

اثر آلومینیوم 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 آستمپر شده بررسی شده است. برای یافتن مناسبترین سیکل عملیات حرارتی آستمپر کردن و تعیین ترکیب شیمیایی بهینه، نمونه های کشش و ضربه در محدوده دمایی ۸۹۰ الی ۹۹۰ درجه سانتیگراد آستنیت و در دامنه دمایی ۲۸۵ تا ۳۷۵ درجه سانتیگراد به مدت زمانهای ۱۵ الی ۱۵۰ دقیقه آستمپر شدند.

نتایج حاصل نشان داد که اضافه کردن ۱/۸ درصد مس و ۰/۷ درصد نیکل به ترکیب شیمیایی، اثرات مخرب و نامطلوب 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 آستنیت

* 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 آلومینیوم به این خانواده از چدن‌ها در دماهای ۷۰۰ درجه سانتیگراد و بالاتر، بهبود قابل ملاحظه‌ای در مقاومت اکسیداسیون آنها ایجاد می‌کند.

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 بگونه‌ای 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 آلومینیوم با داشتن خواص ویژه‌ای همچون افزایش مقاومت خوردگی و مقاومت در برابر اکسیداسیون 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 محدوده 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 آلومینیوم است [۶ و ۷].

روش آزمایش

به منظور تهیه نمونه های مورد نیاز، بلوکهایی مطابق با استاندارد ۸۰ - ASTM ۸۵۳۶ 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 قایقهای 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

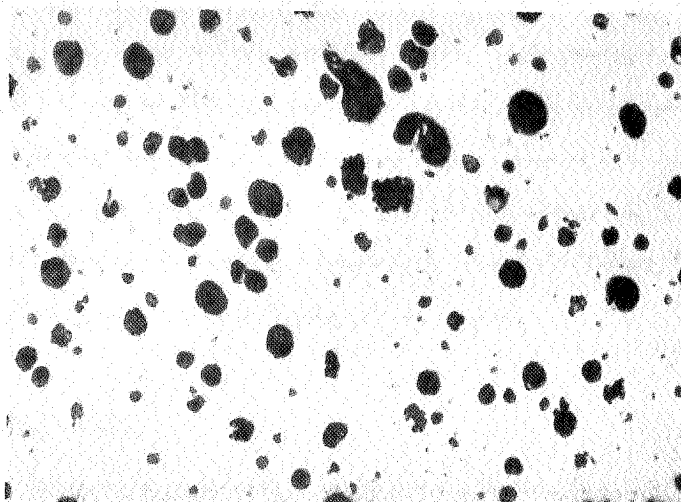
ردیف نام آلیاژ	ترکیب اسمسی			ترکیب شیمیایی حقیقی								
	%Al	%Cu	%Ni	%C	%Al	%Cu	%Ni	%Si	%Mn	%S	%P	%Mg
۱ چدن شماره ۱	۰	۰	۰	۳/۴۸	۰/۰۲	۰/۰۶	۰/۰۲	۲/۵۶	۰/۱۴	۰/۰۱۵	۰/۰۳	۰/۰۵
۲ چدن شماره ۲	۰/۸	۰	۰	۳/۶۱	۰/۷۹	۰/۰۶	۰/۰۲	۲/۵۹	۰/۱۸	۰/۰۰۷	۰/۰۳	۰/۰۵
۳ چدن شماره ۳	۱/۱	۰	۰	۵/۳۲	۱/۱۳	۰/۰۴	۰/۰۲	۲/۱۵	۰/۱۵	۰/۰۰۸	۰/۰۲	۰/۰۵
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 چدن غیر آلیاژی	۰	۰	۰	۳/۶۶	۰/۲۲	۰/۰۷	۰/۰۳	۲/۴۰	۰/۲۲	۰/۰۰۱	۰/۰۴	۰/۰۴
۷ چدن ۰ درصد آلومینیوم	۱/۸	۰/۷	۰	۳/۷۰	۰/۱۵	۱/۷۳	۰/۶۹	۱/۷۹	۰/۰۳	۰/۰۰۹	۰/۰۳	۰/۰۵
۸ چدن ۰/۵ آلومینیوم	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 ۲ آلومینیوم	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 ۴/۸ آلومینیوم	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

