

انقباض حین انجماد و تغذیه گذاری

انقباض حین انجماد و تغذیه گذاری

برای تهیه قطعات به روش ریخته‌گری، در کارگاه‌های خوب، تکنیک‌های مختلفی از لحاظ روش ریخته‌گری، نوع قالب، روش و انتقال مذاب، و غیره مشاهده می‌شود. به عنوان مثال در کارگاه‌های ریخته‌گری کوره‌های مختلفی برای ذوب فلزات استفاده می‌شود و تجهیزاتی مانند بوته، پاتیل، ملاقه برای نگهداری، انتقال و ریختن مذاب به کار گرفته می‌شود. به علاوه، قالب‌های مختلفی برای ریخته‌گری قطعات وجود دارد، مانند قالب‌های ماسه ای، فلزی، سرامیکی و غیره که هر کدام در کیفیت مذاب ایجاد شده و در نهایت در کیفیت قطعه تولیدی مؤثر است. هنگامی که مذاب به داخل قالب ریخته می‌شود با سرد شدن مذاب در داخل قالب انجماد آن شروع شده و پس از مدتی مذاب به‌طور کامل جامد می‌شود. چگونگی انجماد مذاب تأثیر بسیار مهمی بر کیفیت قطعات ریخته‌گری دارد. بنابراین، دانستن چگونگی انجماد فلز برای تولید قطعه ریخته‌گری مرغوب بسیار مهم است. به همین منظور، محققان زیادی پدیده انجماد فلزات را مورد بررسی قرار داده و رفتار فلزات مختلف در حین انجماد را مطالعه کرده‌اند

تا براساس آن، راه‌های تولید قطعه ریخته‌گری مرغوب را شناسایی کنند و در صورت نیاز تمهیدات لازم حین تولید قطعه به روش ریخته‌گری را پیش‌بینی کرده و در نظر گیرند. بنابراین، انجماد فلزات یکی از مهم‌ترین مباحث ریخته‌گری است که تأثیر مستقیم بر کیفیت قطعه ریخته‌گری دارد.

انقباض حین انجماد و تغذیه گذاری

ساده‌ترین روش برای مطالعه و بررسی نحوه انجماد مذاب فلزی در قالب، بررسی نحوه انتقال حرارت در قالب ریخته‌گری می‌باشد. شکل قطعه ریخته‌گری و نوع قالب ریخته‌گری تأثیر بسزایی بر انتقال حرارت مذاب فلز دارد. نحوه انتقال حرارت مذاب فلز معمولاً از سه جنبه بررسی می‌شود که عبارتند از:

الف) قوانین اولیه انتقال حرارت: که مشخص می‌شود در هنگام انجماد فلز مذاب در قالب، گرمای مذاب به کدام یک از روش‌های انتقال حرارت شامل هدایت، جابه‌جایی و تشعشع، به قالب و محیط خارج منتقل می‌شود.

ب) متغیرهای مربوط به شکل و اندازه قطعه ریخته‌گری: با توجه به ابعاد قطعه ریخته‌گری، ضخامت قسمت‌های مختلف قطعه و فصل مشترک آن قسمت‌ها با جداره قالب می‌توان پیش‌گویی کرد که کدام قسمت قطعه سریع‌تر حرارت خود را از دست داده و منجمد می‌شود؛ مانند گوشه‌های خارجی قطعه و یا کدام قسمت قطعه دیرتر حرارت خود را از دست داده و منجمد می‌شود؛ مانند گوشه‌های داخلی قطعه.

ج) متغیرهای مربوط به قالب و نوع فلز ریخته‌گری: که نشان می‌دهد انتقال حرارت در کدام یک از قالب‌ها بهتر صورت می‌گیرد. بنابراین گرمای مذاب با سرعت بیشتری خارج شده و مذاب سریع‌تر منجمد می‌شود. به عنوان مثال، انتقال حرارت در قالب‌های فلزی نسبت به قالب‌های ماسه‌ای بهتر صورت می‌گیرد؛ بنابراین مذاب فلز سریع‌تر منجمد می‌شود. از طرف دیگر، نوع فلز مذاب نیز در انتقال حرارت مؤثر است؛ مثلاً انتقال حرارت در فلزاتی مانند آلومینیوم و مس به علت ضریب هدایت حرارتی بالاتر و نقطه ذوب کمتر، نسبت به فلزاتی مانند آهن، بهتر صورت می‌پذیرد.

انقباض حین انجماد و تغذیه گذاری در قطعات ریخته‌گری

هنگامی که فلز مذاب منجمد می‌شود، معمولاً حجم آن کاهش می‌یابد، به عبارت دیگر، در قطعه انقباض حجمی رخ می‌دهد. در اثر این کاهش حجم، ممکن است ابعاد قطعه ریخته‌گری کوچکتر از ابعاد موردنظر شود و یا این کاهش حجم سبب ایجاد حفرات و فضاهای توخالی در قطعه ریخته‌گری شود که به حفره‌های انقباضی موسوم هستند. به همین دلیل، برای تولید یک قطعه ریخته‌گری سالم و با کیفیت مناسب، باید کاهش حجم قطعه ریخته‌گری را به طریقی جبران کرد.

