



چکیده:

قالب های مسی اجزای بسیار حساسی در ریخته گری پیوسته هستند به گونه ای که شرایط سطحی قالب تاثیر مستقیم بر کیفیت محصول نهایی می گذارد. حال اگر پوششی که ما بر روی قالب هایمان استفاده می کنیم دارای سختی مناسب نباشد و عمر کوتاهی داشته باشد این امر مستقیماً بر روی بازده خروجی ریخته گری پیوسته تاثیر می گذارد.

این مقاله به بررسی شکست قالب های مسی که توسط لایه کروم پوشش داده شده است می پردازد و بررسی های انجام شده نشان می دهد که شکست قالب های مسی عموماً به دلیل اصلی روی می دهد: شکست های ناشی از تنش های حرارتی که تحت شرایط کاری قالب اتفاق می افتد و شکست های که از نفوذ عنصر روی که از مذاب فولاد به درون لایه مسی نفوذ می کند ناشی می شود.

بررسی شکست قالب های مسی و خساراتی که به ماشین ریخته گری پیوسته وارد می شود

منبع : ELSEVIER.2014

ترجمه: محمد نعمت الهی



مقدمه:

فولاد بعد از مرحله تصفیه توسط پاتیل به سمت ماشین ریخته گری پیوسته فرستاده میشود و مذاب از درون پاتیل به درون تاندیش و از تاندیش به درون قالب مسی که توسط افشانک های آب خنک می شود ریخته می شود و همزمان مذاب شروع به انجماد پوسته ای می کند. (شکل ۱) حال وظیفه اصلی قالب ایجاد و تثبیت یک پوسته انجمادی مقاوم در برابر فشار مذاب است. اگر قالب به درستی عمل نکند و نتواند یک پوسته انجمادی مناسب تشکیل بدهد شکست رخ می دهد و باعث ریخته شدن فولاد مذاب روی ماشین ریخته گری می شود که شرایط خیلی خطرناکی ایجاد می کند. [۱،۲]

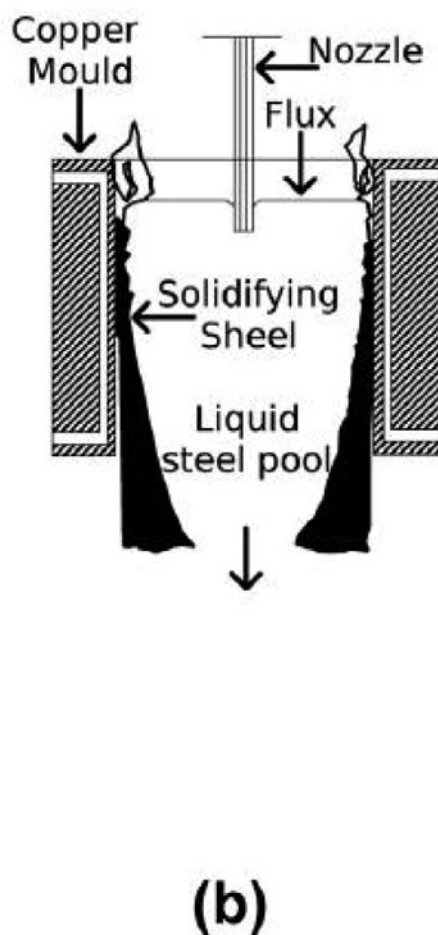
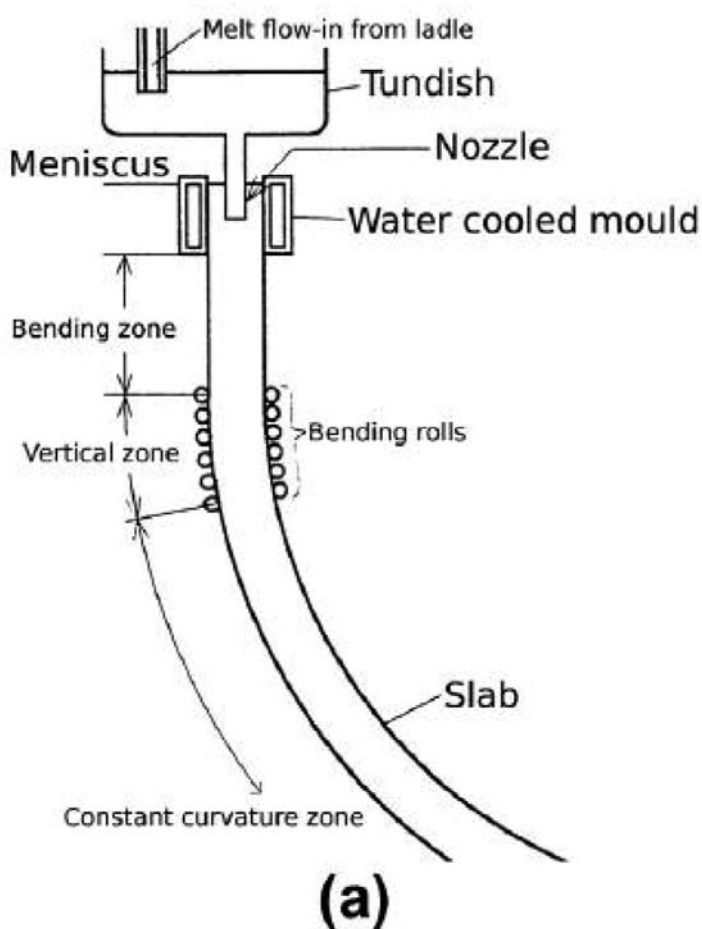
قالب مسی سازه ای است شبیه به یک جعبه که ۲ انتهای آن باز است که از عنصر مس با درصد خلوص بالا ساخته می شود و شامل مسیر های خنک شونده داخلی است که توسط آب خنک می شود. قالب های مسی شکل و اندازه های گوناگونی دارند و با توجه به شکل ریخته گری که می تواند بیلت، بلوم، اسلب و یا بیم

