نشریه تحقیقاتی فنی ـ مهندسی‌استقلال، دانشگاه صنعتی اصفهان، شماره ۱۴ اسفندماه ۱۳۷۲

اثرآلومینیوم بر ریز ساختار و خواص مکانیکی چدنهای نشکن آستمپر شده

علیرضا کیانی رشید* - عباس نجفی زاده** - محمد علی گلعذار***

چکیده

در این مقاله اثر افزایش عنصر آلومینیوم تا ۸/۵ درصد بر ریز ساختار، خواص مکانیکی و مقاومت اکسیداسیون چدنهای نشکن و چدنهای نشکن آستمپرشده بررسی شده‌است. برای یافتن مناسبترین سیکل عملیات حرارتی آستمپرکردن و تعیین ترکیب شیمیایی بهینه، نمونه های کشش و ضربه در محدوده دمایی ۸۹۰ الی ۹۹۰ درجه سانتیگراد آستنیته و در دامنه دمایی ۲۸۵ تا ۳۷۵ درجه سانتیگراد به مدت زمانهای ۱۵ الی ۱۵۰ دقیقه آستمپرشدند.

نتایج حاصل نشان داد که اضافه کردن ۱/۸ درصد مس و ۰/۷ درصد نیکل به ترکیب شیمیایی، اثرات مخرب ونامطلوب آلومینیوم را بر شکل گرافیت های کروی به شدت کاهش می دهد. همچنین مشخص شد که برای ایجاد ساختار بینیتی در چدنهای نشکن با ۲ درصد آلومینیوم، دمای مطلوب برای آستنیته

---

* عضو هیأت علمی دانشگاه سیستان و بلوچستان

** دانشیار دانشکده مهندسی مواد - دانشگاه صنعتی اصفهان

*** استادیار دانشکده مهندسی مواد - دانشگاه صنعتی اصفهان

کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد است؛ در حالی که با افزایش درصد آلومینیوم به بیش از ۲ درصد دمای آستنیته کردن نیز باید به دماهای بالاتر نظیر ۹۹۰ درجه سانتیگراد افزایش داده شود. همچنین مشخص شد که اضافه شدن آلومینیم به این خانواده از چدنهادر دماهای ۷۰۰ درجه سانتیگراد و بالاتر، بهبودقابل ملاحظه ای در مقاومت اکسیداسیون آنها ایجاد می کند.

مقدمه

تولید چدنهای نشکن آستمپر شده با توجه به ویژگیهای منحصر به فرد آن در سالهای اخیر توجه زیادی را جلب کرده و امروزه شاهد تحولات زیادی در بهبود این نوع چدنها هستیم. از آنجایی که مهمترین عامل کنترل کننده در خواص مکانیکی قطعات تولید شده ترکیب شیمیایی این آلیاژهاست، آزمایشهای فراوانی در مورد بکارگیری ترکیبات متفاوت انجام گرفته است بگونه ای که درصدهای مختلف از عناصر مس، نیکل، مولیبدن، قلع و ... به چدنهای نشکن آستمپر شده افزوده شده [۱ تا ۵] و این تحقیقات عمدتاً در راستای حصول استحکام و قابلیت انعطاف بالا و افزایش سختی پذیری متمرکز بوده است.

بنابراین دور از انتظار نیست که عنصر آلومینیم با داشتن خواص ویژه ای همچون افزایش مقاومت خوردگی و مقاومت در برابراکسیداسیون در درجه حرارتهای بالا، افزایش سختی و ... به عنوان عنصر آلیاژی در این نوع چدنها مورد مطالعه قرار گیرد. در این ارتباط تعیین شرایط مناسب ذوب، انتخاب صحیح آلیاژ و درجه حرارتها و زمانهای مناسب عملیات آستنیته کردن و آستمپر کردن برای تولید آلیاژهای مطلوب ضروری است.

چدنهای حاوی آلومینیوم ویژگیهای جالبی از قبیل مقاومت در برابر پوسته شدن در دماهای بالا و استحکام خزشی خوب در محدودهٔ دمای ۸۹۰ - ۵۳۰ درجه سانتیگراد را دارا هستند. به علاوه نشان داده شده است که در دمای بالا،مقاومت در برابر اکسیداسیون و خواص مکانیکی چدنهای نشکن به مراتب بهتر از چدنهای خاکستری با درصدهای معادل آلومینیم است [۶ و ۷].

روش آزمایش

به منظور تهیه نمونه های مورد نیاز، بلوکهایی مطابق با استاندارد ۸۰ - ۸۵۳۶ ASTM در قالبهایی از جنس ماسه سیلیسی تهیه شد.

آلیاژ سازی در کوره زمینی انجام گرفت. در این عملیات از چدن سورل با ترکیب شیمیایی ذیل به عنوان مبنا استفاده شد.

جدول ۱ - ترکیب شیمیایی چدن سورل

نوع عنصر	%C	%Si	%Mn	%S	%P
مقدار	۳/۳-۳/۸	۱/۵	۰/۰۲-۰/۰۸	۰/۰۲-۰/۰۸	۰/۰۲-۰/۰۳

جهت تصحیح مقدار سیلیسیم و همچنین به عنوان جوانه زا از فروسیلیس ۷۵ درصد و برای کروی کردن از فروسیلیکو منیزیم با ۵/۵ درصد منیزیم استفاده گردید. ضمناً از آلومینیم، مس و نیکل خالص برای تهیه آلیاژهای لازم بهره گرفته شد.

