

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

۲۰۹۵۰۱۴

۹۸، ۶، ۳

انجماد آلیاژها

جلد اول: جدایش‌های غاظتی ماکروسکوپی

تألیف:

دکتر سید محمد حسین میرباقری

عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

زمستان ۱۳۹۸

سرشناسه	میر باقری، سید محمد حسین، ۱۳۴۷
عنوان و نام پدیدآور	انجماد آلیاژها/ سید محمد حسین میر باقری
مشخصات نشر	تهران: دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، مرکز نشر ۱۳۹۸
مشخصات ظاهری	ج. :
شابک	ج. 978-964-463-785-81
وضعیت فهرست‌نویسی	فیپا :
یادداشت	ج. ۱. جدایش‌های غلظتی ماکروسکوپی
یادداشت	انجماد :
موضوع	Solidification :
موضوع	آلیاژها :
موضوع	Alloys :
شناخت افزوده	دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، مرکز نشر
شناسه افزوده	Amir Kabir university of technology (Tehran polytechnic)
رده‌بندی کنزورده	QC ۳۰۳ :
رده‌بندی دیویی	۵۳۰/۲۱۴ :
شماره کتابشناسی ملی	۵۱۰۴۷۳۳ :



انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

این کتاب در جلسه مورخ ۱۳۹۷/۱۲/۱۲ شورای چاپ و
نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر به تصویب رسیده است.

عنوان کتاب	انجماد آلیاژها - جلد اول جدایش‌های غلظتی ماکروسکوپی
تألیف	دکتر سید محمد حسین میر باقری
ناشر	انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ و صحافی	انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)
چاپ اول	زمستان ۱۳۹۸
قیمت	۴۵,۰۰۰ تومان
تیراژ	۱۰۰۰ نسخه
شابک	ISBN: 978-964-463-785-81 ۹۷۸-۹۶۴-۴۶۳-۷۸۵-۸۱

آدرس مرکز پخش: خیابان ولیعصر، روبروی خیابان بزرگمهر، فروشگاه کتاب مرکز نشر

دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران) - تلفن: ۶۶۴۹۸۸۶۸

وبسایت: <http://publication.aut.ac.ir>

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

فصل ۱: انجماد تعادلی و غیر تعادلی آلیاژها

۲	۱-۱- اهمیت انجماد آلیاژها
۴	۱-۲- دیاگرام‌های فازي نمادی از انجماد آلیاژها
۷	۱-۲-۱- انجماد آلیاژهای ساده - کاملاً محلول Isomorphous
۸	۱-۲-۲- Eutectic انجماد آلیاژهای یوتکتیکی
۱۵	۱-۲-۳- Peritectic انجماد آلیاژهای پریتکتیکی
۱۷	۱-۲-۴- Monotectic انجماد آلیاژهای مونوتکتیکی
۱۹	۱-۲-۵- Syntectic انجماد آلیاژهای سینتکتیکی
۲۱	۱-۲-۶- Metatectic انجماد آلیاژهای متاتکتیکی
۲۳	۱-۲-۷- انجماد آلیاژهای ساده - کاملاً غیر محلول
۲۶	۳-۱- مکانیزم انجماد آلیاژها و تئوری سبب تعادل
۲۹	۳-۱-۱- انجماد تعادلی در آلیاژها و جدایش غلظتی (مدل اهرم)
۵۷	۳-۱-۲- انجماد غیر تعادلی در آلیاژها و جدایش غلظتی
۶۴	۴-۱- تقسیم‌بندی جدایش‌های غلظتی در انجماد غیر تعادلی
۶۶	۵-۱- نیروی محرکه فرایند انجماد فلزات
۷۶	۶-۱- خلاصه فصل ۱
۷۸	تمرین‌های فصل ۱

فصل ۲: جدایش غلظتی غیر نرمال در انجماد غیر تعادلی آلیاژها

۸۶	۱-۲- مقدمه
۸۶	۲-۲- انواع جدایش‌های غلظتی
۸۸	۳-۲- جدایش‌های غلظتی غیر نرمال
۸۸	۳-۳-۱- جدایش غلظتی غیر نرمال بدون نفوذ جرمی در فاز جامد (مدل Scheil)