انقباض حین انجماد و تغذیه گذاری

هنگامی که مذاب به داخل قالب ریخته می‌شود، معمولاً انجماد از قسمت‌های نازک‌تر قطعه شروع می‌شود، زیرا انتقال حرارت در قسمت‌های نازک‌تر قطعه به دلیل حجم کم مذاب و سطح تماس زیاد آن قسمت با دیواره قالب، نسبت به انتقال حرارت در قسمت‌های ضخیم‌تر قطعه بهتر صورت می‌گیرد. انجماد قسمت‌های نازک قطعه معمولاً از مجاورت دیواره‌های قالب شروع می‌شود؛ به‌طوری که یک پوسته جامد در کنار دیواره قالب تشکیل می‌شود. تشکیل پوسته جامد با انقباض همراه است که این انقباض معمولاً با جابه‌جایی مذاب از قسمت‌های ضخیم‌تر قطعه به قسمت‌های نازک‌تر جبران می‌شود. جابه‌جایی مذاب در قسمت‌های مختلف قطعه در حال انجماد، جهت جبران انقباض قسمت‌های مختلف قطعه، تا پایان انجماد ادامه دارد و به این طریق، انقباض قسمت‌های نازک‌تر قطعه در هنگام انجماد، جبران می‌شود. در مرحله آخر انجماد، حجم مذاب باقی مانده نسبت به حجم محفظه قالب کاهش می‌یابد زیرا مذاب جهت جبران انقباض در مراحل اولیه انجماد مصرف شده است و در مراحل آخر، مذاب کافی برای جبران انقباضات ایجاد شده وجود ندارد. بنابراین، در آخرین قسمت قطعه که مذاب منجمد می‌شود، حفره‌ای به‌وجود می‌آید که اصطلاحاً به آن، حفره انقباضی می‌گویند یا توجه به این که حفره انقباضی در آخرین مرحله انجماد به‌وجود می‌آید، می‌توان نتیجه گرفت که حفره انقباضی در ضخیم‌ترین قسمت قالب یا به عبارت دیگر، در گرم‌ترین نقطه قطعه تشکیل می‌شود. برای جلوگیری از به‌وجود آمدن حفره انقباض، باید به روشی مذاب اضافی به محفظه قالب وارد شود. به همین منظور، معمولاً در مجاورت قسمت‌های ضخیم یا گرم‌ترین نقاط قطعه، که در آخرین مرحله منجمد می‌شوند، کانالی اضافی از مذاب قرار داده می‌شود تا حفره انقباضی به‌وجود آمده در آخرین مرحله انجماد را پر کند. به این کانال‌ها، تغذیه می‌شود. به‌طور کلی می‌توان گفت، هنگامی که مذاب به داخل قالب ریخته می‌شود، سردترین قسمت قطعه ریختگی، قسمت‌های نازک قطعه و جداره خارجی قطعه است که در تماس با دیواره قالب می‌باشد و انتقال حرارت در آن قسمت‌ها سریع‌تر انجام می‌گیرد. از طرف دیگر، گرم‌ترین منطقه در قطعه ریختگی، تغذیه است که در آخرین مرحله انجماد، منجمد می‌شود.

انقباض حین انجماد و تغذیه گذاری

- معمولاً فلزات و آلیاژها در هنگام انجماد و سرد شدن قالب کاهش حجم یافته و منقبض می‌شوند؛ به جز فلزاتی مانند بیسموت و بعضی از آلیاژها مانند چدن‌های خاکستری و چدن‌های با گرافیت کروی که در حین انجماد منبسط می‌شوند. هنگامی که مذاب فلز سرد می‌شود تا منجمد گردد، سه نوع انقباض در آن اتفاق می‌افتد؛ انقباض مایع، انقباض حین انجماد و انقباض جامد.
- **انقباض مایع:** هنگامی که مذاب فلز سرد می‌شود، دمای آن کاهش می‌یابد و در نتیجه، حجم آن کاهش یافته و منقبض می‌شود. این انقباض در حالت مایع بوده و تا دمای انجماد ادامه می‌یابد.
- **انقباض حین انجماد:** هنگامی که دمای مذاب فلز به نقطه انجماد می‌رسد، اولین ذرات جامد در آن تشکیل می‌شود و با ادامه سرد شدن، به تدریج مقدار جزء جامد افزایش می‌یابد. با توجه به این که حجم جامد ایجاد شده معمولاً از حجم مایع کمتر است، حجم مخلوط جامد و مذاب کاهش یافته و قطعه منقبض می‌شود. این انقباض از شروع انجماد تا پایان آن ادامه می‌یابد.
- **انقباض جامد:** هنگامی که مذاب به طور کامل منجمد شد، با ادامه سرد کردن، دمای جامد کاهش می‌یابد و در نتیجه حجم جامد نیز کاهش یافته و منقبض می‌شود. این انقباض از پایان انجماد تا رسیدن دمای فلز به دمای محیط ادامه می‌یابد.

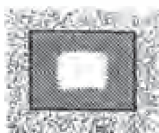
انقباض حین انجماد و تغذیه گذاری

Table 4.2. Solidification contraction of various metals and alloys

Material	Volumetric solidification contraction, %	Material	Volumetric solidification contraction, %
carbon steel	2.5 to 3	Cu-30%Zn	4.5
1% carbon steel	4	Cu-10%Al	4
white iron	4 to 5.5	aluminum	6.6
gray iron	-2.5 (expansion) to 1.6	Al-4.5%Cu	6.3
ductile iron	-4.5 (expansion) to 2.7	Al-12%Si	3.8
copper	4.9	magnesium	4.2
		zinc	6.5

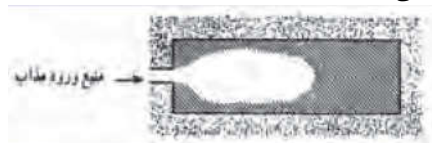
انقباض حین انجماد و تغذیه گذاری

- انجماد مذاب در قالب ریخت هگری به دو شکل می تواند انجام شود؛ انجماد همه جانبه و انجماد جهت دار
- **الف - انجماد همه جانبه:** در این حالت انجماد از دیواره قالب شروع می شود. پوسته جامد به تدریج ضخیم تر شده و حرکت آن به سمت مرکز قطعه ادامه می یابد.



انجماد همه جانبه

- **ب - انجماد جهت دار یا کنترل شده:** در این حالت، انجماد از دورترین قسمت قالب نسبت به محل ورود مذاب به محفظه قالب، شروع شده و قشر منجمد شده با گذشت زمان به سمت محل ورود مذاب یا راهگاه پیشروی می کند.



انقباض حین انجماد و تغذیه گذاری

- زمانی که انجماد به صورت جهت دار است، انجماد از دورترین نقطه نسبت به محل ورود مذاب به قالب شروع شده و فصل مشترک جامد مذاب به سمت محل ورود مذاب حرکت می کند. در نتیجه، آخرین مذاب موجود در قالب در نزدیکی محل ورود مذاب یا راهگاه منجمد می شود. بنابراین، حفره انقباضی ایجاد شده در اثر انقباض مذاب در حالت مایع و در حین انجماد، در نزدیکی محل ورود مذاب به قالب بوجود می آید. با توجه به این که این حفره ها نزدیک به محل ورود مذاب به قالب است و هنوز در راهگاه مذاب وجود دارد، این حفره ها پُر می شوند و از به وجود آمدن عیب در قطعه جلوگیری می شود.