در این تحقیق، تعداد ۱۰ ذوب تهیه و ریخته گری شد که ترکیب شیمیایی آنها در جدول ۲ نشان داده شده است. آنالیز هر ذوب به روش کوانتومتری تعیین گردید. به منظور انجام عملیات حرارتی آستمپرینگ، نمونه ها در دمای ۸۹۰ یا ۹۹۰ درجه سانتیگراد و به مدت زمانهای ۱۵، ۳۰، ۷۵ و ۱۵۰ دقیقه آستمپر شدند. خواص مکانیکی آلیاژهای ریخته شده، پس از عملیات حرارتی توسط آزمایشهای کشش، سختی و ضربه تعیین شد.

ریز ساختار نمونه ها به کمک میکروسکوپ نوری پس از پولیش و اچ کردن با محلول نایتال ۲ درصد مورد بررسی قرار گرفت. ضمناً در مواردی از میکروهاردنس نیز جهت تعیین نوع فازها استفاده شده است.

برای تعیین مقاومت در برابر اکسیداسیون، نمونه هایی با ابعاد یکسان از آلیاژهایی با درصد متفاوت آلومینیوم را پس از توزین اولیه در قایقکهای سرامیکی گذاشتیم و آنها را در کوره ای با دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد با جریان مداوم هوا قرار دادیم. در مقاطع مختلف زمانی نمونه ها از کوره خارج شدند و پس از توزین مجدداً در داخل کوره قرار گرفتند.

جدول ۲ - ترکیب شیمیایی آلیاژهای ریخته شده

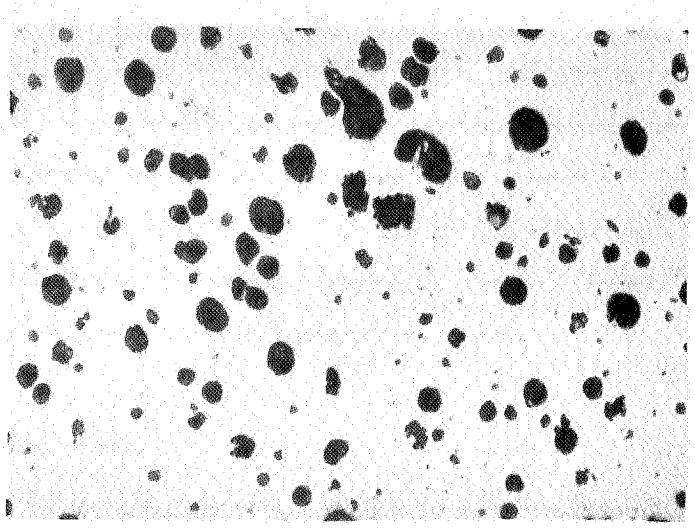
ردیف	نام آلیاژ	ترکیب اسمی			ترکیب شیمیایی حقیقی								
		%Al	%Cu	%Ni	%C	%Al	%Cu	%Ni	%Si	%Mn	%S	%P	%Mg
۱	چدن شماره ۱	۰	۰	۰	۳/۴۸	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۲	۲/۵۶	۰/۱۴	۰/۰۱۵	۰/۰۳	۰/۰۵
۲	چدن شماره ۲	۰/۸	۰	۰	۳/۶۱	۰/۷۹	۰/۰۶	۰/۰۲	۲/۵۹	۰/۱۸	۰/۰۰۷	۰/۰۳	۰/۰۵
۳	چدن شماره ۳	۱/۱	۰	۰	۵/۳۲	۱/۱۳	۰/۰۴	۰/۰۲	۲/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۰۸	۰/۰۲	۰/۰۵
۴	چدن شماره ۴	۳/۵	۰	۰	۴/۴۹	۳/۶۴	۰/۰۵	۰/۰۲	۲/۰۲	۰/۱۶	۰/۰۰۵	۰/۰۳	۰/۰۶
۵	چدن شماره ۵	۸/۵	۰	۰	۳/۹۶	۸/۴۶	۰/۰۵	۰/۰۲	۱/۵۹	۰/۱۲	۰/۰۱۲	۰/۰۲	۰/۰۴
۶	چدن‌غیرآلیاژی	۰	۰	۰	۳/۶۶	۰/۲۲	۰/۰۷	۰/۰۳	۲/۴۰	۰/۲۲	۰/۰۰۱	۰/۰۴	۰/۰۴
۷	چدن ۰درصدآلومینیوم	۰	۱/۸	۰/۷	۳/۷۰	۰/۱۵	۱/۷۳	۰/۶۹	۱/۷۹	۰/۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۳	۰/۰۵
۸	چدن ۰/۵آلومینیوم	۰/۵	۱/۸	۰/۷	۳/۷۶	۰/۵۲	۲/۰۵	۰/۸۶	۲/۱۴	۰/۱۷	۰/۰۰۴	۰/۰۳	۰/۰۸
۹	چدن ۲آلومینیوم	۲	۱/۸	۰/۷	۳/۸۵	۲/۰۶	۲/۰۴	۰/۴۶	۲/۵۱	۰/۳۰	۰/۰۱۱	۰/۰۸	۰/۰۵
۱۰	چدن ۴/۸آلومینیوم	۴/۸	۱/۸	۰/۷	۴/۰۲	۴/۷۸	۱/۴۹	۰/۷۳	۲/۵۴	۰/۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۲	۰/۰۶

