čvrste faze, u intervalu temperatura kristalizacije, pri temperaturi T određena je izrazom

$$\psi = \frac{V}{V_0} = \frac{B \cdot C}{A \cdot C} = \psi (T) \quad (4)$$

U dijagramu stanja dvojne legure tačka B određuje hemijski sastav, tačka A temperaturu solidusa i tačka C temperaturu likvidusa. Korišćenjem pravila poluge, može se odrediti količina i sastav čvrste faze za određenu leguru.

Priraštaj relativne količine čvrste faze, sa padom temperature, u intervalu temperatura kristalizacije prema ravnotežnom dijagramu stanja, označiće se sa μ , tj.

$$\frac{d\psi}{dT} = \mu \quad (5)$$

gde je: μ - tempo kristalizacije ili temperaturna intenzivnost kristalizacije i predstavlja važnu karakteristiku procesa.

Tempo kristalizacije može se odrediti i na osnovu obrazaca datih u literaturi /1,2/.

Ako se izraz (5) pomnoži sa dT i podeli sa d τ dobija se:

$$\frac{d\psi}{d\tau} = \mu \frac{dT}{d\tau} \quad (6)$$

4. REŠENJE DIFERENCIJALNE JEDNAČINE

Unošenjem izraza (6) u jednačinu (2) ista glasi:

$$\frac{dQ}{d\tau} = \mu \cdot \rho \cdot L \cdot V_0 \frac{dT}{d\tau} + c \cdot \rho' \cdot V_0 \frac{d(\Delta T)}{d\tau} \quad (7)$$

U periodu odvodjenja toplote pregrevanja tj. pri hladjenju odlivka od temperature livenja T_1 do temperature kristalizacije T_{kr} , relativna količina čvrste faze $\psi=0$, a time je i $\mu=0$. Usled toga prvi član na desnoj strani jednačine (7) jednak je nuli, te se ista može napisati u obliku:

$$\frac{dQ}{d\tau} = c \cdot \rho' \cdot V_0 \frac{d(T_1 - T)}{d\tau} \quad (8)$$

gde je: T_1 - temperatura livenja.

Unošenjem izraza (3) u prethodnu jednačinu ista glasi:

$$\alpha (T - T_s) \cdot S = c \cdot \rho' \cdot V_0 \frac{d(T_1 - T)}{d\tau} \quad (9)$$

Prelaskom na bezdimenzioni oblik jednačina (9) dobija oblik:

$$\frac{dt}{dFo} + Bi \cdot t = 0 \quad (10)$$

gde je: $t = \frac{T - T_s}{T_1 - T_s}$ - bezdimenziona temperatura

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{X^2} - \text{Furie-ov kriterij.}$$

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} \cdot X - \text{Bio-v kriterij.}$$

Rešenje jednačine (10) glasi:

$$T = (T_1 - T_s) \exp(-Bi \cdot Fo) + T_s \quad (11)$$

Jednačina (11) definiše krivu hladjenja rastopa od temperature livenja do temperature kristalizacije legure. Vreme hladjenog liva određuje se iz jednačine (10) pri $T=T_{kr}$.

Nakon unošenja izraza (3) u jednačinu (7) koja opisuje proces hladjenja legure u intervalu temperatura likvidus-solidus, jednačina (7) dobija oblik:

$$\alpha (T - T_s) \cdot S = \mu L \cdot \rho \cdot V_0 \frac{d(T_{kr} - T)}{d\tau} + c \rho' V_0 \frac{d(T_{kr} - T)}{d\tau} \quad (12)$$

Nakon niza transformacija jednačina (12) može se napisati u bezdimenzionom obliku:

$$\frac{dt}{dFo} + \frac{L \cdot \mu \cdot \rho}{c\rho'} \cdot \frac{dt}{dFo} + Bi \cdot t = 0 \quad (13)$$

gde je:

$$t = \frac{T - T_s}{T_{kr} - T_s}$$

Rešenje jednačine (12) odnosno (13) glasi:

$$T = (T_{kr} - T_s) \exp\left(-\frac{c\rho'}{c\rho' + L\mu\rho} Bi Fo\right) + T_s \quad (14)$$

Izraz (14) definiše opštu krivu hladjenja odlivka u intervalu temperatura kristalizacije. Da bi se kriva hladjenja prikazala grafički, treba poznavati fizička svojstva određene legure, koeficijent prelaza toplote sa odlivka na kalup, debljinu zida odlivka i vreme očvršćavanja.

5. ZAKLJUČAK

1. Izraz (14) predstavlja opšte rešenje jednačine toplotnog bilansa sistema odlivak-kalup, kada se kao parametar procesa koristi tempo kristalizacije legure.
2. Jednačina u jednostavnom obliku medjusobno povezuje parametre legure i kalupa.
3. Za odredjivanje vrednosti temperature i grafičko prikazivanje krive hladjenja legure, treba poznavati fizička svojstva legure, koeficijent prelaza toplote α i vreme očvršćavanja odlivka.

Literatura

1. Balandin G.F.: Formirovanie kristaličeskogo stroenija otlivok "Mašinstroenie", Moskva, 1973.
2. Balandin G.F.: Osnovi teorii formirovanija otlivki, Častj-j I, "Mašinstroenie", Moskva, 1975.
3. Vejnik, A.I.: Teorija zatverdevanija otlivki, "MAŠGIZ", Moskva, 1960.