

تأثیر عناصر آلیاژی بر ساختار و خواص مکانیکی چدن‌های پر سیلیسیم مقاوم به خوردگی

کامران شیرانی^۱، بهزاد نیرومند^۲، علی شفیعی^۲

۱- کارشناس ارشد، شرکت پایا مواد

۲- استادیار دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

چکیده

چدن‌های پرسلیسیم مقاوم به خوردگی با ۱۵ درصد سیلیسیم از ارزان‌ترین آلیاژهای مقاوم به خوردگی در محیط‌های اسیدی می‌باشند ولی ریخته‌گری این چدن‌ها بسیار مشکل است و ضایعات زیاد در روند تولید باعث افزایش قیمت آنها می‌شود. این تحقیق جهت بهبود بخشیدن به ساختار و خواص مکانیکی آلیاژ مذکور انجام شد. هشت ذوب چدن با ترکیب پایه یکسان با ۱۴/۵٪ سیلیسیم و افزودن عناصر آلیاژی Ca, Ti, Ni, Nb, Mo, Cr و Mg, Cu در قالب‌های ستاره‌ای با ضخامت مقاطع مختلف ریخته‌گری شدند. نتایج نشان داد نمونه حاوی ۱/۳ درصد مس دارای ساختار تقریباً یکنواختی در ضخامت‌های ۵، ۱۰ و ۳۰ میلیمتر است و حضور مس باعث می‌شود در همه ضخامت‌ها گرافیت‌های ورقه‌ای نوع A تشکیل شوند. تنش شکست برای این نمونه ۱۷۲ مگا پاسکال اندازه‌گیری شد که نسبت به بقیه ذوب‌ها بجز ذوب حاوی کرم-مولیبدن بالاتر بود.

کلیدواژه:

چدن پر سیلیسیم؛ عناصر آلیاژی؛ خواص مکانیکی؛ گرافیت لایه‌ای.

۱- مقدمه

فلئوریک دارد. مقاومت به خوردگی در این آلیاژ به علت ایجاد یک لایه مقاوم پسیو روی سطح فلز ایجاد می‌شود [۳،۴].

با توجه به مقدار سیلیسیم موجود در ترکیب همانگونه که انتظار می‌رود ریز ساختار این چدن‌ها شامل زمینه سلیکو فریت (فریت با مقدار زیادی سیلیسیم حل شده) و گرافیت‌های ورقه‌ای می‌باشد. ایجاد محلول جامد آهن و سیلیسیم در زمینه باعث ایجاد سختی حدود ۵۰۰ برینل

چدن‌های پرسلیسیم مقاوم به خوردگی با ۱۵ درصد سیلیسیم از ارزان‌ترین آلیاژهای مقاوم به خوردگی در محیط‌های اسیدی می‌باشند ولی ریخته‌گری این چدن‌ها بسیار مشکل است و ضایعات زیاد در روند تولید باعث افزایش قیمت آنها می‌شود. این چدن‌ها در سال ۱۹۰۸ میلادی ابداع شده و تاکنون کاربردهای وسیعی یافته‌اند [۱،۲]. این آلیاژ مقاومت به خوردگی خوبی در برابر اسیدها به استثنای اسید

جدول (۱): آنالیز نهایی ذوب پایه جهت تهیه مذابها

%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo
0.95	14.51	0.79	0.02	0.01	0.005

جدول (۲): آنالیز نهایی ذوبهای ۱ تا ۸

شماره ذوب	Mg%	Ca%	Ti%	%Nb	%Cu	%Ni	%Mo	%Cr	%Mn	%Si	%C
1	-	-	-	0.08	-	-	-	-	0.79	14.49	0.95
2	-	-	-	-	1.29	-	-	-	0.78	14.46	0.94
3	-	-	-	-	-	1	-	-	0.78	14.47	0.94
4	-	-	-	-	-	-	0.28	0.28	0.78	14.47	0.96
5	-	-	-	-	-	-	3	-	0.8	14.48	0.94
6	-	0.10	-	-	-	-	-	-	0.79	14.47	0.95
7	-	0.02	-	-	-	-	-	-	0.78	14.46	0.95
8	0.05	-	-	-	-	-	-	-	0.8	14.49	0.94

جدول (۳): نتایج حاصل از بررسی عکسهای متالوگرافی نمونه ذوبهای ۱ تا ۷ و نمونه اصلی در ضخامت ۳۰ میلیمتر.