نتایج حاصل از آزمایشها و بررسی آنها

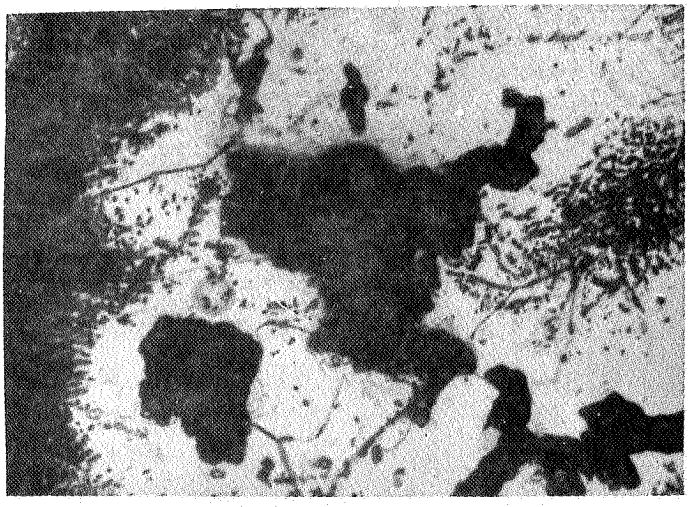
الف - بررسی ریز ساختار

بطور کلی نمونه های ریخته شده را می توان به دو گروه تقسیم کرد. گروه اول شامل نمونه های شماره ۱ الی ۵ هستند که صرفاً در جهت بررسی تاثیرات افزایش درصد آلومینیوم بر شکل گرافیت‌ها تهیه شده اند. همانگونه که ترکیب شیمیایی این نمونه ها (جدول شماره ۱) نشان می دهد به ترتیب درصدهای آلومینیوم افزایش پیدا کرده است. نکته قابل توجه، تاثیر نامطلوب و مخرب آلومینیوم بر شکل گرافیت های کروی است. مقایسه شکل ۱ مربوط به نمونه شماره ۱ با شکل ۲ مربوط به نمونه شماره ۵ این موضوع را به خوبی نشان می دهد.

تحقیقات انجام شده در مورد اثرات مخرب آلومینیوم بر شکل گرافیتها بیانگر این واقعیت است که آلومینیم باعث ابقای گوگرد که عامل تشکیل گرافیت لایه ای است می گردد [۸]. در این ارتباط اشاره می شود که حتی زمانی که گوگرد در حد طبیعی باشد آلومینیوم اثر مضری بر شکل گرافیتها در چدنهای نشکن دارد. از عناصری که تا حدودی در آلیاژهای با درصد بسیار پایین آلومینیوم این اثر نامطلوب را خنثی می کند از سریم می توان نام برد [۹].



شکل ۱ - ریز ساختار آلیاژشماره ۱ با صفر درصد آلومینیوم به حالت ریختگی (۱۰۰×)



شکل ۲ - ریز ساختار آلیاژ شماره ۵ با ۸/۵ درصد آلومینیوم به حالت ریختگی (۴۰۰×)

با توجه به اینکه از اهداف اولیه در تولید چدنهای نشکن، به دست آوردن ساختاری با بیش از ۹۰ درصد گرافیت کروی است نیاز به اصلاحاتی در ترکیب شیمیایی شدیداً احساس می شد. در این زمینه همان طورکه قبلاً اشاره شد عناصری از قبیل سریم تا حدودی می تواند این نقیصه را برطرف کند. با توجه به اینکه چنین عنصری برای در صدهای بسیار پایین آلومینیم موثر است لزوم استفاده از عناصر دیگر مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. نتیجتاً با استفاده از درصدهای ثابتی از مس و نیکل حتی در مقادیر بالای آلومینیوم نیز ساختاری با گرافیت کروی تولید گردید. شکلهای ۳ تا ۶ شکل کاملاً کروی گرافیت در درصدهای متفاوت آلومینیوم را نشان می دهد.

ب - بررسی خواص مکانیکی

در این گروه از آلیاژها، خواص بهینه معطوف به درصد خاصی از عنصر آلومینیوم نیست و با انتخاب صحیح عملیات حرارتی می توان به ویژگیهای مطلوبی دست پیدا کرد. با توجه به نتایج بدست آمده، به آلیاژهای با کیفیت برتر این گروه تحت شرایط عملیات حرارتی اشاره خواهد شد.

در دمای آستنیته کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد متناسب با دما و زمان آستمپرکردن درصد آلومینیوم آلیاژ می تواند در تعیین نوع بهینه مؤثر باشد به عنوان مثال :

- در دمای آستمپرکردن ۲۸۵ درجه سانتیگراد چدنها با ۲-۰/۵ درصد آلومینیوم که به مدت زمان حدود ۱۵ دقیقه آستمپر شده اند دارای خواص بهینه هستند (جدول ۳).

