



شده‌اند قادر به تولید شمش فولاد ساختمانی بر اساس استانداردها و کیفیت قابل قبول در سطح جهانی نیست و اساساً زیرساخت تکنولوژی آنها امکان استفاده از تجهیزات و تکنولوژی‌های به روز دنیا را نمی‌دهد.

آگاهی از این تکنولوژی‌ها و دستاوردها می‌تواند منجر به رشد و بهبود صنعت فولاد کشور گردد.

همزن الکترومغناطیسی (EMS)

همزن الکترومغناطیسی در ریخته‌گری مداوم برای بالا بردن کیفیت و بهبود تولیدات مورد استفاده قرار می‌گیرد.



همزن الکترومغناطیسی معادل استاتور موتور سنکرون می‌باشد. مبدل‌های فرکانس (کانورترهای فرکانس) به طور کلی به صورت سه فاز و بعضاً دو فاز عرضه می‌گردند.

تأثیر همزن های الکترومغناطیسی بر کیفیت شمش در ماشین ریخته‌گری مداوم

امیرحسین یوسف‌زاده کارشناس مهندسی فروش گروه پاترون

مرتبط است. عدم همگنی آنالیز شیمیایی، جدایش مرکزی، ترک‌های مرکزی، حفرات مرکزی از عیوب تأثیرگذار بر کیفیت محصولات نهایی است. هر چه کاربردهای محصول نهایی خاص‌تر و حساس‌تر باشد، اهمیت این عیوب و تلاش برای رفع آنها اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. عیوبی همچون عدم همگنی آنالیزی، انواع ترک‌ها، پلیسه‌شدن و پارگی در محصولات نهایی با استفاده از همزن الکترومغناطیسی رفع خواهد شد. ضرورت انتشار این مقاله از این جهت است که متأسفانه بخشی از صنعت فولاد کشور که در حال تولید شمش فولادی است، به خاطر استفاده از تکنولوژی‌های منسوخ ریخته‌گری مداوم که عموماً با تجهیزات هندی و چینی وارد کشور

ماهنامه پردازش: در این مقاله ضمن ارائه توضیحاتی در رابطه با عیوب کریستالی شمش‌های فولادی، یکی از راهکارهای بر طرف کردن این عیوب با استفاده از سیستم همزن الکترومغناطیسی، عملکرد، مزایا و سپس بررسی آزمایشگاهی و نتیجه‌گیری از استفاده همزن الکترو مغناطیسی مطرح گردد. امروزه یکی از فاکتورهای مهم محصولات نیمه‌نهایی (semi-finished) که از فرایند ریخته‌گری مداوم به دست می‌آیند، مثل شمش، شمشال و تختال، کیفیت ظاهری و داخلی محصولات تولید شده است. کیفیت محصولات نهایی (finished) علاوه بر آنالیز شیمیایی مستقیماً به کیفیت ظاهری و درونی محصولات تولید شده

جدول ۱: اثرات متالورژیکی همزن‌های الکترومغناطیسی

نوع همزن	اثر متالورژیکی	گرید فولاد
همزن الکترومغناطیسی قالب (M-EMS)	افزایش ناحیه مرتبط با دانه‌های ممتد	فولاد کم آلیاژ
	کاهش حفرات و تخلخل‌های سوزنی شکل	فولاد فنر
	و ناخالصی‌های سطحی و زیر سطحی	فولاد نورد سرد
	یکسان‌سازی پوسته‌های شمش	فولاد کربن متوسط و کربن بالا
همزن الکترومغناطیسی میانی (S-EMS)	افزایش منطقه دانه‌های ممتد	فولاد ضد زنگ
	بهبود جدایش مرکزی	فولاد ابزار
	کاهش ترک‌های درونی	کاهش تخلخل‌های مرکزی و انقباض
همزن الکترومغناطیسی نهایی (F-EMS)	ایجاد ناحیه مرتبط با دانه‌های ممتد	فولاد ابزار فولاد بلبرینگ فولاد ویژه پر کربن
	کاهش تخلخل‌های مرکزی و انقباض	

این مبدل‌ها یک میدان مغناطیسی دوار تولید می‌کند که به صورت متناوب در داخل فولاد جریان‌های گردابی ایجاد می‌کند.

