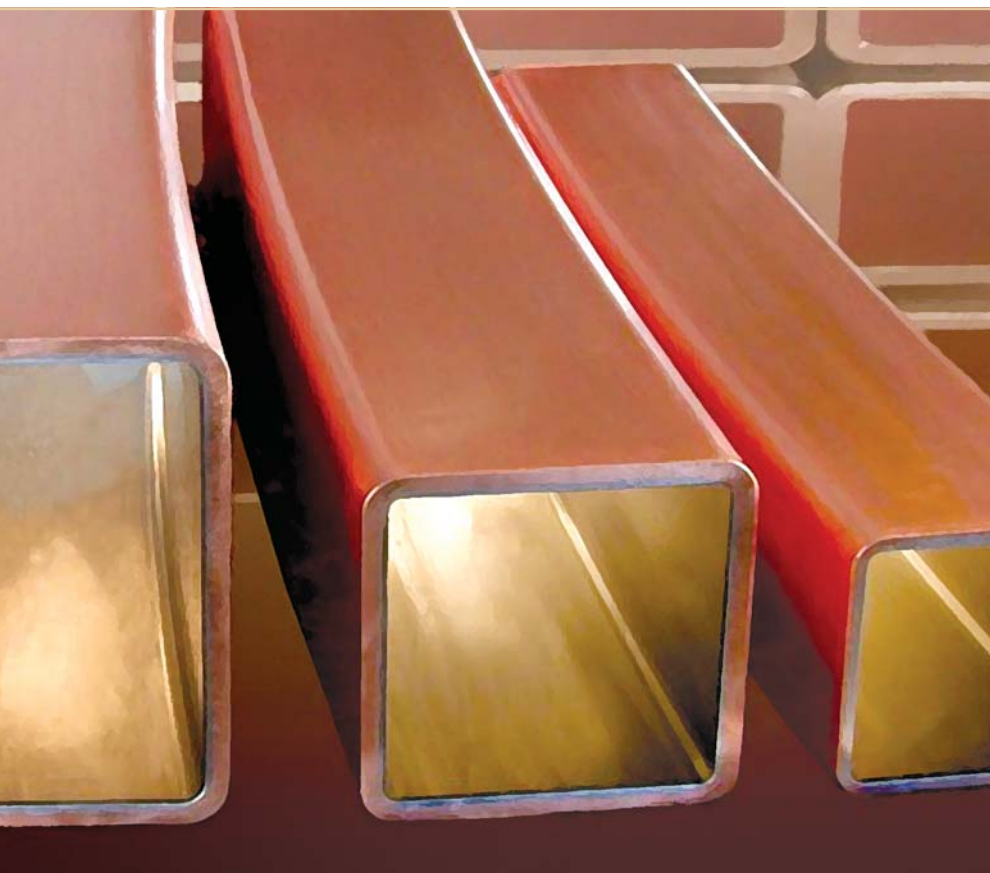


بررسی آسیب‌ها و صدمات تیوب مسی در ماشین ریخته‌گری مداوم

امیرحسین یوسف‌بیگی کارشناس مهندسی فروش گروه پاترون



هنگامی که فرآیند آلیاژسازی مذاب در کوره تکمیل می‌شود، مذاب در پاتیل تخلیه شده و پس از آن برای ریخته‌گری راهی ماشین ریخته‌گری مداوم (CCM) می‌شود. مذاب به داخل تاندیش ریخته شده و پس از آن وارد تیوب مسی برای تولید شمش می‌شود. شکل‌گیری پوسته‌ای نازک و سخت در شکل (۱) قابل مشاهده است.

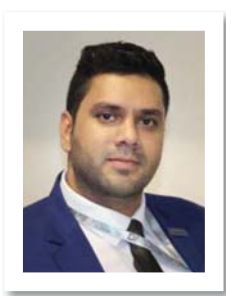
ماهانامه پردازش: عملکرد اصلی تیوب مسی، ایجاد یک پوسته مقاوم و با ثبات است که بوسیله سیستم خنک‌کاری موجود در قالب ایجاد می‌شود و سپس در ناحیه خنک‌کاری ثانویه به تثبیت کامل می‌رسد تا در مقابل فشار مذاب متمرکز در تیوب مسی مقاومت کافی داشته باشد.