بلنک باشد انتخاب می شوند.

یک روغن روان کننده به درون قالب برای جلوگیری از ارتباط مستقیم بین فاز مذاب و قالب زده می شود تا از خسارات ناشی از تماس مستقیم بین مذاب و قالب جلوگیری شود.

برای ایجاد یک سطح سخت و جلوگیری از سایش مس سطوح داخلی قالب توسط کروم و نیکل پوشانده می شود زیرا سایش مس باعث می شود که محصول ریخته گری ما دچار عیوب مختلفی شود.

ترک هایی که بعد از مدتی روی لایه کروم و مس ایجاد می شد باعث شد که مطالعاتی بر روی رفتار های مکانیکی و حرارتی قالب انجام بگیرد. [۳،۷] شیب حرارتی که بین صفحات قالب وجود دارد ممکن است باعث تغییر شکل قالب شود. همچنین کار کردن زیاد قالب تحت دمای زیاد ممکن است باعث ایجاد پدیده خزش شود. این خزش همراه با پدیده خستگی حرارتی که در اثر سیکل های زیاد سرد و گرم شدن قالب در طول مراحل ریخته گری ایجاد می شود.



شکل ۱- ماشین ریخته گری پیوسته (a) جزئیات قالب (b)



محققان تلاش زیادی کردند برای شبیه‌سازی رفتارهای مکانیکی قالب و پیش‌بینی خسارات احتمالی که ممکن است سرباره به قالب وارد کند همچنین اطلاع از خساراتی که سیستم دینامیکی ماشین ریخته‌گری به قالب وارد می‌کند مانند اصطحاکاکی که بین قالب و قسمت نگهدارنده قالب وجود دارد همچنین ممکن است بین قالب و فولادی که در حال انجماد است اصطحاکاکی از نوع کشویی و چسبنده وجود داشته باشد.

امروزه از پوشش‌های سرامیکی و فلزی برای محافظت از قالب استفاده می‌شود. پوشش‌های سرامیکی عمر قالب را زیاد می‌کنند ولی به دلیل قیمت بالای آن و تبادل حرارتی پایین زیاد استفاده نمی‌شوند. در مقابل پوشش‌های فلزی پایه کروم و پایه نیکل علرغم این که ترد هستند و پایداری کمی دارند بیشتر استفاده می‌شوند. [۸]

این مقاله به بررسی ترک‌ها و شکست‌هایی که در قالب‌های مسی با مقطع مربعی و سایز ۱۵۰*۱۵۰ میلی‌متر و طول ۱۰۰۰ میلی‌متر که از فلز مس کار سخت شده با در صد خلوص بالا ساخته شده است و مورد استفاده در ماشین ریخته‌گری پیوسته برای تولید شمش بیلت است می‌پردازد. [۴،۵]

روش عملی:

شکل ۲ قالبی را نشان می‌دهد که در منطقه‌ای از داخل آن ترک دیده شده و دچار خسارت شده است. قسمت خسارت دیده برای بازرسی سطح به آزمایشگاه SEM برده شد. SEM مجهز به EDS، که می‌توانست ترکیب شیمیایی قسمت آسیب دیده را آنالیز کند. همچنین آزمایش متالوگرافی نیز برای بررسی ریز ساختار قسمت آسیب دیده توسط SEM و میکروسکوپ نوری انجام شد. نمونه توسط سمباده و پولیش آماده‌سازی شد و به مدت ۱۰ ثانیه درون محلول 5 g FeCl_3 , 50 ml HCl , 100 ml water (شکلی ۲) حکاکی شد.

بحث و نتایج:

منطقه خسارت دیده در فاصله ۱۱۰ میلی‌متری بالای قالب بود که حتی از بیرون قالب هم این منطقه به دلیل رنگ خاصی که پیدا کرده بود قابل تشخیص بود. این تغییر رنگ ناشی از کار کردن قالب تحت دمای خیلی بالا بوده است. (شکل ۲)



شکل ۲ - قالب آسیب دیده با مقطع مربعی

جایی که لایه محافظ کروم کاملا از بین رفته و سطح دچار سایید شده است. آنالیز ترکیب شیمیایی شکل ۵ در جدول ۱ گزارش شده است بر اساس این آنالیز (جدول ۱) لایه کروم دور تر از منطقه آسیب دیده کاملا سالم و بی عیب بوده زیرا درصد عنصر کروم در این قسمت نزدیک به ۱۰۰ درصد است. ولی در آنالیز شیمیایی قسمت آسیب دیده تعداد زیاد عنصری که در فولاد مذاب است شناسایی شد مثل سیلیسیم و منگنز و گوگرد.

