

## اثر دوره عملیات حرارتی آستمپر کردن روی خواص مکانیکی و ساختار میکروسکپی چدنهای نشکنی با درصدهای مختلفی از مس

عباس نجفی زاده\* - محمدعلی گل‌عذار\*

### خلاصه

در این تحقیق به بررسی اثر دوره عملیات حرارتی آستمپر کردن بر خواص مکانیکی و ساختار میکروسکپی چدنهای نشکنی با درصدهای متغیری از مس (بین ۵/۰ تا ۲ درصد) پرداخته شده، جهت انجام این پژوهش ابتدا ۴- بلوک‌هایی از جنس چدنهای نشکنی با درصدهای مختلفی از مس از طریق ریخته‌گری تهیه گردید و سپس با استفاده از آنها نمونه‌های متالوگرافی، کشش و ضربه ساخته شدند. نمونه‌های ساخته شده در دمای ۸۹۰ درجه سانتیگراد بمدت یک ساعت آستنیت‌ه و سپس در دماهای ۲۸۵، ۳۳۵ و ۳۷۵ درجه سانتیگراد بمدت زمانهای مختلف ۱۵، ۳۰، ۷۵ و ۱۵۰ دقیقه آستمپر گردیدند. نتایج حاصله نشان داد که چدن نشکنی با یک درصد مس که در دماهای ۲۸۵ و ۳۳۵ درجه سانتیگراد بمدت ۷۵ دقیقه آستمپر شده مناسب‌ترین ترکیب خواص مکانیکی را، نسبت به سایر آلیاژهایی که در همان شرایط آستمپر گردیده‌اند، داراست و این درحالی است که در دمای آستمپر کردن ۳۷۵ درجه سانتیگراد، آلیاژی با دو درصد مس که بمدت ۳۰ دقیقه آستمپر شده از خود مناسب‌ترین خواص مکانیکی را نشان می‌دهد.

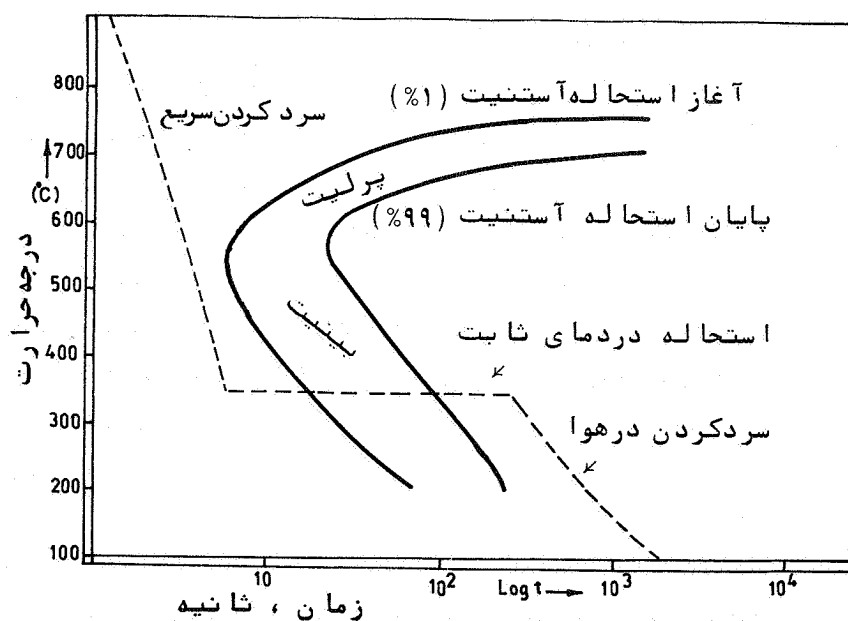
### مقدمه

چدنهای نشکن آستمپر شده بخاطر خواص مکانیکی عالی خود در دهه اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نوع چدن‌ها با

\* استادیاران دانشکده مواد - دانشگاه صنعتی اصفهان

داشتن استحکام کششی زیاد، مقاومت در برابر خستگی تماسی و خمشی خوب و قابلیت ماشین کاری مناسب خواصی معادل و در مواردی بالاتر از برخی از فولادهای آهنگری شده از خود نشان می‌دهند. چنین خواصی همراه با هزینه‌های تولید کمتر، نسبت به قطعات مشابه در روش آهنگری (حدود ۳۰ درصد کاهش قیمت تمام شده) موجب گردیده که جاذبه زیادی در صنعت برای استفاده از این دسته چدن‌ها بوجود آید [۳ تا ۴]. از جمله این قطعات می‌توان به انواع چرخ دنده‌ها با اندازه‌های مختلف، انواع میل‌لنگ‌ها و میل‌بادامک‌ها اشاره نمود [۴ تا ۶].

این نوع چدن از انجام فرآیند عملیات حرارتی خاصی موسوم به آستمپر کردن روی چدن‌های نشکن بدست می‌آید (شکل ۱).



شکل ۱ - نمایش فرآیند عملیات آستمپر کردن (خط چین) روی نمودار ایزوترم یک چدن نشکن غیر آلیاژی

بطور کلی فرآیند آستمپر کردن شامل چهار مرحله زیر است:  
مرحله ۱ - قرار دادن قطعه ریختگی در دمای آستنیت ب مدت زمانی معین ( در پایان این مرحله لازم است زمینه ساختار میکروسکپی قطعه کاملاً " آستنیه شده باشد .

مرحله ۲ - سرد کردن سریع قطعه بکمک یک محیط خنک کننده نظیر حمام نمک ، تا درجه حرارت معینی موسوم به دمای آستمپر کردن .

مرحله ۳ - نگهداری قطعه ب مدت زمانی معین در این دما .

مرحله ۴ - خروج و سرد کردن قطعه تا درجه حرارت محیط .

با انجام این فرآیند ساختار میکروسکپی چدن نشکن از پرلیتی- فریتی به بینیتی تبدیل خواهد شد. تحقیقات انجام گرفته نشان داده که خواص نهائی چدن نشکن آستمپر شده عمدتاً " متاثر از عواملی نظیر شرایط ریخته‌گری ، ترکیب شیمیائی و دوره عملیات حرارتی آستمپر کردن می‌باشد [۸ و ۷]. تغییر این عوامل می‌تواند خواص مکانیکی قطعه را در یک محدوده نسبتاً " گسترده قرار دهد ( استحکام کششی از ۸۰۰-۱۶۰۰ مگا پاسکال و کرنش شکست از ۱-۱۶ درصد).