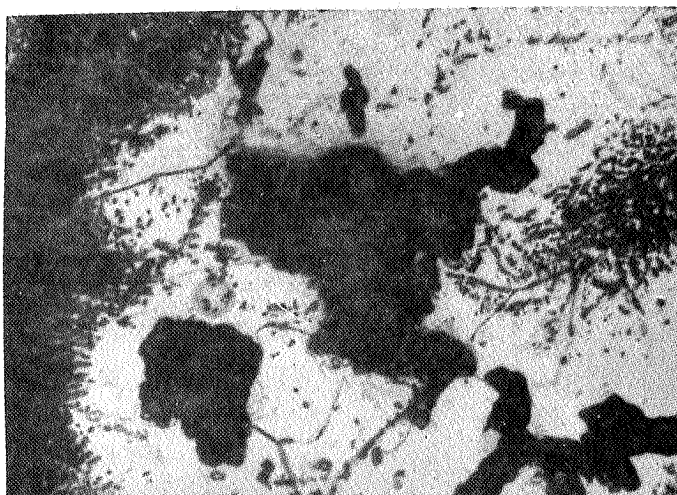
الف - بررسی ریز ساختار

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 گرافیت ها 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 آلومینیوم 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 مضر 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 آلیاژ شماره 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 می‌شود. در این زمینه همان طور که قبلاً اشاره شد عناصری از قبیل سریم تا حدودی می‌تواند 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 در صد‌های ثابتی از مس و نیکل حتی در مقادیر بالای آلومینیم نیز ساختاری با گرافیت کروی تولید گردید. شکل‌های ۳ تا ۶ شکل کاملاً کروی گرافیت در در صد‌های متفاوت آلومینیم را نشان می‌دهد.

ب - بررسی خواص مکانیکی

در این گروه از آلیاژها، خواص بهینه معطوف به درصد خاصی از عنصر آلومینیم نیست و با انتخاب صحیح عملیات حرارتی می‌توان 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 آستنیت کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد متناسب با دما و زمان آستمبر کردن درصد آلومینیم آلیاژ می‌تواند در تعیین نوع بهینه مؤثر باشد به عنوان مثال:

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

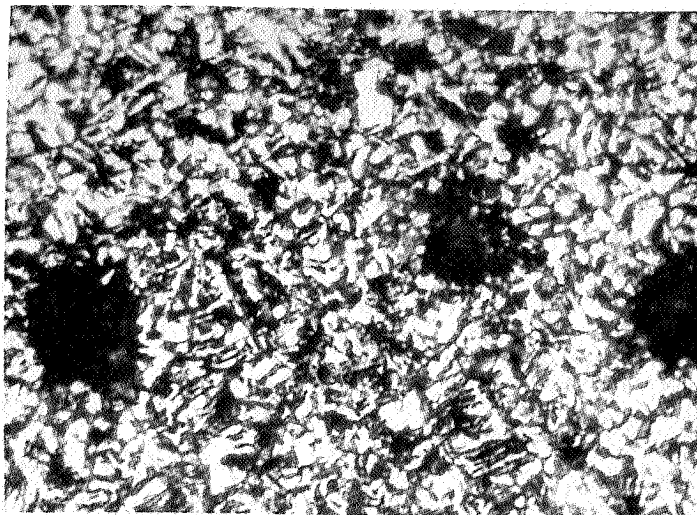
- در دمای آستمبر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد آلیاژهایی با ۲-۵/۰ درصد آلومینیم که به مدت ۱۵۰ دقیقه آستمبر شده اند، استحکام ضربه ای بالا و انرژی شکست زیادی را نشان می‌دهند و ضمناً از سختی و استحکام نسبتاً خوبی برخوردار هستند (شکل‌های ۷ تا ۹).