ذوب	عنصر آلیاژی	کاربرد	گرافیت			
			نوع	حداکثر طول (μm)	تعداد*	درصد مساحت از کل سطح
1	Nb	-	A	240	99	5.5
2	Cu	-	A	103	68	5.0
3	Ni	-	A	300	134	8.5
4	Cr-Mo	-	A-D	100	-	-
5	Mo	*	A	198	45	7.2
6	Ti	-	A	210	94	5.7
7	Ca	-	A	151	90	5.3
Fabric	-	-	A-D-E	450	68	9

* تعداد در بزرگنمایی ۲۰۰ برابر

می‌شود، این افزایش سختی باعث کاهش شدید انعطاف‌پذیری و تردی این آلیاژ خواهد شد. از جمله کاربردهای این چدن‌ها ساخت قطعات مورد استفاده در صنایع تولید اسیدها و مواد شیمیایی، تولید کودهای شیمیایی، مواد منفجره، فاضلاب‌ها، تصفیه آب، اسید شویی فلزات، آندهای حفاظت کاتدی، صنایع کاغذ و... است [۲، ۵، ۶].

تا به حال تحقیقات زیادی جهت اصلاح خواص مکانیکی این آلیاژ انجام گرفته است ولی به علت کاربردهای نظامی و محدود بودن تولید کننده‌های چدن‌های پر سیلیسیم اطلاعات منتشر شده زیادی در این مورد وجود ندارد.

۲- مواد و روش تحقیق

در تهیه مذاب‌ها از ترکیب شیمیایی بهینه که در مرحله دیگری از این تحقیق بر اساس استاندارد ASTM 518 تعیین شده بود، به عنوان ذوب پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی ذوب پایه در جدول (۱) نشان داده شده است. عناصر آلیاژی مس، منیزیم، مولیبدن، نیوبیم، نیکل، کلسیم و کرم با توجه به تحقیقات قبلی منتشر شده، تجربه موجود در محل انجام تحقیق، تاثیر این عناصر در دیگر چدن‌ها و عیوب موجود در قطعات ریخته‌گری شده انتخاب شدند. سپس هشت ذوب با استفاده از شمش‌های اولیه ریخته شده با ترکیب شیمیایی پایه و افزودن این عناصر آلیاژی ریخته‌گری شد. جدول (۲) ترکیب شیمیایی ذوب‌های ریخته‌گری شده را نشان می‌دهد. در هر ذوب دو نوع نمونه ریخته‌گری شدند. یک نمونه میله‌ای شکل مربوط به تست خمش مطابق استانداردهای A518 و A438 و یک نمونه ستاره شکل جهت بررسی تاثیر سرعت سرد شدن بر ساختار (شکل ۱). ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها با روشهای استاندارد متالوگرافی و با استفاده از نرم افزار آنالیز تصویری بررسی و مشخصه‌یابی شد. علاوه بر آن ساختار نمونه‌ها با ساختار یک نمونه اصلی ریخته‌گری شده در کشور آلمان مقایسه شدند.