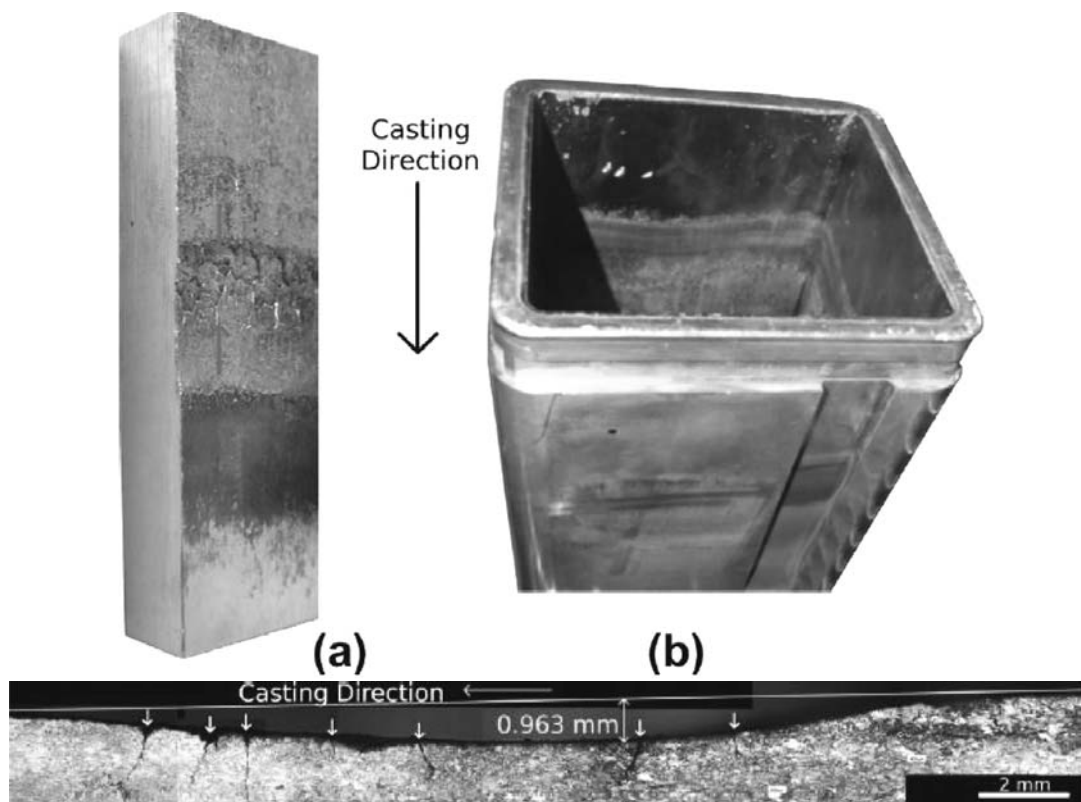
همچنین EDS در ناحیه آسیب دیده در صد هایی از عنصر روی شناسایی کرد. روی از طریق قراضه به درون فولاد مذاب وارد می شود ولی در طی عملیات تصفیه فولاد و متالورژی ثانویه حذف می شود. زمانی که مقداری از عنصر روی درون فولاد حل شده باشد از طریق نفوذ به درون لایه مسی قالب، تمایل به تشکیل آلیاژ های برنج دارد. این تشکیل برنج باعث کاهش چقرمگی و کاهش رسانایی الکتریکی و حرارتی می شود.

آنالیز SEM ناحیه آسیب دیده لایه ای از برنج را نشان داد (شکل ۶، جدول ۲) در این ناحیه تعداد زیادی ترک مشاهده شد ولی از بین آنها ۲ ترک نمایان تر بود. یکی از آنها ۲.۲ میلی متر طول داشت (شکل ۷-ا) و اطراف آن تبلور مجدد مشاهده شد. (شکل ۷-ب) علاوه بر روی ناخالصی هایی دیگری نظیر سرب، آهن در داخل ترک مشاهده شد که ناشی از تصفیه نامطلوب فولاد است (جدول ۳)

