

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
مهندسی مکانیک-تبدیل انرژی

موضوع:

تخمین معکوس ضریب انتقال حرارت در مرز فلز- قالب
در انجماد دوبعدی آلیاژ $AI-5\%Si$ با استفاده از الگوریتم PSO

استاد راهنما:

دکتر علی اکبر رنجبر

استاد مشاور:

مهندس مهدی فاموری

نگارش:

پرسیا دوستی

زمستان ۸۹

با سپاس از استاد بزرگوار جناب آقای دکتر رنجبر، مشاور گرامی جناب آقای فاموری و تمامی عزیزانی که در مراحل مختلف انجام این پایان نامه مرا صمیمانه همراهی نموده اند.

چکیده

در تحقیق حاضر، آنالیز هدایت حرارتی معکوس به منظور تخمین ضریب انتقال حرارت مرز فلز- قالب (IHTC)، در فرآیند انجماد دو جهتی ارائه می شود. به دلیل وجود شرایط مرزی غیر خطی، تغییر فاز در داخل فلز و شار حرارتی مجهول در دو مرز فلز- قالب و فلز- نسوز، مساله انتقال حرارت معکوس (IHCP)، کاملاً غیر خطی است. در این تحقیق، با استفاده از الگوریتم بهینه سازی جمعیت ذره ای (PSO) برای حل مسئله معکوس، IHTC با دو پروفیل نمایی تخمین زده شده است، که در حالت اول IHTC فقط وابسته به زمان (شامل چهار پارامتر مجهول) در نظر گرفته شده و در حالت دوم در دیواره عمودی سمت راست قالب وابستگی به زمان و ارتفاع، به طور همزمان لحاظ شده است (شامل شش پارامتر مجهول). دماهای تخمینی با حل عددی مساله مستقیم انجماد دو بعدی به روش FDM و با فرض معلوم بودن کلیه خواص و پارامترها به دست می آید. تغییر فاز در داخل فلز در طول انجماد توسط روش آنتالپی کنترل می شود. در حل مسئله با چهار پارامتر مجهول، تاریخچه دمایی از چهار سنسور قرار گرفته درون مذاب، قالب و نسوز به دست آمده و در حالت شش پارامتری تعداد سنسورها به هشت عدد افزایش یافته است. برای تایید آنالیز معکوس به کار رفته، شبیه سازی آزمایش با نويز افزودنی گوسی (۹۹٪ حد اطمینان) صورت گرفته است. دماهای شبیه سازی شده وارد الگوریتم PSO شده و با استفاده از تابع هدف تعریف شده برای این الگوریتم بهترین تخمین برای تمامی پارامترهای نامعلوم به دست آمده و بالاترین برازندگی حاصل می شود. پارامترهای تخمینی برای دو حالت دقیق و با نويز به دست می آید، در حالت دقیق داده های به دست آمده دقت قابل ملاحظه ای در قیاس با مقادیر از پیش تعیین شده دارند و در حالت نويزی اندکی انحراف نسبت به مقادیر دقیق را نشان می دهند. همچنین هنگامی که تاثیر ارتفاع بر میزان انتقال حرارت از دیواره نسوز در نظر گرفته می شود مقدار مجموع مربعات خطا کاهش می یابد که بیان گر افزایش دقت تخمین می باشد. نتایج حاصل از مقایسه پارامترهای تخمینی و پارامترهای از پیش انتخاب شده بیان گر کارایی و سرعت الگوریتم بهینه سازی جمعیت ذره ای در حل مسائل مختلف بهینه سازی حتی با توابع غیر خطی چند پارامتری و مالتی مودال می باشد.

واژه های کلیدی: آنالیز انتقال حرارت معکوس، ضریب انتقال حرارت مرزی، دماهای شبیه سازی شده، الگوریتم بهینه سازی جمعیت ذره ای.

۱.....	فصل اول _ مقدمه
۱.....	۱-۱ ضرورت و اهداف تحقیق
۱.....	۱-۱-۱ تشکیل باریکه هوایی در مرز فلز- قالب
۸.....	۱-۲ پیشینه تحقیق
۱۱.....	فصل دوم _ انتقال حرارت معکوس
۱۱.....	۱-۲ مفهوم مسئله انتقال حرارت معکوس
۱۵.....	۲-۲ شبیه سازی آزمایش
۱۷.....	۳-۲ زمینه های کاربرد انتقال حرارت معکوس
۱۷.....	۴-۲ مشکلات حل مسائل انتقال حرارت معکوس
۱۹.....	۵-۲ مروری بر روش های حل مسائل انتقال حرارت معکوس
۲۵.....	فصل سوم _ الگوریتم بهینه سازی جمعیت ذره ای
۲۵.....	۱-۳ مقدمه ای بر هوش جمعی
۲۷.....	۲-۳ معرفی روش بهینه سازی جمعیت ذره ای
۲۸.....	۳-۳-۱ ساختار شبکه اجتماعی ، اصل همسایگی
۳۰.....	۳-۳-۳ الگوهای الگوریتم بهینه سازی جمعیت ذره ای
۳۰.....	۳-۳-۳-۱ بهترین فردی
۳۱.....	۳-۳-۳-۲ بهترین سراسری
۳۳.....	۳-۳-۳-۳ بهترین محلی
۳۴.....	۴-۳ محاسبه شایستگی
۳۴.....	۵-۳ همگرایی
۳۶.....	۶-۳ توپولوژی دینامیک
۳۹.....	۷-۳ پارامترهای سیستمی PSO
۳۹.....	۱-۷-۳ ماکزیمم سرعت، V_{max}
۳۹.....	۲-۷-۳ اندازه همسایگی
۳۹.....	۳-۷-۳ وزن لختی
۴۰.....	۴-۷-۳ عملگر کاهش دامنه یا انقباض