از دیدگاه کاربردی چدنهای نشکن آستمپر شده را به دو دسته تقسیم می‌کنند:

دسته اول: چدنهای نشکنی که در دمای پائین آستمپر شده اند ( ۲۵۰ - ۳۳۰ درجه سانتیگراد ) اینگونه چدنها دارای استحکام ، سختی و مقاومت به سایش بالائی می‌باشند. این ساختار میکروسکپی به بینیت پائینی موسوم است .

دسته دوم: چدنهای نشکنی که در دمای بالا آستمپر شده اند ( ۳۳۰ - ۴۵۰ درجه سانتیگراد). گرچه استحکام و سختی این دسته پائین تر از اولی است ، لیکن این چدنها می‌تواند دارای ترکیب مناسبی از استحکام بالا و قابلیت انعطاف پذیری زیاد باشند. این ساختار میکروسکپی بینیت بالائی

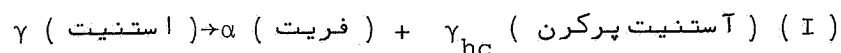
نامیده می‌شود.

### استحاله بینیتی در چدنهای نشکن آستمپر شده

استحاله بینیتی در چدنهای نشکن آستمپر شده در دو مرحله

انجام می‌پذیرد:

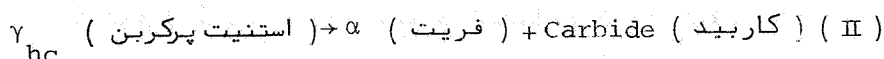
مرحله اول: هنگامیکه قطعه در دمای آستمپر قرار گرفت، جوانه‌های فاز فریت در روی مرزهای فازی و یا مرز دانه‌ها تشکیل می‌شود و سپس این جوانه‌ها در درون فاز آستنیت شروع به رشد می‌کنند. بدلیل بالا بودن درصد سیلیسیم در ترکیب شیمیائی چدن، تشکیل سمانتیت - که معمولاً همراه با فریت است با مانع مواجه خواهد شد. لذا رشد سوزنهای فریتی با پس زدن کربن‌های اضافی به درون آستنیت‌های مجاور توأم خواهد گردید. در این شرایط درصد کربن در آستنیت‌های هم‌جوار فریت مرتباً افزایش می‌یابد و حتی تا نزدیک به ۲ درصد نیز می‌رسد [۹ و ۱۰]. باین ترتیب در این مرحله، استحاله بینیتی را می‌توان بصورت واکنش زیر نوشت:



افزایش درصد کربن در آستنیت، دمای تبدیل آن را به مارتنزیت کاهش می‌دهد و حتی به زیر ۱۲۰- درجه سانتیگراد نیز می‌رساند [۹] در این موقع اگر قطعه از حمام نمک‌خارج و سرد شود ساختار میکروسکوپی آن حاوی صفحات فریتی با اضافه آستنیت پرکربن خواهد بود. چنین ساختاری از لحاظ داشتن ترکیب مناسبی از استحکام و انعطاف‌پذیری بسیار مطلوب است.

مرحله دوم: اگر قطعه همچنان در دمای آستمپر کردن نگهداری شود،

بتدریج آستنیت پرکربن طی واکنش زیر به فریت و کاربید تجزیه خواهد شد.



انجام چنین واکنشی موجب کاهش انعطاف پذیری قطعه بدون تغییر عمده در استحکام کششی خواهد گردید. بنابراین این واکنشی است نامطلوب

### اثر عناصر آلیاژی

یکی از دلائل اضافه نمودن عناصر آلیاژی به چدنهای نشکن آستمپر شده افزایش سختی پذیری در آنهاست. البته انتخاب اینگونه عناصر با دقت انجام می‌گیرد. زیرا لازم است عناصر آلیاژی اثرات مخربی روی کیفیت قطعات ریختگی و همچنین مشخصات مکانیکی حالت آستمپر شده آنها نداشته باشد. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد که عناصری نظیر Mn و Mo و Ni و Cu به تنهایی یا مشترکا " برای تامین این اهداف می‌توانند مفید واقع شوند [۱۱ و ۱۲].

از بین عناصر فوق لازم است درصد منگنز و مولیبدن را، بخاطر ایجاد پدیده جدایش در هنگام انجماد، در چدن محدود نمود. نشان داده شده که حداکثر مقدار مفید این عناصر در ترکیب شیمیایی چدن به ترتیب عبارتند از ۳/۵٪ و ۲۵/۰٪ [۱۳].

عناصر دیگر نظیر Ni و Cu را می‌توان تا حدود ۲٪ در این چدن‌ها مورد استفاده قرار داد. تحقیقات انجام گرفته در این زمینه نشان داده که اثرات Ni و Cu در این محدوده تشابهاتی با یکدیگر دارند [۱۱]. با توجه به این نتایج و همچنین با عنایت به قیمت بالای نیکل نسبت به مس، توجه این پژوهش صرفاً " معطوف به بررسی اثرات عنصر مس روی خواص مکانیکی این نوع چدن‌ها گردیده.

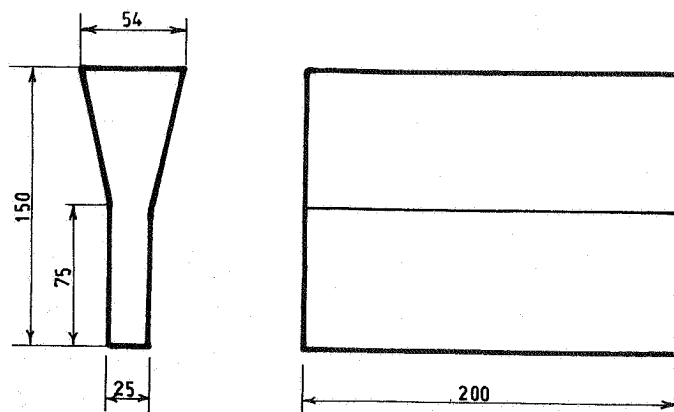
## ۳ - روش آزمایش

## روش قالب‌گیری

دو نوع قالب در هر ذوب مورد استفاده قرار گرفت .