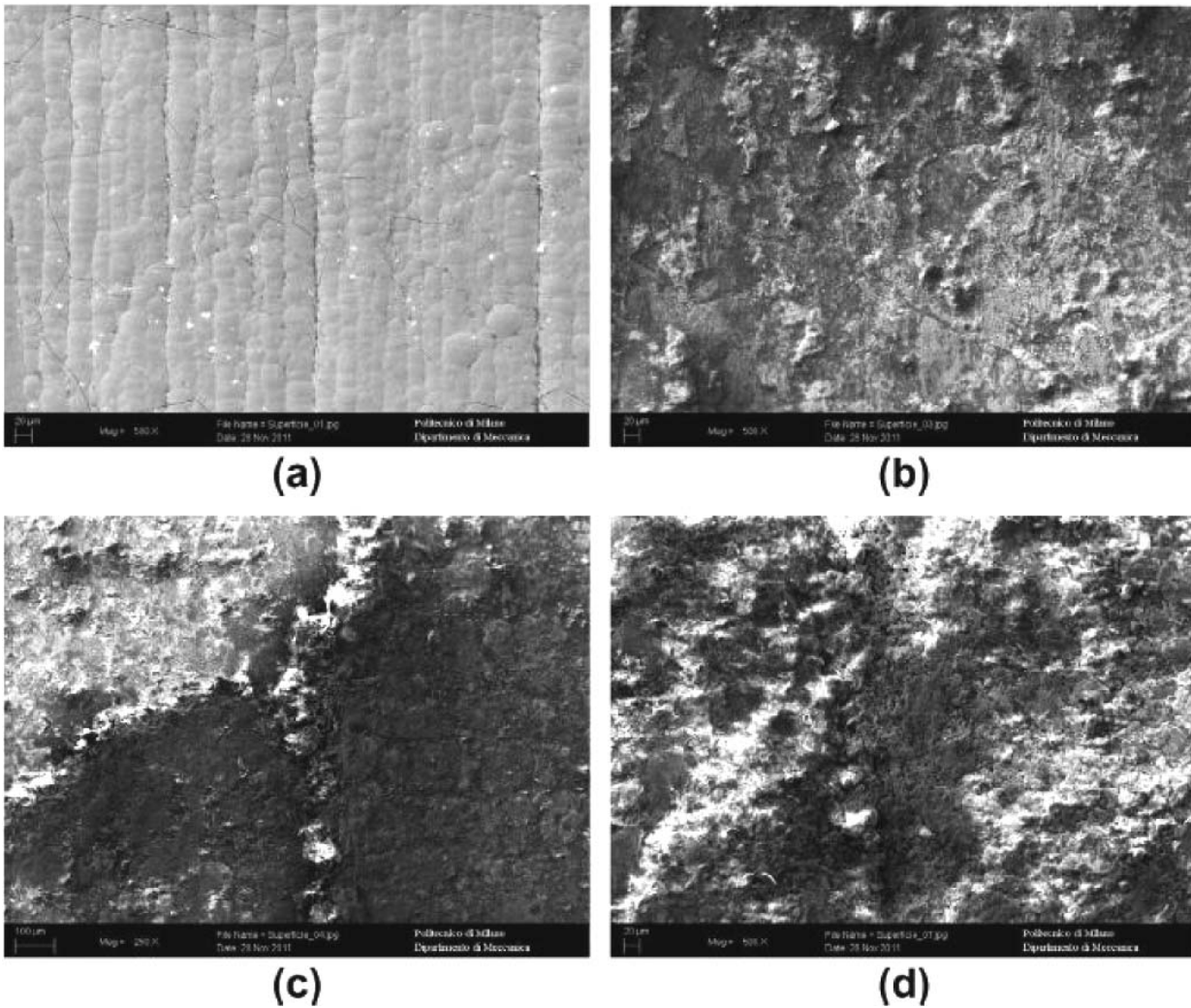
بازرسی چشمی سطح آسیب دیده نشان از سطحی نا هموار و غیر هم جنس میداد. با بررسی هایی که روی تکه جدا شده از عرض دیوار قالب انجام شد، یک نوار مشکی دیده شد که تعداد زیادی ترک در آن ناحیه دیده می شد. این ترک ها در شکل ۳ بین ۲ فلش قرمز نشان داده شده است. نوار مشکی به نظر می رسد که توسط اکسید های آهن که در دما های زیاد تشکیل می شود به وجود آمده است. ترک ها عمیق تر از لایه محافظ کروم بوده که نه تنها باعث خوردگی لایه محافظ کروم بلکه لایه مسی هم می شوند که باعث نفوذ مذاب فولاد به داخل ترک ها می شود.

نمونه ای که آماده سازی شده بود متالوگرافی شد و ضخامت لایه کروم و عمق منطقه آسیب دیده اندازه گیری شد. ضخامت لایه کروم $100 \mu\text{m}$ و عمق منطقه آسیب دیده $960 \mu\text{m}$ بود (شکل ۴). تعداد زیادی ترک در این ناحیه مشاهده شد و ترک ها از سطح شروع و به عمق نفوذ کرده بودند. آنالیز ترکیب شیمیایی منطقه آسیب دیده و منطقه سالم دور از منطقه آسیب دیده توسط SEM انجام شد. در بزرگنمایی های زیاد در منطقه سالم (شکل ۵-ا) فقط کروم شناسایی شد همراه با تعدادی ترک که حاصل تنش های حرارتی است که در اثر شرایط کاری قالب در ریخته گری پیوسته فولاد، ایجاد می شوند. نتیجه این ترک ها کاهش سختی و در پی آن کاهش مقاومت به خوردگی است. [۱۱، ۱۲]

این خوردگی و سایش در اثر از بین رفتن لایه محافظ کروم ایجاد می شود شکل ۵ (b, c, d) منطقه خورده شده را نشان می دهد