تعامل این میدان‌های مغناطیسی، تولید نیرو (نیروی لورنتز) می‌کند که نتیجه‌نهایی آن به وجود آمدن گشتاور و به هم خوردن ذوب می‌گردد. این نیرو به پارامترهای زیر وابسته است:

- ۱- شدت جریان تغذیه
- ۲- تعداد حلقه‌های تشکیل دهنده کویل
- ۳- فرکانس
- ۴- هندسه سیستم

این پارامترها بسته به نوع همزن الکترومغناطیسی تغییر می‌کند. در واقع این پارامترها در اندازه و موقعیت همزن تاثیر می‌گذارد. بسیار مهم است که اطلاعات ماشین ریخته‌گری پیوسته، گرید فولاد و پارامترهای ریخته‌گری مورد به مورد دسته‌بندی و طبقه‌بندی شوند.

دسته‌بندی همزن‌ها بر اساس موقعیت قرارگیری و تاثیر آن‌ها بر روی ریخته‌گری به این صورت است:

همزن الکترومغناطیسی قالب
M-EMS=Mould Electromagnetic (Stirrer)

همزن الکترومغناطیسی میانی
S-EMS=Strand Electromagnetic (Stirrer)

همزن الکترومغناطیسی نهایی
(F-EMS=Final Electromagnetic Stirrer)

همزن الکترومغناطیسی قالب

این همزن‌ها به ۴ دسته تقسیم‌بندی می‌شوند:

- ۱- همزن الکترومغناطیسی داخل قالب که از آب قالب بهره می‌برد: این همزن‌ها درون قالب نصب می‌شوند و از سیستم خنک‌کاری قالب استفاده می‌کنند و به راحتی عمل می‌کنند. (مناسب برای فرکانس ۲-۸ هرتز)

- ۲- همزن الکترومغناطیسی داخل قالب که از آب تمیز بهره می‌برد: این همزن در جلد قالب نصب می‌شود و سیستم خنک‌کاری مجزایی دارد. این سیستم دارای ساختار بهم پیوسته و دارای عمر طولانی می‌باشد. (مناسب برای فرکانس ۲-۸ هرتز)
- ۳- همزن الکترومغناطیسی خارج قالب: این سیستم در خارج قالب نصب می‌شود. تیوب مسی به راحتی تعویض می‌گردد. همزن در طیف گسترده‌ای از ابعاد می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. (مناسب برای فرکانس ۲-۵ هرتز)

- ۴- همزن الکترومغناطیسی خارج قالب با لوله‌های مسی خنک کن آب: این سیستم در خارج قالب نصب می‌شود. اما نشت مغناطیسی آن به قدری بالاست که به سلامت و محیط زیست آسیب می‌رساند. این سیستم نیاز به آب مقطر یا خالص دارد و بنابراین هزینه نسبتاً بالایی دارد.

گوناگونی برای بهینه‌سازی محصول با توجه به درخواست مشتری صورت می‌گیرد.

طراحی برای رسیدن به اهداف نهایی ذیل می‌باشد:

- ۱- اطمینان از بهره‌وری مطلوب اثرات مغناطیسی هیدرودینامیکی
- ۲- اطمینان از بهینه بودن خنک‌سازی همزن
- ۳- اطمینان از اندازه مناسب تمام اجزا برای جلوگیری از تحمیل بار اضافی موقت به سیستم. سیستم خنک‌کاری همزن به گونه‌ای طراحی می‌شود تا با فشار آب کم نیز کار کند. چرخش آب به گونه‌ای طراحی می‌شود که تعادل خوبی را برای یک توزیع حرارت بهینه تضمین کند و از جمع شدن حرارت بیش از حد در نواحی مختلف دستگاه جلوگیری کند.