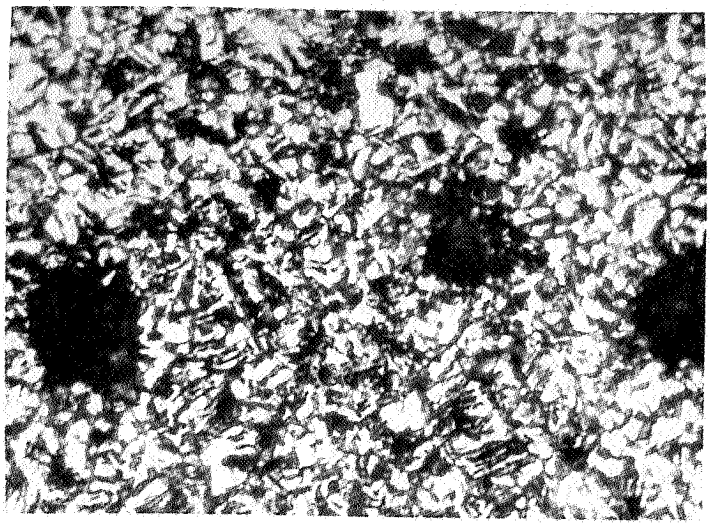
- در دمای آستمپرکردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد آلیاژهایی با ۲-۰/۵ درصد آلومینیم که به مدت ۱۵۰ دقیقه آستمپر شده اند ، استحکام ضربه ای بالا و انرژی شکست زیادی را نشان می دهند و ضمناً از سختی و استحکام نسبتاً خوبی برخوردار هستند (شکلهای ۷ تا ۹).

در دمای آستمپر کردن ۳۷۵ درجه‌سانتیگراد آلیاژ ۰/۵ درصد آلومینیوم که به‌مدت ۳۰ دقیقه و آلیاژ ۲ درصد آلومینیوم که به مدت ۱۵ دقیقه آستمپر شده‌اند خواص مکانیکی بهینه‌ای دارند (جدول ۴).

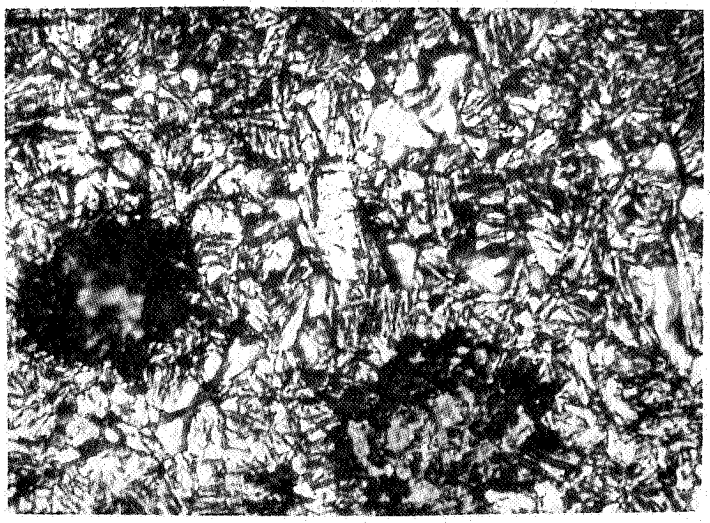
همان طورکه قبلاً اشاره شد با تغییر دمای آستنیته کردن از ۸۹۰ درجه سانتیگراد به ۹۹۰ درجه سانتیگراد، خواص مکانیکی آلیاژهایی با بیش از ۲ درصد آلومینیوم خصوصاً آلیاژ ۴/۸ درصد

جدول ۳ - نتایج به‌دست‌آمده از آزمایشهای کشش ، سختی و ضربه در دمای آستنیته کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمپرکردن ۲۸۵ درجه سانتیگراد

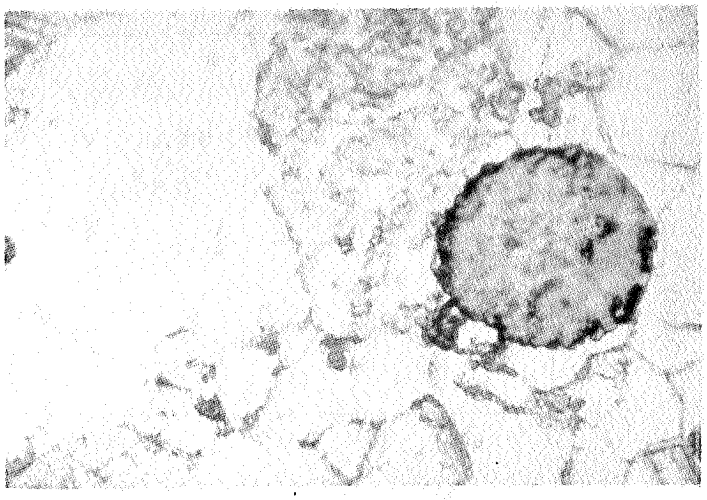
نام آلیاژ	زمان آستمپرکردن (دقیقه)	استحکام (MPa)	درصدکرنش شکست	سختی (برینل)	انرژی ضربه ای (ژول)
	۱۵	۱۰۹۹	۸/۸	۳۹۰	۱۲/۵
غیرآلیاژی	۳۰	۱۲۸۸	۸/۸	۳۷۱	۱۱/۲
	۷۵	۱۰۶۲	۷/۳	۳۲۶	۱۱/۱
	۱۵۰	۹۷۹	۶	۳۷۵	۱۲
	۱۵	۱۱۲۲	۵/۴	۴۷۹	۸/۱
٪۰ Al	۳۰	۸۵۱	۵/۵	۴۲۴	۹
	۷۵	۹۲۴	۸/۵	۳۷۱	۸/۹
	۱۵۰	۱۰۶۲	۵/۳	۳۸۶	۹
	۱۵	۱۰۹۶	۵/۴	۴۴۴	۸/۴
٪۰/۵ Al	۳۰	۹۳۶	۵/۴	۳۹۰	۹/۵
	۷۵	۷۹۸	۵/۵	۳۴۱	۹/۲
	۱۵۰	۹۷۷	۵/۷	۴۰۷	۹/۵
	۱۵	۱۰۸۸	۵/۳	۳۸۷	۷/۱
٪۲ Al	۳۰	۱۰۸۷	۵/۸	۳۵۴	۷/۹
	۷۵	۸۴۱	۴/۵	۳۱۰	۸/۹
	۱۵۰	۹۷۰	۲/۸	۳۲۸	۷/۳
	۱۵	۵۳۷	۵/۳	۳۲۲	۶/۲
٪۴/۸ Al	۳۰	۵۸۸	۵/۳	۳۱۶	۶/۲
	۷۵	۶۵۰	۵/۳	۳۰۶	۶/۴
	۱۵۰	۸۷۵	۵/۵	۳۱۹	۶/۵