Fluid Flow during Solidification

انقباض حین انجماد و تغذیه گذاری

Shrinkage Flow:

- The vast majority of metals and alloys shrink during solidification
- Solidification contraction:

$$\beta = \frac{v_L - v_S}{v_L} = \frac{\rho_S - \rho_L}{\rho_S}$$

Table 4.2. Solidification contraction of various metals and alloys

Material	Volumetric solidification contraction, %	Material	Volumetric solidification contraction, %
carbon steel	2.5 to 3	Cu-30%Zn	4.5
1% carbon steel	4	Cu-10%Al	4
white iron	4 to 5.5	aluminum	6.6
gray iron	-2.5 (expansion) to 1.6	Al-4.5%Cu	6.3
ductile iron	-4.5 (expansion) to 2.7	Al-12%Si	3.8
copper	4.9	magnesium	4.2
		zinc	6.5

Fluid Flow during Solidification

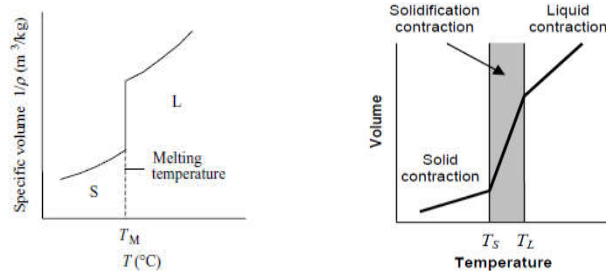
Shrinkage Flow انقباض حین انجماد و تغذیه گذاری

Assumptions:

- Heat is extracted from the wide faces of the plate by convection with a constant heat transfer coefficient(h).
- Temperature gradients within the plate are negligible.
- The solid fraction at any given time is uniform through the plate.
- Temperature range of solidification is not too large.
- Fluid flow within mushy zone is modeled as fluid flow through a porous media with interconnected pores (Darcy Law).
- Liquid fraction is treated as fraction of porosity in porous media.
- Physical properties of each phase is assumed to be constant.
- A fixed dendritic network is assumed.

Fluid Flow during Solidification

Metal Shrinkage and feeding(risring)



For effective feeding to occur during solidification four main requirements must be satisfied:

- a feeding source (riser) that solidifies after the region to be fed;
- sufficient liquid must be available to feed the shrinkage;
- unrestricted feeding channels (path of flow from the feeder to the shrinkage);
- sufficient pressure on the liquid to make it flow toward the shrinkage region.

Fluid Flow during Solidification

Metal Shrinkage and feeding(risering):

➤ Calculation of feeder volume:

The volume of the feeder has to be adapted in such a way that two conditions are fulfilled:

- The solidification time of the feeder must be equal to or longer than that of the casting. Then the melt in the feeder compensates for the solidification shrinkage of the casting.
- The volume of the feeder must have a size which at least is large enough to enclose the whole solidification shrinkage inside the feeder.

➤ Time condition of the feeder and casting:

- This condition assumes that solidification time of feeder has to be greater or equal to solidification time of casting:

$$t_{f, \text{feeder}} \geq t_{f, \text{casting}}$$

Heat Transfer in mold

Modes of heat transfer: ❖

- Conduction
- Convection
- Thermal radiation

Heat Transfer in mold

Conduction

❖ Basic Law of Thermal Conduction under Stationary Conditions

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -kA \frac{T_L - T_0}{L}$$

$$\frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dy}$$

where

Q = amount of heat

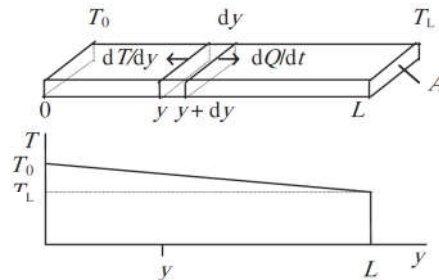
t = time

k = thermal conductivity

A = cross-section area of bar

L = length of bar

$T_L - T_0$ = temperature difference between the ends of the bar.



15

Heat Transfer in mold

Conduction

1D steady state heat conduction ❖

area and unit time) can be The heat flux (amount of heat per unit area and unit time) can be written as:

$$\frac{dq}{dt} = -k \left(\frac{dT}{dy} \right) \quad \text{Fourier's first law}$$

where q = amount of heat per unit area = Q/A .

16

Heat Transfer in mold

Conduction

❖ Thermal conductivity of some elements and alloys.

Material at 20 °C	<i>k</i> (W/m K)
Cu	390
Cu (s, 1083 °C)	334
Al	237
Al (s, 600 °C)	218
Fe	83
Fe (s, 1535 °C)	31
Fe 0.85%C	45
Fe 18%Cr 8%Ni	~15
Water	0.60
Air (0 °C)	0.024

Heat Transfer in mold

Thermal Radiation

All bodies emit electromagnetic radiation or thermal radiation to their surroundings.

$dQ_{\text{rad}} = \sigma_B A T^4 dt$ Boltzmann's law $dQ_{\text{rad}}^{\text{total}} = \epsilon \sigma_B A (T^4 - T_0^4) dt$

Material	<i>T</i> (°C)	ϵ
Al film	100	0.09
Oxidized Al	150–500	0.20–0.30
Polished steel	100	0.066
Cast iron	22	0.44
Cast iron	880–990	0.60–0.70
Low carbon steel	230–1065	0.20–0.32

Heat Transfer in mold

Convection

One type of convection present in the casting of a metal melt is caused by cooling the surface of the solidified metal or the mould with water ❖

The cooling of a mould by flowing water is an example of forced convection. ✓

One example of natural convection is the cooling of a metal surface in contact with the air without any measures being taken to make the air circulate. ✓

$$\frac{dq}{dt} = h_{\text{con}}(T - T_0)$$

where

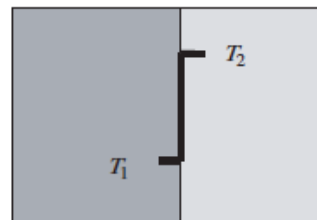
h_{con} = heat transfer coefficient of convection
 T = temperature of the surface of the metal
 T_0 = temperature of cooling medium.