این خنک‌کننده به نحوی طراحی می‌شود تا کمترین تفاوت دما را در درون همزن داشته باشد و از انبساط، ترک و شکاف جلوگیری کند. سیستم خنک‌کاری از پایین تا بالا همزن وجود دارد تا از اصطکاک و رسوب ذرات ریز در کویل‌ها جلوگیری کند تا طول عمر همزن را طولانی کند.

تاثیرات همزن الکترومغناطیسی بر کریستال‌های شمش ماشین ریخته‌گری

همزن‌های الکترومغناطیسی در ماشین ریخته‌گری مداوم، با بکارگیری نیروی مغناطیسی هیدرولیکی باعث به وجود آمدن فازهای جامد و کریستاله شدن ذوب می‌گردد.

از نقطه نظر فیزیک و شیمی این فرآیند به وسیله تعدادی از پارامترهای مناسب مانند مشخصات فیزیکی و گرمای جنبشی فولاد و همچنین مقادیر

(مناسب برای فرکانس ۴-۱ هرتز)

همزن الکترومغناطیسی نهایی

این همزن با میدان چرخشی در هسته مرکزی طولانی مورد استفاده قرار می‌گیرد. القای مغناطیسی مرکزی قدرت بالا و دامنه وسیعی از کاربردها را در بر دارد. تاثیر همزن باید به صورت متناوب و پایدار باشد. اثرات استفاده از یک یا ترکیب انواع همزن الکترومغناطیسی در جدول (۱) خلاصه شده است. بر اساس تکنیک FEM، طراحی‌های

شکل ۱: مقایسه‌ی ساختارهای ماکروسکوپی در زمان استفاده و عدم استفاده از همزن مغناطیسی



جدول ۲: اثرات استفاده از یک یا ترکیب انواع همزن الکترومغناطیسی

مدل همزن الکترومغناطیسی و ترکیب مدل‌ها	حفرات سطحی و زیر سطحی	ترک‌های سطحی و زیر سطحی	کاهش پارگی خط	ترک سطحی	استحکام ساختار و ترک‌های داخلی	جداسازی مرکزی	جداسازی V
M-EMS	+++	+++	++	++	++	++	+
M+F-EMS	+++	+++	++	++	++	+++	+++
M+S+F-EMAS	+++	+++	++	++	+++	+++	+++
M+S-EMS	+++	+++	++	++	++	++	++
S-EMS	/	/	+*	/	+	++	+***
S+F-EMS	/	/	+*	/	**	+++	++

۵ تا ۵۰ HZ می‌باشد. پیچیدگی مراحل بیشتر زمانی اتفاق می‌افتد که درجه حرارت به دمایی بالاتراز دمای ریخته‌گری افزایش پیدا کند تا به دمای بسیار پایین و دمای انجماد برسد. همچنین یک رنج وسیع از پارامترهای ساختاری و عملکردی وابسته به ماشین ریخته‌گری و همزن الکترومغناطیسی وجود دارد که این پارامترها به طور همزمان و دو طرفه می‌باشند.

سرعت مذاب به وسیله همزن الکترومغناطیسی (EMS) ایجاد می‌شود، در جاهایی از $0,1 \text{ m/s}$ تا 1 m/s هستند. پارامترهای همزن در یک طیف از مقدار و اندازه‌ها هستند و وابسته به ساختار و عملکرد فنی همزن‌ها می‌باشند.

توان خروجی اغلب بین 100 KW و 800 KW ، جریان برق بین 300 A و 1000 A ، ولتاژ تا 400 V و فرکانس ریخته‌گری شمش از 5 HZ

الکتریکی و مغناطیسی مشخص می‌شود. همزن الکترومغناطیسی مانع رشد بلورهای ستونی کریستال‌های شمش می‌شود و تمایل به ترک خوردگی را در طی ریخته‌گری و در دماهای پایین کاهش می‌دهد.

فرض کنید ماشین ریخته‌گری ای داشته باشیم تا با کمک آن همزن‌های الکترومغناطیسی را بررسی کنیم. یک همزن را بر روی قالب و همزن دیگر را زیر قالب قرار می‌دهیم تا تاثیر استفاده از همزن را در شکل‌گیری ساختار فولاد بررسی کنیم.