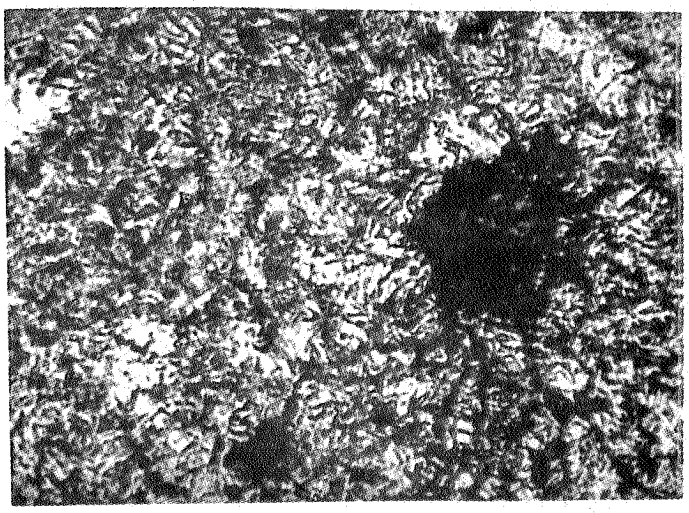
شکل ۳ - ریز ساختار آلیاژ ۰/۵ درصد آلومینیوم، دمای آستمپرکردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد و زمان آستمپر کردن ۱۵۰ دقیقه (۴۰۰×)



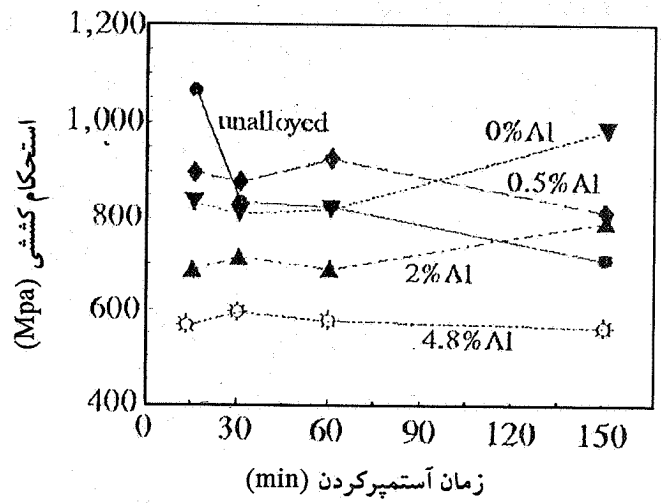
شکل ۴ - ریز ساختار آلیاژ ۲ درصد آلومینیوم، دمای آستمپر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد و زمان آستمپرکردن ۱۵ دقیقه (۴۰۰×)



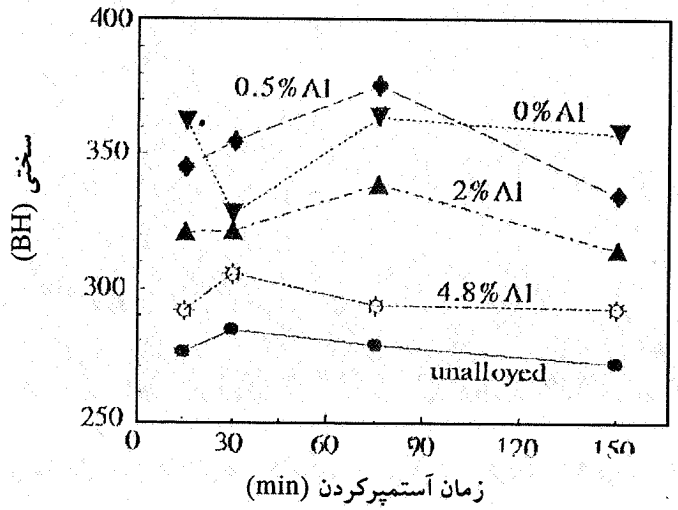
شکل ۵ - ریز ساختار آلیاژ ۴/۸ درصد آلومینیوم (۴۰۰×)