یکی : قالب‌های ماسه‌ای برای تهیه تعداد کافی Y- بلوک با اندازه استاندارد ( شکل ۲ ) .

دیگری: قالب‌فلزی ، بمنظور تهیه نمونه کوانتومتری از هر ذوب .  
قالب‌های موقت یکمک دست و با استفاده از ماسه سیلیسی و چسب سیلیکات سدیم بروش  $CO_2$  ، تهیه شدند و سپس سطوح آنها بتوسط رنگ گرافیت پوشش داده شدند .



شکل ۲ - ابعاد Y- بلوک مورد استفاده مطابق با استاندارد

ASTM A536 - 80

## آماده سازی مذاب

کلیه ذوب‌ها در یک کوره زمینی و با استفاده از موارد زیر تهیه شده‌اند .

- شمش سورل متال با ترکیب شیمیایی صفحه بعد :

۳/۸ - ۴/۳	( C )	کربن
۱/۵	( Si )	سیلیسیم
۰/۰۲ - ۰/۰۸	( Mn )	منگنز
۰/۰۲ - ۰/۰۸	( S )	گوگرد
۰/۰۲ - ۰/۰۴	( P )	فسفر

- فرو سیلیس ۷۵ درصد

- فرو سیلیکومنیزیم با حدود ۵/۵ درصد منیزیم

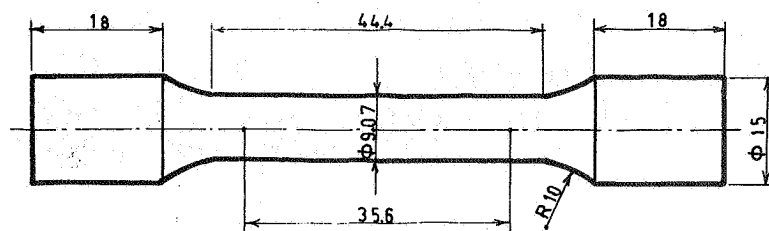
- مس خالص

مراحل آماده سازی هر ذوب به ترتیب زیر بود:

- ۱ - ۴۰ کیلوگرم شمش سورل بداخل بوته ریخته و ذوب گردید.
- ۲ - حدود بیست دقیقه قبل از پایان ذوب، ۱۸۰ گرم فروسیلیس ۷۵ درصد به همراه مقدار مس لازم ( با احتساب اتلافات مس ) بداخل بوته اضافه شد.
- ۳ - پس از اتمام ذوب، عمل سرباره گیری و کنترل دما انجام گرفت.
- ۴ - عمل کروی کردن بکمک روش غوطه وری ( Plunging ) انجام گرفت.
- ۵ - درست قبل از ریختن مذاب بداخل قالبها مقدار ۱۸۰ گرم فروسیلیس ۷۵ درصد بعنوان جوانه‌زا به آن اضافه شد.
- ۶ - پس از گذشت سه الی چهار ساعت ۷- بلوکها، از قالب خارج گردیدند.

نمونه‌های تهیه شده از ۷- بلوک‌های هر ذوب

در هر ذوب یکی از ۷- بلوکها جهت بررسی خواص مکانیکی در حالت ریختگی نگهداشته شد و بقیه در دمای ۸۹۰ درجه سانتیگراد بمدت یک ساعت آنیل گردیدند. سپس با استفاده از قسمت پائین ۷- بلوکها نمونه‌های کشش به ابعاد استاندارد ( شکل ۳ ) و نمونه‌های ضربه شیاردار جهت انجام آزمایش چارپی - تهیه شدند.



شکل ۳ - ابعاد نمونه آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM A536-80

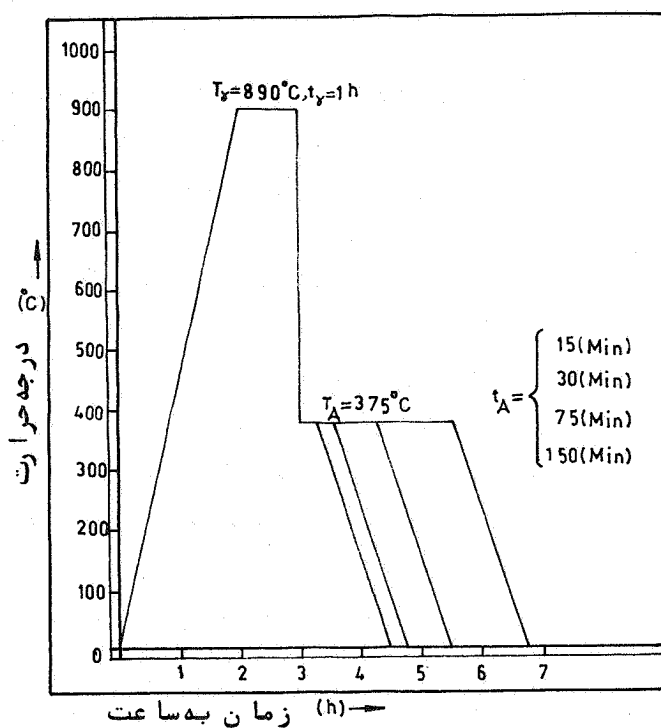
#### عملیات حرارتی آستمپر کردن

نمونه‌های ضربه و کشش تهیه شده از ۷- بلوک‌های آنیل شده را در دوازده جعبه سمانتاسیون، حاوی براده چدن، بقرار هر جعبه شامل مجموعه‌ای از ۲-۳ نمونه کشش و ۲-۲ نمونه ضربه قرار داده شدند و عملیات حرارتی آستمپر کردن روی آنها به ترتیب زیر انجام گرفت.