در دمای آستمبر کردن ۳۷۵ درجه سانتیگراد آلیاژ ۵/۰ درصد آلومینیم که به مدت ۳۰ دقیقه و آلیاژ ۲ درصد آلومینیم که به مدت ۱۵ دقیقه آستمبر شده‌اند خواص مکانیکی بهینه‌ای دارند (جدول ۴).

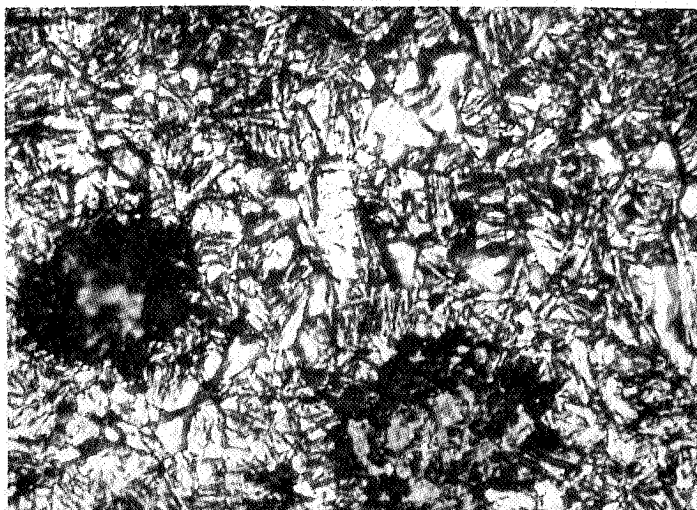
همان طور که قبلاً اشاره شد با تغییر دمای آستنیت کردن از ۸۹۰ درجه سانتیگراد به ۹۹۰ درجه سانتیگراد، خواص مکانیکی آلیاژهایی با بیش از ۲ درصد آلومینیم خصوصاً آلیاژ ۴/۸ درصد

جدول ۳ - نتایج به دست آمده از آزمایشهای کشش، سختی و ضربه در دمای آستنیته کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمر کردن ۲۸۵ درجه سانتیگراد

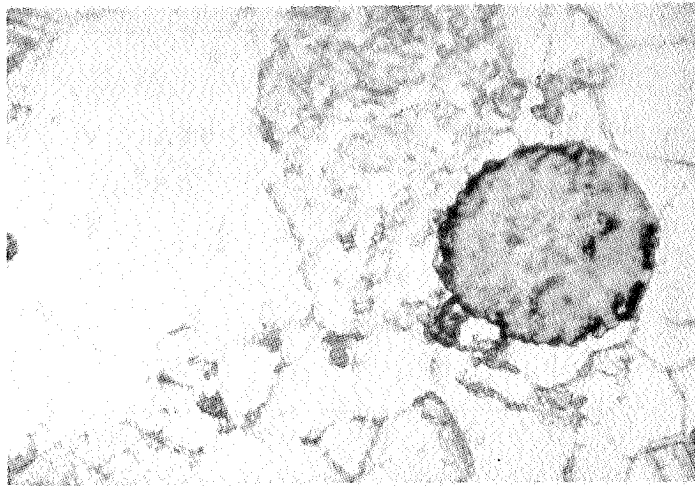
نام آلیاژ	زمان آستمر کردن (دقیقه)	استحکام (MPa)	درصد کرنش شکست	سختی (برینل)	انرژی ضربه ای (ژول)
غیر آلیاژی	۱۵	۱۰۹۹	۸/۸	۳۹۰	۱۲/۵
	۳۰	۱۲۸۸	۸/۸	۳۷۱	۱۱/۲
	۷۵	۱۰۶۲	۷/۳	۳۲۶	۱۱/۱
	۱۵۰	۹۷۹	۶	۳۷۵	۱۲
%۰ Al	۱۵	۱۱۲۲	۵/۴	۴۷۹	۸/۱
	۳۰	۸۵۱	۵/۵	۴۲۴	۹
	۷۵	۹۲۴	۸/۵	۳۷۱	۸/۹
	۱۵۰	۱۰۶۲	۵/۳	۳۸۶	۹
%۰/۵ Al	۱۵	۱۰۹۶	۵/۴	۴۴۴	۸/۴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



