



سازمان جهاد دانشگاهی تهران

طرح فناوریانه

" تکمیل دانش فنی ساخت و تولید کریستالیزاتور صنایع فولاد و ریخته‌گری "

عنوان مدرک :

گزارش فنی کریستالیزاتور (استاندارد KME و برخی اسناد و تست های انجام شده)

مجری :

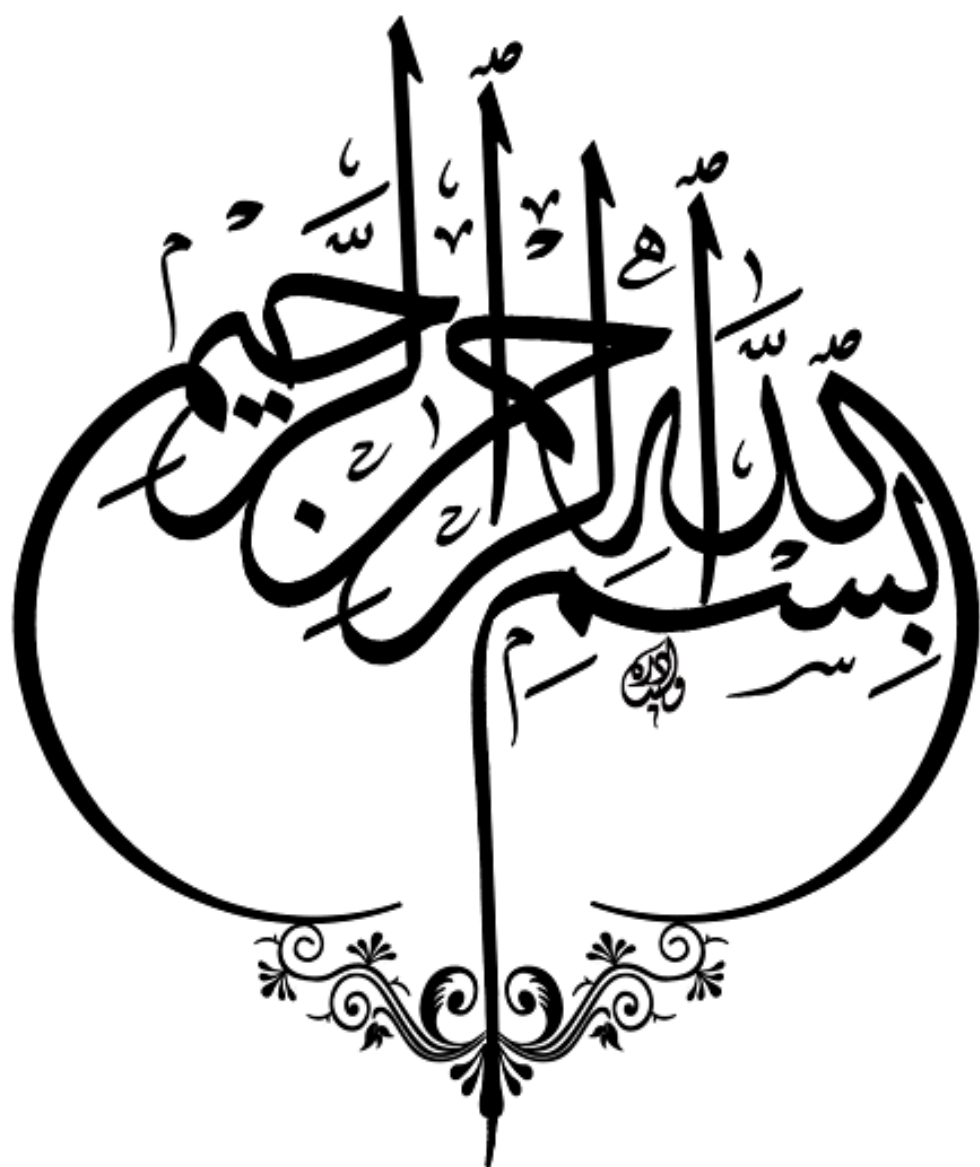
مهندس سید حسن سجادیان

تهیه کننده:

سحر صادقی

مرکز تحقیقات و فناوری مواد ویژه فلزی

خرداد ۱۴۰۰



فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۵
۱- معرفی کریستالیزاتور	۵
۲- ساخت کریستالیزاتور	۷
۳- انتخاب مواد اولیه	۸
۳-۱- هدایت گرمایی	۸
۳-۲- خواص مکانیکی	۸
۳-۳- مقاومت در دماهای بالا، دمای تبلور مجدد	۸
۳-۴- رفتار خزشی	۸
۳-۵- خستگی حرارتی	۸
۴- نتایج تست های انجام گرفته از صفحات کریستالیزاتور تولیدی توسط جهاد دانشگاهی	۱۴
۴-۱- آنالیز شیمیایی نمونه CuAg ریخته گری شده	۱۴
۴-۳- آنالیز تست سختی سنجی	۱۵
۵- پدیده های تخریب قالب و راه حل آن	۱۶
۵-۱-۱- جلوگیری از خراشیدگی یا انقباض عرضی وجه باریک قالب	۱۷
۵-۱-۲- اعمال پوشش بر روی کریستالیزاتور	۱۸
۵-۱-۳- تکنیک های سرمایش قالب اسلب مسی	۱۹
۵-۱-۳-۱- نیاز به بهبود توان خنک کنندگی قالب و تکنیک های آن	۱۹
۵-۱-۳-۲- نیاز به سرمایش یکنواخت	۲۰
۶- پدیده خستگی حرارتی	۲۱

فهرست اشکال

- شکل ۱- شماتیک ریخته گری پیوسته و قالب انجماد (کریستالیزاتور) ۶
- شکل ۲- قالب صفحه ای ۶
- شکل ۳- تصویر قالب صفحه ای پیچ شده به قالب فولادی ۷
- شکل ۴- آنالیز شیمیایی شمش CuAg ریخته گری شده ۱۵
- شکل ۵- مثالهایی از انواع تخریب سطحی قالب ۱۷
- شکل ۶- سیستم کلمپینگ متداول ۱۷
- شکل ۷- مقایسه بین توزیع دمایی در مقطع افقی بین قالب های اصلی و جدید ۲۰
- شکل ۸- تغییر در عمر قالب ۲۱