۲-۳-۲- جدایش غلظتی غیرنرمال با نفوذجرمی جزئی در فاز جامد (مدل

۱۰۴

(Back Diffusion

۱۰۷ $X_i = b\sqrt{t}$ - مدل جدایش غلظتی فلمینگ با رشد پارابولیک

۱۱۰ $X_i = b't$ - مدل جدایش غلظتی فلمینگ با رشد خطی

۱۱۲ - اثر عدد فوریه بر جدایش غلظتی در مدل‌های فلمینگ

۱۱۹ - مقایسه پروفیل‌های غلظت در مدل‌های جدایش غلظتی غیرنرمال

۱۳۴ - تغییرات دما در جبهه انجماد در مدل‌های جدایش غلظتی غیرنرمال

۱۳۹ - خلاصه فصل ۲

۱۴۱ - تمرین‌های فصل ۲

فصل ۳: جدایش غلظتی نرمال در انجماد غیرتصادفی آلیاژها

۱۴۸ - ۱-۳- مقدمه‌ای بر جدایش غلظتی نرمال

۱۴۹ - ۲-۳- مکانیزم جدایش غلظتی اشباع، بدون جابجایی جرمی در مذاب و جامد

۱۵۴ - ۱-۲-۳- آنالیز جدایش غلظتی اشباع در انجماد جهت‌دار

۱۷۲ - ۲-۲-۳- آنالیز دما و تحت‌تبرید غلظتی در انجماد جهت‌دار

۱۸۲ - ۳-۲-۳- کنترل ساختار دانه‌ها به کمک تحت‌تبرید غلظتی، گرادیان

دما و سرعت رشد

۲۰۸ - ۴-۲-۳- آنالیز جدایش غلظتی اشباع و تحت‌تبرید حرارتی در انجماد

همگن (بدون جهت)

۲۱۸ - ۳-۳- آنالیز جدایش غلظتی شبه اشباع آلیاژ با جابجایی جرمی در مذاب

۲۳۹ - ۴-۳- مقایسه جدایش غلظتی نرمال و غیرنرمال

۲۴۱ - ۵-۳- خلاصه فصل

تمرین‌های فصل ۳

۲۴۳ - تمرین‌های فصل ۳

حل تمرین‌ها

۲۵۰ - حل تمرین‌های فصل یک

۲۶۱ - حل تمرین‌های فصل دوم

۲۷۵

حل تمرین‌های فصل سوم

۲۹۷

منابع

۲۹۹

پیوست‌ها

۳۰۸

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی

۳۱۰

واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

۳۱۳

نمایه

www.ketab.ir

پیش‌گفتار

متن حاضر، برآمده از سال‌ها (قریب به یک دهه) تدریس درس انجماد فلزات در مقاطع مختلف کارشناسی و تحصیلات تکمیلی، در معتبرترین دانشگاه‌های کشور است. در این سال‌ها همواره دو مسئله اساسی ذهن من را آزار می‌داد؛ نخست، از آنجایی که انجماد به‌عنوان یک علم، درهم‌آمیختگی و همپوشانی فراوانی با ریخته‌گری به‌عنوان یک فن (مهندسی) دارد، بسیاری از دانشجویان و مهندسين و حتی مدرسين را دچار این سوءتفاهم می‌کرد که انجماد ریخته‌گری را می‌توان در یک قالب واحد، ارائه و تدریس نمود. مسئله دوم آن است که در کتاب‌های متعددی که توسط همکاران بسیار ارجمند بنده در خصوص انجماد فلزات خالص منتشر شده است، تمرکز فراوانی بر موضوعات جوانه‌زنی، رشد و تحلیل ریزساختار دانه‌بندی و ساختاری فلزات خالص وجود دارد و جای موضوعات این‌چنینی در مورد فلزات آلیاژی (نه خالص) بسیار خالی است!

این دو مسئله من را بر آن داشت تا به صورت تفصیلی و با جزئیات، در مورد پدیده جدایش غلظتی فلزات آلیاژی سالی بنویسم و ارائه دهم. در توجیه رویکرد انتخاب شده در این متن باید یادآور شوم به‌فراوانی سهم بسیار زیادی را در تولید قطعات ریخته‌گری صنعتی به خود اختصاص می‌دهند. رسول دیگر، یکی از روش‌های مرسوم و رایج در افزایش استحکام فلزات، آلیاژسازی است که تسهیل انجماد فلزات آلیاژی را بیش‌ازپیش نسبت به فلزات خالص آشکار می‌کند.