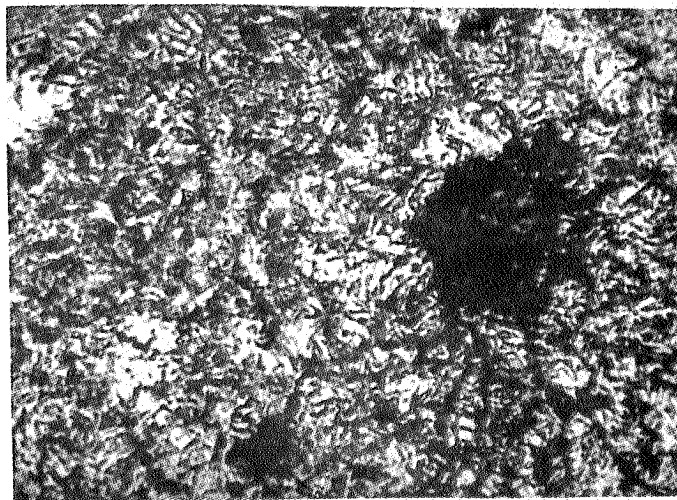
شکل ۳ - ریز ساختار آلیاژ ۰/۵ درصد آلومینیوم، دمای آستمپر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد و زمان آستمپر کردن ۱۵۰ دقیقه (×۴۰۰)



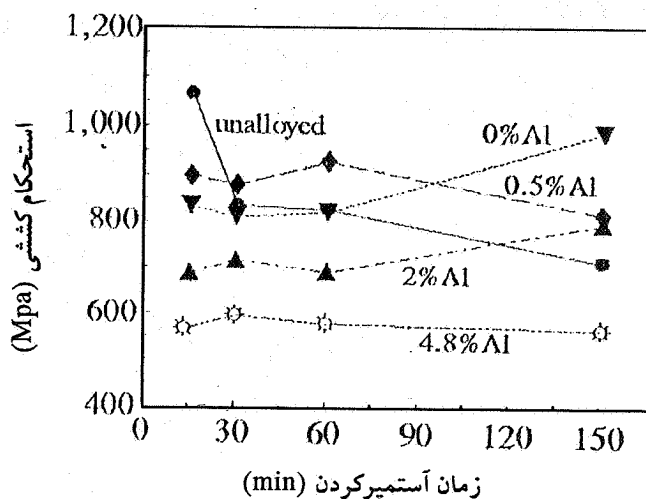
شکل ۴ - ریز ساختار آلیاژ ۲ درصد آلومینیوم، دمای آستمپر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد و زمان آستمپر کردن ۱۵۰ دقیقه (×۴۰۰)



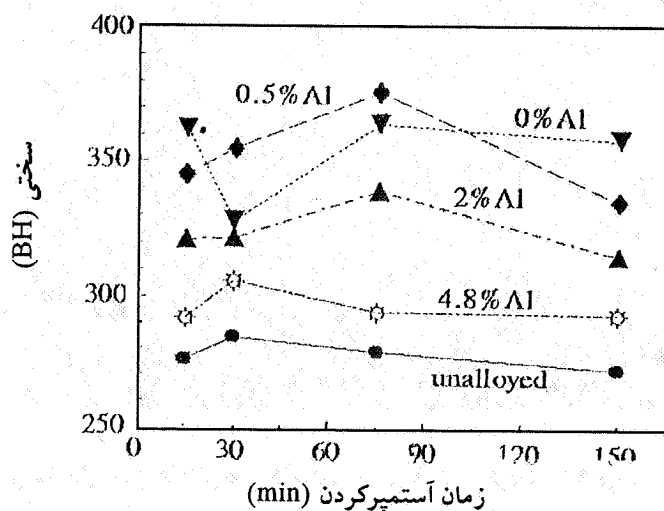
شکل ۵ - ریز ساختار آلیاژ ۴/۸ درصد آلومینیوم (×۴۰۰)