فهرست جداول

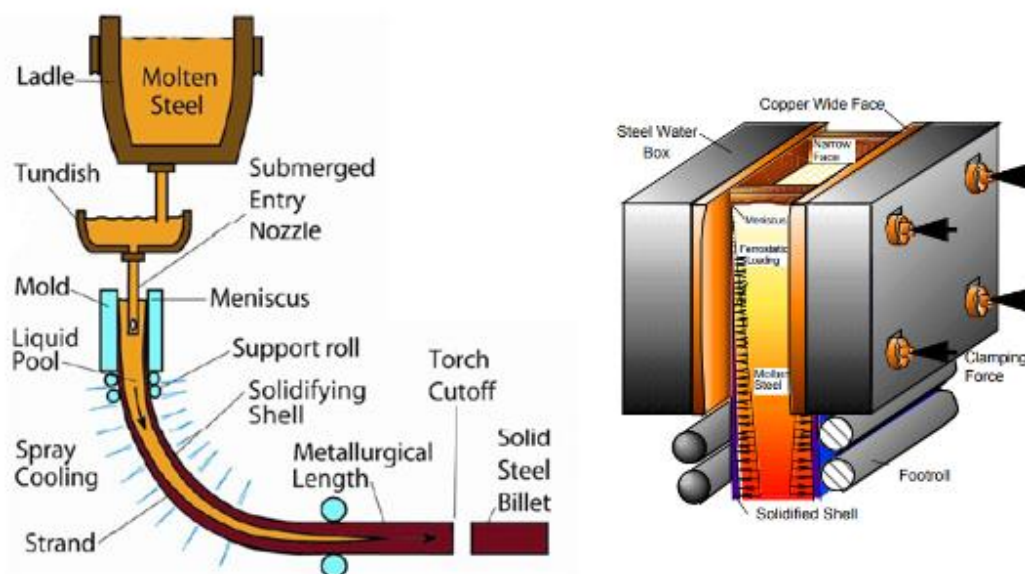
- جدول ۱- آلیاژهای مورد استفاده در ساخت قالب مسی مطابق استاندارد KME ۱۰
- جدول ۲- خواص و کاربردهای آلیاژهای قالب مطابق استاندارد KME ۱۰
- جدول ۳- ترکیب شیمیایی آلیاژ CuFe0.1P ۱۲
- جدول ۴- خواص فیزیکی آلیاژ CuFe0.1P ۱۲
- جدول ۵- خواص مکانیکی آلیاژ CuFe0.1P ۱۲
- جدول ۶- ترکیب شیمیایی آلیاژ CuMgAgP ۱۳
- جدول ۷- خواص فیزیکی آلیاژ CuMgAgP ۱۴
- جدول ۸- خواص مکانیکی آلیاژ CuMgAgP ۱۴
- جدول ۹- نمونه های مختلف پوشش و خواص آن ۱۸
- جدول ۱۰- تاثیر لایه نیکل بر روی میزان حرارت منتقله ۱۹

مقدمه

حدود (۹۰-۸۵)٪ از فولاد تولیدی جهان به روش ریخته گری پیوسته تولید می گردد. قالبهای انجماد یا کریستالیزاتورها مهمترین و استراتژیک ترین قسمت سیستم ریخته گری پیوسته می باشند که نقش گلوگاهی در این صنعت را دارا هستند. قالب های انجماد قطعاتی از آلیاژهای مس می باشند که محفظه انجماد برای تبدیل مذاب به شمش جامد را تشکیل داده و بسته به نوع محصول فولاد، بصورت چهارتکه، یکپارچه و یا تیوپی ساخته می شوند.

۱- معرفی کریستالیزاتور

کریستالیزاتور بعنوان اولین سرد کننده مذاب، اساسی ترین قسمت ماشین ریخته گری پیوسته فولاد می باشد که در آن انجماد مذاب و شکل گرفتن شمش آغاز می شود. مهمترین کار کریستالیزاتور عبارت است از تامین انتقال حرارت زیاد از فولاد مذاب در حال انجماد و شرایط لازم برای شکل گرفتن مداوم پوسته بیرونی جامد و مقابله جهت شمش ریخته گری به ترتیبی که این پوسته هنگام بیرون آمدن از کریستالیزاتور تحت تاثیر فشار فروستاتیک مذاب درونی دچار پارگی نشود. شکل ۱ شماتیکی از سیستم ریخته گری پیوسته و قالب انجماد را نشان می دهد. سیستم قالب علاوه بر نقش اساسی که در شکل دهی و انجماد رشته ریخته گری فولاد دارد بر اقتصاد کل کارخانه ریخته گری نیز تاثیر مهمی دارد. ارزش سیستم قالب اعم از مواد و هزینه های ساخت، عمر سرویس دهی قالب، کیفیت رشته ریخته گری عواملی هستند که در معادله اقتصادی موثرند. عمر سرویس دهی قالب، مدت زمان یا تعداد دفعاتی است که قالب می تواند بدون آنکه پایداری ابعادی خود را از دست بدهد در ذوب ریزی نماید و محصول مطابق با استاندارد تعیین شده به دست بدهد. بسته به گرید فولاد یا استاندارد مورد نظر، عمر کاری قالب از یک کارخانه به کارخانه دیگر متفاوت خواهد بود هر چند که قالب ها از طرح و ابعاد یکسانی برخوردار باشند.

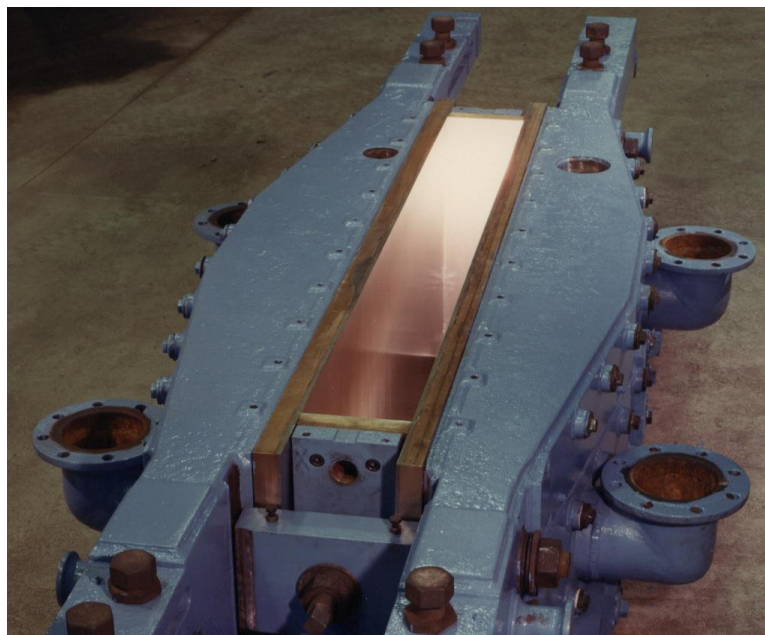


شکل ۱- شماتیک ریخته گری پیوسته و قالب انجماد (کریستالیزاتور)

قالب انجماد ساخته شده در مرکز فرآوری جهاد دانشگاهی تهران از نوع قالب صفحه ای می باشد که برای ریخته گری تختال های بزرگ (ا سلب) به کار می روند. چهار صفحه که دیواره قالب را تشکیل می دهند به یک قالب فولادی به نام ژاکت (جعبه آب) پیچ می شوند. کانال های خنک کاری در دیواره پشت صفحات قالب یا در صفحات فولادی نگهدارنده قالب و جعبه آب به وسیله ماشینکاری بوجود می آیند. شکل ۲ تصویری از یک قالب صفحه ای را نشان می دهد. همچنین در شکل ۳ تصویری از قالب صفحه ای پیچ شده به قالب فولادی را نشان می دهد.