- ۱ - جعبه‌های سمانتاسیون در داخل کوره عملیات حرارتی قرار داده شدند و کوره روشن گردید تا دمای آن به ۸۹۰ درجه سانتیگراد رسید، آنگاه بمدت یکساعت جعبه‌ها در این دما نگهداشته شدند.
  - ۲ - جعبه‌ها به سه دسته چهارتایی تقسیم شدند. آنگاه نمونه‌های هر دسته از جعبه خارج و در حمام نمکی با درجه حرارت مورد نظر قرار گرفتند. دماهای آستمپر کردن مورد استفاده عبارت بودند از ۲۸۵، ۳۳۵ و ۳۷۵ درجه سانتیگراد.
  - ۳ - در هر دمای آستمپر کردن پس از گذشت زمان‌های ۱۵، ۳۰، ۷۵ و ۱۵۰ دقیقه یک مجموعه (شامل ۳-۲ نمونه کشش و ۳-۲ نمونه ضربه) از حمام نمک خارج و در هوا سرد شد.
- نمونه‌های ازدوره‌های عملیات حرارتی آستمپر کردن در دمای



۳۷۵ درجه سانتیگراد را می‌توان در شکل ۴ مشاهده نمود.



شکل ۴ - نمونه از دوره‌های عملیات حرارتی

آستمپر کردن در دمای ۳۷۵ درجه  
سانتیگراد

### آزمایشات انجام گرفته

آزمایشاتی که روی نمونه‌های هر ذوب انجام گرفت، عبارت بودند از: آزمایش کشش، ضربه، تعیین سختی بروش برینل (با نیروی ۱۸۷/۵ کیلوگرم و ساچمه ۲/۵ میلی متر)، بررسی ساختار میکروسکپی بکمک میکروسکپ نوری و آنالیز هر ذوب بروش کواتتومتری.

### ۴- نتایج حاصله از آزمایشات و بررسی آنها

#### ۴-۱- ترکیب شیمیائی نمونه‌ها

۴ ذوب با ترکیب‌های شیمیائی مندرج در جدول ۱ ریخته شد.

#### ۴-۲- خواص مکانیکی نمونه‌های آستمپ‌شده

بمنظور ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌ها، آزمایشات کشش سختی و ضربه روی آنها انجام گرفت. در این رابطه جهت حصول نتیجه میانگین در هر حالت بین ۲ تا ۳ آزمایش کشش و ضربه و ۵ اندازه‌گیری سختی انجام گرفت و سپس میانگین آنان محاسبه گردید. نتایج بدست آمده در جدول ۲ الی ۵ و نمودارهای ۵ الی ۷ ارائه گردیده.

بررسی خواص مکانیکی در دمای آستمپ کردن ۲۸۵ درجه سانتیگراد میانگین نتایج آزمایشات مکانیکی انجام گرفته در این درجه حرارت در نمودار شماره ۵ و قسمتی از جدول ۲ الی ۵ ارائه شده است. با توجه به این اطلاعات نتایج زیر را می‌توان استخراج نمود.

- ۱- بطور کلی تا زمان آستمپ کردن ۷۵ دقیقه استحکام کششی هر آلیاژ افزایش یافته و سپس تقریباً " ثابت باقی می‌ماند.
- ۲- با استثناء آلیاژ ۵/۵ درصد مس، کرنش شکست تا زمان آستمپ کردن ۷۵ دقیقه زیاد شده و آنگاه تقریباً " ثابت باقی می‌ماند. چنین رفتاری حاکی از آن است که در این دما مس بعنوان یک عامل کند کننده سرعت واکنش (II) عمل می‌نماید، در آلیاژ ۵/۵

جدول ۱ - ترکیب شیمیائی آلیاژهای ریخته شده

%Cu	%Ni	%Mg	%P	%S	%Mn	%Si	%C	درصد اسمی Cu در آلیاژ	شماره ذوب
۰/۴۳	۰/۱۲۲	۰/۰۶۳	۰/۰۲	۰/۰۱۹	۰/۰۱۵	۲/۴۶	۳/۴۷	۰/۵	۱
۰/۹۶	۰/۱۱۳	۰/۰۵۴	۰/۰۱۹	۰/۰۱۸	۰/۰۱۴	۲/۶۳	۳/۵۴	۱	۲
۱/۴۱	۰/۱۱۷	۰/۰۵۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱۷	۰/۰۱۵	۲/۵۸	۳/۵۵	۱/۵	۳
۱/۸۹	۰/۱۲۳	۰/۰۶۲	۰/۰۲۱	۰/۰۱۴	۰/۰۱۳	۲/۴۹	۳/۴۸	۲	۴

جدول شماره ۲ - نتایج حاصله از آزمایشات کشش، سختی و ضربه روی نمونه‌های آلیاژی با ۰/۵ درصد مس

انرژی ضربه‌ای (J)	سختی برینل	درصد کرنش شکست	استحکام کششی (Mpa)	زمان آستمپر (°C)	دمای آستمپر کردن (°C)	درصد اسمی در آلیاژ
۵/۵	۲۴۶	۶	۶۷۰	بحالت ریختگی		۰/۵
۶/۵	۲۹۵	۲/۴	۱۰۷۷	۱۵	۲۸۵	
۷	۲۵۵	۲/۴	۱۱۴۱	۳۰		
۵/۵	۲۸۵	۲/۹	۱۲۴۶	۷۵		
۶	۲۸۵	۲/۸	۱۳۰۲	۱۵۰		
۶/۸	۳۴۳	۲/۴	۱۱۱۲	۱۵		
۸	۳۵۲	۲/۶	۱۱۲۶	۳۰		
۵	۳۷۱	۲/۹	۱۱۳۰	۷۵		
۸	۳۲۴	۲/۱	۱۱۱۰	۱۵۰		
۱۰	۲۸۲	۴/۵	۷۹۷	۱۵	۳۷۵	
۷	۲۹۹	۵	۹۶۰	۳۰		
۴	۲۹۵	۲/۲	۹۵۰	۷۵		
۳/۸	۳۰۸	۲/۴	۸۹۱	۱۵۰		

جدول شماره ۳- نتایج حاصله از آزمایشات کشش، سختی و ضربه روی نمونه‌های آلیاژی با ۱ درصد مس