اگر این سیستم به درستی کار نکند و فاز جامد به درستی شکل نگیرد مذاب هسته به بیرون نفوذ کرده و خرابی‌های بسیاری را برای ماشین ریخته‌گری مداوم بوجود می‌آورد.

تیوب مسی، ساختمانی شبیه قوطی دو سر باز از جنس مس با خلوص بالا و پوششی جهت

حفاظت داخلی (اغلب از جنس کروم) دارد که توسط سیستم خنک‌کاری موجود در قالب احاطه شده است. تیوب مسی می‌تواند در شکل‌ها و اندازه‌های مختلف (بیلت، بلوم، اسلب، اسلب نازک، لوله توپر و ...) و متناسب با نیاز ریخته‌گری مورد استفاده قرار گیرد.

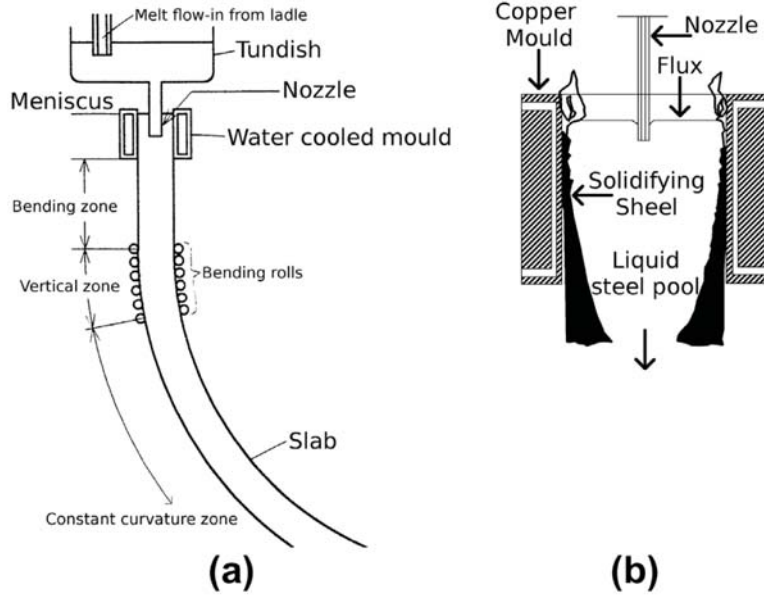
همانطور که در شکل (۱) (b) مشاهده می‌کنید، معمولاً پودر قالب ریخته‌گری (CastingPat) یا روغن به عنوان یک روانکار به سطح مذاب موجود درون تیوب مسی اضافه می‌شود تا موجب تسهیل عبور شمش از درون آن شود. با اضافه کردن پودر به سطح مذاب، این پودر با نرخ معینی ذوب شده



و یک سرباره‌ی شیشه‌ای مذاب تشکیل می‌دهد، این سرباره همانند یک فیلم نازک بین تیوب مسی و پوسته فولادی منجمد شده قرار گرفته و به عنوان

یک روانساز بین این دو عمل می‌کند، همچنین پودر مذکور عایق حرارتی بوده و موجب جذب ناخالصی‌های ذوب نیز می‌گردد. سطح داخلی