شکل ۲- قالب صفحه ای



شکل ۳- تصویر قالب صفحه ای پیچ شده به قالب فولادی

۲- ساخت کریستالیزاتور

جهت تولید قطعات ویژه مسی و به خصوص کریستالیزاتورها فرآیند ویژه ای صورت می گیرد که در این فرآیند فعالیت‌های کلی شکل گرفته به شرح زیر می باشد :

- ۱- انتخاب مواد اولیه مناسب
- ۲- خرید مواد اولیه
- ۳- عملیات ذوب و ریخته گری
- ۴- آماده سازی سطوح جهت شکل دهی گرم
- ۵- شکل دهی گرم
- ۶- آماده سازی سطوح جهت شکل دهی سرد
- ۷- شکل دهی سرد
- ۸- ماشینکاری و ساینک
- 8- پوشش دهی

۳- انتخاب مواد اولیه

برای مواد قالب الزاماتی وجود دارد. این امر مستقیماً به عملکرد سیستم قالب و تنش هائی که به آن وارد می شود، وابسته است. این الزامات شامل موارد زیر است:

۳-۱- هدایت گرمایی

جهت بازدهی مطلوب قالب، بایستی حرارت انجماد و حرارت اضافی از طریق دیواره به آب خنک کننده هدایت شود. این امر در مورد انواع مختلف قالب به کار می رود و در نتیجه فلز به کار رفته در قالب بایستی بالاترین حد ممکن هدایت حرارتی را دارا باشد.

۳-۲- خواص مکانیکی

استحکام و مقامت ماده قالب تعیین کننده میزان پایداری و ثبات قالب می باشد. این امر مخصوصاً برای سیستم هایی که از قاب هایی استفاده می کنند که دیواره نسبتاً نازک دارند (همانند قالبهای تیوبی) از اهمیت خاصی برخوردار است. جهت حداقل کردن تاب برداشتن و خوردگی مکانیکی که بوسیله خراشیدگی ناشی از حرکت رشته فولادی و سرباره نسبت به قالب ایجاد می شود، مقاومت مکانیکی بالا و سختی بالا برای فلز قالب یک اصل کلی و مطلوب محسوب می شود.

۳-۳- مقاومت در دماهای بالا، دمای تبلور مجدد

به جهت آنکه در دیواره های قالب دمای بالایی وجود خواهد داشت لذا باید فلز قالب در دمای بالا از استحکام و مقاومت زیادی برخوردار باشد. خاصیت اصلی دیگر این است که دمای تبلور مجدد آن به اندازه کافی بالا باشد تا از نرم شدن فلز جلوگیری نماید.

۳-۴- رفتار خزشی

در تمامی قالب ها، اختلاف دمای موجود بین دو طرف دیواره قالب در یک مقطع و نیز اختلاف دمایی که بین بالا و پایین قالب وجود دارد موجب می شود که در طول عمر عملکردی قالب تنش های حرارتی در فلز قالب تا سطح قابل ملاحظه ای وجود داشته باشد.

۳-۵- خستگی حرارتی

شکست ناشی از خستگی معمولاً در قطعات تنش های سیکلی با یا در قطعاتی که در معرض ارتعاش و لرزش می باشند به وقوع می پیوندند. به دلیل آنکه بارگذاری و تغییرات حرارتی فقط در شروع ذوب ریزی وجود دارد

خطر خستگی حرارتی وجود دارد پس از آن وضعیت قالب مادامیکه ذوب ریزی وجود دارد از وضعیت نسبتاً ثابتی برخوردار است. در حقیقت توالی ذوب ریزی باعث می شود که تعداد سیکل بارگذاری و تغییر حرارت کاهش یابد.

بنابراین رسیدن به این الزامات برای شرایط کاری متفاوت بستگی به انتخاب دقیق یکی از مواد زیر می باشد:

۱- (CuDHP)phosphorus Deoxidized Copper

مس DHP امروزه به طور وسیعی به عنوان ماده تولید قالب برای ریخته گری پیوسته شمشال (billet) استفاده می شود. جائیکه جریان حرارتی معمولاً متوسط است و ضخامت دیواره قالب زیاد نیست.

۲- CuAg

اضافه کردن ۰,۱٪ نقره به مس سبب افزایش دمای تبلور مجدد تا حدود 100°C می شود. با توجه به این خواص ویژه، از این آلیاژ برای تولید قالب هایی برای تولید شمشه (bloom) و تختال (slab) استفاده شده است، جائیکه دما به meniscus می رسد و از 300°C فراتر می رود. چنین دمای بالایی به علت ضخامت قابل توجه دیواره ها و جریان حرارتی بالا داخل قالب است. این حقیقت که این مواد سبب حفظ سختی اولیه ($\text{HB} > 80$) برای مدت طولانی در معرض دمای 300°C می شوند، سبب امکان پذیری قرار گیری در معرض پوشش تکرار پذیر، قبل از اینکه به ضخامت مینیمم تعیین شده برسند، می شود.

۳- CuCrZr

این آلیاژ سبب بهبود خواص مکانیکی در دماهای بالای آلیاژهای مس با هدایت حرارتی بالا می شود. که از لحاظ متالورژیکی این قابلیت به خواص رسوب سخت شونده این آلیاژ بر می گردد. آلیاژ Cu-Cr-Zr دارای خواص فوق العاده است که اجازه می دهد سختی اش در معرض دمای بالا برای مدت زمان طولانی حفظ شود.

۴- CuNiBe

این آلیاژ سبب می شود ترکیب صحیحی از هدایت حرارتی و مقاومت مکانیکی را در دماهای بالا داشته باشیم و سبب کاهش تفاوت دمایی در کل محیط قالب می شود. مزیت این آلیاژ برای شرایط انجمادی، آن است که بدون تنش حرارتی در پوسته انجمادی و همچنین در خود قالب است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی و مکانیکی آلیاژهای مورد استفاده به عنوان قالب در ریخته گری پیوسته فولاد و آلیاژهای غیرآهنی را مطابق استاندارد شرکت KME نشان می دهد.

گزارش فنی کریستالیزاتور

جدول ۲ خواص و کاربرد های آلیاژهای مورد استفاده در ساخت قالب مسی مطابق استاندارد KME را نشان می دهد. این آلیاژها در ساخت قالب ها برای کاربردهای مختلف همچون قالب ا سلب فولادی و قالب تیوپی برای ریخته گری پیوسته فولاد ، قالب چرخ مسی برای ریخته گری پیوسته در آلیاژهای غیر آهنی مثل مس و آلومینیوم و ... و انواع قالب های دیگر مطابق جدول ۲ به کار می روند.