۴۱	۸-۳ به روز رسانی الگوریتم.....
۴۱	۹-۳ نقاط قوت و ضعف PSO
۴۱	۱-۹-۳ نقاط قوت.....
۴۲	۲-۹-۳ معایب.....
۴۲	۱۰-۳ بررسی عملکرد الگوریتم PSO با تابع آزمایشی f_2
۵۱	فصل چهارم - روش تحقیق
۵۱	۱-۴ الگوریتم کلی تحقیق
۵۴	۲-۴ حدس اولیه
۵۵	۳-۴ حل مستقیم
۵۵	۱-۳-۴ بررسی محدوده محاسباتی، معادلات حاکم و شرایط مرزی
۵۸	۱-۱-۳-۴ بررسی معادلات داخل فلز ریخته گری
۵۹	۲-۱-۳-۴ روش آنتالپی برای حل مسایل تغییر فاز.....
۶۳	۲-۲-۳-۴ بررسی معادلات داخل قالب
۶۴	۳-۲-۳-۴ بررسی معادلات داخل نسوز
۶۵	۳-۳-۴ روش های حل معادلات هدایت
۶۷	۴-۴ شبیه سازی آزمایش
۶۹	۱-۴-۴ استفاده از فیلتر جهت کاهش نویز
۷۲	فصل پنجم - نتایج
۷۲	۱-۵ تخمین IHTC در مرز فلز مذاب - قالب ، مذاب - نسوز در حالت ۴ پارامتری
۷۴	۱-۱-۵ پروفیل های دمایی
۷۵	۲-۱-۵ خطای اندازه گیری دما در حالت دقیق و نویزی
۷۶	۳-۱-۵ تغییرات تابع برازندگی بر حسب محدوده انتخابی پارامترهای معکوس
۷۷	۴-۱-۵ تخمین پارامترها برای حالت دقیق
۷۸	۵-۱-۵ تخمین پارامترها برای حالت با نویز
۸۱	۶-۱-۵ مقایسه IHTC دقیق و تخمینی
۸۲	۲-۵ تخمین IHTC در مرز فلز مذاب - قالب و مذاب - نسوز برای حالت ۶ پارامتری
۸۴	۱-۲-۵ تغییرات تابع برازندگی بر حسب محدوده انتخابی پارامترهای معکوس
۸۶	۲-۲-۵ تخمین پارامترها برای حالت دقیق
۸۷	۳-۲-۵ تخمین پارامترها برای حالت با نویز
۹۱	فصل ششم - بحث، نتیجه گیری و پیشنهادات

۹۱.....	بحث و نتیجه گیری
۹۳.....	پیشنهادات
۹۴.....	پیوست ۱
۱۰۰.....	منابع

فهرست جداول

صفحه

عنوان

جدول ۱-۳	بهینه سازی تابع f_2 دوبعدی با به کارگیری عملگر کاهش دامنه	۴۴
جدول ۲-۳	بهینه سازی تابع f_2 دو بعدی بدون عملگر کاهش دامنه	۴۴
جدول ۳-۳	بهینه سازی تابع f_2 چهار بعدی در ۳ اجرای متفاوت با به کارگیری عملگر کاهش دامنه	۴۴
جدول ۴-۳	بهینه سازی تابع f_2 چهار بعدی در ۳ اجرای متفاوت بدون عملگر کاهش دامنه	۴۴
جدول ۵-۳	بهینه سازی تابع f_2 شش بعدی در ۳ اجرای متفاوت با به کارگیری عملگر کاهش دامنه	۴۵
جدول ۶-۳	بهینه سازی تابع f_2 شش بعدی در ۳ اجرای متفاوت بدون عملگر کاهش دامنه	۴۵
جدول ۱-۴	پارامترهای انتخابی برای حل مسئله معکوس	۵۴
جدول ۲-۴	خواص حرارتی آلیاژ ریخته گری	۶۲
جدول ۳-۴	خواص حرارتی قالب	۶۳
جدول ۴-۴	خواص حرارتی نسوز	۶۴
جدول ۱-۵	مختصات قرارگیری سنسورها در حالت ۴ پارامتری	۷۳
جدول ۲-۵	نتایج تخمین پارامترهای معکوس برای حالت بدون نویز در ۳ اجرا	۷۸
جدول ۳-۵	نتایج تخمین پارامترهای معکوس برای حالت با نویز در ۴ اجرا	۷۹
جدول ۴-۵	درصد خطا بین IHTC دقیق و تخمینی در حالت ۴ پارامتری	۸۰
جدول ۵-۵	مختصات قرارگیری سنسورها در حالت ۶ پارامتری	۸۳
جدول ۶-۵	نتایج تخمین پارامترهای معکوس ۶ بعدی برای حالت بدون نویز در ۳ اجرا	۸۶
جدول ۷-۵	نتایج تخمین پارامترهای معکوس ۶ بعدی برای حالت با نویز در ۳ اجرا	۸۷
جدول ۸-۵	درصد خطا بین IHTC دقیق و تخمینی	۹۰