شکل ۶ - ریز ساختار آلیاژ ۴/۸ درصد آلومینیم، دمای آستنیته کردن ۹۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمپرکردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد، زمان آستمپر کردن ۱۵ دقیقه (۴۰۰×)



شکل ۷ - تغییرات استحکام کششی نسبت به زمان آستمپرکردن چدنهای نشکن با درصدهای مختلف آلومینیوم، دمای آستنیته کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمپر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد



شکل ۸ - تغییرات سختی نسبت به زمان آستمپرکردن در چدنهایی با درصدهای مختلف آلومینیوم، دمای آستنیته کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمپر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد

آلومینیوم‌به شدت‌بهبود پیدا می‌کند. دلیل این موضوع می تواند قرارگرفتن در محدوده آستنیته‌کردن واقعی‌این‌آلیاژباشدکه درمراحل بعدی عملیات حرارتی طی روند صحیحی از آستمپرکردن ساختار مطلوب بینیتی حاصل می‌شود. چگونگی‌این‌تغییرات درمقایسه شکلهای ۷ تا ۹ که‌درآنهادمای آستنیته‌کردن ۸۹۰ درجه‌سانتیگراداست‌باشکلهای ۱۰ تا ۱۲ که‌دمای‌آستنیته‌کردن ۹۹۰ درجه سانتیگراداست مشاهده می‌شود. باتوجه‌به‌این‌نمودارهااستحکام‌کششی،استحکام‌ضربه وسختی آلیاژ ۴/۸ درصدبه‌شدت‌بهبود پیداکرده که‌مستقیماًمرتبط باتغییردرریزساختاراین‌آلیاژهاست (شکل ۶).

ج - مقاومت در برابر اکسیداسیون در درجه حرارت بالا

با توجه به نتایج به دست آمده (شکل ۱۳)، با افزایش درصد آلومینیوم تا حدود ۴/۸ درصد مقاومت اکسیداسیون افزایش چشمگیری نشان می دهد. تحت همین شرایط آلیاژهایی با صفر درصد آلومینیوم و چدن غیر آلیاژی در قیاس با این نمونه ۱۰۰ برابر ضعیف‌تر هستند.

نتیجه گیری

۱) بر اساس این تحقیق چدنهای تا حدود ۲ درصد آلومینیوم که در درجه حرارت ۸۹۰ درجه سانتیگراد آستنیته شده اند می توانند در محدوده کاری این تحقیق (۲۸۵ الی ۳۷۵ درجه سانتیگراد) آستمپر شده و ساختار بینیتی داشته باشند. برای درصدهای بالاتر آلومینیوم نیاز به دمای آستمپرکردن بیشتری است.

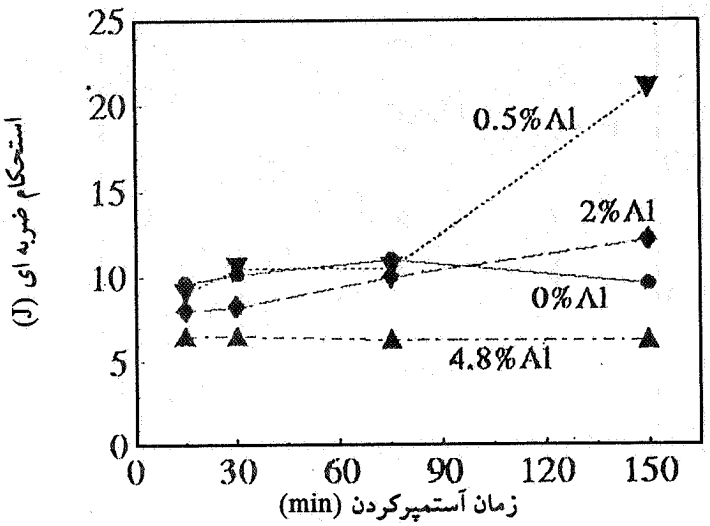
۲) با افزایش درجه حرارت آستنیته کردن از ۸۹۰ به ۹۹۰ درجه سانتیگراد اختلاف فاحشی در خواص مکانیکی آلیاژ ۴/۸ درصد آلومینیوم آشکار می شود. در دمای آستمپرکردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد وبه مدت زمان ۷۵ دقیقه ترکیب مناسبی از خواص مکانیکی در این آلیاژ مشاهده می‌شود.

۳) نتایج حاصل نشان می دهد که آلیاژ ۴/۸ درصد آلومینیوم در ابتدای قرارگرفتن در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد با تشکیل لایه بسیار نازک اکسید آلومینیوم رویین شده و در زمانهای بعد کوچکترین افزایش وزنی ناشی از اکسیداسیون را نشان نمی دهد.