جدول ۱- آلیاژهای مورد استفاده در ساخت قالب مسی مطابق استاندارد KME

KME materials for mould plates, block moulds and casting rolls

Material Properties*	Temperature		Units	CuAg-GS	CuAg-NS	ELBRODUR® G/GP	ELBRODUR® GP-NS/ GD-NS	ELBRODUR® GR** 40/50/60	ELBRODUR® B93	ELBRODUR® B93S	ELBRODUR® NIB
Chemical composition (without copper)			%	0.09 Ag	0.1 Ag	0.65 Cr	0.65 Cr	0.65 Cr	1.0 Co	1.4 Co	1.5 Ni
				0.006 P	0.004 P	0.1 Zr	0.1 Zr	0.1 Zr < 1.5 others	0.1 Be	0.3 Be	0.2 Be
Physical Properties	°C	°F									
Electrical conductivity	20	68	S·m/mm²	54	57	48	49	23/29/35	35	31	40
			% IACS	93	98	83	84	40/50/60	60	54	69
Thermal conductivity	20	68	W/(m·K)	377	385	350	350	160/205/250	240	220	290
Coefficient of thermal expansion	20-300	68-572	10⁻⁴/K	17.7	17.7	18	18	18	18	18	18
Recrystallisation temperature	-	-	°C	370	350	(800)	(800)	(800)	(800)	(800)	(800)
Softening temperature***	-	-	°C			580	580	580	590	590	590
Modulus of elasticity	20	68	10⁴ MPa	125	125	128	128	128	128	128	128
Mechanical Properties	°C	°F									
0.2 % Proof stress R _{p0.2}	20	68	MPa	275	285	285/330	370/380	275	490	610	510
	200	392		245	255	260/290	330/335	250	450	580	500
	350	662		(200)	(200)	230/255	300/305	220	430	540	470
	500	932		(20)	(20)	(200/220)	(245/250)	(180)	(400)	(450)	(420)
Tensile strength R _m	20	68	MPa	280	290	410/420	430/440	400	630	720	630
	200	392		250	250	350/365	370/375	340	570	670	570
	350	662		(210)	(210)	295/310	325/330	290	500	600	510
	500	932		(80)	(80)	(230/250)	(255/260)	(215)	(440)	(500)	(430)
Elongation A ₅	20	68	%	16	17	25/22	19	26	13	10	12
	200	392		14	15	24/20	16	23	11	7	10
	350	662		(12)	(12)	22/19	16	21	(5)	(3)	(4)
	500	932		(70)	(70)	(22/19)	(16)	(21)	(3)	(2)	(3)
Hardness HBW 2.5/62.5 ⁽¹⁾	20	68		90	90	120/130	135	120	200	235	200

جدول ۲- خواص و کاربردهای آلیاژهای قالب مطابق استاندارد KME

Properties and applications of mould alloys

Material	Cu-GS	CuAg-GS/NS	ELBRODUR® G/GP	ELBRODUR® GP-NS/GD-NS	ELBRODUR® GR	ELBRODUR® B 93	ELBRODUR® NIB
Thermal conductivity	High	Very high	High	High	Medium	Medium	Medium
Softening/Recryst. temp.	Medium	Medium	Very high	Very high	Very high	Very high	Very high
Strength/Hardness	Medium	Medium	High	High	High	Very high	Very high
Application	Mould tubes	Wide-face and narrow-face plates for slab moulds/ thin slab moulds; mould tubes	Mould tubes; Plates for slab moulds; bloom moulds; (casting rolls)	AFM®, ABBM, ASM	Tubes for billet and bloom moulds with electromagnetic stirring systems	Moulds for special purposes; casting rolls	Wide-face and narrow-face plates for slab moulds/ thin slab moulds; casting rolls

جنس قالب مسی ساخته شده در مرکز تحقیقات و فرآوری جهاد دانشگاهی تهران از نوع آلیاژ مس - نقره انتخاب شده است. میزان نقره در حدود ۰/۱ درصد می باشد.

دلایل انتخاب آلیاژ CuAg0.1 به شرح زیر است:

۱. با توجه به موارد گفته شده آلیاژ CuAg0.1 با توجه به خواص حرارتی مکانیکی و قیمت بهترین انتخاب برای کریستالیزاتور است.
۲. مزیت مهم آلیاژ مس - نقره این است که دارای هدایت حرارتی بالاتری است و نقره بر روی خاصیت هدایت الکتریکی آلیاژ هیچگونه تأثیر نامطلوبی ندارد.
۳. استفاده از مس DHP به دلیل هدایت حرارتی کمتر در ضخامت های بالا (کریستالیزاتور صفحه ای توصیه نمی شود)
۴. استفاده از مس خالص دیگر به دلیل دمای نرم شدن کمتر در شرایط کاری خاصی قابل استفاده است. (در صورتی که دمای کاری، دمای سطح اتصال کریستالیزاتور به اسلب کمتر از ۱۸۰ درجه سانتی گراد باشد)
۵. آلیاژهای CuCrZr و CuNiBe به دلیل هزینه بالای مواد اولیه دارای هزینه های ساخت زیاد می باشند.

برخی آلیاژهای جدید تولید شده در KME با هدایت حرارتی خوب:

۵- CuFe0.1P

استاندارد آلیاژ طراحی شده به شکل زیر است:

Alloy Designation	
EN	CuFe0.1P
DIN CEN/TS 13388	
UNS	C19210

ترکیب شیمیایی این آلیاژ در جدول ۳ آورده شده است.

گزارش فنی کریستالیزاتور

جدول ۳- ترکیب شیمیایی آلیاژ CuFe0.1P

Chemical composition (reference) %	
Cu	Rest
Fe	0,05 - 0,15
P	0,025 - 0,04
Other	max. 0,5

مشخصه های اصلی این آلیاژ به صورت زیر است:

- ✓ ترکیبی از هدایت خیلی بالا با خواص شکل دهی سرد عالی
- ✓ مقاومت به نرم شدن از دماهای استحکام کم، خوب است.
- خواص فیزیکی و مکانیکی این آلیاژ به ترتیب در جدول ۴ و ۵ آمده است.