فهرست اشکال

صفحه

عنوان

-
- شکل ۱-۱ (الف) قالب ریخته گری فولادی (ب) ریخته گری تبریدی ۲
- شکل ۲-۱ نمونه آزمایشگاهی انجماد یک بعدی ۲
- شکل ۳-۱ نمونه آزمایشگاهی انجماد دو بعدی بررسی شده در این تحقیق ۳
- شکل ۴-۱ روند فرآیند انجماد در مرز فلز- قالب ۴
- شکل ۵-۱ مدل سازی انتقال حرارت در مرز فلز- قالب ۵
- شکل ۶-۱ پروفیل تقریبی دما در فلز مذاب و قالب ۶
- شکل ۷-۱ مدل هندسی مساله انجماد دو بعدی ۷
- شکل ۱-۲ مدل انتقال حرارت مستقیم ۱۱
- شکل ۲-۲ مدل انتقال حرارت معکوس ۱۲
- شکل ۳-۲ هدایت گذرای دو بعدی ۱۲
- شکل ۱-۳ ساختارهای همسایگی برای بهینه سازی جمعیت ذره ای ۳۰
- شکل ۲-۳ بهترین سراسری ۲۹
- شکل ۳-۳ مدل های l_{best} و g_{best} ۳۴
- شکل ۴-۳ فلوجارت الگوریتم PSO ۳۸
- شکل ۵-۳ تابع $f_2 \min$ ۴۳
- شکل ۶-۳ تابع Rastrigrin یک بعدی و تابع f_2 ۴۳
- شکل ۷-۳ نمودار x_i های به دست آمده برای تابع برازندگی ۲ بعدی ۴۶
- شکل ۸-۳ نمودار برازندگی های به دست آمده برای تابع برازندگی ۲ بعدی ۴۶
- شکل ۹-۳ برازندگی تابع ۲ بعدی به ازای ۳ اجرای مختلف ۴۷
- شکل ۱۰-۳ نمودار x_i های به دست آمده برای تابع برازندگی ۴ بعدی ۴۷
- شکل ۱۱-۳ نمودار برازندگی های به دست آمده برای تابع برازندگی ۴ بعدی ۴۸
- شکل ۱۲-۳ برازندگی تابع ۴ بعدی به ازای ۳ اجرای مختلف ۴۸
- شکل ۱۳-۳ برازندگی تابع ۶ بعدی به ازای ۳ اجرای مختلف ۴۹