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



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

آلومینیوم به شدت بهبود پیدا می‌کند. دلیل این موضوع می‌تواند قرار گرفتن در محدوده آستنیت‌کردن واقعی این آلیاژ باشد که در مراحل بعدی عملیات حرارتی طی روند صحیحی از آستمپر کردن ساختار مطلوب بینیتی حاصل می‌شود. چگونگی این تغییرات در مقایسه شکل‌های ۷ تا ۹ که در آن‌ها دمای آستنیت‌کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد است با شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ که دمای آستنیت‌کردن ۹۹۰ درجه سانتیگراد است مشاهده می‌شود. با توجه به این نمودارها استحکام کششی، استحکام ضربه و سختی آلیاژ ۴/۸ درصد به شدت بهبود پیدا کرده که مستقیماً مرتبط با تغییر در ریز ساختار این آلیاژهاست (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 می‌دهد. تحت همین شرایط آلیاژهایی با صفر درصد آلومینیوم و چدن غیر آلیاژی در قیاس با این نمونه ۱۰۰ برابر ضعیف‌تر هستند.

نتیجه‌گیری

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

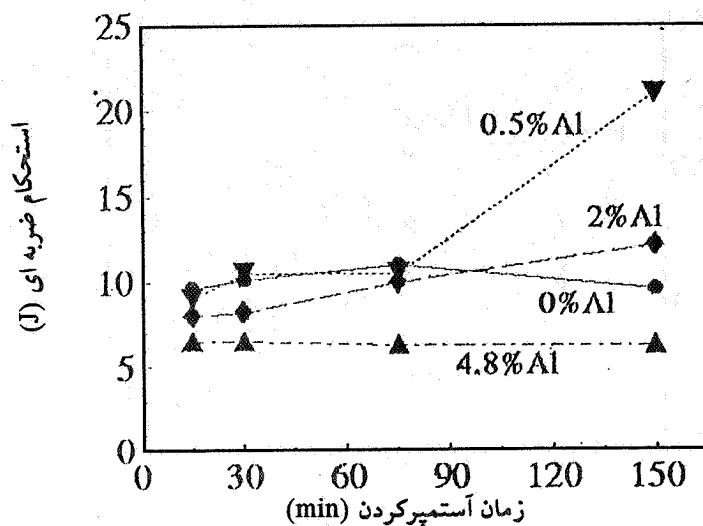
۲) با افزایش درجه حرارت آستنیت‌کردن از ۸۹۰ به ۹۹۰ درجه سانتیگراد اختلاف فاحشی در خواص مکانیکی آلیاژ ۴/۸ درصد آلومینیوم آشکار می‌شود. در دمای آستمپر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد و به مدت زمان ۷۵ دقیقه ترکیب مناسبی از خواص مکانیکی در این آلیاژ مشاهده می‌شود.

۳) نتایج حاصل نشان می‌دهد که آلیاژ ۴/۸ درصد آلومینیوم در ابتدای قرار گرفتن در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد با تشکیل لایه بسیار نازک اکسید آلومینیوم روپین شده و در زمان‌های بعد کوچکترین افزایش وزنی ناشی از اکسیداسیون را نشان نمی‌دهد.