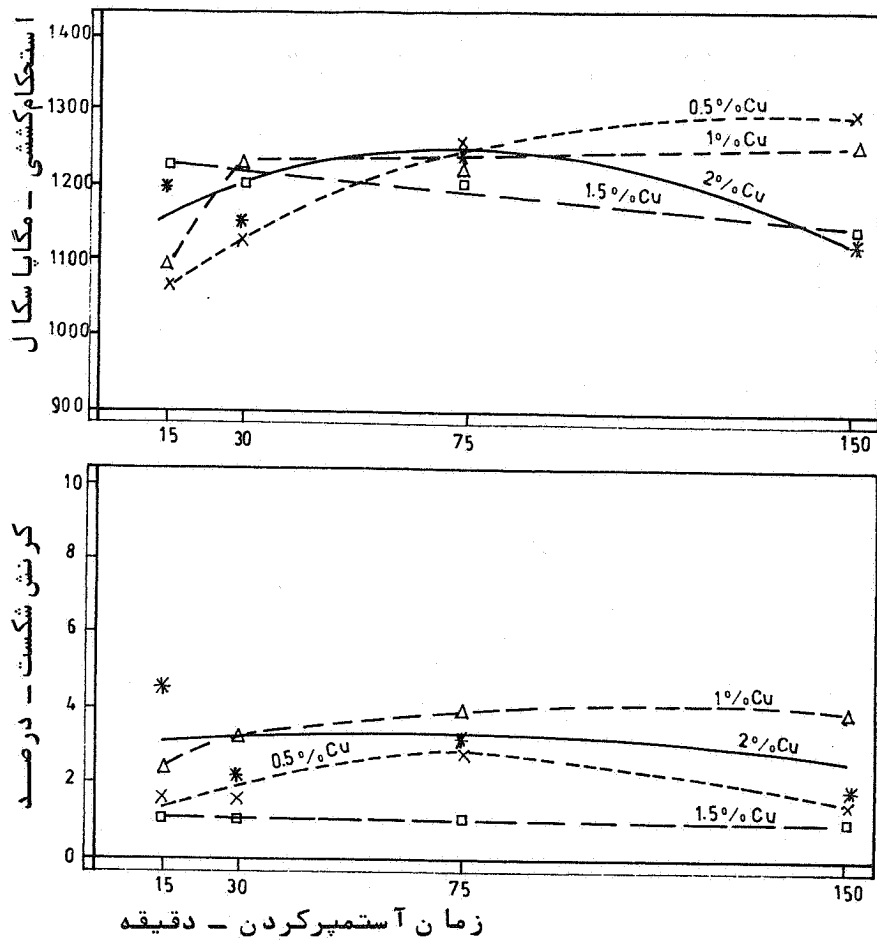
انرژی ضربه‌ای (J)	سختی برینل	درصد کرنش شکست	استحکام کششی (Mpa)	زمان آستمپر کردن (°C)	دمای آستمپر کردن (°C)	درصد اسمی در Cu آلیاژ
۵/۳	۲۵۵	۱۰/۳	۶۲۷	بحالت ریختگی		۱
۷	۳۸۸	۲/۲	۱۱۰۰	۱۵	۲۸۵	
۸	۳۷۸	۳/۱	۱۲۲۹	۳۰		
۷	۳۹۳	۳/۷	۱۲۴۳	۷۵		
۶	۳۹۳	۳/۷	۱۲۶۰	۱۵۰		
۷/۵	۳۳۵	۴/۷	۱۱۴۰	۱۵	۳۳۵	
۶	۳۷۸	۳/۵	۱۱۱۰	۳۰		
۱۰	۳۶۷	۶/۵	۱۱۴۰	۷۵		
۹/۵	۳۱۰	۴/۶	۱۰۳۹	۱۵۰		
۹	۲۸۹	۲	۹۰۷	۱۵	۳۷۵	
۹/۸	۳۱۳	۵/۱	۱۰۵۲	۳۰		
۸/۳	۳۲۵	۲/۴	۹۸۶	۷۵		
۸	۳۲۱	۱/۶	۱۰۱۱	۱۵۰		

جدول شماره ۴- نتایج حاصله از آزمایشات کشش، سختی و ضربه روی نمونه‌های آلیاژی با ۱/۵ درصد مس

انرژی ضربه‌ای (J)	سختی برینل	درصد کرنش شکست	استحکام کششی (Mpa)	زمان آستمپر کردن (°C)	دمای آستمپر کردن (°C)	درصد افسمی در Cu آلیاژ
—	—	—	—	بحالت ریختگی		۱/۵
۷/۵	۳۲۰	۱/۲	۱۲۳۷	۱۵	۲۸۵	
۶/۹	۲۹۸	۱/۲	۱۲۱۵	۳۰		
۶/۸	۳۰۶	۱/۱	۱۲۱۲	۷۵		
۶/۸	۲۹۷	۱	۱۱۵۳	۱۵۰		
۱۲	۲۸۵	۲	۱۰۸۱	۱۵	۳۳۵	
۱۲/۶	۲۶۰	۳/۷	۱۰۰۹	۳۰		
۱۱/۲	۲۷۲	۲/۸	۱۱۲۹	۷۵		
۸/۵	۲۵۵	۳/۴	۹۲۴	۱۵۰		
۱۲/۲	۲۵۵	۴/۲	۹۷۵	۱۵	۳۷۵	
۱۳/۸	۲۴۴	۴/۵	۹۹۹	۳۰		
۱۲/۸	۲۶۰	۳/۶	۹۶۲	۷۵		
۱۰/۲	۲۶۶	۳/۴	۹۳۶	۱۵۰		