- شکل ۳-۱۴ برازندگی تابع ۶ بعدی به ازای ۳ اجرای مختلف ۴۹
- شکل ۴-۱ نمودار گردشی الگوریتم تحقیق ۵۳
- شکل ۴-۲ مساله انجماد دو بعدی ۵۵
- شکل ۴-۳ سه محدوده محاسباتی مساله انجماد ۵۶
- شکل ۴-۴ تفکیک مناطق محاسباتی و شرایط مرزی ۵۷
- شکل ۴-۵ رابطه آنتالپی-دما برای (الف) مواد کریستالی خالص و (ب) آلیاژها و مواد ناخالص ۶۰
- شکل ۴-۶ گرہ های به کار رفته در حل معادلات هدایت ۶۶
- شکل ۴-۷ تاریخچه دمایی سنسور قرار گرفته درون قالب برای دو حالت دقیق و با نویز ۶۸
- شکل ۴-۸ تاریخچه دمایی سنسور قرار گرفته درون مذاب برای دو حالت دقیق و با نویز ۶۸
- شکل ۴-۹ تاریخچه دمایی سنسور قرار گرفته درون نسوز برای دو حالت دقیق و با نویز ۶۹
- شکل ۴-۱۰ تاریخچه دمایی سنسور قرار گرفته درون قالب در حالت دقیق ، با نویز و فیلتر شده ۷۰
- شکل ۴-۱۱ تاریخچه دمایی سنسور قرار گرفته درون مذاب در حالت دقیق ، با نویز و فیلتر شده ۷۰
- شکل ۴-۱۲ تاریخچه دمایی سنسور قرار گرفته درون نسوز در حالت دقیق ، با نویز و فیلتر شده ۷۱
- شکل ۵-۱ نحوه قرار گیری سنسورها در حل مسئله ۴ پارامتری ۷۳
- شکل ۵-۲ تاریخچه دمایی سنسور شماره ۱ ۷۳
- شکل ۵-۳ تاریخچه دمایی سنسور شماره ۲ ۷۴
- شکل ۵-۴ تاریخچه دمایی سنسور شماره ۴ ۷۵
- شکل ۵-۵ خطای اندازه گیری دما در حالت دقیق و نویزی برای سنسور شماره ۱ ۷۵
- شکل ۵-۶ تغییرات تابع برازندگی بر حسب محدوده انتخابی پارامترهای تخمینی برای حالت ۴ پارامتری ۷۶
- شکل ۵-۷ نتایج بهترین برازندگی به دست آمده برای حالت بدون نویز در ۳ اجرا ۷۷
- شکل ۵-۸ نتایج بهترین برازندگی به دست آمده برای حالت با نویز در ۳ اجرا ۷۸
- شکل ۵-۹ مقایسه ضریب انتقال حرارت تخمینی و دقیق در مرز فلز-قالب ۸۰
- شکل ۵-۱۰ مقایسه ضریب انتقال حرارت تخمینی و دقیق در مرز فلز-نسوز ۸۰
- شکل ۵-۱۱ (a) مقایسه بین IHTC دقیق و تخمینی (b) مقایسه بین دماهای دقیق و تخمینی ۸۲
- شکل ۵-۱۲ نحوه قرارگیری سنسورها در حل مسئله ۶ پارامتری ۸۳
- شکل ۵-۱۳ تاریخچه دمایی به دست آمده از ۸ سنسور در حالت بدون نویز ۸۴
- شکل ۵-۱۴ تغییرات تابع برازندگی بر حسب محدوده انتخابی پارامترهای تخمینی برای حالت ۶ پارامتری ۸۵
- شکل ۵-۱۵ نتایج برازندگی های به دست آمده برای حالت بدون نویز در ۳ اجرا ۸۶
- شکل ۵-۱۶ نتایج بهترین برازندگی های به دست آمده برای حالت با نویز در ۳ اجرا ۸۸
- شکل ۵-۱۷ مقایسه ضریب انتقال حرارت تخمینی و دقیق در مرز فلز-قالب در حالت ۶ پارامتری ۸۹
- شکل ۵-۱۸ مقایسه ضریب انتقال حرارت تخمینی و دقیق در مرز فلز-قالب در حالت ۶ پارامتری (برای $y=0$) ۸۹

- شکل ۵-۱۹ ضریب انتقال حرارت در مرز فلز- نسوز در ارتفاع های مختلف دیواره ۹۰
- شکل ۵-۲۰ ضریب انتقال حرارت در مرز فلز- نسوز در زمان های مختلف آزمایش ۹۱

لیست علائم و اختصارات

ظرفیت حرارتی ویژه (J/kg.K)	C_p
ضرایب شتاب	c_1, c_2
شار حرارتی متغیر با زمان	$f(t)$
تابع برازندگی	$f(\beta)$
تعداد احضار تابع برازندگی	f_{eval}
تابع آزمایشی	f_r
بهترین سراسری	g_{best}
آنتالپی (J/kg)	H
آنتالپی فلز مایع (J/kg)	H_L
آنتالپی فلز جامد (J/kg)	H_S
ضریب انتقال حرارت هوا در مرز قالب- محیط (W/m ² K)	h_{air}
ضریب انتقال حرارت آب در مرز قالب- محیط (W/m ² K)	h_{water}
ضریب انتقال حرارت مرز فلز مذاب - قالب (W/m ² K)	h_{in}
ضریب انتقال حرارت مرز فلز مذاب- نسوز (W/m ² K)	h_{inr}
تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده از یک حسگر	I
ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	k
ضخامت (mm) / گرمای نهان ذوب (J/Kg)	L
حد پایین جدید	$L(i)_{new}$
بهترین محلی	l_{best}
تعداد حسگرهای حرارتی	M
تعداد کل دماهای اندازه‌گیری شده	N_t
اندازه جمعیت اولیه	NS
تعداد کل ذرات	NG
تعداد پارامترهای مجهول	np
بردار پارامترهای مجهول	P
بهترین فردی	P_{best}
ذره i ام	P_i
شار حرارتی ثابت (kW/m ²)	q
ضریب انقباض دامنه	r_c
تابع حداقل مربعات معمولی خطا / حسگر حرارتی	S
زمان پایان اندازه‌گیری (s)	t_f
بردار دمای تخمینی (° K)	T
دمای آب خنک کننده (° K)	T_{water}

دمای هوای اتاق ($^{\circ} K$)	T_{air}
دمای اولیه ($^{\circ} K$)	T_{init}
نقطه ذوب آلیاژ فلزی ($^{\circ} C$)	T_L
نقطه ذوب فلز خالص ($^{\circ} C$)	T_{melt}
نقطه انجماد آلیاژ فلزی ($^{\circ} C$)	T_s
سرعت ذره i ام	$\bar{v}_i(t)$
موقعیت در جهت محور x	x
مکان ذره i ام	$\bar{x}_i(t)$
حد بالایی جدید	$U(i)_{new}$
موقعیت در جهت محور y	y
دمای اندازه‌گیری یا شبیه‌سازی شده ($^{\circ} K$)	\tilde{T}_{im}