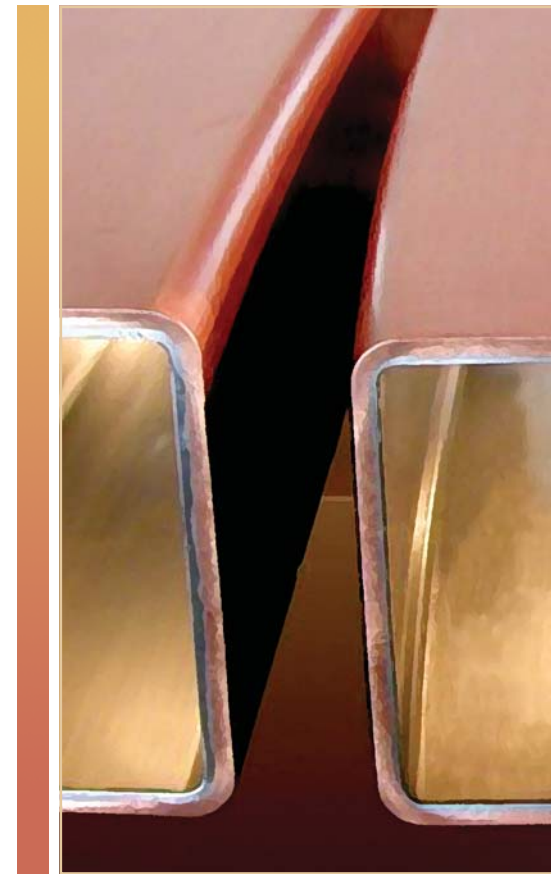
شکل ۱) طرحی از ماشین ریخته‌گری مداوم (a) و جزئیات قالب (b)



تیوب مسی که در تماس مستقیم با مذاب است، اغلب با پوششی از کروم یا نیکل برای داشتن سطح سخت‌تر و جلوگیری از کنده‌شدن مس در هنگام ریخته‌گری و جلوگیری از توسعه ترک‌های سطحی در محصول نهایی ریخته‌گری محافظت می‌شود. نگهداری تیوب مسی با قابلیت اطمینان بالا، بدون ترک و تولرانس ابعادی مناسب برای ایمنی و بهره‌وری بسیار مهم است.

گرادیان حرارتی شدیدی در سرتاسر تیوب مسی ایجاد می‌شود که باعث اعوجاج‌های هندسی قالب می‌شود و علاوه بر این، ساعت‌های طولانی کار در دماهای بالا باعث ایجاد خزش در تیوب مسی می‌شود.

این خزش با پدیده خستگی حرارتی همراه



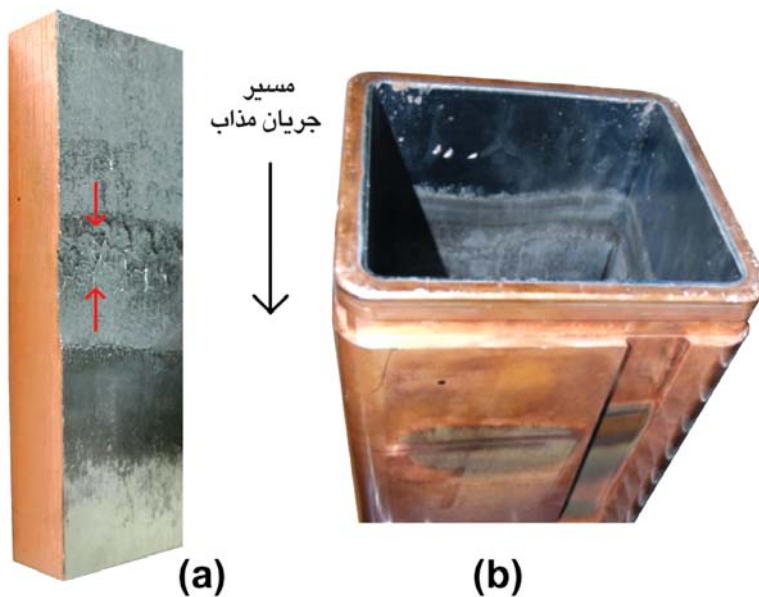
شکل ۲ - تیوب مسی آسیب دیده



در حال حاضر، هر دو پوشش فلزی و سرامیکی در دسترس هستند که اجازه می‌دهد طول عمر تیوب مسی افزایش یابد، اما به دلیل هزینه و مبادله حرارتی آن به طور گسترده استفاده نمی‌شود (برعکس، پوشش تیوب از نیکل یا کروم به صورت گسترده استفاده می‌شود). به دلیل تردی و مقاومت در برابر سایش، کروم بیشترین استفاده در تیوب‌سازی را دارد.