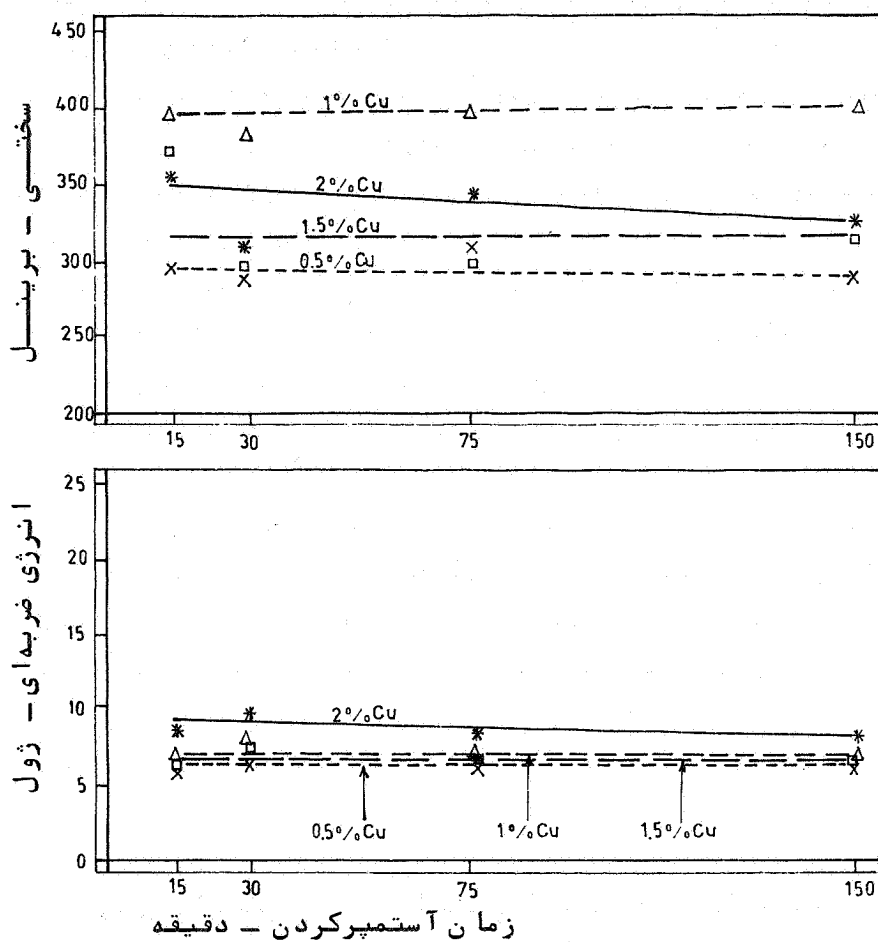
جدول شماره ۵ - نتایج حاصله از آزمایشات کشش ، سختی و ضربه روی نمونه‌های آلیاژی با ۲ درصد مس

انرژی ضربه‌ای (J)	سختی برینل	درصد کرنش شکست	استحکام کششی (Mpa)	زمان آستمپر کردن (°C)	دمای آستمپر کردن (°C)	درصد اسمی در Cu آلیاژ
—	—	—	—	بحالت ریختگی		۲
۸/۴	۳۵۹	۴/۳	۱۲۰۲	۱۵	۲۸۵	
۹/۲	۳۱۴	۲/۴	۱۱۶۰	۳۰		
۷/۵	۳۲۹	۳/۱	۱۲۵۶	۷۵		
۸/۶	۳۲۱	۱/۴	۱۱۴۰	۱۵۰		
۷/۲	۳۸۲	۳/۶	۱۲۵۰	۱۵	۳۳۵	
۷/۲	۳۸۳	۳/۱	۱۲۹۰	۳۰		
۸/۳	۳۶۲	۲/۸	۱۲۰۲	۷۵		
۶/۲	۳۷۳	۳/۳	۱۲۰۸	۱۵۰		
۹/۳	۳۴۲	۴/۲	۱۱۰۱	۱۵	۳۷۵	
۹/۸	۳۲۹	۵/۴	۱۰۸۲	۳۰		
۸/۸	۳۵۴	۵/۵	۱۰۸۲	۷۵		
۹/۶	۳۳۳	۴/۸	۱۰۱۷	۱۵۰		



شکل ۵ - نمودار تغییرات استحکام کششی و کرنش شکست نمونه‌هایی که در دمای ۲۸۵ درجه سانتیگراد بمدت زمانهای مختلف آستمپر شده‌اند.





ادامه شکل ۵ - نمودار تغییرات سختی و انرژی ضربه‌ای نمونه‌هایی که در دمای ۲۸۵ درجه سانتیگراد بمدت زمانهای مختلف آستمپر شده‌اند.

درصد مس، مقدار این عنصر به اندازه‌ای نیست که بتواند اثر عمده‌ای در این رابطه از خود نشان دهد. لیکن از ۱٪ به بالا اثرات آن کاملاً محسوس است.

۳- بطور کلی مشاهده می‌شود که افزایش درصد مس، در زمانهای آستمپر شدن بیش از ۷۵ دقیقه موجب کاهش استحکام کشش می‌گردد.

۴- زمان آستمپر کردن از ۱۵ تا ۱۵۰ دقیقه اثر چندانی روی تغییر میزان سختی هیچیک از آلیاژها ندارد.

۵- مقادیر استحکام ضربه‌ای کلیه آلیاژها نسبتاً پائین است (بین ۵ تا ۹ ژول) و این مقدار برای هر یک از آنها با تغییر زمان آستمپر کردن تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

مقایسه نتایج فوق با تحقیقات سایرین [۱۳ و ۱۱ و ۱۰] همخوانی آنها را تأیید می‌نماید.

بررسی کلیه نتایج فوق مشخص می‌نماید که آلیاژی با ترکیب یک درصد مس که بمدت ۷۵ دقیقه در این دما آستمپر شده می‌تواند مناسب‌ترین ترکیب خواص مکانیکی را نسبت به سایرین دارا باشد. در این شرایط مشخصات مکانیکی این آلیاژ عبارت است از:

- استحکام کششی (Mpa) ۱۲۵۰

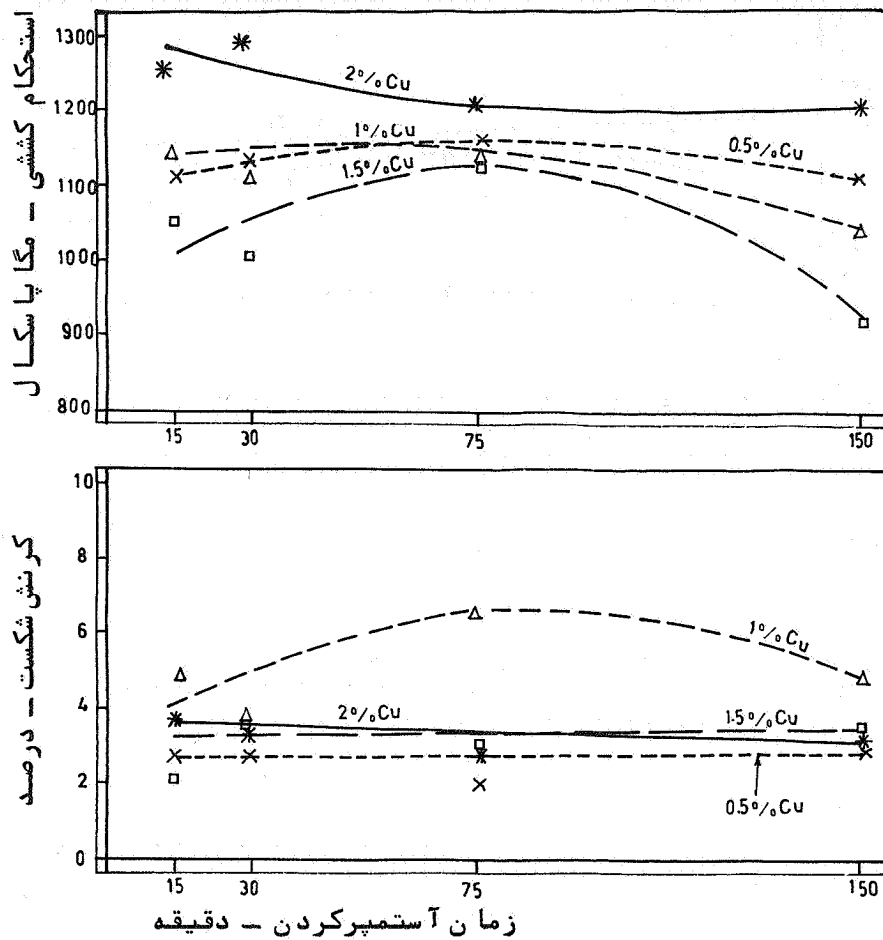
- درصد کرنش شکست ۴

- سختی HB ۳۹۰

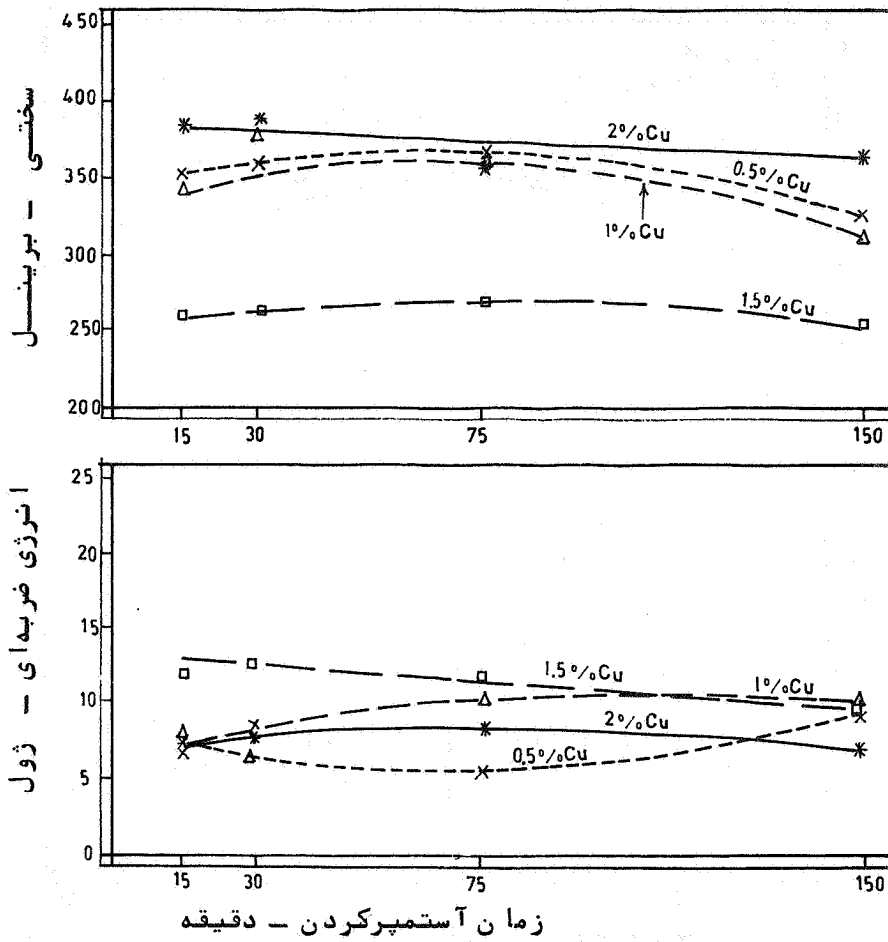
بررسی خواص مکانیکی در دمای آستمپر کردن ۳۲۵ درجه سانتیگراد نمودار شماره ۶ و قسمتی از جداول ۲ الی ۵ بیانگر میانگین نتایج حاصله از آزمایشات مکانیکی روی آلیاژهای مورد مطالعه می‌باشند. بررسی این اطلاعات نیز مراتب کلی زیر را آشکار می‌سازد.

۱- استحکام کششی آلیاژها در زمان ۷۵ دقیقه به مقدار ماکزیمم خود میرسد.