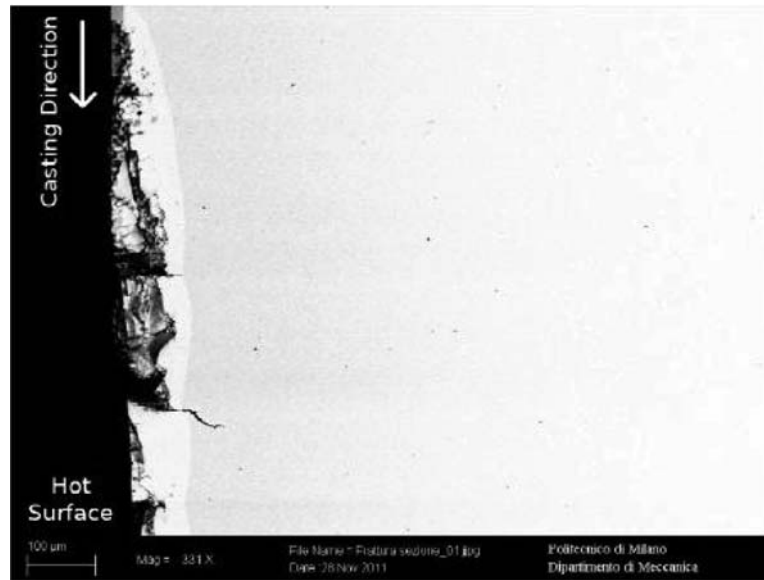
شکل ۴- مقطع قالب آسیب دیده برای اندازه گیری منطقه ای دچار خوردگی شده است



شکل ۵- نتیجه آزمایش SEM روی منطقه سالم (a) و منطقه آسیب دیده (b,c,d)

جدول ۱- SEM-EDS آنالیز برای شکل ۵، که شامل آنالیز شیمیایی منطقه سالم و آسیب دیده است

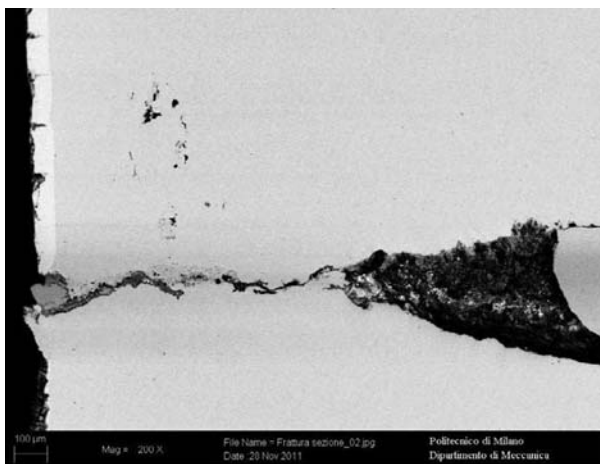
wt%	O	F	Si	S	Cr	Mn	Fe	Cu	Zn	Sn	Pb
Picture											
(a)					99.56			0.44			
(b)	18.45	2.03	0.85	3.85	13.44	14.11	1.68		43.09		
(c)	11.78	1.42	2.01	23.66		19.75	4.70	6.38	20.16	8.92	
(d)	17.45	4.93	1.46	3.98		5.11	2.49	1.35	26.71		27.01



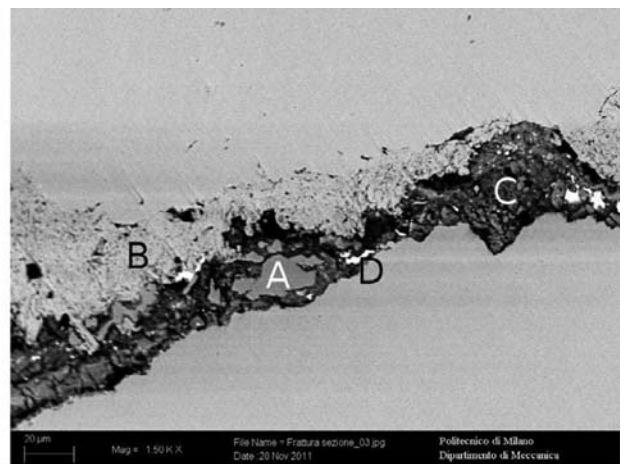
شکل ۶- آنالیز SEM بر روی منطقه آسیب دیده

جدول ۲- آنالیز شیمیایی SEM-EDS برای شکل های ۷ و 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		

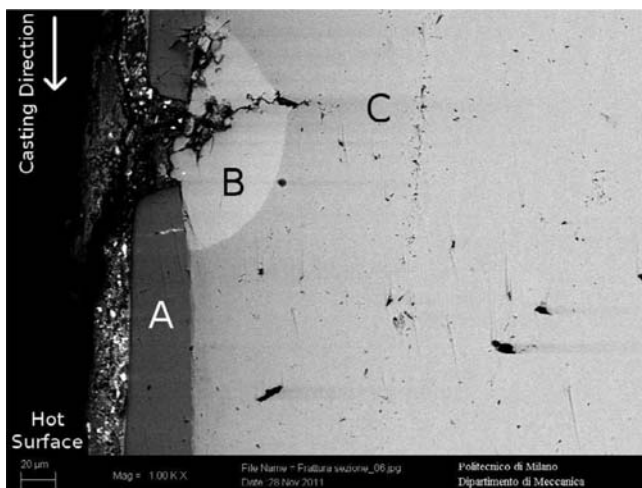


(a)