جدول ۴- خواص فیزیکی آلیاژ CuFe0.1P

Physical properties		
Density *	g/cm ³	8,9
Thermal conductivity *	W/(m·K)	350
Electr. conductivity ***	MS/m	50
Electr. conductivity ***	IACS	86
Coefficient of thermal expansion **	10 ⁻⁶ /K	17
Modulus of elasticity *	GPa	125
* Reference values at room temperature ** Between 20 up to 300 °C *** Values for the lowest temper class		

جدول ۵- خواص مکانیکی آلیاژ CuFe0.1P

Mechanical Properties				
Temper	Tensile Strength	Yield Strength Minimum	Elongation Minimum	Hardness
	Rm	Rp _{0.2}	A _{50mm}	HV *
	MPa	MPa	%	HV
R300	300 .. 380	300	10	80 .. 110
R360	360 .. 440	260	3	100 .. 130
R420	420 .. 500	350	2	120 .. 150

ترکیبی از خواص مورد نیاز مثل هدایت حرارتی بالا و دمای تبلور مجدد بالا در مقایسه با مس بوسیله ی آلیاژ سازی مس با مقدار کمی از عناصر آلیاژی مثل Cu-Ag، Cu-Cr، Cu-Zr، Cu-Sn، Cu-Fe، Cu-Be، Cu-P، Cu-Fe-P، Cu-Sn-Zr، Cu-Cr-Zr و Cu-Co-Be اغلب در تولید دیواره قالب استفاده شده است. در مورد تاثیر مقدار آهن موجود در مس بر روی هدایت حرارتی باید ذکر شود که طبق تحقیقات صورت گرفته هدایت حرارتی مس خالص به صورت یکنواخت با افزایش دما کاهش می یابد در حالیکه در آلیاژهای مس کم آلیاژ (همانند آلیاژ Cu-Fe)، هدایت حرارتی با افزایش دما به طور یکنواخت افزایش می یابد. عنصر آلیاژی (آهن) سبب تغییر قابل توجهی در ساختار باند انرژی جایی که جدا از باند 4s، باند 3D تشکیل می شود، جایی که مس حلال است، که می تواند منجر به افزایش کلی هدایت گرمایی در هنگام افزایش دما شود.

۶- CuMgAgP

استاندارد آلیاژ طراحی شده به شکل زیر است:

Alloy Designation	C15500
EN	
DIN CEN/TS 13388	
UNS	C15500

ترکیب شیمیایی آلیاژ طراحی شده در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۶- ترکیب شیمیایی آلیاژ CuMgAgP

Chemical composition (%) (reference)	
Cu (incl. Ag)	99,75
Mg	0,08 - 0,13
P	0,04 - 0,08
Ag	0,027 - 0,10

خواص فیزیکی و مکانیکی این آلیاژ به ترتیب در جدول ۷ و ۸ آمده است.

جدول ۷- خواص فیزیکی آلیاژ CuMgAgP

Physical properties		
Density *	g/cm ³	8,91
Thermal conductivity *	W/(m·K)	346
Electr. conductivity ***	MS/m	50
Electr. conductivity ***	IACS	86
Coefficient of thermal expansion **	10 ⁻⁶ /K	17,8
Modulus of elasticity *	GPa	115
* Reference values at room temperature ** Between 20 up to 300 °C *** Values for the lowest temper class		

جدول ۸- خواص مکانیکی آلیاژ CuMgAgP

Mechanical Properties (EN 1652)				
Temper		Tensile strength	Yield Strength Minimum	Elongation Minimum
		R _m	R _{p0.2}	A _{50mm}
		MPa	MPa	%
R235	O61 (annealed)	235 .. 295	105	30
R310	H02 (1/2 hard)	310 .. 380	260	13
R385	H04 (hard)	385 .. 440	345	6
R435	H06 (extra hard)	435 .. 495	385	5
R450	H08 (spring)	450 .. 505	415	4
R470	H10 (extra spring)	470 .. 515	435	3

۴- نتایج تست های انجام گرفته از صفحات کریستالیزاتور تولیدی توسط جهاد دانشگاهی

۴-۱- آنالیز شیمیایی نمونه CuAg ریخته گری شده

نتیجه آنالیز شیمیایی شمش CuAg ریخته گری شده در شکل ۴ آورده شده است که کاملاً در محدوده مجاز رنج استاندارد KME می باشد.

گزارش فنی کریستالیزاتور

درخواست کننده: جهاد فنی تهران
نشانی: ب. کارگر شمالی - پلاک ۱۱۱
نام نمونه: CuAg-Jahad Foseco
شماره شناسایی: ۹۸۱۰۱۲۵-۳
تاریخ درخواست: ۱۳۹۸/۱۱/۱۲
تاریخ گزارش: ۱۳۹۸/۱۱/۲۲

بسمه تعالی

آزمایشگاه متالورژی جهاد شریف

گزارش نتایج آزمون

جهاد
فنی
دانشگاه

پژوهشگاه توسعه تکنولوژی

نمونه برداری توسط مشتری انجام شده و نتایج فقط برای نمونه‌های ارسالی معتبر است.

نوع آزمون: کوآنتومتری

استاندارد مرجع: ASTM E 415-17:2018
استاندارد کنترل شرایط محیطی: ASTM E 406-S1 (2012):2018
نتایج: برحسب درصد وزنی

Cu	Zn	Pb	Sn	P	Mn	Fe	Ni	Si
-99.7	0.021	<0.004	<0.002	0.007	<0.004	0.069	<0.008	<0.004
Mg	Cr	Te	As	Sb	Cd	Bi	Ag	Co
<0.0005	<0.003	<0.010	<0.003	<0.010	<0.003	<0.008	0.09	<0.005
Al	S	Be	Zr					
0.006	<0.002	<0.0001	<0.0010					

تذکره: به دلیل عدم دسترسی به نمونه استاندارد با ترکیب شیمیایی فوق (جهت کنترل کالیبره دستگاه کوآنتومتری)، احتمال وجود خطای جزئی در آنالیز قلمعه فوق وجود دارد.

• تنها اصل گزارش با پرچم هواگرام مورد تایید است. • مسئولیت تطابق نام نمونه با فله ارسالی بر عهده آزمایشگاه نمی‌باشد. • نمونه‌های آزمون و باقی‌مانده آنها حداکثر به مدت یکماه نگهداری خواهند شد. • نشانی: تهران - خیابان آزادی - خیابان شهید صافقی - روبروی درب شمالی دانشگاه شریف - مجتمع جهاد دانشگاهی شریف. وب سایت: www.jdsharif-met.com ایمیل: material@jdms.org
تلفن مستقیم پذیرش: ۶۶۰۷۵۲۰۱-۲ و ۶۶۰۷۵۲۲۲-۹ (داخلی ۲۲۸) - فاکس: ۶۶۰۷۵۲۰۰ - صدای مشتری: ۶۶۰۷۵۱۹۸
کد سند: F-Cha.02
شماره بازنگری: ۸
تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹
شماره صفحه: ۱ از ۱

شکل ۴- آنالیز شیمیایی شمش CuAg ریخته گری شده

۴-۳- آنالیز تست سختی سنجی

نتایج سختی سنجی صفحات کوچک و بزرگ کریستالیزاتور بعد از نورد سرد به ترتیب در جدول ۹ و ۱۰ آورده شده است. همچنین نتایج سختی سنجی صفحات کوچک و بزرگ کریستالیزاتور بعد از ماشینکاری نهایی به ترتیب در جدول ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. نتایج سختی سنجی نشان می‌دهد که سختی صفحات کریستالیزاتور تولیدی کاملاً مطابق با استاندارد KME می‌باشد و حتی از حداقل سختی ارائه شده توسط استاندارد KME بالاتر است.