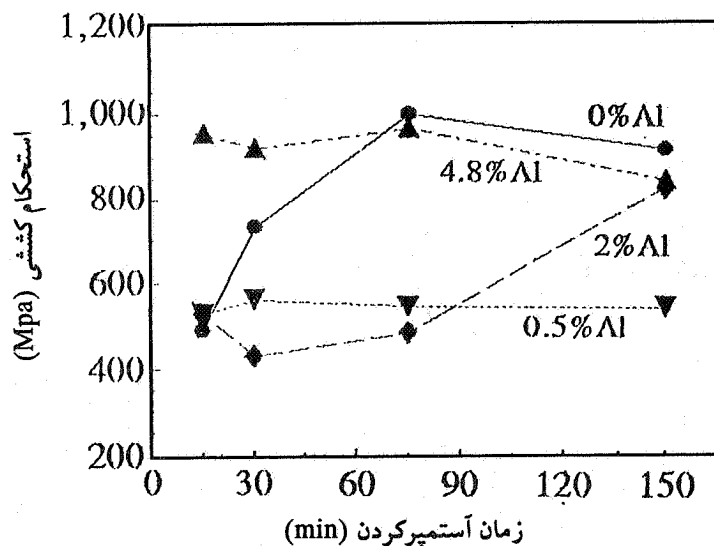
مراجع مختلف [۱ تا ۴] اشاره شده است، مع هذا محدوده دقیق نسبت اکسیژن به استیلن که منجر

جدول ۴ - نتایج به دست آمده از آزمایشهای کشش، سختی و ضربه در دمای آستینیته کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمپر کردن ۳۷۵ درجه سانتیگراد

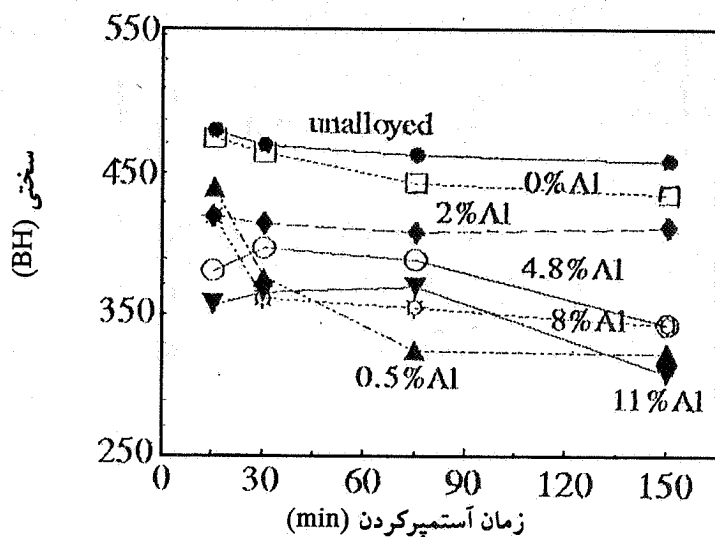
نام آلیاژ	زمان آستمپر کردن (دقیقه)	استحکام کششی (MPa)	درصد کرنش شکست	سختی (برینل)	انرژی ضربه ای (ژول)
غیر آلیاژی	۱۵	۵۹۶	۷/۵	۲۱۳	۱۳/۵
	۳۰	۶۸۱	۱۰	۲۲۷	۹/۷
	۷۵	۵۸۰	۱۰	۱۹۴	۹/۶
	۱۵۰	۵۰۳	۱۱/۳	۱۸۰	۱۰
% Al	۱۵	۷۸۹	۷/۲	۳۳۰	۸/۵
	۳۰	۶۸۱	۷/۲	۲۷۷	۱۱
	۷۵	۸۵۰	۷/۳	۲۶۶	۱۰/۲
	۱۵۰	۸۳۷	۷/۵	۲۶۳	۸/۸
%۰/۵ Al	۱۵	۶۴۰	۷/۱	۲۴۶	۷/۸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