۳- یافته‌ها و بحث

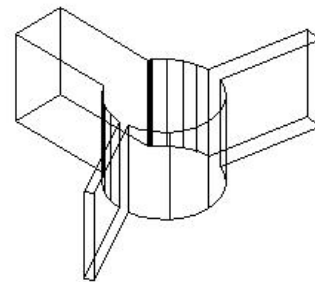
نتایج حاصل از بررسی ساختار متالوگرافی نمونه‌ها در جداول (۴ و ۳) نشان داده شده است. به طور کلی ساختار نمونه‌های ریخته‌گری شده شامل زمینه سیلیکوفریت و گرافیت‌های پراکنده در آن می‌باشد. ذوب ۸ حاوی منیزیم می‌باشد که باعث تغییر شکل گرافیت‌ها از حالت ورقه‌ای به شکل کروی و فشرده شده است. در برخی نمونه‌ها نیز فازهای دیگری در مقادیر کم تشکیل شده اند. گرافیت‌های موجود در نقاط مختلف با بزرگنمایی‌های مختلف بررسی شدند. در بیشترین ضخامت یعنی ۳۰ میلیمتر بزرگترین طول گرافیت ورقه‌ای مربوط به ذوب ۳ حاوی نیکل می‌باشد (شکل ۲). نیکل از جمله عناصر گرافیت‌زا در چدن‌ها می‌باشد. افزایش طول و تعداد گرافیت‌ها در ذوب ۳ نشان دهنده تأثیر مشابه این عنصر در چدن‌های پر سیلیسیم می‌باشد.

ذوب ۲ حاوی عنصر مس می‌باشد. مس خواصی مشابه نیکل در چدن‌های خاکستری دارد و با توجه به اینکه این دو عنصر در مقادیر تقریباً برابری به ذوب افزوده شده‌اند انتظار می‌رود تأثیر آنها در ساختار مشابه باشد ولی گرافیت‌ها در نمونه ذوب حاوی مس بسیار کوچکتر از ذوب ۳ هستند.

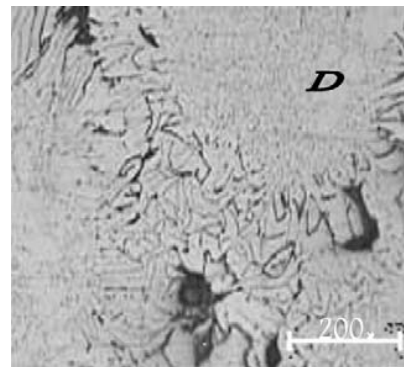
همچنین مقایسه طول بزرگترین گرافیت در نمونه ذوب‌های ریخته‌گری شده و ذوب ۲ نشان می‌دهد مس باعث شده طول گرافیت‌ها نسبت به دیگر نمونه‌ها نیز کمتر باشد (شکل ۳). از جمله عواملی که می‌تواند باعث کوتاه‌تر شدن گرافیت‌ها در ذوب ۲ شده باشد، تأثیر وجود همزمان مس و سیلیسیم در مذاب است. استوود و دیگران در سال ۱۹۳۶ بیان کردند مس در حضور کمتر از ۱/۷۵ تا ۲ درصد سیلیسیم باعث کاهش تمایل به تبرید می‌شود و در مقادیر بالاتر سیلیسیم، مس تبرید را افزایش می‌دهد. تحقیقات بارتون و دیزای نیز در سال‌های ۱۹۵۹ و ۱۹۶۰ نشان می‌دهد مس در صورت وجود کمتر از ۱/۷۵ درصد سیلیسیم در چدن خاصیت کاهش تبرید دارد [۷-۹]. با توجه به این موارد می‌توان کاهش طول گرافیت در حضور مس را به علت افزایش تمایل به تبرید در ذوب ۲ دانست که باعث اصلاح طول گرافیت‌ها شده است. با کاهش

جدول (۴): نتایج حاصل از بررسی عکس‌های متالوگرافی نمونه ذوب ۸

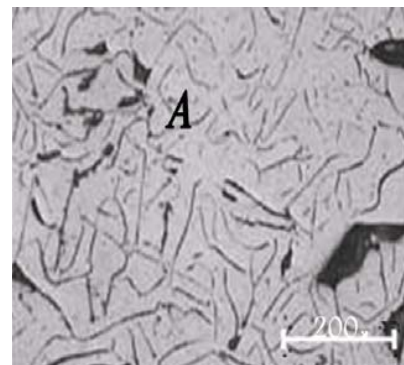
ضخامت (mm)	گرافیت		
	نوع	اندازه (میکرومتر)	درصد کروی شدن
5	کروی- فشرده	10	30
10	کروی- فشرده	10	30
30	کروی- فشرده	18	30



شکل (۱): نمونه ریخته‌گری شده برای بررسی تأثیر ضخامت.