علائم یونانی

پارامتر منظم‌سازی تیخونوف	α^*
بردار پارامترهای تخمینی، عدد بیو	β
چگالی (kg/m^3)	ρ
متغیرهای تصادفی PSO	ρ_1, ρ_2
نویز افزودنی گوسی	ε
انحراف معیار استاندارد خطای اندازه‌گیری	σ
مقدار ویژه ماتریس	λ
فاکتور وزنی در حل مستقیم عددی به روش تفاضل محدود	θ
وزن لختی	ω

بالانویس

بردار	$\bar{\quad}$
بی‌بعد	$+$
آزمایشگاهی یا شبیه‌سازی شده	\sim
اندیس زمانی	n
تکرار	P

زیرنویس

محدوده فلز ریخته‌گری	c
مرز فلز - قالب و فلز - نسوز	$interface$
شماره زمان اندازه‌گیری حسگر	i

شماره پارامتر مجهول	j
محدوده قالب / شماره حسگر	m
بیشینه	max
کمینه	min
فاز جامد فلز	S
فاز مایع فلز	L

علائم اختصاری

روش گرادیان ترکیبی (Conjugate Gradient Method)	CGM
روش تفاضلات محدود (Finite Difference Method)	FDM
نسبت فاصله برازندگی (Fitness Distance Ratio)	FDR
الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)	GA
ضریب انتقال حرارت مرز مذاب (Interfacial Heat Transfer Coefficient)	IHTC
مساله هدایت حرارتی معکوس (Inverse Heat Conduction Problem)	IHCP
بهینه سازی جمعیت ذره ای چند فازی (Multiphase Particle Swarm Optimization)	MPPSO
حداقل مربعات معمولی (Ordinary least squares)	OLS
بهینه سازی جمعیت ذره ای (Particle Swarm Optimization)	PSO
ریشه دوم میانگین خطاها (Root Mean Square)	RMS
بهینه سازی جمعیت ذره ای تصادفی (Stochastic Particle Swarm Optimization)	SPSO

فصل اول

مقدمه

در این فصل ضرورت، اهداف و پیشینه تحقیق مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۱ ضرورت و اهداف تحقیق

انجماد^۱ یک فرآیند تغییر فاز بسیار متداول در طبیعت است که تشکیل قالب یخ مثالی ساده از این فرآیند می‌باشد. تقریباً تمامی ساخته‌های دست بشر فرآیند انجماد را حداقل در یکی از مراحل ساخت به همراه دارد [۱]. انجماد فلزات عاملی مهم در فرایندهای مواد^۲، متالوژی^۳، خالص سازی فلزات^۴ و ... می‌باشد [۳ و ۲]. در طول انجماد فلز در یک قالب فلزی تحت ریخته‌گری تبریدی^۵، انتقال حرارت بین فلز و قالب یکی از مهمترین فاکتورهای موثر در فرآیند انجماد و نیز خواص مکانیکی محصول منجمد شده است [۴]. سرعت زیاد سرمایش در انجماد فلز، به دلیل ایجاد ساختار ریزدانه^۶ در فلز، خواص مکانیکی آن، مانند قابلیت شکل پذیری را به شدت بهبود می‌بخشد [۱ و ۲]. نتایج تجربی متعددی نیز نشان می‌دهند که رسانایی حرارتی در مرز به طور کاملاً محسوسی بر فاکتور سرعت انجماد تاثیر مستقیم دارد [۱ تا ۴].

۱-۱-۱ تشکیل باریکه هوایی در مرز فلز-قالب

به دلیل عدم انطباق کامل و پایدار بین فلز و قالب، یک مقاومت تماسی حرارتی^۷ در مرز فلز-قالب ایجاد می‌شود که میزان انتقال حرارت و نرخ انجماد^۸ را کاهش می‌دهد، در نتیجه مدل سازی تئوری-تجربی انتقال حرارت در مرز فلز-قالب اطلاعات مناسبی در خصوص شرایط ریخته‌گری از قبیل ترکیب‌های

^۱. Solidification

^۲. Materials processing

^۳. Metallurgy

^۴. Purification of metals

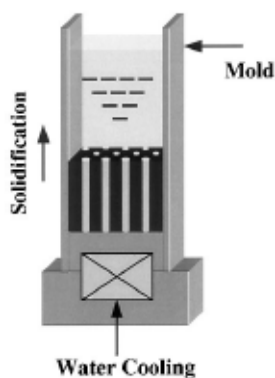
^۵. Chill casting

^۶. Fine grained

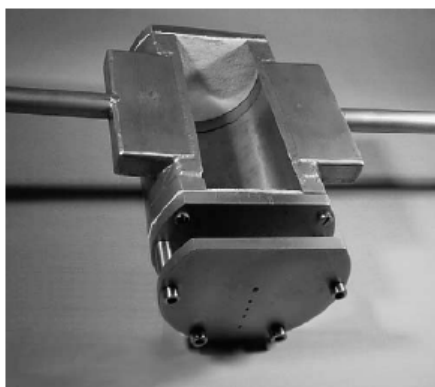
^۷. Thermal contact resistance

^۸. Solidification rate

مختلف فلز- قالب، ابعاد و جنس قالب و نیز میزان پیش گرمایش^۱ فلز خصوصاً در سیستم های ریخته گری تبریدی با ضریب پخش حرارتی^۲ بالا در اختیار ما قرار می دهد [۵]. شکل (۱-۱) یک قالب ریخته گری فولادی و یک ریخته گری تبریدی تک جهتی را نشان می دهد که در این نمونه قالب توسط یک سیال خنک کننده (در اینجا آب) خنک می شود [۶].