در این کتاب، به بررسی و تحلیل فیزیکی و فنی-مهندسی عیب جدایش غلظتی طی انجماد فلزات آلیاژی پرداخته شده است. این کتاب در ۳ فصل ارائه شده است و تلاش شده است مبحث جدایش غلظتی از دیدگاه ماکروسکوپی (حاد ۱) مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. این کتاب متناسب با سطح علمی دانشجویان کارشناسی و مهندسين مشغول در صنعت تدوین شده است؛ اما در جلد ۲ به دیدگاه میکروسکوپی جدایش غلظتی که به توزیع عناصر آلیاژی در مرز بین دانه‌ها و دندریت‌ها در محدوده نانو تا میکرو می‌پردازد، پرداخته خواهد شد. لذا جلد ۲ این کتاب بیشتر مناسب برای دوره‌های تحصیلات تکمیلی خواهد بود؛ اما در فصل اول کتاب حاضر؛ به دو دیدگاه انجماد تعادلی و غیرتعادلی پرداخته می‌شود و به کمک مدل سرد شدن شبه‌تعادلی، منشأ تمام جدایش‌های غلظتی را ناشی از انجماد غیرتعادلی می‌داند؛ بنابراین با توجه به نحوه‌ی غیرتعادلی بودن، از لحاظ نفوذ جرمی و حرارتی، انواع مختلف جدایش غلظتی تعریف می‌شود. در فصل دوم، گروه اصلی جدایش‌های غلظتی که بیشتر در علم جوشکاری و شمش‌ریزی مداوم مطرح است، تحت عنوان "جدایش غلظتی غیرنرمال" ارائه و مدل‌سازی ریاضی آن بسته به میزان و نرخ نفوذ جرمی در فاز جامد و

جابجایی جرمی در فلز مذاب، ارائه می‌شود. در پایان این فصل دانشجویان تسلط کامل بر رسم پروفیل و تعیین گرادیان غلظت، از سطح به مغز قطعه را در جهت انجماد، خواهند یافت و با چگونگی برطرف کردن احتمالی این عیب جدایش غلظتی آشنا خواهند شد. در فصل سوم گروه دیگر جدایش‌های غلظتی اشباع و شبه‌اشباع که بیشتر در صنعت رشد تک کریستال و قطعه‌ریزی رخ می‌دهد، بیان شده است. در پایان این فصل دانشجویان قادر خواهند بود با رسم پروفیل غلظت در مقطع قطعات، شمشک‌ها و تک کریستال‌ها، به احتمال وقوع جدایش غلظتی در این مدل پی ببرند و بدانند که پدیده جدایش غلظتی می‌تواند، منتفی باشد یا نه؟ و چرا اکثر قطعات آلیاژی، بدون جدایش غلظتی و همگن منجمد می‌شوند؟ رعایت نکردن نکات کنترل‌کننده انجماد (گرادیان دما و سرعت رشد) چه اثری بر کیفیت قطعات انجمادی خواهد گذاشت؟ همچنین خواننده با الگوی انجماد همه‌جانبه؛ که با ایجاد کسر جامد جوانه‌زنی بسیار بالای دانه‌های هر حو، همراه است، آشنا و پروفیل دما و غلظت اطراف دانه‌های هم‌محور آلیاژی و تبدیل ساختارهای ستون به هم‌محور طی انجماد را فرا خواهند گرفت و در انتها با مکانیزم کنترلی پروفیل غلظت در رشد تک کریستال آلیاژی، با هم‌زدن جزئی تا زیاد مذاب، توسط کریستال در حال رشد امکان خواهد شد و قادر به رسم پروفیل غلظت، در لایه استاتیکی و همچنین لایه دینامیکی چسبیده به جبهه از نماد؛ در روش رشد تک کریستال چکراسکی خواهند شد.