جدول ۹- آنالیز سختی سنجی صفحه کوچک پس از ماشینکاری نهایی

No	1	2	3	4	ave
Hardness(HB)	104	101	105	105	103.75

گزارش فنی کریستالیزاتور

جدول ۱۰- آنالیز سختی سنجی صفحه بزرگ پس از ماشینکاری نهایی

No	1	2	3	4	5	ave
Hardness(HB)	105	107	105	103	108	105.6

جدول ۱۱- آنالیز سختی سنجی صفحه کوچک پس از ماشینکاری نهایی

Point	T1	T2	T3	D1	D2	D3
Hardness (HB)	105	102	104	104	103	106

جدول ۱۲- آنالیز سختی سنجی صفحه بزرگ پس از ماشینکاری نهایی

Point	T1	T2	T3	SL1	D1	D2	D3	SR1
Hardness (HB)	107	105	111	109	109	107	109	108

۵- پدیده های تخریب قالب و راه حل آن

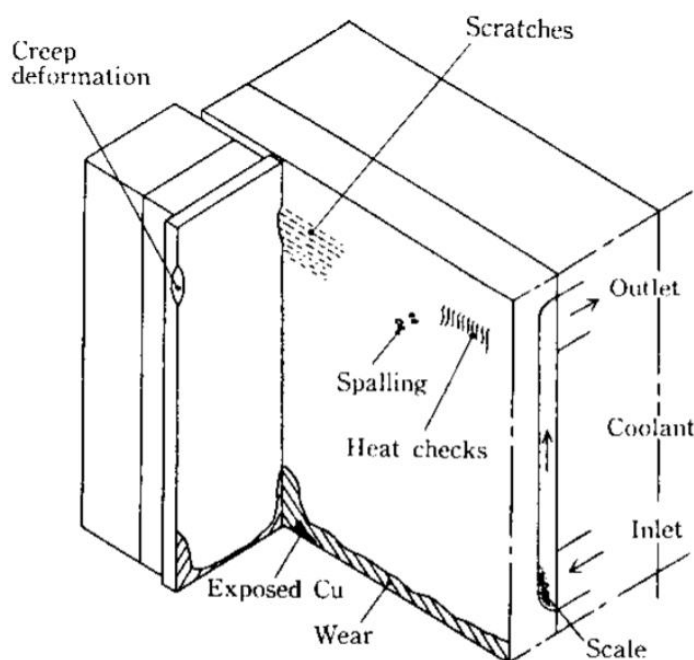
شکل ۴ پدیده هایی که سبب تخریب قالب ریخته گری می شود را نشان می دهد. افزایش در شکاف گوشه به علت انقباض وجه باریک قالب ریخته گری یا تغییرات خراشیدگی وجه عریضش منجر به نفوذ فولاد مذاب می شود که سبب انجماد به شکل پرک شکل شده و بدون شک سبب شکست می شود. ورقه ورقه شدن و ترک سبب تخریب صافی صفحات قالب شده و روانکاری بین اسلب ریخته شده و قالب را کاهش داده و سبب چسبندگی به هنگام بیرون کشی می شود.

جهت طولانی کردن عمر قالب روش های زیر پیشنهاد شده است:

۴-۱- تکنیک هایی جهت جلوگیری از خراشیدگی در عرض یا انقباض عرضی وجه باریک قالب

۴-۲- تکنیک های آبکاری سطحی قالب جهت افزایش مقاومت حرارتی و مقاومت سایش قالب

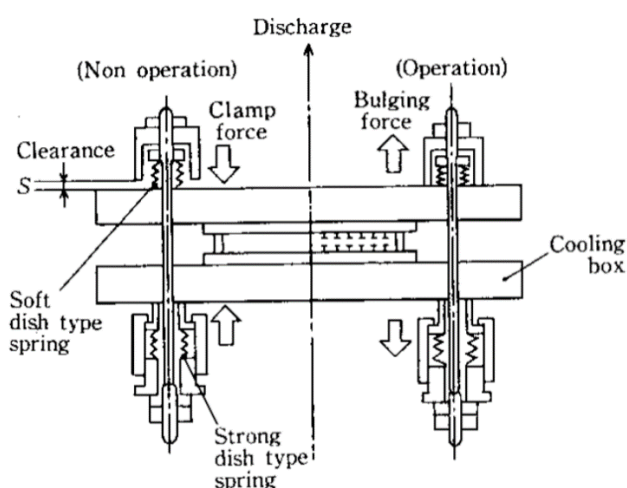
۴-۳- تکنیک های سرمایش قالب ریخته گری جهت تولید اسلب دمای بالا و بدون عیب



شکل ۵- مثالهایی از انواع تخریب سطحی قالب

۵-۱-۱- جلوگیری از خراشیدگی یا انقباض عرضی وجه باریک قالب

جهت طولانی کردن عمر قالب با روش اول و جلوگیری از خراشیدگی ناشی از تغییرات عرضی، نیروی clamping مورد نیاز جهت افزایش فشار هیدرواستاتیک در همه زمان باید در مینیمم مقدار مجاز نگهداری شود تا اجازه به انبساط حرارتی وجه باریک دهد. برای همین منظور از سیستم کنترل اتوماتیک نیروی clamping استفاده می کنند.



شکل ۶- سیستم کلمپینگ متداول

۵-۲-۱-۱ اعمال پوشش بر روی کریستالیزاتور

ضمن ریخته گری پیوسته فولاد، پوسته تشکیل یافته شمش بر روی سطح دیواره کاری مس کریستالیزاتور می لغزد. در نتیجه دیواره کاری کریستالیزاتور به علت سختی میکروکم مس (80kgf/mm^2) شدیداً دچار ساییدگی می شوند. سایش دیواره ها باعث تغییر اندازه های هندسی سطح کریستالیزاتور، غیر یکنواختی انتقال حرارت، افزایش تنش های حرارتی و بوجود آمدن ترک های میکرو در پوسته شمش ریخته گری می شود. در واقع مس کنده شده در اثر سایش جذب فولاد شده و منجر به نفوذ در مرز دانه شده و ترک فولاد می شود. بنابراین یک لایه مقاوم به سایش در سطحی که مذاب با آن تماس دارد باید اعمال شود تا مقاومت به سایش و عمر کاری کریستالیزاتور را افزایش دهد. به غیر از مسئله سایش، ریخته گری فولاد در کریستالیزاتور بدون وجود لایه واسط بین شمش در حال ریخته گری و دیواره مسی ممکن است باعث زیاد سرد شدن موضعی پوسته شمش در نتیجه ی قابلیت انتقال حرارت زیاد مس گردد. این عمل به نوبه خود می تواند باعث از بین رفتن یکنواختی انتقال حرارت و دگرگونی فرم جبهه کریستالیزاتور شود.