(b)

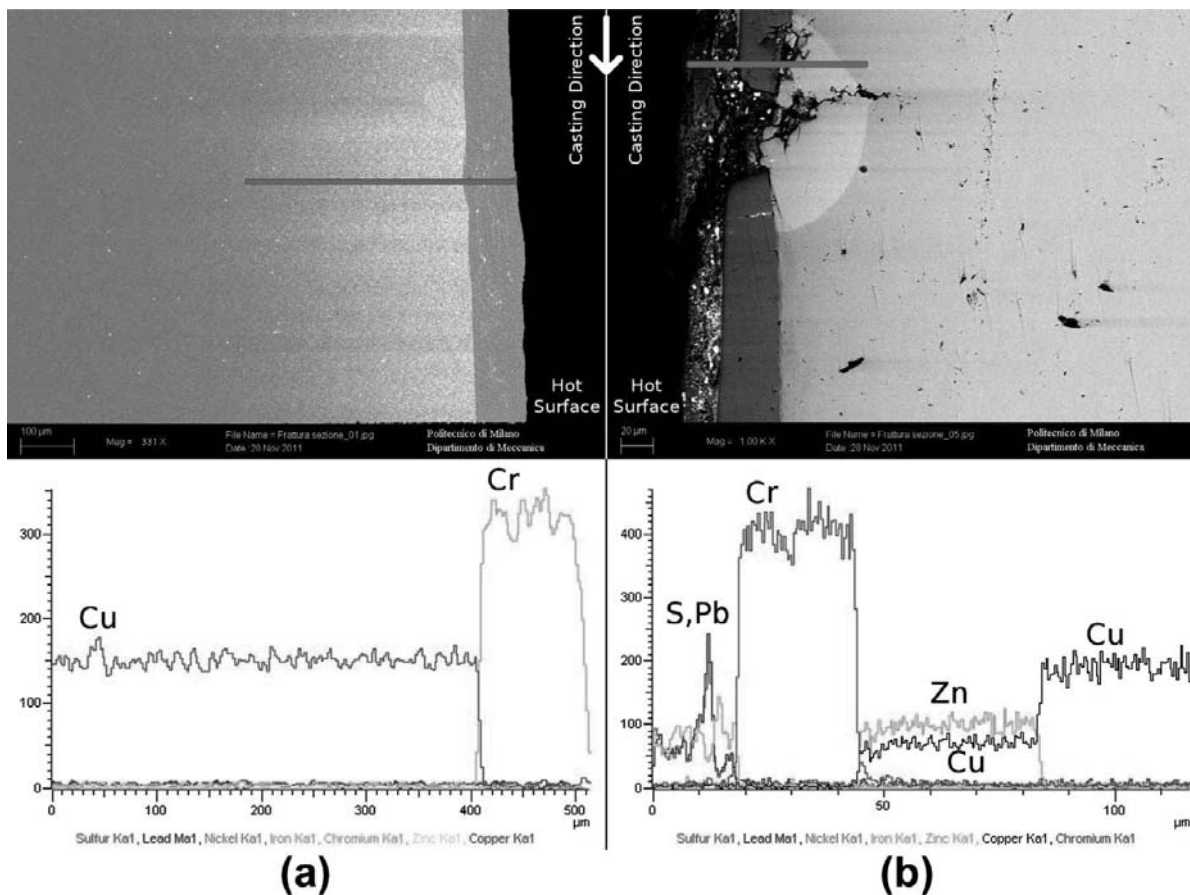
شکل ۷- آنالیز SEM بر روی قسمتی از منطقه آسیب دیده و جزئیات ترک



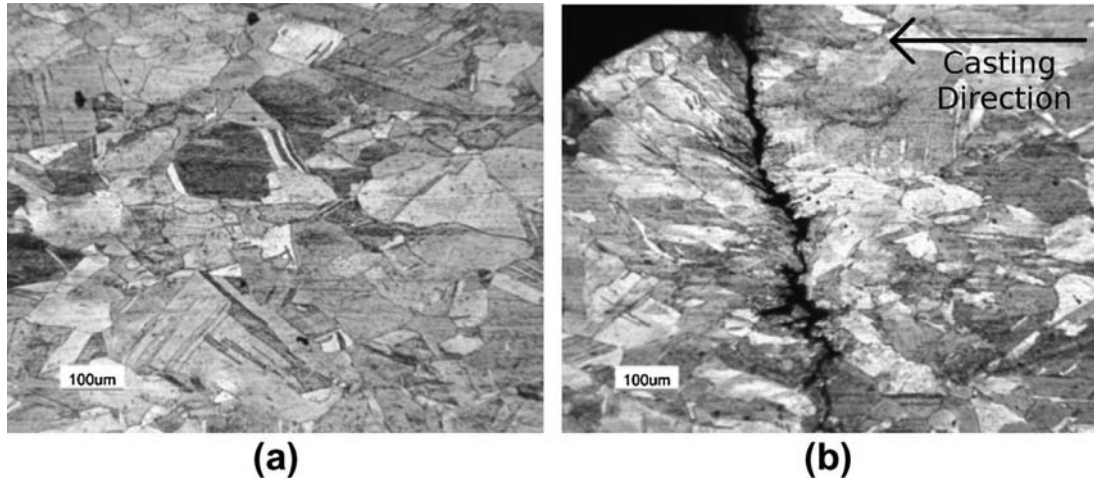
شکل ۸- آنالیز SEM روی قسمتی از منطقه آسیب دیده و جزئیات ترک