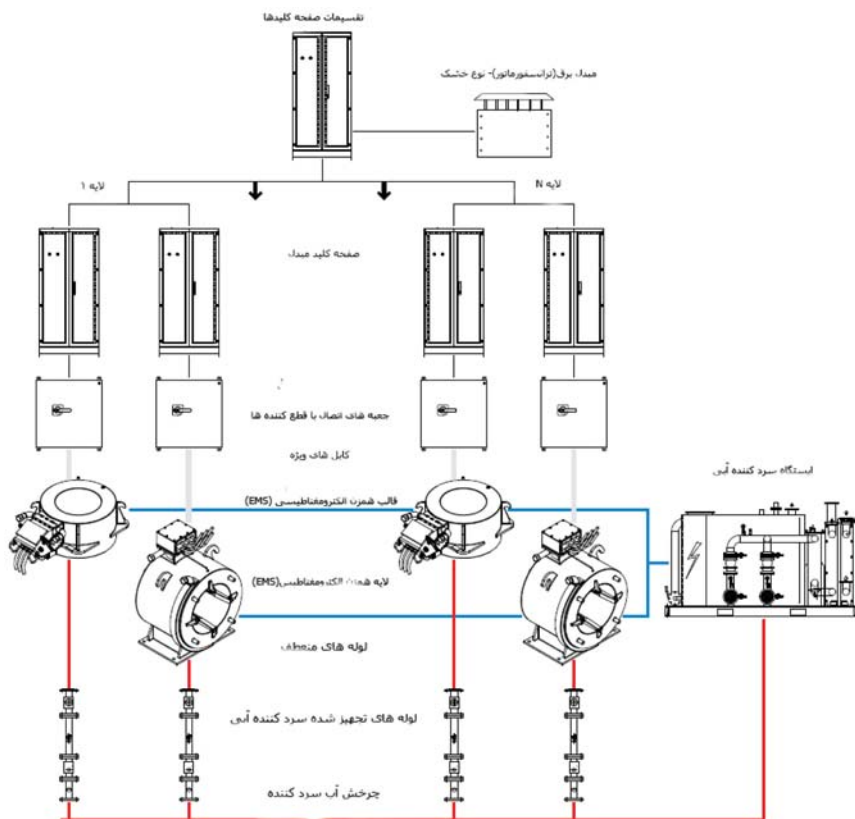
تعداد مشخصی از شمش‌ها را بدون استفاده از همزن و تعدادی را با خاموش و روشن کردن یکی در میان سوییچ‌ها آزمایش می‌کنیم. نمونه‌ها از قسمت‌هایی برداشته شدند تا ساختار دندریت وضوح بهتری داشته باشند.

زمانی می‌توانیم بالاترین بهره‌وری را داشته باشیم که از هر دو همزن به طور همزمان استفاده کنیم. بدین ترتیب که مشاهده خواهیم کرد رشد ستونی کریستال‌ها زمانی که از همزن‌ها استفاده نشد، بین $1/3$ تا $1/4$ از عرض شمش خواهد بود. تحقیقات تجربی نیز با نتایج به دست آمده از مدل‌های میدانی دما، ناهمگنی شیمیایی و نظریه‌های فیزیکی شباهت دارد.

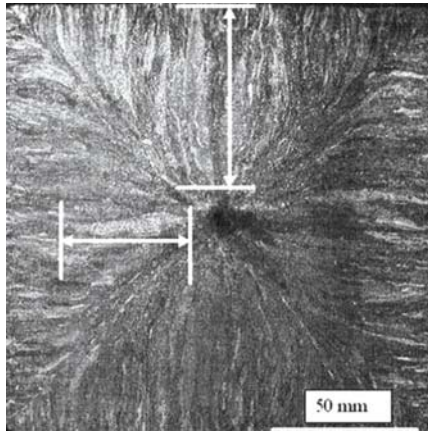
در حال حاضر در سیستم‌های همزن مذاب در ریخته‌گری از مولدهای دوار الکترومغناطیسی استفاده می‌شود. این مولدهای دوار یک میدان القایی دوار الکترومغناطیسی ایجاد می‌کنند که با یک القا (B)، که باعث بوجود آمدن جریان ادی (جریان گردابی) (J) با سرعت (V) در یک فاصله عمودی به B القا می‌کند.