هدف از این تحقیق، تجزیه و تحلیل صدمات بوجود آمده برای پوشش تیوب مسی با تجزیه و

شکل ۳



قالب‌های آسیب دیده، در قسمت خارجی، رنگ مشخصی و متفاوت از رنگ اصلی شامل تیوب مسی کلی (a) و سطح آسیب دیده داخلی تیوب مسی با حذف پوشش کروم و ترک (b)

است که توسط درجه حرارت قالب و چرخه خنک‌کاری تیوب مسی در طی سکون‌س‌های ناپایدار اولیه و نهایی ذوب‌ریزی ایجاد می‌شود. بسیاری تلاش کرده‌اند تا این رفتار مکانیکی را به منظور درک بهتر نقش دینامیک ماشین در فرآیند آسیب دیدن تیوب مسی و پیش‌بینی آسیب‌های پنهان شبیه‌سازی کنند.

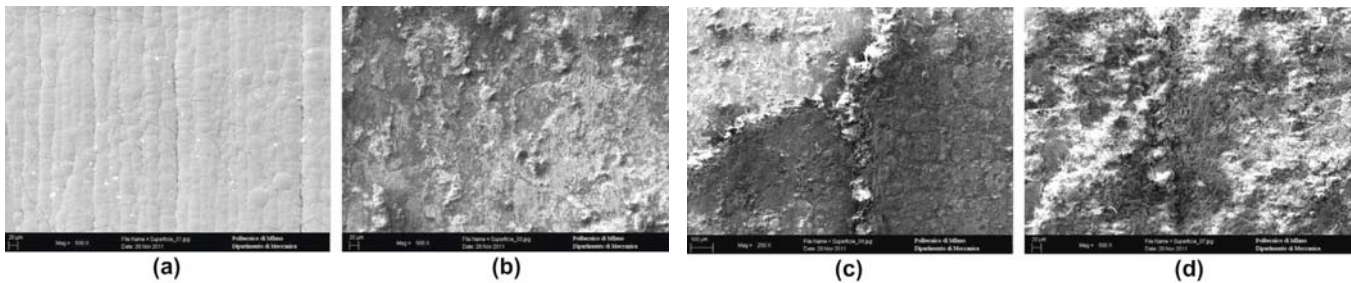
علاوه بر این، پدیده اصطکاک به طور بالقوه بین تیوب مسی و مذاب رخ می‌دهد. اصطکاک بین مذاب منجمد و قالب اساساً در سرتیوب مسی ایجاد می‌شود. این آسیب‌ها در نهایت می‌تواند باعث بروز عواقب فاجعه بار شود.

شکل ۴ - سطح مقطع تیوب مسی: اندازه‌گیری منطقه آسیب‌دیده (بزرگنمایی ۲۵ برابر)



تحلیل یک تیوب مسی با سطح مقطع مربع و ساخته شده از مس خالص و سخت‌کاری شده می‌باشد. تیوب مسی را با سطح مقطع ۱۵۰ میلیمتر در ۱۵۰ میلیمتر و ارتفاع ۱۰۰۰ میلیمتر در نظر می‌گیریم. این تیوب مسی در یک ماشین ریخته‌گری مداوم برای تولید شمش استفاده شده است و تنها یک

شکل ۵ - بررسی SEM در مناطق بدون آسیب (a) و آسیب‌دیده (b-d)



جدول ۱ - خصوصیات SEM-EDS تصاویر نشان‌داده شده در شکل (۵)

wt%	O	F	Si	S	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Sn	Pb
Picture (a)					99.56			0.44			
(b)	18.45	2.03	0.85	3.85	13.44	14.11	1.68		43.09		
(c)	11.78	1.42	2.01	23.66		19.75	4.70	6.38	20.16	8.92	
(d)	17.45	4.93	1.46	3.98		5.11	2.49	1.35	26.71		27.01

مشاهده می‌باشد. این صدمات حتی از سمت بیرون تیوب مسی نیز دیده می‌شود، جایی که تیوب مسی به دلیل قرار گرفتن در معرض دمای بالا رنگ معمولی خود را از دست داده است. با بررسی چشمی می‌توان فهمید دمای تیوب مسی به ۳۵۰ درجه سانتیگراد رسیده است. علاوه بر این، بخش داخلی تیوب مسی (پوشش کروم) دارای سطح غیر همگن بود. برای بررسی عمیق در امتداد عرض دیواره، نمونه‌ها از تیوب مسی برش داده شدند. از سطح سیاه نمونه‌ای برش داده شد و همانطور که بوسیله فلش قرمز در شکل (۳) نشان داده شده است، بسیاری از ترک‌ها در این منطقه دیده می‌شوند این ترک‌ها در امتداد محور قالب قرار گرفته‌اند.

موضوعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تجزیه و تحلیل متالوگرافی برای مشخص ساختن ریز ساختارهای تیوب مسی توسط میکروسکوپ نوری و SEM انجام می‌شود. تمامی نمونه‌ها پولیش و پرداخت می‌شوند. برای سایش و مس بری میکرونی (Micro-etching)، تیوب مسی را به مدت ۱۰ ثانیه در محلول اسید کلریدریک (۵۰ ml اسید کلریدریک + ۵ گرم کلرید آهن + ۱۰۰ ml آب) قرار داده، تست میکرو سختی و یکرز با بار ۳۰۰ گرم در زمان ۱۵ ثانیه انجام شد.

۲ - بررسی و نتایج

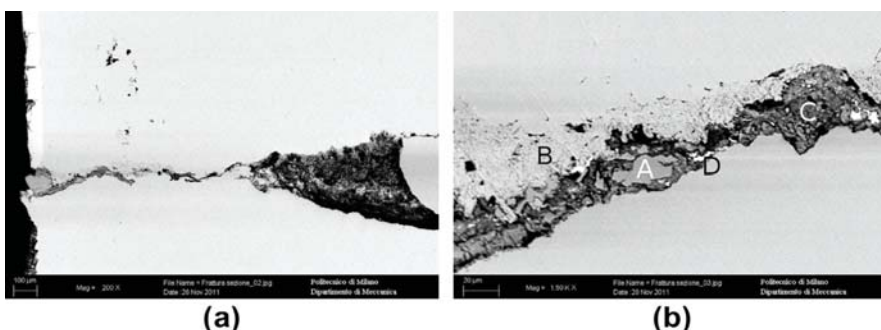
در تیوب مسی مورد بررسی تقریباً بیشترین صدمات در ۱۳۰ میلیمتر از بالای تیوب قابل

نمونه از تیوب مسی‌های مختلفی است از شمار زیادی از تیوب مسی‌هایی که تحت تاثیر این پدیده قرار گرفته‌اند.

۱- روش تجربی

همانطور که در شکل (۲) تیوب مشاهده می‌کنید تیوب مسی در سطح دچار آسیب جدی بخصوص در ناحیه قوسی شکل شده است. پس از بررسی کامل چشمی از تیوب مسی، نمونه‌های مختلفی برای انجام تست بوسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح آسیب دیده برش داده شد. SEM به یک پروب اسپکتروسکوپی پراکنده انرژی (EDS) مجهز می‌باشد که برای انجام تجزیه و تحلیل شیمیایی

شکل ۷ - بررسی SEM در ناحیه آسیب‌دیده، جزئیات ترک



شکل ۶ - بررسی SEM در ناحیه آسیب‌دیده



جدول ۲ - خصوصیات SEM-EDS در نواحی نشان داده شده در شکل (۶) - (۸)

wt%	O	F	Si	S	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Pb
Picture										
Fig. 6A								35.21	64.44	
Fig. 7(b) A						1.21	95.21	0.93	0.81	
Fig. 7(b) B	1.80						0.56	97.34		
Fig. 7(b) C	10.78	5.23		18.94		4.87	0.97	13.01	44.33	
Fig. 7(b) D	8.96					1.35	0.82	4.58	7.65	75.33
Fig. 8A					100					
Fig. 8B								39.57	60.43	
Fig. 8C								100		