جهت پوشش دهی قالب های تختال عمدتاً از نیکل یا ترکیبی از نیکل و کروم استفاده می شود. پوشش نیکل باعث می شود مقاومت به شوک دمایی افزایش یابد چون که مس و نیکل دارای ضریب انبساط حرارتی مشابه هستند. جدول ۹ نمونه های مختلف پوشش مورد استفاده در کریستالیزاتورهای صفحه ای و تیوبی را نشان می دهد. وجود پوشش نیکل بر روی سطح داخلی کریستالیزاتور باعث می شود میزان انتقال حرارت کاهش یابد. در کنار سایر مشخصات بیان شده ضخامت پوشش نیز باید لحاظ گردد. تاثیر لایه نیکل بر روی میزان حرارت منتقله و دمای دیواره بر روی یک کریستالیزاتور صفحه ای طبق استاندارد KME در جدول ۱۰ نشان داده شده است.

جدول ۱۳- نمونه های مختلف پوشش و خواص آن

Material Properties	MM1 (CuDHP)	Nickel	Hardened Nickel	Chromium	Nickel Cobalt
Hardness (HV)	93	220	400	980	410
Coefficient of thermal expansion	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$1,28 \cdot 10^{-5}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$	$0,84 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$
Thermal conductivity at 20°C (W/(m·K))	340	88	78	70	80

جدول ۱۴- تاثیر لایه نیکل بر روی میزان حرارت منتقله

Material: CuAg wall thickness: 35 mm	Ni-coating mm	ΔT -wall $^{\circ}\text{C}$	Δ -heat transfer W/m^2
	0.7	+ 11	- 0.9
	1	+ 15	- 1.3
	2	+ 30	- 2.6
	3	+ 45	- 3.8
Coefficients of heat transfer:			
steel/mould		1500 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	
mould/water		11000 $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	

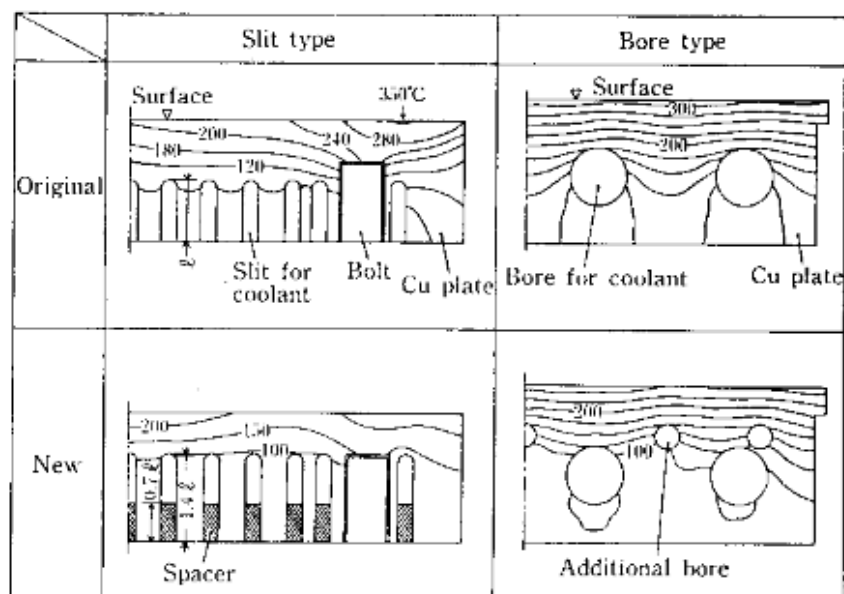
همچنین از پوشش های Ni-Fe و Ni-W-Fe استفاده می شود که استحکام دمای بالا پوشش Ni-Fe در (400°C) ۲,۵ برابر نیکل است و استحکام دمای بالا پوشش Ni-W-Fe در (400°C) ۱,۵ برابر Ni-Fe است.

۵-۳-۱- تکنیک های سرمایش قالب اسلب مسی

۵-۳-۱-۱- نیاز به بهبود توان خنک کنندگی قالب و تکنیک های آن

همچنانکه سرعت ریخته گری افزایش می یابد، بارگذاری حرارتی بر روی صفحات قالب مسی افزایش می یابد مخصوصاً در منطقه مینیسک و وجه باریک قالب که دما در سطح قالب به $300-350$ درجه سانتیگراد می رسد. زیرا در وجه باریک قالب، انبساط حرارتی بوسیله ی نیروی کلمپینگ محدود شده است و تغییر شکل خزشی رخ می دهد که منجر به انقباض وسیع در اثر سرمایش می شود.

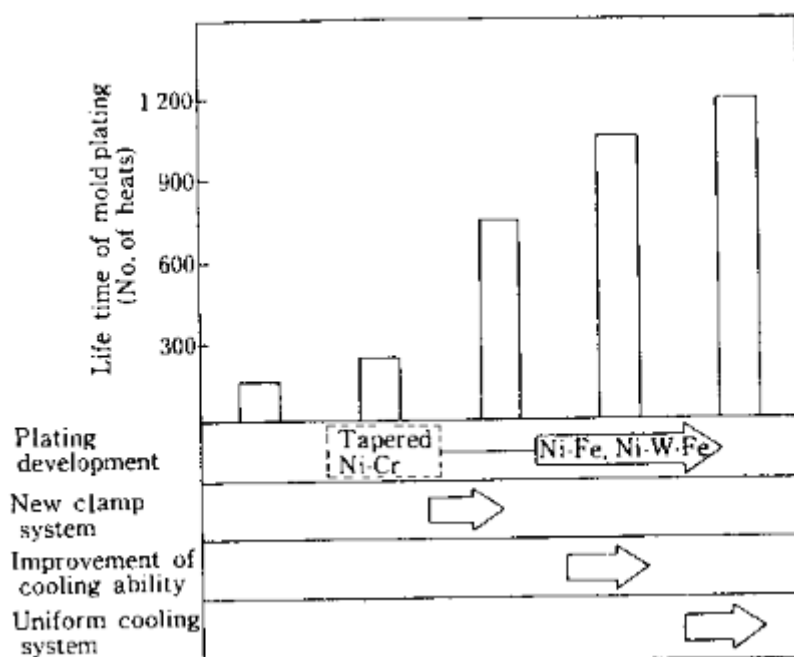
یک روش جهت حل این مشکل، مطالعه جهت بهبود توان خنک کنندگی است که در شکل ۶ نشان داده شده است که بیانگر توزیع دمایی قبل و بعد از مدلسازی جدید است که شیارهای آب خنک کننده به صورت شیارهای طولی (slit) یا شیارهای سوراخ دار (bore) می باشد. در نوع slit یک جداساز بر روی سطح مینیسک نصب شده است و سرعت جریان جهت بهبود هدایت حرارتی افزایش یافت. در نوع bore ، سوراخ های سرمایش کمکی جدیدی ایجاد شدند که مقاومت به انتقال حرارت در جهت ضخات کاهش یافت و سبب بهبود توان خنک سازی گشت. از طریق این مدل سازی مجدد دمای سطح صفحات به 250 درجه سانتیگراد کاهش یافت که منجر به جلوگیری از تغییر شکل خزشی گردید. این تکنیک همچنین جهت جلوگیری از تغییر شکل صفحات مس در وجه عریض قالب استفاده شده است.