القای B و جریان J یک نیروی الکترومغناطیسی ایجاد می‌کنند که این نیرو بر روی حجم فولاد کار می‌کند و یک تحرک در روند ذوب به وجود می‌آورد. حاصلضرب بردار $(V \times B)$ یک اتصال بین میدان الکترومغناطیسی و جریان مذاب را نشان می‌دهد.

شکل ۲: نمونه‌ای از یک سیستم توزیع همزن الکترومغناطیسی



شکل ۴: رشد دندریت در ساختار شمش بدون به کارگیری از EMS در حالت ۲A



گردیده است (برش عرضی برای نمایان شدن ساختار دندریت ایجاد شده است). سرعت ماشین ریخته‌گری به میزان m/min ۲,۷ در شرایط آزمایشگاهی در نظر گرفته شده است. طول شمش‌های مورد آزمایش در حالات مختلف و بر اساس ضریب طول متالورژی (ذوب فلزات) ثابت در نظر گرفته شده است. متوسط دمای بالاتر از دمای ذوب شمش‌ها (جدول ۳) $32,8 \pm 3,1$ درجه سانتیگراد در ذوب A و $28,0 \pm 4,6$ در ذوب B، درون یک بازه استاندارد از دماها در نظر گرفته شده است.

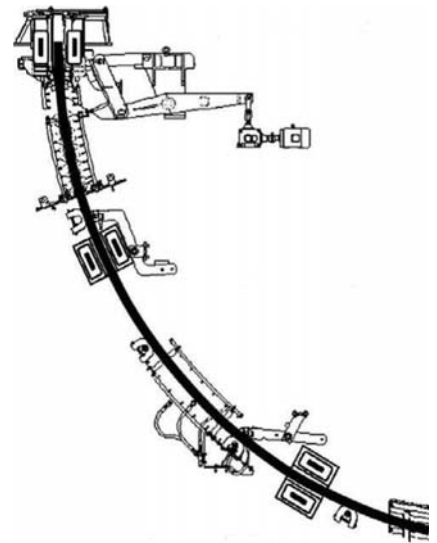
(S-EMS) زمانی کار می‌کند که مذاب به وسیله یک لایه از کریستال‌ها محیط و درون شمش را احاطه کرده باشد و در این زمان مذاب کمتری در منطقه بالای همزن اول وجود دارد.

در زمان خاموش بودن هر دو همزن، کریستالی و جامد شدن به طور نرمال ادامه پیدا می‌کند و منجمد شدن مذاب یک حرکت متلاطم را در بر نخواهد داشت.

برای بررسی اثرات همزن مغناطیسی، نمونه‌ها از قسمت‌هایی از قالب شمش در زمان کار همزن الکترومغناطیس قالب (M-EMS) و همزن میانی (S-EMS) بطور همزمان و همچنین در زمانی که از همزن‌های الکترومغناطیس استفاده نمی‌شود و یا یکی از همزن‌ها در حال کار می‌باشد؛ گرفته شده است. نمونه‌ها از مقطع عرضی شمش گرفته شده است. برای تایید تاثیر همزن الکترومغناطیس قالب (M-EMS) و میانی (S-EMS) بر روی ساختار کلی یا میکروسکوپی شمش، آزمایشی روی دو ذوب با ترکیبات شیمیایی مشابه انجام شد (جدول ۳).