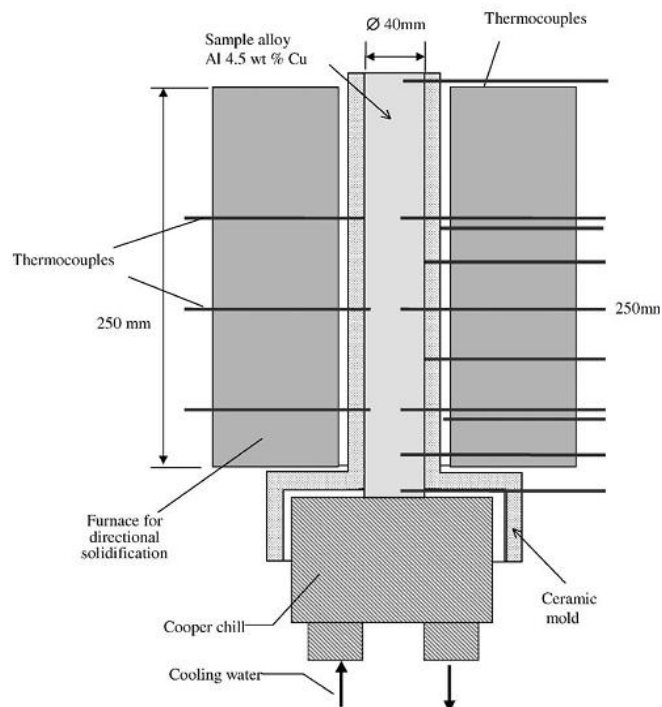


(ب)



(الف)

شکل ۱-۱ (الف) قالب ریخته گری فولادی [۵] (ب) ریخته گری تبریدی [۶]

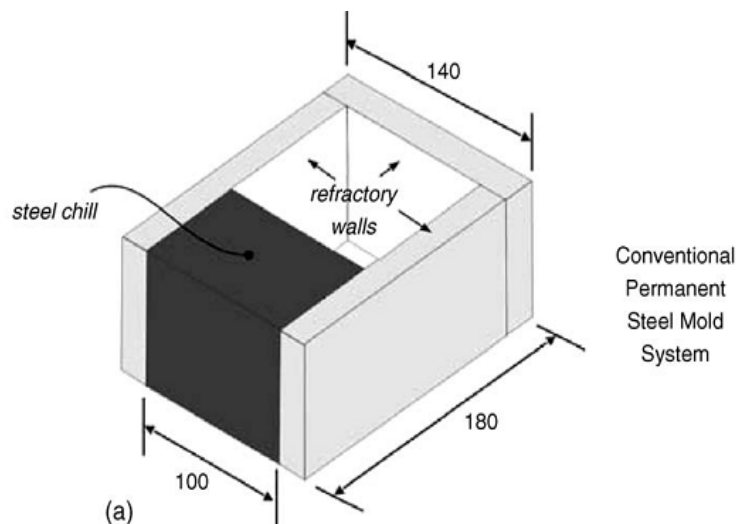


شکل ۲-۱ نمونه آزمایشگاهی انجاماد یک بعدی [۷]

^۱. Superheat

^۲. Thermal diffusivity

شکل (۳-۱) نمای جانبی، مکان ترموکوپل ها^۱ و ابعاد یک قالب آزمایشگاهی مورد استفاده در آنالیز معکوس را برای یک آلیاژ ۵% Cu Al نشان می دهد [۷]. در شکل ۳-۱ مسئله مورد بررسی در این تحقیق نشان داده شده است که در آن مذاب از سمت پایین با قالب و از سمت راست با ماده نسوز انتقال حرارت انجام می دهد، بنابراین فرآیند انجماد، دو بعدی در نظر گرفته می شود. به منظور دو بعدی انگاشتن مساله، اطراف قالب با دیواره هایی از نسوز احاطه شده و خنک کن تبریدی نیز در قسمت پایینی برای تسریع فرآیند انجماد قرار گرفته است. فرض می شود که انتقال حرارت در حین انجماد از مذاب به دیواره قالب و نیز از مذاب به دیواره های نسوز صورت می گیرد [۸].