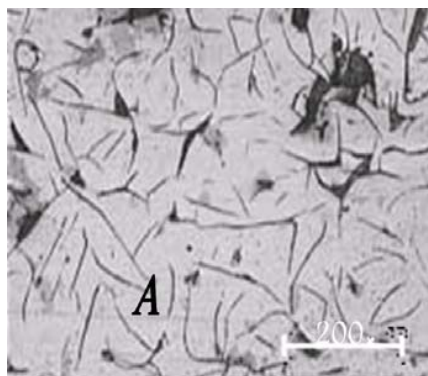


الف

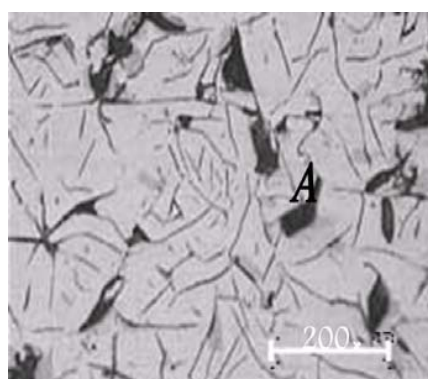


ب

شکل (۲): ساختار میکروسکوپی ذوب حاوی نیکل در ضخامتهای (الف) ۱۰ و (ب) ۳۰ میلیمتر.

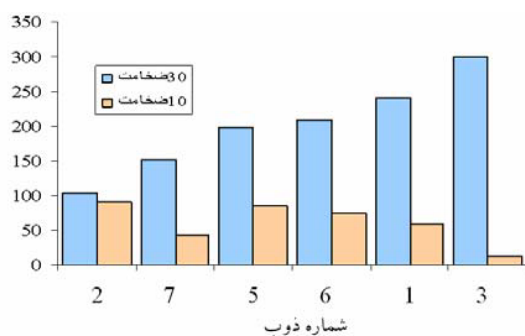


الف



ب

شکل (۳): ساختار میکروسکوپی ذوب حاوی مس در ضخامتهای (الف) ۱۰ و (ب) ۳۰ میلیمتر.



شکل (۴): تاثیر عنصر آلیاژی و ضخامت مقطع بر طول بلندترین گرافیت مشاهده شده در ساختار.

عرضی استفاده شد که نتایج آن در جدول (۵) ارائه شده است. در بین نمونه‌های آزمایش شده نمونه ذوب ۴ بیشترین مقاومت به شکست را داراست. این نمونه حاوی عناصر کرم و مولیبدن

ضخامت از ۳۰ به ۱۰ میلیمتر در بیشتر نمونه‌ها گرافیت‌ها به صورت ترکیب توزیع A و D در آمده ولی در نمونه ذوب‌های ۱ و ۲ توزیع گرافیت‌ها همچنان به صورت نوع A باقیمانده‌اند. کاهش ضخامت و افزایش سرعت سرد شدن باعث شده گرافیت‌های ورقه‌ای نوع A در همه نمونه‌ها کوتاه‌تر شوند. البته این کاهش طول در همه نمونه‌ها یکسان نمی‌باشد. کاهش طول بلندترین گرافیت با کاهش ضخامت در شکل (۴) به صورت نموداری نشان داده شده است.

گرافیت‌های موجود در ساختار ذوب ۸ با استفاده از آمیزان فروسیلیکومینیزیم با روندی مشابه آنچه در مورد چدن‌های داکتیل به کار می‌رود به صورت کروی و فشرده تبدیل شدند. بررسی دقیق‌تر نمونه‌های این ذوب در بزرگنمایی‌های مختلف و در ضخامت‌های متفاوت نشان می‌دهد گرافیت‌های کروی در مرکز دانه‌های فریت اولیه تشکیل شده‌اند و گرافیت‌های تحت تبرید نوع D در بین دانه‌های اولیه رشد کرده‌اند (شکل ۵).