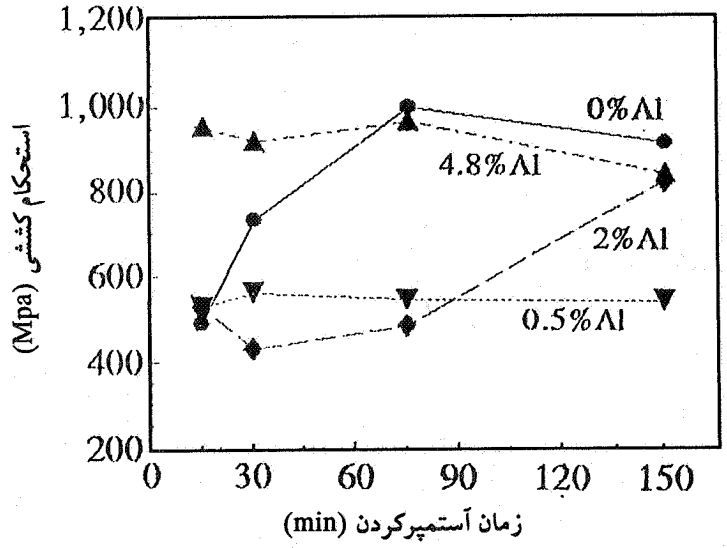
مراجع مختلف [۱ تا ۴] اشاره شده است، مع هذا محدوده دقیق نسبت اکسیژن به استیلن که منجر

جدول ۴ - نتایج به‌دست‌آمده از آزمایشهای‌کشش ، سختی و ضربه در دمای‌آستنیته‌کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمپرکردن ۳۷۵ درجه سانتیگراد

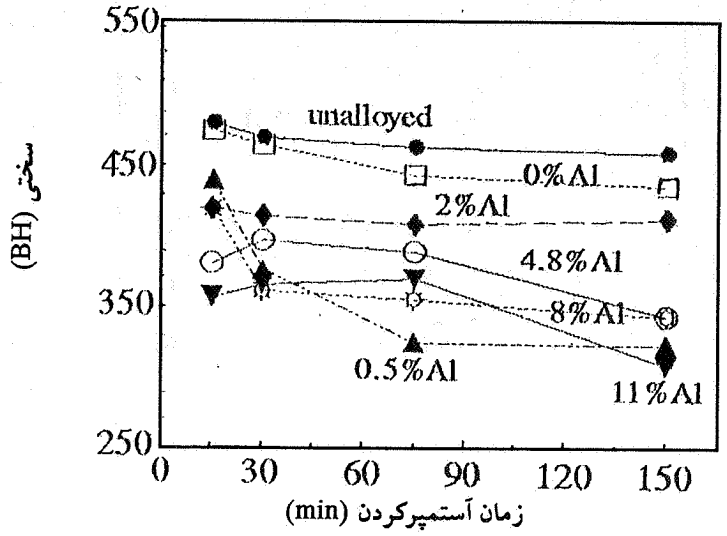
نام آلیاژ	زمان آستمپرکردن (دقیقه)	استحکام کششی (MPa)	درصدکرنش شکست	سختی (برینل)	انرژی ضربه ای (ژول)
	۱۵	۵۹۶	۷/۵	۲۱۳	۱۳/۵
غیرآلیاژی	۳۰	۶۸۱	۱۰	۲۲۷	۹/۷
	۷۵	۵۸۰	۱۰	۱۹۴	۹/۶
	۱۵۰	۵۰۳	۱۱/۳	۱۸۰	۱۰
	۱۵	۷۸۹	۷/۲	۳۳۰	۸/۵
٪۰ Al	۳۰	۶۸۱	۷/۲	۲۷۷	۱۱
	۷۵	۸۵۰	۷/۳	۲۶۶	۱۰/۲
	۱۵۰	۸۳۷	۷/۵	۲۶۳	۸/۸
	۱۵	۶۴۰	۷/۱	۲۴۶	۷/۸
٪۰/۵ Al	۳۰	۶۹۴	۷/۱	۲۶۷	۲۱/۵
	۷۵	۶۶۶	۷/۲	۲۵۶	۱۰/۵
	۱۵۰	۶۲۴	۷/۲	۲۴۰	۹/۷
	۱۵	۶۳۲	۲/۸	۲۶۸	۱۳/۵
٪۲ Al	۳۰	۶۰۴	۳	۲۵۵	۹/۶
	۷۵	۶۸۱	۲/۸	۲۳۷	۸/۹
	۱۵۰	۶۲۷	۲/۸	۲۴۹	۱۲/۵
	۱۵	۵۹۶	۳/۳	۳۰۶	۶/۲
٪۴/۸ Al	۳۰	۶۳۷	۳/۱	۳۰۱	۷/۵
	۷۵	۷۵۰	۲/۳	۲۸۷	۶
	۱۵۰	۵۶۰	۱/۵	۳۱۳	۶/۵



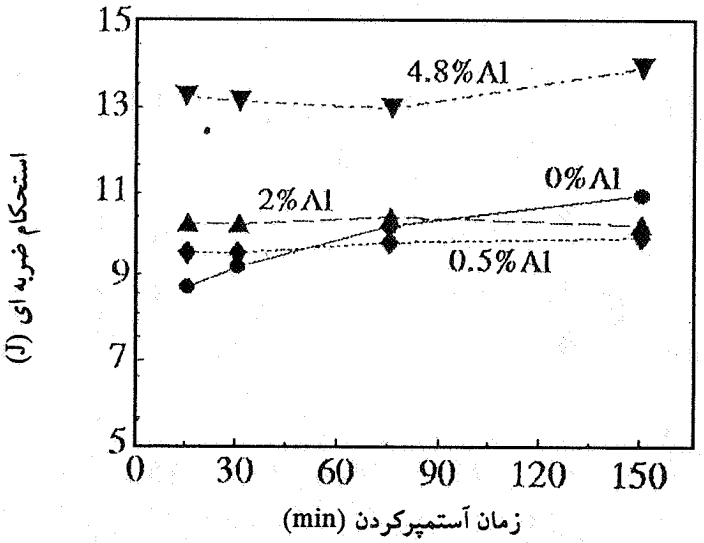
شکل ۹ - تغییرات استحکام ضربه‌ای نسبت به زمان آستمپر کردن در چدنهای نشکن با درصدهای مختلف آلومینیوم، دمای آستنیته کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمپر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد



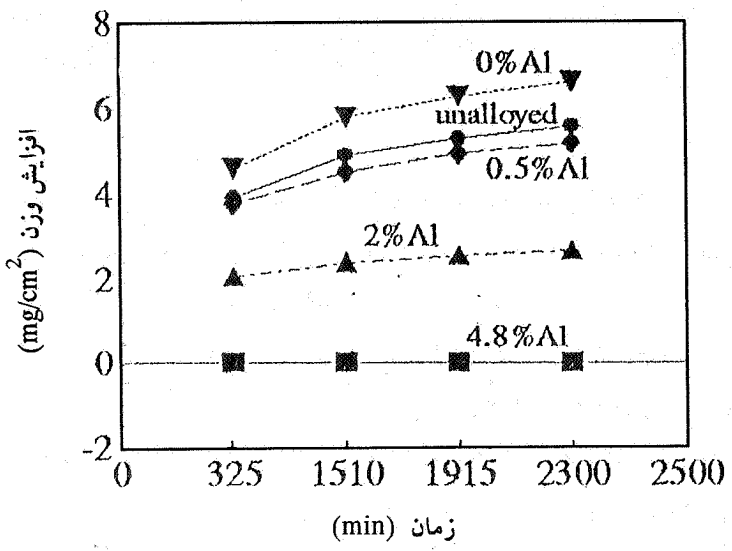
شکل ۱۰ - تغییرات استحکام کششی نسبت به زمان آستمپر کردن چدنهای نشکن با درصدهای مختلف آلومینیوم، دمای آستنیته کردن ۹۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمپر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد



شکل ۱۱ - تغییرات سختی نسبت‌به زمان آستمپر کردن چدنهای نشکن با درصدهای مختلف آلومینیوم، دمای آستنیته کردن ۹۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمپر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد



شکل ۱۲ - تغییرات‌استحکام‌ضربه‌ای نسبت به زمان‌آستمپر کردن چدنهای نشکن با درصدهای مختلف آلومینیوم، دمای آستنیته کردن ۹۹۰ درجه سانتیگرادو دمای آستمپر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد



شکل ۱۳ - تغییرات افزایش وزن با زمان چدنهای نشکن با درصدهای مختلف آلومینیوم در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد

مراجع

۱. نجفی زاده،ع. و گلعذار، م.ع. ،" نقش زمان و درجه حرارت آستمپرکردن برروی خواص مکانیکی ساختار میکروسکپی چدنهای نشکن با درصدهای مختلفی از مس و قلع"، *دومین سمینار سالیانه جامعه ریخته گران ایران*،صفحات ۹۸-۷۶ ، مهرماه ۱۳۶۸.

2. Dorazile, E. et al., "High Strength Bainitic Ductile Cast Iron", *AFS Int Cast Metals J.*, Vol. 7, pp. 52-62, 1982.

3. Runman, K. B. et al., " The Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron", *J. of Heat Treating*, Vol. 5, No. 2, pp. 79-95, 1988.

۴. جافریان،م.، توکلی،ف. و دوامی،پ. ،" استفاده از مس بجای نیکل در چدنهای نشکن آستمپر"، *اولین سمینار جامعه ریخته گران ایران* ، صفحات ۳۰-۱ ، آبان ماه ۱۳۶۷.

۵. نجفی زاده،ع. و گلعذار،م.ع. ،" اثر دوره عملیات حرارتی آستمپر کردن روی خواص مکانیکی و ساختار میکروسکپی چدنهای نشکن با درصدهای مختلفی از مس"، *استقلال - فنی ومهندسی* ، دانشگاه صنعتی اصفهان، شماره ۸، صفحات ۵۸-۳۲ ، ۱۳۶۹.

6. Walton, C., *Iron Casting Handbook*, Iron Casting Society, Inc., pp. 427-438, 1981.

7. Ghoreshy, M. and Kondic, V., " Structure and Mechanical and Casting Properties of Fe-C-Al Cast Iron", Department of Industrial Metallurgy, University of Birmingham, pp. 562-568, 1984.

8. Hardening, R.A., "The Effect of Metallurgical Variables on Austempered Ductile Iron", *Metals and Materials*, pp. 65-71, 1986.

9. Ganguli, A.C., Chakrabarti, A.K. and Dasgupta, S.C., "Effect of Nickel and Aluminium on Solid State Transformation of S. G. Iron ", Regional Engi -

neering College, Durgopour, India, pp. 328-334.

10. Rouch, A.H., *Source Book on Ductile Iron*, ASM, Ohio, pp. 27-39, 1977.