شکل ۳-۱ نمونه آزمایشگاهی انجماد دو بعدی بررسی شده در این تحقیق [۸]

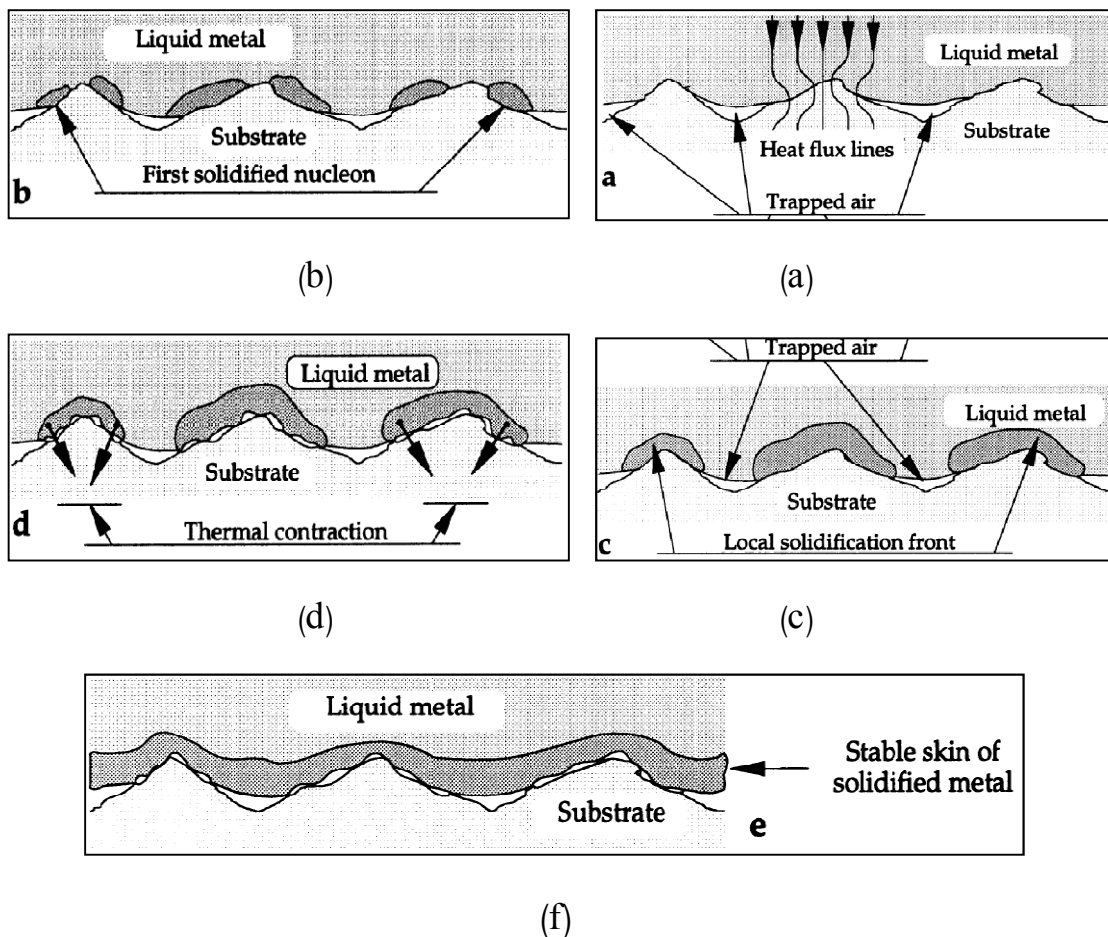
عموماً جریان حرارتی در مرز فلز- قالب توسط ضریب انتقال حرارت مرزی^۲ IHTC تعریف و مشخص می شود، که به دلیل انطباق مناسب ماهیچه^۳ قالب و فلز در مراحل اولیه انجماد، عدد بزرگی است. با پیشرفت انجماد و انبساط نسبی قالب (در اثر جذب انرژی گرمایی) و انقباض قابل توجه فلز منجمد شده بر روی سطح مرزی قالب (در اثر دفع انرژی گرمایی)، چون فشار مرزی برای یک انطباق پایدار کافی نیست، مطابق شکل (۱-۱)

۱. Thermocouples

۲. Interfacial Heat Transfer Coefficient

۳. Core

۴) باریکه^۱ ای شامل هوا و احتمالاً گازهای فلزی در مرز تماس فلز- قالب تشکیل می شود. این حفره همانند یک عایق عمل کرده و با تشکیل این حفره و گسترش آن، IHTC به مرور زمان به شدت کاهش می یابد [۳].