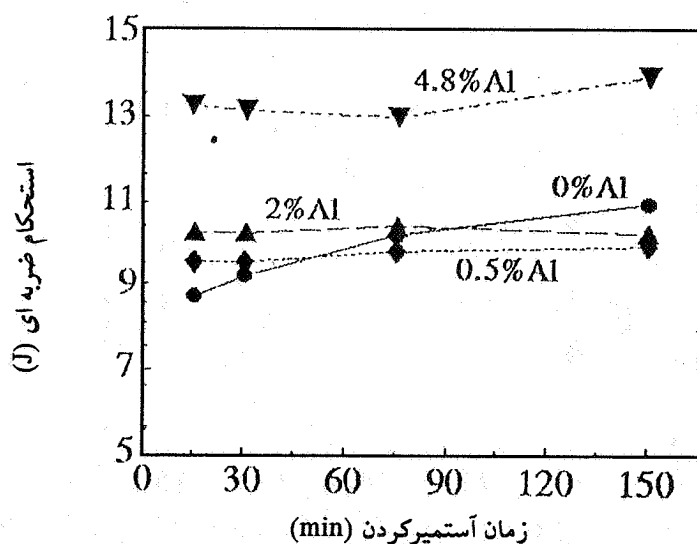
شکل ۹- تغییرات استحکام ضربه ای نسبت به زمان آستمبر کردن در چدنهای نشکن با درصدهای مختلف آلومینیوم، دمای آستنبه کردن ۸۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمبر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد



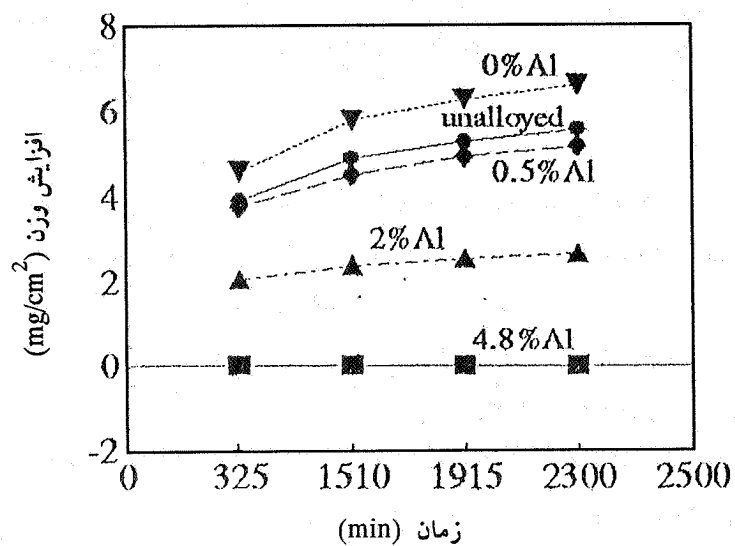
شکل ۱۰- تغییرات استحکام کششی نسبت به زمان آستمبر کردن چدنهای نشکن با درصدهای مختلف آلومینیوم، دمای آستنبه کردن ۹۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمبر کردن ۳۳۵ درجه سانتیگراد



شکل ۱۱ - تغییرات سختی نسبت به زمان آستمپر کردن چدنهای نشکن با درصدهای مختلف آلومینیوم، دمای آستنیت‌ه کردن ۹۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمپر کردن ۲۳۵ درجه سانتیگراد



شکل ۱۲ - تغییرات استحکام ضربه‌ای نسبت به زمان آستمپر کردن چدنهای نشکن با درصدهای مختلف آلومینیوم، دمای آستنیت‌ه کردن ۹۹۰ درجه سانتیگراد و دمای آستمپر کردن ۲۳۵ 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 گلغذار، م.ع.، "نقش زمان و درجه حرارت آستمپر کردن بر روی خواص مکانیکی ساختار میکروسکوپی چدنهای نشکن با درصدهای مختلفی از مس و قلع"، دومین سمینار سالیانه جامعه ریخته گران ایران، صفحات ۷۶-۹۸، 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. جعفریان، م.، توکلی، ف. و دوامی، پ.، "استفاده از مس بجای نیکل در چدنهای نشکن آستمپر"، اولین سمینار جامعه ریخته گران ایران، صفحات ۱-۳۰، آبان ماه ۱۳۶۷.
۵. نجفی زاده، ع. و گلغذار، م.ع.، "اثر دوره عملیات حرارتی آستمپر کردن روی خواص مکانیکی و ساختار میکروسکوپی چدنهای نشکن با درصدهای مختلفی از مس"، استقلال - فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی اصفهان، شماره ۸، صفحات ۳۲-۵۸، 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.