19

Heat Transfer across the Interface

between Temperature drop across the interface ❖
 materials with different temperatures two

$$\frac{dQ}{dt} = -h A (T_2 - T_1) \quad \frac{dq}{dt} = -h(T_2 - T_1)$$



of air Poor contact between the materials will result in a thin layer ❖
 the heat transfer will between them. Air is a poor thermal conductor and
 layer appears decrease considerably when an air

$$h = \frac{k}{\delta}$$

With applying Fourier's law and the heat transfer Equation on the thin layer of air

where

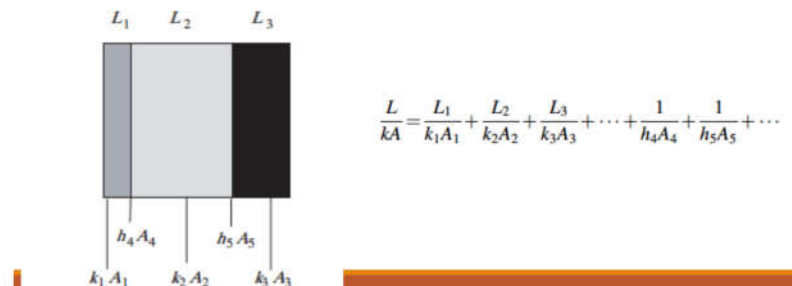
h = heat transfer coefficient of air
 k = thermal conductivity of air
 δ = thickness of air layer.

20

Heat Transfer in mold

Thermal Resistivity

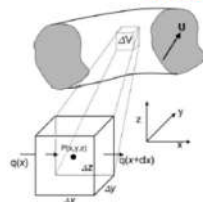
- ❖ Thermal Conduction through Several Layers and across Several Interfaces, Coupled in Series, under Stationary Conditions



Heat Transfer in mold

General Heat transfer with phase change Equation

- To be derived based on thermal Energy conservation in the system

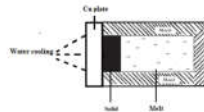


- Rate of Heat input – Rate of Heat output + Rate of Heat generation – Rate of Heat consumption = Rate of change of Heat content of the system

General Equation of Heat Transport in Solidification

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \nabla \cdot (\rho c_p \mathbf{V} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S$$

انجماد میله ای از جنس فولاد زنگ نزن به طول ۵۰ سانتی متر به صورت جهت دار مطابق شکل شماتیک زیر صورت می گیرد که در آن سطح جانبی و سطح انتهایی کاملاً عایق بندی شده و حرارت از یک طرف از طریق یک میرد مسی سرد شده یا آب خارج می شود. مقاومت حرارتی فصل مشترک جامد - میرد و همچنین میرد مسی با چوب بوده و دمای سطح خارجی میرد معادل دمای محیط سرد کننده می باشد ($T_0=25^\circ\text{C}$).

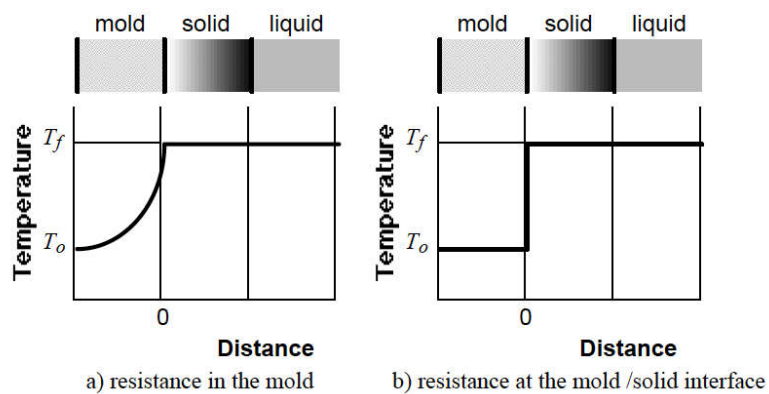


با فرض اینکه گرادیان دمایی در منطقه مذاب قابل صرف نظر کردن باشد، معادله فوق است: الفیراورد سرعت پیشرفت جبهه انجماد از طریق الیگز مسئله استفان به محاسبه زمان کل انجماد و همچنین زمان رسیدن جبهه انجماد به وسط میله. اطلاعات مسئله:

$k = 15 \text{ W/m.K}$, $\rho = 7900 \text{ kg/m}^3$, $C_{ps} = 490 \text{ J/kg.K}$, $C_{pl} = 800 \text{ J/kg.K}$, $T_m = 1370^\circ\text{C}$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $\Delta H_f = 290 \text{ kJ/mol}$

Heat Transport in the Mold

Temperature profile in the mold and in the casting for different assumptions ❖



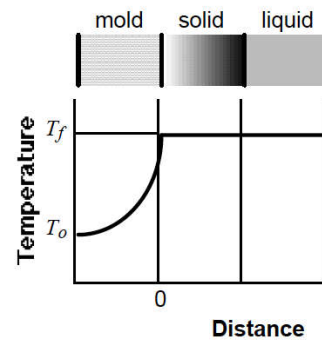
Solidification in an Insulating Mold

The governing equation $\partial T / \partial t = \alpha (\partial^2 T / \partial x^2)$

$$T = C_1 + C_2 \operatorname{erf}(u) \quad \text{where} \quad u = x / (2\sqrt{\alpha t})$$

$\operatorname{erf}(u)$ is the error function

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-x^2) dx$$



25

Solidification in an Insulating Mold

$$\begin{array}{lll} \text{BC1} & \text{at} & x = -\infty \quad T = T_o \\ \text{BC2} & \text{at} & x = 0 \quad T = T_f \end{array}$$

where T_f is the fusion temperature of the metal, and T_o is the ambient temperature.