نکته قابل تأملی که در نگارش این کتاب می‌توان به مردم، عدم هرگونه ترجمه یا کپی صرف از سایر متون علمی در زمینه انجماد فلزات است. به سراج، می‌توان گفت این کتاب حاصل اقتباس و فهم نویسنده از مبانی جدایش‌های غلظتی در فلزات زمینه داده لذا پس از توصیف هر واژه فیزیکی به تشریح آن از دیدگاه نویسنده، پرداخته و تمامی روابط حاکم که در سایر متون علمی یافت می‌شود را خود نویسنده بیان و مراحل اثبات آن‌ها را به نگارش آورده است. لذا این امر منجر به ایجاد اشتباه یا خطا خواهد شد. از این‌رو نویسنده کتاب با اذعان بر این که در این کتاب ممکن است خطاهایی وجود داشته باشد، از کلیه صاحب‌نظران و متخصصین علم انجماد و رشد بلورهای فلزی، تقاضا دارد به آدرس ایمیل نویسنده؛ موارد موردنظر را اطلاع دهند تا ضمن درج نام و تشکر از آن‌ها در نسخه‌های آتی، این مشکلات رفع شود. به دانشجویان گرمی توصیه می‌کنم در خواندن این کتاب که هر قسمت آن با مثال و تمرین‌های ریاضی متعدد، سعی در فهم و اهمیت درس انجماد فلزات نموده است، به یک‌مرتبه، خواندن متن اکتفا ننموده و چند مرتبه آن را مطالعه و سعی نمایند، تمرین‌های آن را با بستن کتاب و فقط استفاده از اطلاعات یا جداول داده‌های آخر کتاب حل نموده تا بر آن مسلط شوند. به این منظور در انتهای هر فصل، مسائل متعددی که تمام بحث هر فصل را می‌پوشاند، ارائه شده است. سپس

روند حل مسائل، به صورت دو در میان، در انتهای کتاب آورده شده است. برای درک عمیق مسائل مربوط به جدایش غلظتی توصیه می‌شود، حتماً نمودارهای پروفیل‌های غلظت به طور کامل رسم شود و به یک نقطه اکتفا نشود، در این صورت لازم است از نرم‌افزار اکسل (یا سایر نرم‌افزارهای مشابه) استفاده نماید و فرمول‌های مربوطه را در آن نوشته تا بتوانید به راحتی خطاهای احتمالی در محاسبات را متوجه شوید. به همکاران و اساتید محترم عرض می‌نمایم رسم پروفیل‌های غلظت و دما از سطح به مغز قطعات منجمد شده را که با نرم‌افزارهای محاسباتی قابل انجام است به صورت تکالیف به دانشجویان ارائه و جواب آن‌ها خواسته شود؛ اما برای آزمون‌های ارزیابی دوره‌ای، می‌توان، مسائلی که محدود به تعیین غلظت یا دمای یک یا حداکثر سه نقطه دلخواه از قطعه است را ملاک ارزیابی دانشجویان قرار داد. لذا هر دو نوع مسئله در این کتاب در هر فصل و مسائل آخر فصل کتاب پیش رو، طراحی و آورده شده است. همچنین در آخر هر فصل خلاصه آن فصل، با دیدگاه فنی-مهندسی، ارائه شده تا کاربرد عملی آن در صنعت، برای خواننده مشخص شود. امید که این کتاب بتواند گام مؤثری برای یکپارچه‌سازی تدریس انجمن فلزات آلیاژی در مقطع کارشناسی باشد.

در پایان برخود لازم می‌دانم، سال تشکر را از آقایان مهندسین مجید عسکری و مهدی سلطانعلی نژاد بابت حمایت مالی این کتاب به منظور کاهش قیمت کتاب به نحوی که دانشجویان بتوانند به راحتی آن را خریداری کنند، بنمایم. بی دریغ حمایت مالی صنعت بومی سازی مواد فلزی و همت این عزیزان به عنوان یک وظیفه اجتماعی و میهنی می‌تواند سرلوح سایر شرکت‌ها، سازمان‌ها و نهادهای کشور، برای رواج توسعه فرهنگ انتشار کتاب و کتاب خوانی ارزان برای دانشجویان عزیز باشد.

تیرماه ۱۳۹۸

سید محمدحسین میرباقری

smhmirbagheri@aut.ac.ir