آزمایش متالوگرافی قسمت آسیب دیده و سالم نشان داد که قسمتی که آسیب دیده است اندازه دانه های کوچکتری نسبت به منطقه سالم دارد که باعث می شود ترک راحت تر بین دانه ها نفوذ کند. شکست مرز دانه ای (شکل ۱۰)

با توجه به ترک نشان داده شده در شکل ۸ روی از طریق ترک ایجاد شده به درون لایه مسی نفوذ کرده ولایه ای از برنج را تشکیل داده است. آنالیز ترکیب شیمیایی قسمت آسیب دیده و سالم برای فهم بهتر ترکیب شیمیایی قسمت آسیب دیده در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- آنالیز غلظت عناصر، (a) بر روی قسمت سالم، (b) بر روی قسمت آسیب دیده

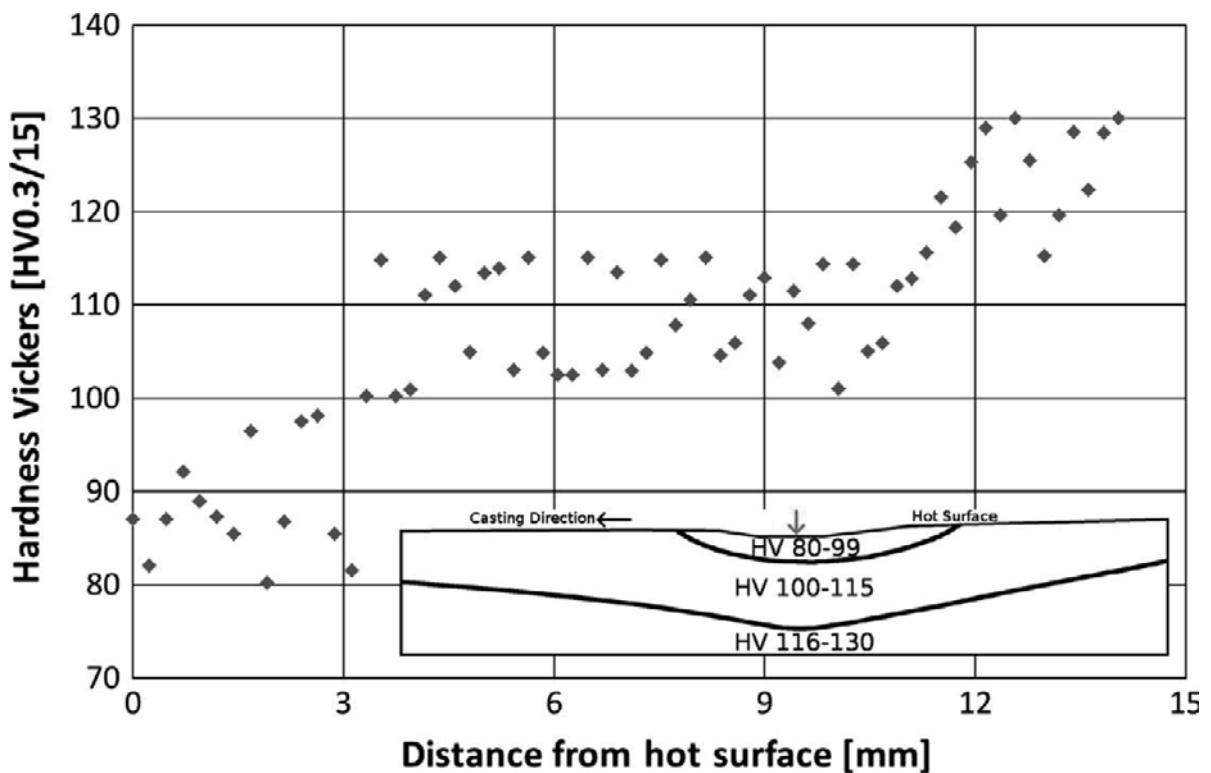


شکل ۱۰- (a) میکروساختار قسمت سالم و دور از منطقه آسیب دیده (b) قسمت آسیب دیده

به نظر می رسد که اطراف ترک به دلیل اندازه کوچک دانه تبلور مجدد رخ داده بود همچنین در برخی نقاط مس به دلیل تماس با فولاد مذاب، ذوب شده بود. سرانجام آزمایش های سختی سنجی به بهتر فهمیدن تاثیرات حرارتی که در اثر تماس فولاد مذاب با قالب، به قالب وارد می شود بهتر کمک کردند. [۲۱]

در منطقه نزدیک به منطقه آسیب دیده سختی کم (۸۰-۹۰ HV) مشاهده شد به دلیل تبلور مجدد که در اثر رشد دانه ها ایجاد می شود. در منطقه دور از قسمت آسیب دیده سختی در

حدود (۱۱۵-۱۳۰ HV) بود. بین این دو ناحیه سختی در حدود (۱۱۵-۱۰۰ HV) بود که تحت تاثیر حرارت زیاد قرار گرفته بود. این بدان معناست که تبلور مجدد در این ناحیه رخ داده است (شکل ۱۱). موادی که کار سخت می شوند انرژی نقص در چیده شدن را در خود نگه می دارند که این انرژی نیروی پیش رانی برای تبلور مجدد است. همچنین گرمای ناشی از دمای زیاد فولاد مذاب انرژی مورد نیاز برای فرآیند نفوذ و تبلور مجدد را فراهم میکند.