در جدول (۴) اطلاعات تاثیر همزن الکترومغناطیس قالب (M-EMS) و میانی (S-EMS) در طول کار کردن ماشین ریخته‌گری در ۹ حالت نمونه‌برداری شده ثبت گردیده است. این اطلاعات با یک سابقه از ارتباط همزن الکترومغناطیس قالب (M-EMS) با اطلاعات مربوطه به طول‌های شمش و نکاتی از نمونه‌های واقعی که گردآوری شده، تکمیل

شکل ۳: موقعیت همزن‌های الکترومغناطیس (M-EMS) و (S-EMS)



مثالی از بررسی عملی جهت درک اثرات همزن مغناطیسی روی کیفیت شمش فولاد

فعالیت‌های بیشتری در سال‌های اخیر پیرامون مدلسازی همزن الکترومغناطیسی (EMS) در ماشین ریخته‌گری انجام شده است. در این مقاله به بررسی استفاده از دو همزن الکترومغناطیس در روی ماشین ریخته‌گری شمش و اثرات آن بر روی

جدول ۳: ترکیبات شیمیایی ذوب‌های آزمایشی (درصد وزنی)

نمونه ذوب	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	Ti
A	0.14	0.31	0.22	0.014	0.009	0.03	0.05	0.02	0.02	0.002
B	0.13	0.32	0.22	0.018	0.012	0.09	0.06	0.04	0.02	0.002

جدول ۴: نمونه ذوب و حالت نمونه‌برداری شمش

۱A	۳۷	A
۲A	۳۱	
۳A	۳۳	
۴A	۳۰	
۱B	۳۵	B
۲B	۳۰	
۳B	۲۷	
۴B	۲۴	
۵B	۲۴	

ارزیابی
ارزیابی تمام ۹ نمونه ریخته‌گری (جدول ۴) به این نکته اشاره دارد که آرایش یا چیدمان دندریت‌ها در سطح مقطع‌های مختلف، همان گرایش و زمینه‌ای را دارد که در اولین فاز کریستال شدن دنبال می‌کنند و آن ساختار توسط دندریت‌های ستونی نسبت به دیواره‌ها یا بدنه‌ی شمش ایجاد می‌شوند (شکل ۴).
درون شمش‌هایی که از سیستم همزن استفاده نشده است، دندریت‌ها به طور تدریجی در قطر با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند. رشدشان یا متوقف می‌شود یا دندریت‌ها به سمت قطرها تمایل پیدا می‌کنند.
دندریت‌ها به سمت قطرها خم می‌شوند و رشدشان در تمام مسیر تا مرکز شمش ادامه پیدا می‌کند. دندریت‌های ستونی که از قسمت میانی

کیفیت شمش‌های فولادی می‌پردازیم (شکل ۳). اولین همزن، همزن الکترومغناطیس قالب (M-EMS) نامیده می‌شود که به طور مستقیم بر روی ماشین ریخته‌گری نصب می‌شود و دومین همزن، همزن الکترومغناطیس میانی (S-EMS) نامیده می‌شود که به در ابتدای جریان مذاب در زون خنک‌کننده دوم نصب می‌گردد.

ساختار بیرونی شمش بوسیله یک لایه فشرده و یکنواخت کریستالی ایجاد شده است، هر چند که در مرکز شمش، مقدار قابل توجهی از مذاب وجود دارد که به وسیله همزن الکترومغناطیسی میانی مخلوط می‌شود.

شرایط آزمایشگاهی

اولین همزن الکترومغناطیسی (M-EMS) مذاب درون قالب را متلاطم می‌کند تا اینکه شمش جامد و کریستاله بشود. دومین همزن الکترومغناطیس

سطح باقی مانده است در جهت عمودی تا سطح شمش و در جهت مرکز شمش رشد می کنند.

در قسمت مرکزی سطح مقطع، یک حفره آشکار بروی تمام ریز ساختارهای ۹ مورد وجود دارد که یک انقباض یا چین خوردگی می باشد. این مکانیزم توضیح داده شده در مورد رشد دندریت ها در طول ریخته گری بدون همزن در شکل ۴ نمایان می باشد.

درون شمش ها، وقتی همزن الکترومغناطیس قالب یا هر دو همزن قالب و میانی استفاده می شود، حرکت و جنبش های منجمد شدن و رشد دندریت ها در ابتدا با حالت بدون همزن یکی می باشد. همچنین دندریت ها ستونی را ایجاد می کنند که در امتداد قطرها با هم تماس پیدا می کنند.