شکل ۷- مقایسه بین توزیع دمایی در مقطع افقی بین قالب های اصلی و جدید

۵-۳-۱-۲- نیاز به سرمایش یکنواخت

اگر سرعت جریان آب خنک کننده غیر یکنواخت باشد و یا توزیع سرعت غیر یکنواخت باشد، حذف حرارت ناکافی در موقعیتی که سرعت آهسته است اتفاق می افتد و سبب چسبندگی بین قالب و اسلب و در نهایت شکست اسلب می گردد. این پدیده مخصوصاً در طول ریخته گری سرعت بالا مشهود است. سرمایش غیر یکنواخت همچنین مسئول تخریب کیفیت و ایجاد ترک طولی در اسلب می شود. در نوع متداول سرعت در مرکز در جهت پهنا دو برابر سریعتر است. دلایل امکان پذیر شدن برای این کار این است درگاه ورودی و خروجی آب خنک کننده در مرکز قرار گرفته است و ظرفیت حجمی منبع تامین آب خنک کننده بسیار کوچک است. در نوع جدید ظرفیت حجمی منبع تامین آب افزایش یافته است و همچنین میزان اثرات ورودی و خروجی آب خنک کننده نادیده گرفته شده است. یک سوراخ روزنه همچنین در نوع جدید نصب شده است که سرعت جریان کاملاً یکنواخت می شود. در نتیجه سرعت حتی در منطقه مینیسک نیز یکنواخت می شود. در نتیجه توسعه و بهبود تکنیک های متفاوت که در بالا ذکر شد، اثرات سودمندی حاصل می شود. در اثر به کار گیری تکنیک های به کار گرفته شده عمر قالب افزایش می یابد که در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۸- تغییر در عمر قالب

در اثر توسعه سیستم کنترل نیروی کلمپینگ سبب حذف انقباضات عرضی که به دلیل خزش وجه باریک قالب اتفاق می افتد، می شود. در نتیجه عمر قالب از 250 heat به 750 heat افزایش می یابد. همچنین در اثر افزایش توان خنک کنندگی آب، عمر قالب به 1050 heat افزایش می یابد. در نتیجه آبکاری قالب با Ni-Fe و Ni-W-Fe عمر قالب ها تا 1200 heat افزایش می یابد.

۶- پدیده خستگی حرارتی

قالب در منطقه meniscus به علت جدا شدن ماده پوشش و و تخریب مکانیکی همراه با حمله شیمیایی عناصر با نقطه ذوب کم بر روی زیرلایه مس سبب شکننده شدن قالب می شود. از پوشش ها برای پوشاندن دیواره های داخلی قالب استفاده می شود و تحت تأثیر تخریب ترمومکانیکال قرار می گیرند که خصوصیات مکانیکی را کاهش می دهد.

سطح داخلی قالب تحت تنش های گرمایی با نوسان زیاد قرار دارد که می تواند منجر به خستگی حرارتی شود.

طبق تحقیقات انجام شده مشاهده شده است که در مناطق نزدیک به مینیسک شبکه ای گسترده از ترک ها رخ می دهد در حالیکه مناطق اطراف آن به نظر می رسد بدون تغییر باقی می ماند. در این منطقه دمای سطح قالب دارای بالاترین دما می باشد. در قالب اشاره شده در قالب اشاره شده، دمای آب ۴۰ درجه

سانتیگراد در نظر گرفته شده است. هدایت حرارتی 377 W/mK در دمای محیط و 370 W/mK در دمای 100 درجه سانتیگراد می باشد.

مشاهدات صورت گرفته در منطقه ترک نشان می دهد که مس به برنج با نسبت وزنی 0.5 به 1 تبدیل شده است که مطابق با تشکیل فازهای ترد β' (نزدیک به 1 درصد) و γ (نزدیک به 0.5 درصد) و یا مخلوطی از این دو می باشد. این فازها پر از ترک بودند. ترک از برنج عبور کرده و در زیرلایه زیرین مس ادامه دارد. این شکاف توسط فاز دیگری متشکل از S ، Zn و Pb احاطه شده است.

درست در 30 میلی متر زیر منطقه meniscus در سطح داخلی قالب، شار حرارتی ماکزیمم است و طبق آنالیزهای انجام گرفته ماکزیمم کرنش پلاستیک در این منطقه جاییکه بالاترین دما را دارد اتفاق می افتد. طبق بحث های انجام گرفته در بالا دو موضوع روی تخریب و عمر کاری قالب نقش دارد: (۱) خستگی حرارتی (۲) تغییر متالورژیکی. آسیب شدید نزدیک منطقه meniscus همراه با جدا شدن کامل پوشش کروم است. حضور تنش های حرارتی بالا نزدیک منطقه meniscus به علت گرادیان حرارتی بالا در این منطقه است که این تنش های حرارتی متناوب سبب پدیده خستگی حرارتی می شوند.

مشاهدات میکروسکوپی نشان می دهد که پوشش کروم کاملاً در منطقه meniscus جدا شده است. اختلاف در ضریب انبساط حرارتی مس و کروم دلیل اصلی شکست پوشش است. این فرض شده است که بالاترین تنش ها در فصل مشترک بین زیرلایه و پوشش ایجاد می شود. پوشش کروم متحمل کاهش در سختی به دلیل قرارگیری در معرض دمای بالا می باشد که سبب کاهش خواص مکانیکی (خستگی و سختی) می گردد.

شکست پوشش منجر به نفوذ عناصر با نقطه ذوب کم (S ، Zn و Pb) شده که احتمالاً در طول انجماد فولاد به دلیل حلالیت کم اشان یا به دلیل تشکیل ترکیبات با نقطه ذوب کم می باشد. این عناصر که دارای نزدیکی بالایی با مس هستند در ترک های پوشش کروم نفوذ کرده و سبب نفوذ فلز مذاب می شود. در واقع در اثر جدا شدن پوشش مس در معرض تخریب با عناصر با نقطه ذوب کم قرار می گیرد. در نتیجه واکنش این عناصر با مس سبب تشکیل فاز ترد در نوک ترک می شود که سبب بهبود گسترش ترک از نوع ترک خستگی حرارتی می شود. گسترش ترک سبب رشد دانه زیر لایه مس و کاهش تافنس موضعی می شود. رشد دانه می تواند در نتیجه قرار گیری در معرض قرارگیری در دمای بالا به مدت طولانی بعد از فرآیند تبلور مجدد باشد.