شکل ۱-۴ روند فرآیند انجماد در مرز فلز- قالب

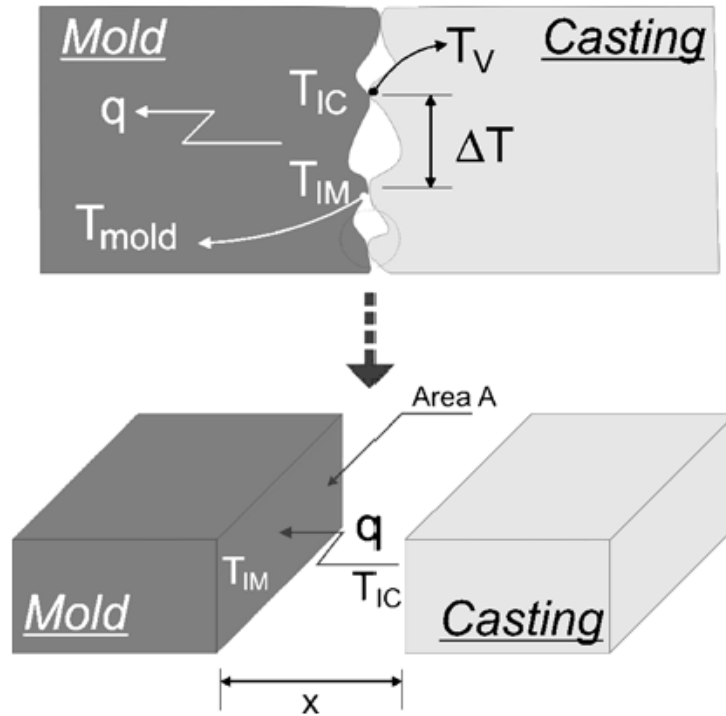
به طور کلی انتقال حرارت بین فلز و قالب در این مرحله به سه طریق صورت می گیرد:

- رسانایی از طریق نقاط تماس فلز و قالب
- رسانایی از طریق گاز های موجود در حفره
- تابش بین سطوح مرزی فلز و قالب

در مراحل پایانی انجماد، با تشکیل لایه فلزی یکنواخت بر روی سطح قالب، به دلیل کاهش گرادیان دمایی در مرز، IHTC به مقدار پایدار و تقریباً ثابتی می رسد. این تغییرات IHTC با دما تقریباً در تمام سیستم های ریخته گری قابل مشاهده است [۹ تا ۱۳].

^۱. Gap

در اکثر پژوهش‌های انجام شده [۹ تا ۱۲ و ۱۷]، انتقال حرارت در مرز فلز مذاب و قالب را به صورت انتقال حرارت همرفت^۱ مدل کرده و سطح مشترک قالب و مذاب را با یک ضریب همرفت ($h_{interface}$) معادل کرده اند. در شکل (۵-۱) این موضوع به روشنی نشان داده شده است [۹].

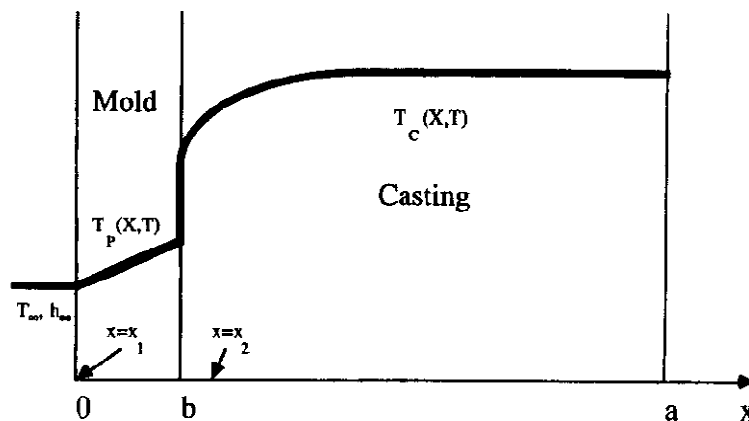


شکل ۵-۱ مدل سازی انتقال حرارت در مرز فلز-قالب [۹]

پروفیل تقریبی دما در فلز مذاب و قالب در شکل (۶-۱) نشان داده شده است [۱۰]. همان‌گونه که در شکل مشخص است، در مرز قالب یک پرش دمایی وجود دارد که ناشی از ضریب انتقال حرارت همرفت می باشد و نکته دیگر نحوه توزیع دما در مذاب که تابعی غیر خطی (هدایت^۲ غیر خطی) از دما است.

^۱. Convection

^۲. Conduction



شکل ۶-۱ پروفیل تقریبی دما در فلز مذاب و قالب [۱۰]

در تحقیق حاضر، IHTC و تغییرات آن با زمان، در انجماد دو بعدی آلیاژ ۵٪ Si-Al در قالب فولادی (SAE ۱۰۱۰)، با فرض خواص حرارتی ثابت و شار حرارتی مجهول وابسته به زمان تخمین زده شده است. در حل این مساله انتقال حرارت معکوس از تاریخچه دمایی شبیه سازی شده در نقاط داخلی فلز و قالب استفاده شده است. این مساله به دلیل وابستگی شار حرارتی به دما، غیر خطی بودن شرایط مرزی و نیز تغییر فاز در داخل فلز ریخته گری، کاملاً غیر خطی است و از گروه مسائل بدخیم^۱ محسوب می شود. مدل هندسی مساله در شکل (۷-۱) ترسیم شده است. همان طور که دیده می شود، قالب با محیط اطراف خود، دارای مرز جابجایی آزاد می باشد و محل قرار گیری سنسور ها نیز نشان داده شده است. فلز ریخته گری که در ابتدا دمایی بالاتر یا برابر با دمای ذوب دارد، از کانال مربوطه به داخل قالب که دمایی کمتر از دمای ذوب فلز دارد، ریخته می شود.