آلیاژ برنجی (نوع c) در تیوب مسی دارند. این آلیاژ برنجی باعث کاهش سختی تیوب مسی و همچنین هدایت الکتریکی فیزیکی (هدایت حرارتی و الکتریکی) و خواص شیمیایی (مقاومت خوردگی مذاب) می شود. تجزیه و تحلیل SEM یک لایه برنجی را در سطح تیوب مسی (شکل ۶) و جدول (۲) نشان داده است. بسیاری از ترکها شناسایی شدند، اما دو مورد از آنها بیشتر مشخص شد. علاوه بر روی، علاوه بر روی، بسیاری از دیگر ناخالصی های باقی مانده (به عنوان مثال Fe, S و pb) به دلیل نفوذ مذاب در ترک شناسایی شد و در جدول (۲) نشان داده شده است. ترک نشان داده شده در شکل (۸) ایجاد پوشش برنجی را بر روی سطح کروم آسیب دیده نشان می دهد که در نتیجه انتشار روی در محل مس شکل گرفته است. دگرگونی در مرکز سطح مقطع (شکل ۹) برای شناسایی ترکیب شیمیایی پوشش در مناطق بدون آسیب (a) و آسیب دیده (b) ارائه شده



توجهی روی در این نواحی را نشان داد. روی با قراضه وارد مذاب می شود اما در نهایت و در طی عملیات ذوب و آلیاژسازی تبخیر می شود. با این حال، هنگامی که روی در مذاب در حال ریخته گری حل می شود، به تیوب مسی آسیب وارد می شود، این عناصر تمایل به تشکیل یک

به نظر می رسد منطقه سیاه لایه ای از اکسید آهن است که در دمای بالا به دست آمده است. در مقطع نمونه، یک ناحیه ۲۰ میلیمتری فرسایش یافته در تمام سطح قابل تشخیص است. شیار عمیق تر از صفحه کروم بود و این نشان داد که نه تنها به علت سایش کروم بلکه به علت فرسایش مس به علت نفوذ ذوب از طریق ترک است. تعدادی از نمونه ها به منظور بدست آوردن مشخصات ناحیه آسیب دیده جلا داده شدند. در شکل (۴) عکس چند جزئی میکروسکوپ نوری قابل مشاهده است.

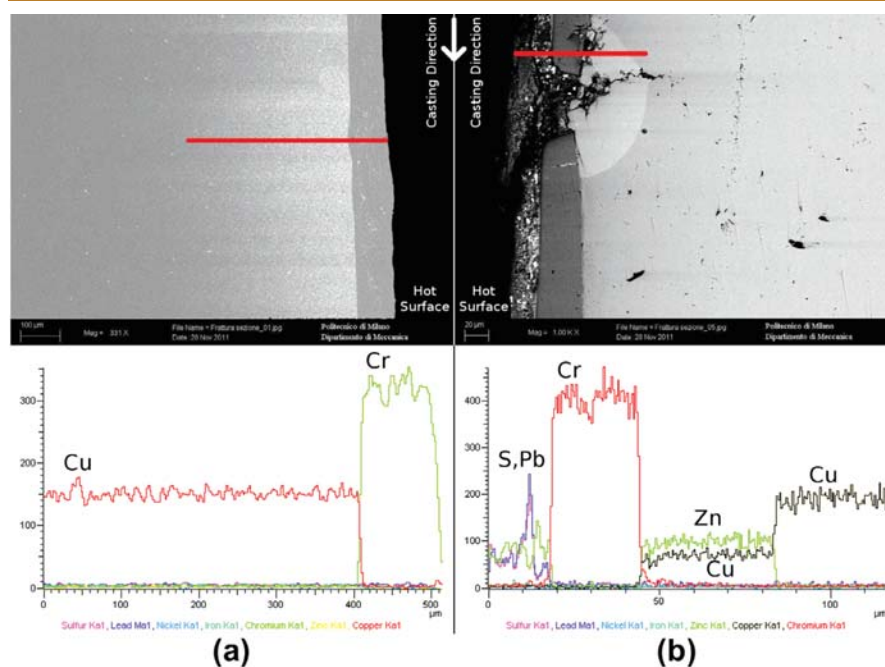
در این مشاهدات، ضخامت پوشش کروم و عمق شیار اندازه گیری شد. پوشش کروم حدوداً ۱۰۰ میلی متر ضخامت داشت و شیار ۰.۹۶ میلیمتر بود. در این مقطع بسیاری از ترکها شناسایی شدند بدین صورت که منشأ ترکها بر روی سطح آسیب دیده به صورت موضعی قرار داشت و سپس ترکها در ضخامت و عمق پخش می شوند. تجزیه و تحلیل SEM بر روی سطح آسیب دیده برای تشخیص ترکیب شیمیایی آن انجام شد. با بزرگنمایی وضعیت ناحیه آسیب دیده (شکل ۵a) پوشش کروم معمولی بود اما برخی ترکها قابل تشخیص بودند.