با این حال، خیلی زود رشدشان متوقف می شود. دندریت های با زاویه مساوی که دندریت های هم محور نیز نامیده می شوند به صورتی رشد می کنند که جهت یابی تنها در قسمت مرکزی به سمت شمش و به صورت کاملاً تصادفی باشد.

مکانیزم رشد این دندریت ها زمانی که هر دو همزن کار می کنند (جدول ۴- A, B, E, B) بیشتر می است. اگر هر دو همزن قالب و میانی به طور همزمان کار کنند تأثیرات همزن به طور قابل توجهی از شکل گیری کریستال های عمودی جلوگیری می کند. اگر تنها همزن قالب در حال کار کردن باشد و همزن میانی خاموش باشد (B1, A1) از کریستال شدن ستونی جلوگیری می شود. روش کار کردن همزن میانی به تنهایی (B3, A3) نمی تواند به طور آشکار تغییرات در ساختار دندریت ها را در مقایسه با عدم استفاده از همزن (A2, B2) نشان دهد.

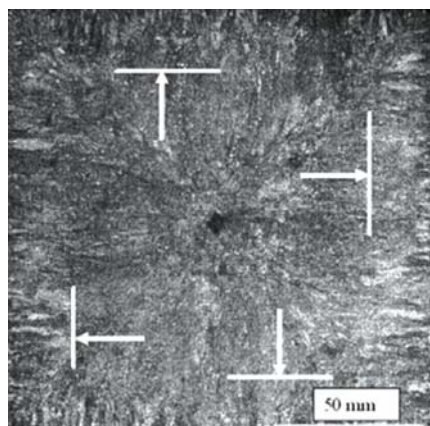
عمق نوارهای ستونی دندریت ها در امتداد یک مسیر از سطح شمش (شکل ۵) که مقدارشان 1.8 ± 0.23 می باشد (همزن SEMS و MEMS همزمان کار کنند) نشان داده شده است.

برای ریخته گری معمولی بدون استفاده از همزن عمق دندانه ها تقریباً 70 mm برآورد می شود (شکل ۴). ناخالصی ها در طول انجماد اغلب در نقاط تماس دندریت های در حال رشد مشاهده می شود. این اثر نامطلوب می تواند در امتداد قطر مشاهده شود که بین 100 mm تا 103 در مرکز انقباض صورت می گیرد.

این نقطه از تماس دندریت ها در طی کار کردن همزمان همزن S-EMS و M-EMS تنها 1.9 ± 0.84 در واقع ۳ الی ۴ بار کمتر می باشد. در منطقه مرکزی شمش یک حفره حاصل از انقباض مشاهده می شود که با رشد دندریت آن حفره پر می شود.

با فرض اینکه بیشترین عیوب (خلل و فرج، ناخالصی، مواد افزودنی، انقباض های ریز) در امتداد قطرها شکل گرفته است، این امکان وجود

شکل ۵: رشد دندریت ها در ساختار شمش که از همزن EMES و SEMS استفاده شده است



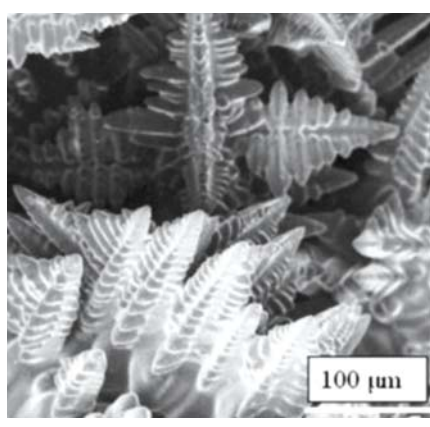
دارد که در گوشه ها به طور خاص روی لبه ها ترک ها بیشتر از دیواره های شمش باشد. اگر اولین تقریب از چقرمگی شمش مربوط به شمش ساخته شده از فولاد کم کربن $KIC \approx 75.0$ ریخته گری، طول تماس دندریت های ستونی در امتداد قطر به صورت تقریبی حدود 101.5 mm (شکل ۴) است.