$$\text{from BC1:} \quad T_o = C_1 + C_2 \operatorname{erf}(-\infty) = C_1 - C_2 \operatorname{erf}(\infty) = C_1 - C_2$$

$$\text{from BC2:} \quad T_f = C_1 + C_2 \operatorname{erf}(0) = C_1$$

$$T = T_f + (T_f - T_o) \operatorname{erf}\left(x / (2\sqrt{\alpha t})\right)$$

$$-k_m \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = -\rho_s \Delta H_f \frac{dx}{dt}$$

26

Solidification in an Insulating Mold

$$T = T_f + (T_f - T_o) \operatorname{erf}\left(x / (2\sqrt{\alpha t})\right)$$

Let us now try to evaluate the thickness of casting, L , solidified over some time t . Heat flux balance at the solid /mold interface gives:

$$-k_m \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = -\rho_s \Delta H_f \frac{dx}{dt}$$

$$-k_m \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = -k_m (T_f - T_o) \left(\frac{\partial}{\partial x} \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \right)_{x=0} = -\frac{k_m (T_f - T_o)}{\sqrt{\pi \alpha t}} = -\sqrt{\frac{k_m \rho_m c_m}{\pi t}} (T_f - T_o)$$

27

Solidification in an Insulating Mold

By analogy with Ohm's law the resistance in the mold can be defined from $q = k \Delta T / \Delta x = \Delta T / (\Delta x / k)$ as:

$$R_m = \frac{1}{A} \sqrt{\frac{\pi t}{k_m \rho_m c_m}} \quad L = \frac{2}{\pi} \left(\frac{T_f - T_o}{\rho_s \Delta H_f} \right) \sqrt{k_m \rho_m c_m} t^{1/2}$$

$$t_f = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{k_m \rho_m c_m} \right) \left(\frac{\rho_s \Delta H_f}{T_f - T_o} \right)^2 \left(\frac{v}{A} \right)^2 = ct \cdot \left(\frac{v}{A} \right)^2 = ct \cdot M^2$$

This equation is known as the *Chvorinov* equation

where M is the *casting modulus*.

28

مثال ۱

۱. یک قطعه مکعبی به طول ۰/۱ متر از جنس فولاد در قالب ماسه ای ریخته می شود. در دو حالت مذاب با بدون فوق گداز و مذاب با دمای فوق گداز ۱۶۰۰ °C موارد زیر را بررسی نمایید:

الف. سرعت پیشرفت جبهه انجماد (ds/dt)

ب. تعیین موقعیت جبهه انجماد بر حسب زمان در دو حالت بیان شده

پ. زمان کل انجماد

ت. برآورد زمان لازم برای استهلاک فوق گداز

ث. منحنی سرد شدن مرکز قطعه مکعب تا دمای محیط را رسم کنید (با فرض سرد شدن نیوتنی مذاب)

$k_s = 40 \text{ W/m.K}$, $k_l = 35 \text{ W/m.K}$, $\rho_l = 7 (1000 \text{ kg/m}^3)$, $\rho_s = 7.21 (1000 \text{ kg/m}^3)$, $c_{pl} = 794 \text{ J/kg.K}$, $c_{ps} = 820 \text{ J/kg.K}$, $T_m = 1538^\circ\text{C}$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $\Delta H_f = 270000 \text{ J/mol}$

مشخصات قالب ماسه ای:

$k_{\text{mold}} = 0.52 \text{ W/m.K}$, $\rho_{\text{mold}} = 1600 \text{ kg/m}^3$, $c_{\text{mold}} = 1170 \text{ J/kg.K}$

الف. سرعت پیشرفت جبهه انجماد (ds/dt)

ب. تعیین موقعیت جبهه انجماد بر حسب زمان در دو حالت بیان شده

پ. زمان کل انجماد

ت. برآورد زمان لازم برای استهلاک فوق گداز

ث. منحنی سرد شدن مرکز قطعه مکعب تا دمای محیط را رسم کنید (با فرض سرد شدن نیوتنی مذاب)

مشخصات قالب ماسه ای:

۱. یک قطعه مکعبی به طول ۰/۱ متر از جنس فولاد در قالب ماسه ای ریخته می شود. در دو حالت مذاب با بدون فوق گداز و مذاب با دمای فوق گداز ۱۶۰۰ °C موارد زیر را بررسی نمایید:

الف. سرعت پیشرفت جبهه انجماد (ds/dt)

ب. تعیین موقعیت جبهه انجماد بر حسب زمان در دو حالت بیان شده

پ. زمان کل انجماد

ت. برآورد زمان لازم برای استهلاک فوق گداز

ث. منحنی سرد شدن مرکز قطعه مکعب تا دمای محیط را رسم کنید (با فرض سرد شدن نیوتنی مذاب)

مشخصات قالب ماسه ای:

$k_s = 40 \text{ W/m.K}$, $k_l = 35 \text{ W/m.K}$, $\rho_l = 7 (1000 \text{ kg/m}^3)$, $\rho_s = 7.21 (1000 \text{ kg/m}^3)$, $c_{pl} = 794 \text{ J/kg.K}$, $c_{ps} = 820 \text{ J/kg.K}$, $T_m = 1538^\circ\text{C}$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $\Delta H_f = 270000 \text{ J/mol}$

$k_{\text{mold}} = 0.52 \text{ W/m.K}$, $\rho_{\text{mold}} = 1600 \text{ kg/m}^3$, $c_{\text{mold}} = 1170 \text{ J/kg.K}$

الف. سرعت پیشرفت جبهه انجماد (ds/dt)

ب. تعیین موقعیت جبهه انجماد بر حسب زمان در دو حالت بیان شده

پ. زمان کل انجماد

ت. برآورد زمان لازم برای استهلاک فوق گداز

ث. منحنی سرد شدن مرکز قطعه مکعب تا دمای محیط را رسم کنید (با فرض سرد شدن نیوتنی مذاب)

مشخصات قالب ماسه ای:

۱. یک قطعه مکعبی به طول ۰/۱ متر از جنس فولاد در قالب ماسه ای ریخته می شود. در دو حالت مذاب با بدون فوق گداز و مذاب با دمای فوق گداز ۱۶۰۰ °C موارد زیر را بررسی نمایید:

الف. سرعت پیشرفت جبهه انجماد (ds/dt)

ب. تعیین موقعیت جبهه انجماد بر حسب زمان در دو حالت بیان شده

پ. زمان کل انجماد

ت. برآورد زمان لازم برای استهلاک فوق گداز

ث. منحنی سرد شدن مرکز قطعه مکعب تا دمای محیط را رسم کنید (با فرض سرد شدن نیوتنی مذاب)

مشخصات قالب ماسه ای:

$k_s = 40 \text{ W/m.K}$, $k_l = 35 \text{ W/m.K}$, $\rho_l = 7 (1000 \text{ kg/m}^3)$, $\rho_s = 7.21 (1000 \text{ kg/m}^3)$, $c_{pl} = 794 \text{ J/kg.K}$, $c_{ps} = 820 \text{ J/kg.K}$, $T_m = 1538^\circ\text{C}$, $T_0 = 25^\circ\text{C}$, $\Delta H_f = 270000 \text{ J/mol}$

$k_{\text{mold}} = 0.52 \text{ W/m.K}$, $\rho_{\text{mold}} = 1600 \text{ kg/m}^3$, $c_{\text{mold}} = 1170 \text{ J/kg.K}$

Solidification in an Insulating Mold

Relation between Solidification Time and the Ratio V/A for Spherical and Cylindrical Moulds

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_{\text{mould}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{n}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)$$

where

r = the radius of the casting

$n = 1$ for a cylinder

$n = 2$ for a sphere.

$$\frac{V_{\text{metal}}}{A} = \left(\frac{T_i - T_0}{\rho_{\text{metal}} (-\Delta H)} \right) \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{k_{\text{mould}} \rho_{\text{mould}} c_p^{\text{mould}}} \sqrt{t_{\text{total}}} + \frac{n k_{\text{mould}} t_{\text{total}}}{2r} \right)$$

31

Solidification in an Insulating Mold

Then,

$$t_f = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{k_m \rho_m c_m} \right) \left(\frac{\rho \Delta H_{\text{eff}}}{T_f - T_o} \right)^2 \left(\frac{v}{A} \right)^2$$

32

Solidification in an Insulating Mold

Example

Determine the solidification time for a steel cylinder with a diameter of 15 cm that is cast in a sand mould. The height of the cylinder is much larger than its diameter. The sand mould and the steel have the following material constants:

The thermal conductivity of the sand	$k_{\text{mould}} = 0.63 \text{ J/m K s}$
The density of the sand	$\rho_{\text{mould}} = 1.61 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
The thermal capacity of the sand	$c_p^{\text{mould}} = 1.05 \times 10^3 \text{ J/kg K}$
Solidification temperature of the steel	$T_L = T_i = 1490 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperature of the surroundings	$T_0 = 23 \text{ }^\circ\text{C}$
Solidification heat of the steel	$-\Delta H = 272 \text{ kJ/kg.}$

33

Solidification in an Insulating Mold

Solution:

$$\frac{V_{\text{metal}}}{A} = \frac{T_i - T_0}{\rho_{\text{metal}} (-\Delta H)} \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\sqrt{k_{\text{mould}} \rho_{\text{mould}} c_p^{\text{mould}}} \right) \sqrt{t_{\text{total}}} + \frac{nk_{\text{mould}} t_{\text{total}}}{2r} \right)$$

We introduce the given values and the height L of the cylinder:

$$\frac{T_i - T_0}{\rho_{\text{metal}} (-\Delta H)} = \frac{1490 - 23}{(7.8 \times 10^3) \times (272 \times 10^3)} = 0.691 \times 10^{-6} \text{ K m}^3/\text{J}$$

$$\frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{k_{\text{mould}} \rho_{\text{mould}} c_p^{\text{mould}}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{0.63 \times (1.61 \times 10^3) \times (1.05 \times 10^3)} = 1.16 \times 10^3 \text{ J/m}^2 \text{ K s}^{0.5}$$

34

Solidification in an Insulating Mold

$$\frac{V_{\text{metal}}}{A} = \frac{\pi r^2 L}{2\pi r L} = \frac{r}{2} = \frac{7.5}{2} = 3.75 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\frac{nk_{\text{mould}}}{2r} = \frac{1 \times 0.63}{2 \times 0.075} = 4.2 \text{ J/m}^2 \text{ s K}$$

$$3.75 \times 10^{-2} = 0.691 \times 10^{-6} (1.16 \times 10^3 \sqrt{t_{\text{total}}} + 4.2 t_{\text{total}})$$

$$t_{\text{total}} + 276 \sqrt{t_{\text{total}}} - 12921 = 0 \quad \sqrt{t_{\text{total}}} = -138 \pm \sqrt{138^2 + 12921}$$

$$\sqrt{t_{\text{total}}} = -138 + 179 = 41; t_{\text{total}} = 1681 \text{ s} = 28 \text{ min}$$

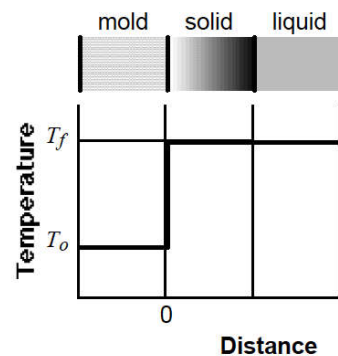
35

Resistance at the Mold/Solid Interface

The basic assumption is that heat transfer from the solid to the mold is by **convection**. This is particularly valid when an **air gap** forms at the interface in such processes as permanent molding or die-casting.