این ترکها گواهی بر فرآیند معمولی رسوب کروم بودند بر اثر تنش گرمائی ایجاد شده در شرایط کاری ریخته گری فولاد بودند. به طور خاص، سختی و در نتیجه آن مقاومت در برابر فرسایش کاهش یافت. این فرسایش می تواند به طور بالقوه باعث تخریب کامل پوشش شود. در شکل (۵b-۵d) ناحیه آسیب دیده در حالتی که پوشش کروم کاملاً از بین رفته و وضعیت سطح

زبر و ناهموار است نشان می دهد. تجزیه و تحلیل EDS در نواحی شکل (۵) در جدول ۱ گزارش داده شده است. بر اساس تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی جدول (۱)، پوشش کروم در بخش فوقانی قالب (ناحیه آسیب دیده) دست نخورده باقی مانده است، زیرا دارای کروم در حدود ۱۰۰ درصد است.

در نواحی آسیب دیده بسیاری از عناصر موجود در مذاب، به عنوان مثال سیلیکون، منگنز و گوگرد و... مشاهده شد. علاوه بر این، EDS مقدار قابل

شکل ۹ - عناصر متمرکز مقطع در نواحی آسیب دیده (a) و بدون آسیب (b)

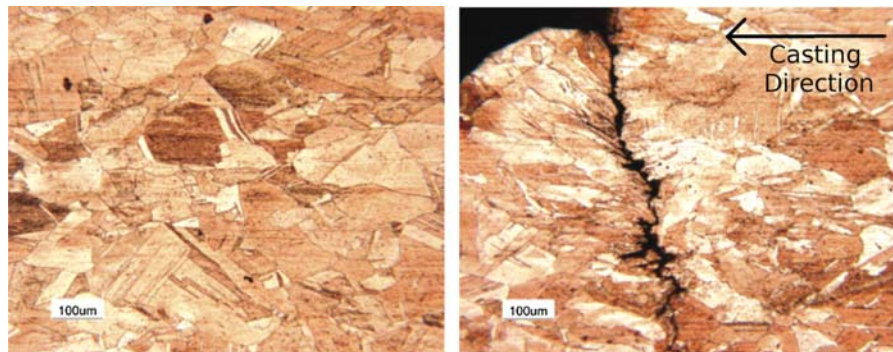


شکل ۱۰ - میکروساختار در ناحیه مرکزی تیوب مسی (a) و ناحیه آسیب‌دیده (b)

ماده سخت شده انرژی را به شکل عیوب شبکه‌های ذخیره کرده و نیروی محرکه برای تبلور مجدد به صورت انرژی ذخیره شده می‌شود. گرما در دماهای بالا و در فاز مذاب، انرژی حرارتی مورد نیاز خود را برای تبدیل مواد به وضعیت با انرژی پایین را از طریق فرآیند انتشار فراهم می‌کند. آسیب‌های شبکه داخلی در هنگام گرم شدن شدید، سختی کاهش می‌دهد.

۳- نتیجه‌گیری:

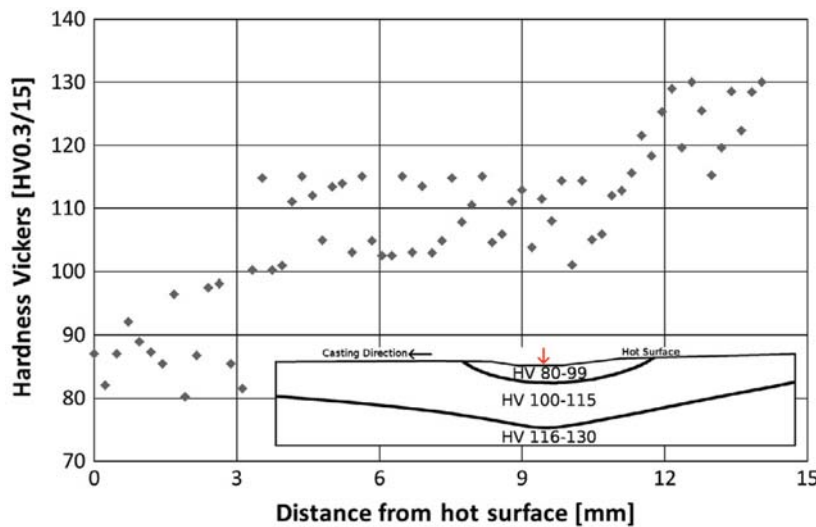
تجزیه و تحلیل صدمات در تیوب مسی ماشین ریخته‌گری منجر به درک بهتر مکانیزم آسیب‌ها شد. در ابتدا به علت فرآیند رسوب، پوشش کروم به طور طبیعی ترک می‌خورد و این ترک‌ها به



(a)

(b)

شکل ۱۱



مقطع میکرو سختی در امتداد مقطع تیوب مسی در نزدیکی ناحیه آسیب‌دیده و نمایش نمودار ریز سختی. فلش‌های قرمز نشان‌دهنده موقعیت داخلی مقطع است.

علت تنش‌های گرمایی ناشی از شرایط کاری تیوب مسی قابلیت انتشار دارد. علاوه بر این، دمای کاری بالا در تیوب مسی منجر به افزایش فرسایش کروم می‌شود. با ترک‌هایی که در سرتاسر ضخامت سطح نفوذ کرده است مذاب در تماس با مس باقی خواهد ماند و روی با مذاب پراکنده شده در سطح مس تشکیل یک آلیاژ برنج با مقدار بالای روی می‌دهد. هر دو پدیده تردی برنج و پدیده تبلور مجدد، دلیل نرم شدن مس و دلیل انتشار ترک است. آسیب مشاهده شده بسیار خطرناک است، زیرا می‌تواند ماشین ریخته‌گری مداوم را از بین ببرد. به همین دلیل باید از بالا رفتن میزان روی در مذاب جلوگیری کرد.

با توجه به اینکه نمی‌توان از ترک‌خوردگی طبیعی کروم، تنش‌های حرارتی و فرسایش پوشش کروم اجتناب کرد. ❌

است. برخی از جدایش پوشش کروم نیز در ترک‌خوردگی ثانویه ظاهر می‌شود. احتمالاً این به دلیل تغییر در خط رابط می‌باشد که باعث کاهش چسبندگی کروم شده است.

در شکل ۱۰ میکروساختار تیوب مسی پس از استفاده از پولیش مناسب در نواحی بدون آسیب و آسیب دیده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در شکل (۱۰a) میکروساختار یک نمونه را دور از منطقه آسیب‌دیده نشان می‌دهد که اندازه متوسط دانه‌بندی تقریباً ۱۰۰ میلی‌متر است.

بسیاری از مشاهدات دیگر بر روی نمونه‌ای که از منطقه آسیب‌دیده به دست آمده در شکل (۱۰b) نشان داده شده است. دانه‌ها بهتر از ناحیه آسیب‌دیده بودند و ترک‌ها در امتداد مرزهای دانه (ترک بین دانه‌ای) پخش شده بودند.

به دلیل ریز بودن دانه‌بندی در نزدیکی ترک‌ها فرآیند تبلور مجدد ریزساختاری قابل مشاهده می‌باشد. علاوه بر این در برخی از نواحی، در اثر تماس ذوب با مسوب شده است.

مطابق استاندارد (E112-96 (2004) و فرضیه تبلور مجدد در مورد اندازه دانه‌بندی‌ها، تعداد دانه‌ها در نواحی بدون آسیب تقریباً در حدود ۲/۵ و در مناطق آسیب دیده ۱/۷ است.

در ناحیه نزدیک آسیب دیدگی‌ها پایین‌ترین سطح سختی در حدود (HB ۸۰-۹۰) را به دلیل پدیده تبلور مجدد استاتیکی و رشد دانه‌ها نشان