از مقایسه نتایج حاصل از متالوگرافی نمونه اصلی و نمونه ذوب‌های ریخته‌گری شده، مشاهده می‌شود که طول گرافیت‌های نوع A در نمونه اصلی خیلی بلند است و تقریباً ۱/۵ برابر بلندترین گرافیت موجود در نمونه‌های ریخته‌گری شده در این تحقیق می‌باشد. همچنین در این نمونه گرافیت‌ها در ساختار یکنواخت نیستند و گرافیت‌های نوع A، D و E در نقاط مختلف این نمونه دیده می‌شوند (شکل ۶).

برای بررسی فازهای موجود در ساختار و مقایسه آنها با نمونه اصلی، آزمایش تفرق اشعه ایکس روی نمونه‌ها انجام شد. در این آزمایش از نمونه ذوب‌های ۱، ۲، ۴، ۵، ۸ و نمونه اصلی استفاده شد. در این چدن‌ها فاز اصلی سیلیکو فریت (Fe₃Si) می‌باشد. نتایج پراش اشعه ایکس این موضوع را تأیید می‌کند. الگوهای پراش بدست آمده کاملاً مشابه‌اند و پیک‌های مربوط به سیلیکوفریت در این الگوها قابل تشخیص هستند. در ساختار این نمونه‌ها فازهای دیگری مانند گرافیت و کاربید نیز وجود دارند ولی چون مقدار آنها کم است توسط این روش نمی‌توان آنها را ردیابی نمود. شکل (۷) الگوی XRD مربوط به ذوب پنجم را نشان می‌دهد.

برای بررسی خواص مکانیکی نمونه‌ها از آزمون خمش

پاسکال است. بعد از آن ذوب ۲ حاوی مس قرار دارد که تنش شکست در آن حدود ۱۷۲ مگا پاسکال است. کمترین مقادیر تنش نیز مربوط به ذوبهای ۳ و ۶ به ترتیب ۷۵ و ۹۷ مگا پاسکال است. با توجه به حداقل تنش شکست قابل قبول برای این آلیاژ (۱۰۰ مگا پاسکال) این نمونه‌ها از نظر خواص مکانیکی مردود هستند.

۴- نتیجه گیری

۱- تاثیر عناصر آلیاژی بر ساختار و خواص مکانیکی چدن پرسلیسیم حاوی ۱۴/۵ درصد سیلیسیم، ۰/۹۵ درصد کربن و ۰/۸ منگنز به صورت زیر می‌باشد:

نیومیم: کاربیدزایی و توزیع تقریباً یکنواخت گرافیت در ضخامت‌های مختلف؛ مس: کاهش حساسیت به سطح مقطع، اصلاح طول گرافیت‌ها، ایجاد توزیع یکنواخت گرافیت‌ها به صورت نوع A، افزایش خواص مکانیکی، کاهش سختی زمینه؛ نیکل: طول شدن گرافیت‌ها در ضخامت‌های زیاد؛ کرم-مولیبدن: افزایش استحکام، تشکیل کاربید، ترویج گرافیت‌های تحت تبرید نوع D؛ کاربید زایی و افزایش حساسیت به سطح مقطع؛ تیتانیم: کاهش خواص مکانیکی؛ کلسیم: کاهش حفره‌های گازی و بهبود خواص مکانیکی؛ منیزیم: کروی و فشرده کردن گرافیت‌ها.

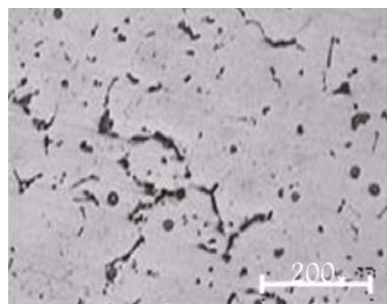
۲- این نتایج نشان می‌دهد که تاثیر گذاری عناصر آلیاژی بر خواص چدن‌های پرسلیسیم تقریباً مشابه آن در چدن‌های خاکستری یکسان می‌باشد.

۳- بهترین مقاومت به شکست با اضافه کردن مقدار کمی کرم و مولیبدن به طور همزمان بدست آمد و پس از افزودن ۱/۳ درصد مس بیشترین تاثیر را داشت.