شکل ۱۱- نمودار سختی بر حسب فاصله از منطقه آسیب دیده و نمایش شماتیک از روند سختی

- [11] AA VV. ASM metals handbook, vol. 9. 9th ed. Material Park, Ohio: The Materials International Society; 1995.
- [12] Hadavia SMM, Abdollah-Zadehb A, Jamshidic MS. The effect of thermal fatigue on the hardness of hard chromium electroplatings. *J Mater Process Technol* 2004;147:385–8.
- [13] AA VV. ASM handbook, vol. 5. Material Park, Ohio: The Materials International Society; 1995 [1994].
- [14] Carter GF. Principles of physical and chemical metallurgy. Material Park, Ohio: The Materials International Society; 1979.
- [15] Clark DS, Varney FR. Physical metallurgy for engineers. New York: D. Van Nostrand Company Inc.; 1953.
- [16] Abbaschian R, Abbashian L, Reed-Hill RE. Physical metallurgy principles. 4th ed. Stamford: Cengage Learning; 2011.
- [17] Nicodemi W. Acciai e leghe non ferrose. 2nd ed. Milano: Zanichelli; 2008.
- [18] Loconsolo V, Nobili L. Il manuale degli ottoni. Milano: Consedit; 1995.
- [19] AA VV. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials, vol. 2. 10th ed. Material Park, Ohio: The Materials International Society; 1990.
- [20] AA VV. Alloy phase diagrams, vol. 3. Material Park, Ohio: The Materials International Society; 1990.
- [21] Humphreys FJ, Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena. 2nd ed. Oxford: Elsevier; 2004.
- [22] Campbell FC. Elements of metallurgy and engineering alloys. Material Park, Ohio: The Materials International Society; 2008

نتیجه گیری:

تجزیه و تحلیل شکست انجام شده در قالب های ریخته گری منجر به فهم بهتر مکانیزم شکست آن شد. اول اینکه لایه محافظ کروم به دلیل تنش های حرارتی زیادی که به دلیل شرایط کاری متحمل می شود دچار انقباض شدید می شود (Process Deposition) و به صورت طبیعی ترک دار می شود. همچنین دمای کاری زیاد قالب باعث افزایش خوردگی لایه کروم می شود. فولاد مذاب به هنگام تماس با قالب درون ترک ها می رود و در آنجا باقی می ماند. عنصر روی Zn موجود در مذاب فولاد به لایه مس نفوذ می کند و باعث تشکیل آلیاژ برنج با درصد بالای روی می شود. دو عامل تردی آلیاژ برنج و تیلور مجدد باعث نرم شدن مس و رشد ترک می شود.

آسیب هایی که بررسی شد و به قالب وارد میشود خیلی خطرناک است و ممکن است باعث شکسته شدن خط ریخته گری پیوسته شود. به همین علت غلظت عنصر روی حل شده در فولاد برای کمتر شدن این خسارات (ترک خوردن پوشش کروم، تنش های حرارتی) که اجتناب ناپذیرند بایستی کم شود.

منابع:

- Mapelli C, Nicodemi W. *Siderurgia*. 2nd ed. Milano: AIM; 2011.
- Irwing WR. *Continuous casting of steel*. London: The Institute of Materials; 1993.
- Thomas BG, Li G, Moitra A, Habing D. Analysis of thermal and mechanical behavior of copper molds during continuous casting of steel slabs, 80th steelmaking conference, (Chicago, IL, April 13–16, 1997), ISS Herty Award Page 1 of 19.
- O'Connor TG, Dantzig JA. Modeling the thin-slab continuous-casting mold. *Metall Mater Trans B* 1994;25B:443.
- Park JK, Thomas BG, Samarasekera IV, Yoon US. Thermal and mechanical behavior of copper molds during thin-slab casting (II): mold crack formation. *Metall Mater Trans B* 2002;33B:437.
- Gravemann H. Mould tubes with improved service life for continuous casting of steel. *Continuous Casting '85*. London: The Institute of Metals; 1985. p. 201–209.
- Li M, Stubbins JF. Creep fatigue behavior in high strength copper alloys. *J ASTM Int* 2005;2.
- Sanz A. Tribological behavior of coatings for continuous casting of steel. *Surf Coat Technol* 2001;147:55–64.
- Pandey JC, Raj Manish, Mishra Rajesh, Tripathy VK, Bandyopadhyaya N. Failure of nickel coating on a copper mold of a slab caster. *J Fail Anal Prevent* 2008;8:3–11.
- Brower JK, Rapp KD. Advanced alternative coatings for mold copper liners. Michael J. Powers, P.E, *Iron and Steel Technology*. July 2006.