از طرف دیگر، اگر دو همزن الکترومغناطیسی (S-EMS و M-EMS) به طور همزمان درگیر شوند طول تماس دندریت های ستونی در امتداد قطر به مقدار $1 \text{ el. mg} \Delta = 29.8 \text{ mm}$ (شکل ۵) است. در امتداد این طول می توان این انتظار را داشت که در طول ریخته گری، تمرکز ابتدایی عیوب افزایش پیدا خواهد کرد و بر اساس نظریه شکست مکانیکی باید از معادلات زیر برای محافظت از پیوستگی سطوح استفاده کرد:

$$\Delta l \text{ normal } / W \text{ (normal)} \sqrt{\pi \Delta l \text{ normal}} \varphi KIC \geq \sigma$$

$$\Delta l \text{ normal } / W \text{ (normal)} \sqrt{\pi \Delta l \text{ el. magn}} \varphi KIC \geq \sigma$$

شکل ۶ - دندریت ها در مرکز شمش



اولین معادله برای ریخته گری نرمال و بدون استفاده از همزن الکترومغناطیسی به کار برده می شود و دومین معادله در زمان استفاده همزمان از همزن های قالب و میانی مورد استفاده قرار می گیرد. اجزا $(\rho \Delta l / W)$ فاکتور اصلی است که اولین تخمین می تواند در هر دو معادله یکسان باشد بنابراین امکان دارد که معادله فشار و کرنش، در نقاط اوج دندریت ها که در امتداد قطرها در تماس هستند، برآورد شود.

$$\text{normal} = \frac{KIC}{\sqrt{\pi \Delta l \text{ normal}}} = \frac{75}{\sqrt{\pi * 0.0298}} = 245.1 \text{ MPa } (\sigma 1)$$

معادله (۱) محدود به فشار و کشش شمش های ماشین ریخته گری نرمال بدون استفاده از همزن الکترومغناطیسی می باشد.

$$\sigma \text{ normal} = \frac{KIC}{\sqrt{\pi \Delta l \text{ normal}}} = \frac{75}{\sqrt{\pi * 0.1015}} = 132.8 \text{ MPa } (\sigma 2)$$

معادله (۲) محدود به فشار و کشش در طول ریخته گری می باشد که از هر دو همزن S-EMS و M-EMS استفاده شده است. مقایسه همزمان حد تنش و کشش در شرایط یکسان نشان می دهد احتمال ترک خوردن شمش در زمانی که از همزن الکترومغناطیسی استفاده نمی کنیم، تقریباً دو برابر زمانی هست که از هر دو همزن استفاده می کنیم. مشاهدات طولانی مدت نشان می دهد استفاده از سیستم همزن الکترومغناطیسی ترک ها را در شمش به صورت قابل توجهی کاهش داده است.

نتیجه گیری

این تحقیق نتایجی از تایید آزمایشگاهی اثرات همزن الکترومغناطیس، بر روی ساختار دندریت در فولاد را در طول ریخته گری شمش را نشان می دهد. ۹ نوع مختلف از نحوه قرارگیری مجزا و ترکیبی سیستم های همزن الکترومغناطیسی مورد بررسی قرار گرفت.

سنگ زنی میکروسکوپی بر روی سطح مقطع شمش های نمونه برای مشاهده ساختار دندریتی صورت گرفته است. بالاترین میزان اثرپذیری همزن الکترومغناطیسی در زمان استفاده همزمان دو سیستم همزن M-EMS و S-EMS مشاهده شده است. این منطقه از دندریت های ستونی، بر محور عمود بر سطح های دیوارها، ضخامت حدودی $1/3$ تا $1/4$ ضخامت شمش را دارد.

در قسمت مرکزی شمش ها استفاده از همزن باعث می شود ساختار دندریت ها یکسان و مساوی شود و به طور کلی عیوب کریستالی در شمش را به صورت محسوس و قابل توجهی کاهش می دهد. ❏