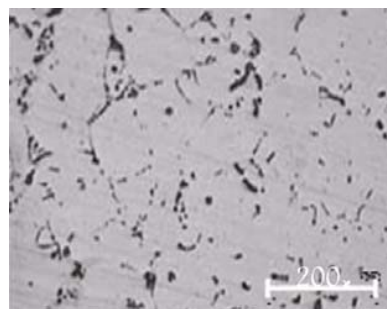
۴- افزودن ۱/۳ درصد مس به چدن پر سیلیسیم همچنین باعث اصلاح طول گرافیت‌ها و کاهش حساسیت به سطح مقطع شد.

۵- تغییر شکل گرافیت‌های ورقه‌ای موجود در ساختار به صورت کروی و فشرده تغییر زیادی در خواص مکانیکی این آلیاژ ایجاد نکرد.

۵-

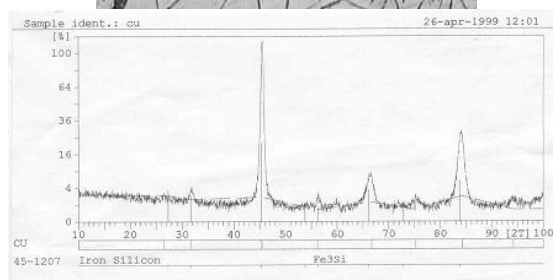


الف

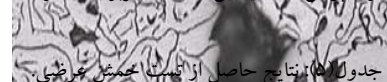


ب

شکل (۵): ساختار میکروسکوپی ذوب حاوی منیزیم در ضخامت‌های: الف) ۱۰ و ب) ۳۰ میلیمتر.



شکل (v): الگوی پراش اشعه ایکس (XRD) مربوط به نمونه ذوب پنجم.



جدول (۵): نتایج حاصل از تست سختی برضی

ذوب	عنصر آلیاژی	قطر (mm)		نیروی اصلاح شده (N)		انحراف اصلاح شده (mm)		TRS (Mpa)	TRS (Mpa)
		اول	دوم	اول	دوم	اول	دوم	اول	دوم
1	Nb	30.3	30.7	5626	5587	0.70	0.60	139.0	132.7
2	Cu	30.4	30.6	6905	7314	0.90	1.00	168.9	175.5
3	Ni	30.5	30.1	3200	2895	0.60	0.50	77.5	73.0
4	Cr-Mo	30.2	30.3	7158	7738	0.71	0.90	178.6	191.2
5	Mo	30.4	30.7	5159	5287	0.60	0.70	126.2	139.7
6	Ti	30.8	30.6	4152	4052	0.70	0.70	97.7	97.2
7	Ca	30.2	30.5	6143	6000	0.71	0.90	153.3	145.4
8	Mg	30.1	30.5	4748	5100	0.90	0.70	119.7	123.6

مراجع

- [۱] م. مرعشی، «متالورژی کاربردی چدن‌ها(۱)»، شرکت تولید و نورد قطعات فولادی تهران، ۱۳۷۵-۱۳۷۷.
- [2] H. T. Angus, "Cast iron physical and engineering properties", 1976, Butterworth press.
- [۳] ه. مشکوه سادات، «چدن‌های الیازی مقاوم به خوردگی»، مجله ریخته گری، زمستان ۱۳۷۶، ش ۴، ص ۱۶۴-۱۷۲.
- [4] M. G. Fontana, "Corrosion engineering", Third edition, 1986, Mc Graw-Hill press.
- [۵] گ. راف، «قطعات ریختگی چدنی (خواص مکانیکی)»، ترجمه محمد رضا افضلی، ۱۳۷۱، مرکز انتشارات صنعت فولاد.
- [6] J. R. Dave, "ASM specialty handbook: Cast iron", 1996, ASM press.
- [7] F. G. Sefing, "The roll of alloys in engineering gray iron casting", NIDI, 1964.
- [8] L. May, "Copper in iron and steel", 1979, Jon Willy and sons press.
- [9] R. Heine, "Principles of casting", Second edition, 1976, McGraw-Hill press.