$$h(T_f - T_o) = -\rho_s \Delta H_f dx/dt$$

$$R_{mS} = 1/(A \cdot h)$$



36

Resistance at the Mold/Solid Interface

After the integration of the flux balance equation, between $t = 0$ ❖ and $t = t$, and between $x = 0$ and $x = l$, it is obtained that:

$$l = (T_f - T_o) h t / (\rho_s \Delta H_f) \quad l = v/A$$

$$t_f = \frac{\rho_s \Delta H_f}{h(T_f - T_o)} \frac{v}{A}$$

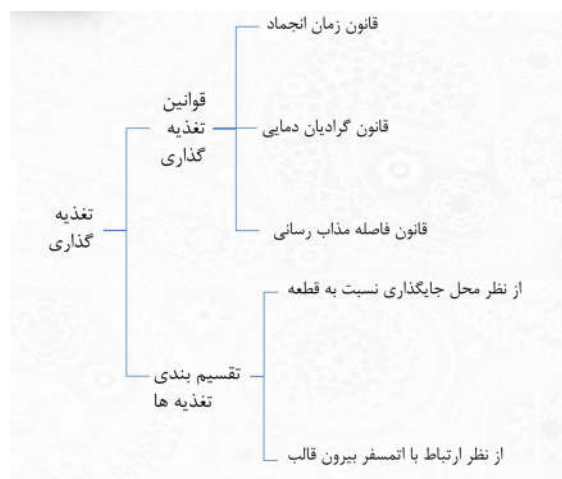
This equation is valid when ΔT_{ms} is large compared with ΔT_s or ΔT_m .

$$\Delta T_{ms} \gg \Delta T_s \text{ when } 1/h \gg L/k_s$$

$$\text{or } \Delta T_{ms} \gg \Delta T_m \text{ when } 1/h \gg [\pi t / (k_m \rho_m c_m)]^{1/2}$$

37

تغذیه گذاری



قوانین تغذیه گذاری

(۱) شرط زمان انجماد قانون چورنیف

- تغذیه باید پس از قطعه منجمد شود.
- برای این که انجماد تغذیه دیر تر از قطعه صورت گیرد زمان انجماد آن را ۲۵٪ بیشتر از قطعه در نظر می گیریم.

$$t = B \times \left(\frac{V}{A} \right)^n$$

ضریب ثابت (بین ۱.۵ تا ۲)
ضریب ثابت قالب (به فلز، جنس قالب، ظرفیت گرمایی، رسانش، حرارتی و چگالی بستگی دارد)
زمان انجماد قطعه
مدول قطعه (نسبت حجم به سطح خنک شونده)

قوانین تغذیه گذاری

(۲) شرط حجم کافی

- تغذیه باید حجم کافی از مذاب مذاب برای جبران انقباض خود و انقباض قطعه در حال انجماد را داشته باشد.

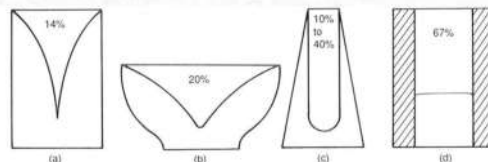
$$V_{add} = V_f - V_{sm}$$

حجم مذابی که درون تغذیه جامد می شود. حجم مذاب در دسترس برای جبران انقباض

$$V_f - V_{sm} = \beta(V_f + V_c) \rightarrow \beta \frac{\rho_s - \rho_t}{\rho_s} \rightarrow r_f = \frac{\beta V_c}{\varepsilon - \beta}$$

شعاع تغذیه
حجم قطعه
انقباض قطعه در اثر انجماد

$$\varepsilon = \frac{V_f - V_{sm}}{V_f} \rightarrow \text{راندمان تغذیه}$$



Metals utilization of feeders of various forms moulded in sand. The (a) cylindrical and (b) hemispherical heads have been treated with normal feeding compounds; (c) the efficiency of the reverse taper heads depends on detailed geometry (Heine, 1982, 1983); (d) shows an exothermic sleeve (Beeley, 1972).

Fluid Flow during Solidification

Metal Shrinkage and feeding(risring):

➤ Calculation of feeder volume :

➤ For sand casting Chvorinove's rule is applied:

$$t_c = C_c \left(\frac{V_c}{A_c} \right)^2 \quad t_f = C_f \left(\frac{V_{sm}}{A_f} \right)^2 \quad V_{sm} = V_f - \beta(V_c + V_f)$$

$$C_c \left(\frac{V_c}{A_c} \right)^2 = C_f \left(\frac{V_{sm}}{A_f} \right)^2 \quad \frac{V_{sm}}{V_c} = \left(\frac{C_c}{C_f} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{A_f}{A_c} \quad \frac{V_{sm}}{V_c} = \frac{V_f}{V_c} - \beta \left(1 + \frac{V_f}{V_c} \right)$$

$$(1 - \beta) \frac{V_f}{V_c} = \left(\frac{C_c}{C_f} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{A_f}{A_c} + \beta \quad V_f = V_c \frac{\left(\frac{C_c}{C_f} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{A_f}{A_c} + \beta}{(1 - \beta)}$$

۴۱

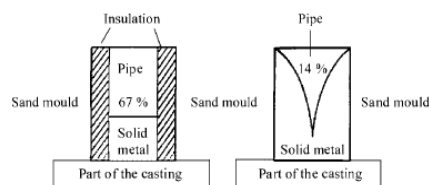
Fluid Flow during Solidification

Metal Shrinkage and feeding(risring):

➤ Efficiency of Feeder (volume condition):

$$\epsilon = \frac{V_f - V_{sm}}{V_f} \quad V_f - V_{sm} = \beta(V_f + V_c)$$

$$V_f = \frac{\beta V_c}{\epsilon - \beta}$$



A feeder will work in a satisfactory way only if both the time and volume conditions are fulfilled.

۴۲

Fluid Flow during Solidification

Metal Shrinkage and feeding(rising):

Example 10.1

A cube with side 20 cm will be cast in carbon steel, which solidifies as austenite. To obtain a compact casting, a cubic feeder is used. Owing to heat losses, the temperature of the melt in the casting is lowered 200 °C below the temperature of the feeder, when the casting starts to solidify. How large must the side of the feeder at least be in order to give a compact casting? The solidification shrinkage is 0.050.

$$C_f = \frac{\pi}{4} \left[\frac{\rho(-\Delta H) + c_p \rho(T_f - T_L)}{T_L - T_0} \right]^2 \frac{1}{k_{\text{mould}} \rho_{\text{mould}} c_p^{\text{mould}}} \quad C_c = \frac{\pi}{4} \left[\frac{\rho(-\Delta H)}{T_L - T_0} \right]^2 \frac{1}{k_{\text{mould}} \rho_{\text{mould}} c_p^{\text{mould}}}$$

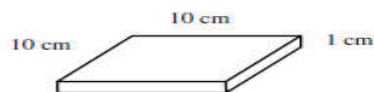
$$\frac{C_c}{C_f} = \left[\frac{-\Delta H}{(-\Delta H) + c_p(T_f - T_L)} \right]^2 \quad (1 - \beta) \frac{V_f}{V_c} = \frac{A_f}{A_c} \left(\frac{C_c}{C_f} \right)^{\frac{1}{2}} + \beta = \frac{-\Delta H}{(-\Delta H) + c_p(T_f - T_L)} \frac{A_f}{A_c} + \beta$$

$$0.95 \times \frac{x^3}{0.20^3} = \frac{276}{276 + 0.45 \times 200} \cdot \frac{5x^2}{5 \times 0.20^2} + 0.050 \Rightarrow x = 0.173 \text{ m}$$

Fluid Flow during Solidification

Example of prediction of feeder volume based on volume condition

Example 10.2



A square plate with side 10 cm and height 1.0 cm is to be cast. What volume should the feeder at least have to ensure that the casting will be compact?

The efficiency of the feeder is 14 % and the solidification shrinkage of steel is 4 %.

Solution:

The height of the casting is small compared with its side. It is reasonable to use the volume condition for calculation of the feeder volume. Equation (10.14) will therefore be used:

$$V_f = \frac{\beta V_c}{\varepsilon - \beta} = \frac{0.04 \times 0.01 \times 0.10^2}{0.14 - 0.04} = 40 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Answer:

The feeder volume must be at least 40 cm³, which corresponds to 40 % of the volume of the casting.

قوانین تغذیه گذاری

۳) شرط فاصله مذاب رسانی

- تغذیه باید به تعداد و فواصل مورد نیاز بر روی قطعه طراحی شود تا امکان مذاب رسانی به تمام قسمت های مورد نیاز فراهم گردد.

- برای جبران انقباض لازم است تا مذاب امکان رسیدن به مناطق مختلف قطعه را داشته باشد و به همین جهت تحقق چند شرط زیر ضروری است:

(۱) انجماد جهت دار به سمت تغذیه

(۲) وجود گرادیان دمایی کافی

(۳) فاصله مذاب رسانی

قوانین تغذیه گذاری شرط فاصله مذاب رسانی

(۱) انجماد جهت دار به سمت تغذیه

- برای انجام این کار می توان از ماسه هایی با قدرت سرد کنندگی متفاوت در مناطق مختلف قطعه یا Chill ها استفاده کرد که Chill ها به دو دسته تقسیم می شوند:

(۱) Chill های خارجی

- از جنس فولاد ، گرافیت و مس (دارای هدایت حرارتی بالا)

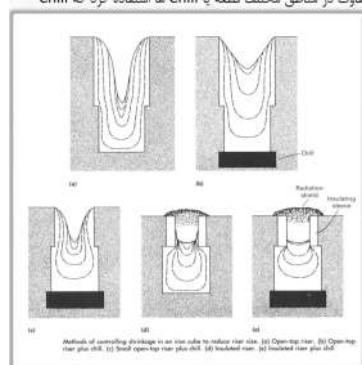
- جایگذاری در دیواره قالب

- باعث کاهش انقباض نیز می شوند.

(۲) Chill های داخلی

- قطعات جامد فلزی از جنس مذاب

- جایگذاری درون قالب (پس از ذوب جزئی از قطعه اصلی می شوند).



قوانین تغذیه گذاری

شرط فاصله مذاب رسانی

۲) وجود گرادیان دمایی کافی

- اگر گرادیان دما به سمت تغذیه از ۰/۱ تا ۱ درجه سانتیگراد بر میلی متر کمتر باشد، امکان ایجاد تخلخل انقباضی در قطعه وجود دارد.
- حداقل گرادیان دمایی برای آلیاژهای مس حدود ۱ و برای آلیاژهای آلومینیوم حدود ۲ درجه سانتیگراد بر میلیمتر بر آورد شده است.

قوانین تغذیه گذاری

شرط فاصله مذاب رسانی

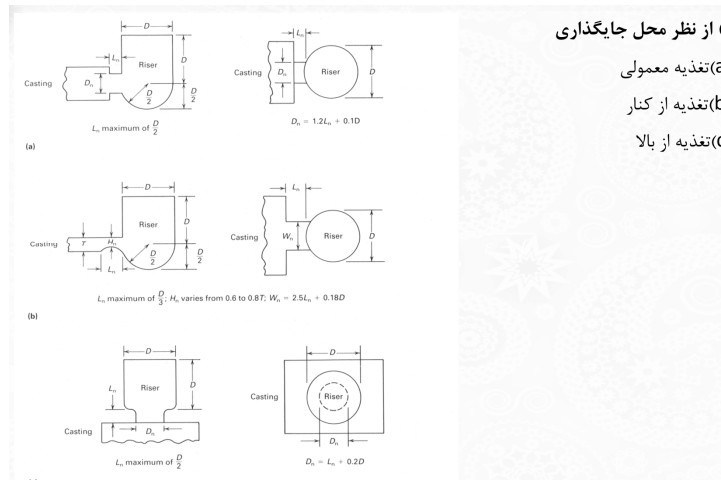
۳) فاصله مذاب رسانی

- Chill ها بر فاصله مذاب رسانی نیز تاثیر گذارند که اثر آن در جدول زیر مشخص شده است.

Shape	Feeding distance in inches	
	Without Chill	With Chill
A) Plate without end effect	$3.6 \sqrt{T}$ or $2T$	$11.6 \sqrt{T} - 3.2$
B) Plate with end effect	$11.6 \sqrt{T} - 5.2$	$11.6 \sqrt{T} - 3.2$
C) Bar without end effect (Horizontal)	$1.5 T$	$6 \sqrt{T} + T$
D) Bar with end effect	$6 \sqrt{T}$	$6 \sqrt{T} + T$

T ---- thickness of casting in inches

تقسیم بندی تغذیه



تقسیم بندی تغذیه