۲- کرنش شکست آلیاژی با ۱٪ مس نیز آهنگ مشابهی با تغییرات



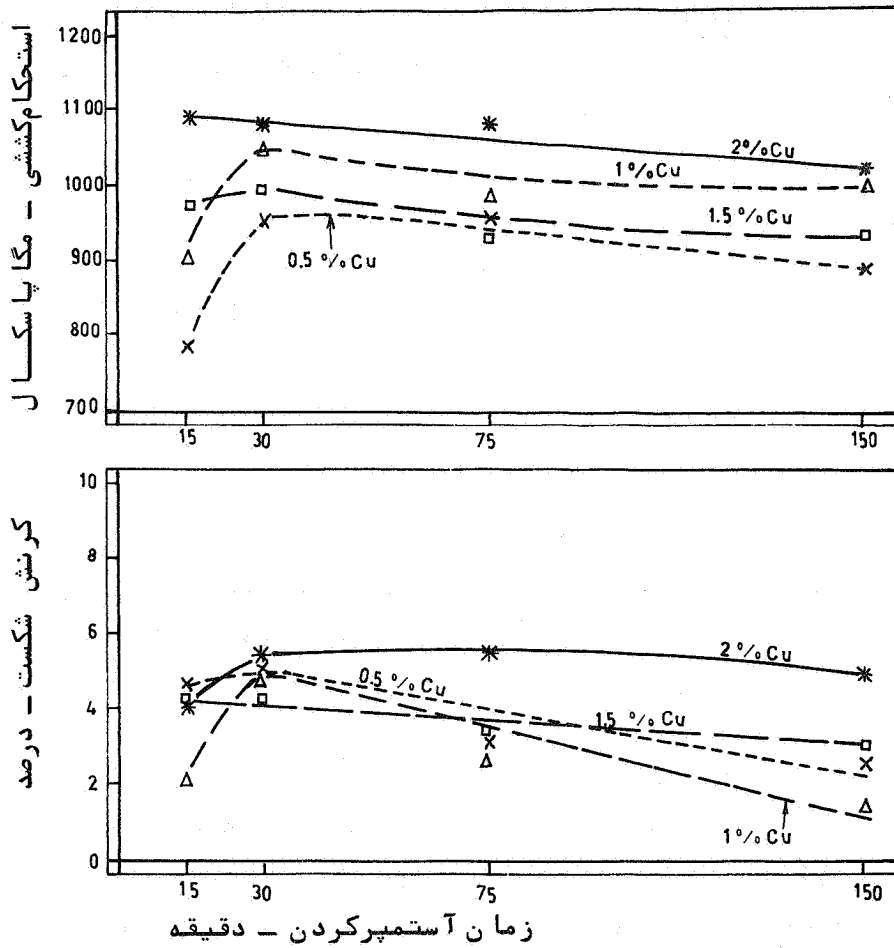
شکل ۶ - نمودار تغییرات استحکام کششی و کرنش شکست نمونه‌هایی که در دمای ۳۳۵ درجه سانتیگراد بمدت زمانهای مختلف آستمپر شده‌اند.



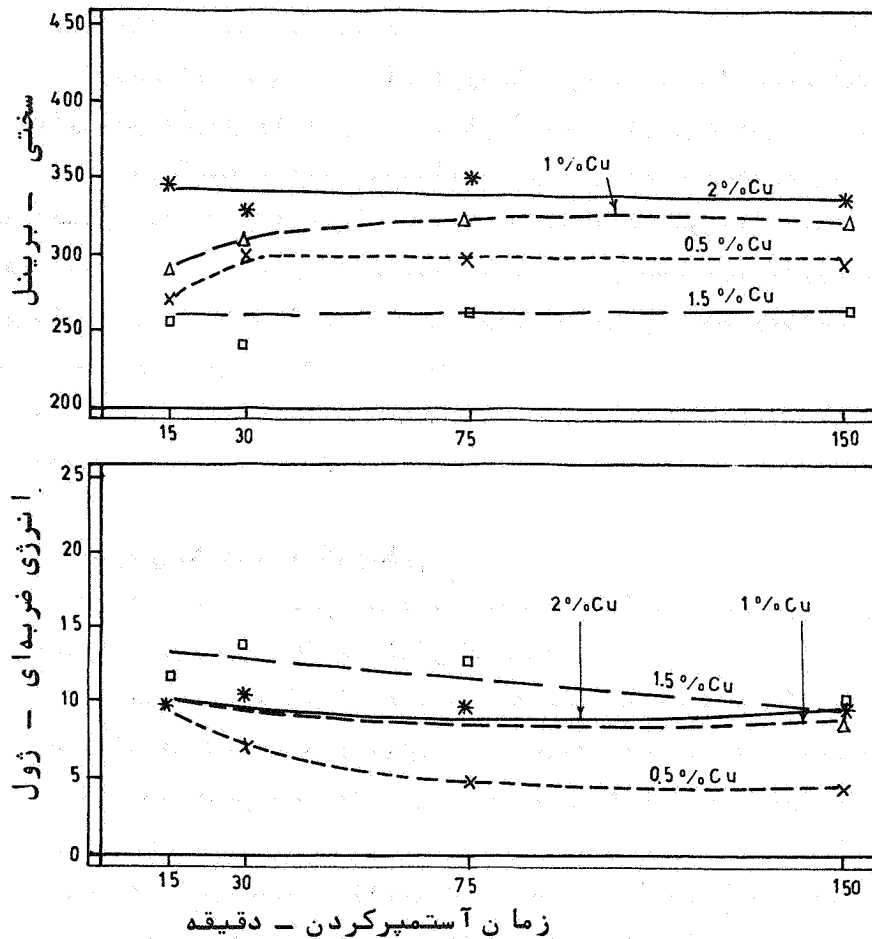
ادامه شکل ۶ - نمودار تغییرات سختی و انرژی ضربه‌ای نمونه‌هایی که در دمای ۳۳۵ درجه سانتیگراد بمدت زمانهای مختلف آستمپر شده‌اند.

- استحکام کششی از خود نشان می‌دهد. اما کرنش شکست سایر آلیاژها تقریباً مستقل از زمان آستمپر کردن می‌باشند.
- ۳ - سختی کلیه آلیاژها در این دما تا زمان ۷۵ دقیقه اندکی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد.
- ۴ - تغییرات زیادی در استحکام ضربه‌ای هر آلیاژ نسبت به تغییر زمان آستمپر کردن دیده نمی‌شود.
- با بررسی کلیه نتایج حاصله در این دما مشخص می‌شود که آلیاژی با ۱٪ مس که بمدت ۷۵ دقیقه آستمپر شده دارای مناسب‌ترین ترکیب خواص مکانیکی نسبت به سایرین می‌باشد. در این شرایط مشخصات آلیاژ فوق بقرار زیر است:
- استحکام کششی (Mpa) ۱۱۵۰
  - درصد کرنش شکست ۷
  - سختی HB ۳۷۰

- بررسی خواص مکانیکی در دمای آستمپر کردن ۳۷۵ درجه سانتیگراد میانگین نتایج آزمایشات مکانیکی انجام گرفته در این درجه حرارت در نمودار شماره ۷ و بخشی از جدول ۲ الی ۵ ارائه شده. بررسی این اطلاعات مراتب کلی زیر را آشکار می‌سازد:
- ۱ - مقادیر استحکام کششی و کرنش شکست هر آلیاژ تا زمان آستمپر کردن ۳۰ دقیقه افزایش یافته و سپس بتدریج کاهش می‌یابد. علت افت این دو عامل پس از زمان آستمپر کردن ۳۰ دقیقه را می‌باید به فعال شدن واکنش (II) از این زمان به بعد مربوط دانست.
- ۲ - از زمان آستمپر کردن ۳۰ دقیقه به بعد، ملاحظه می‌گردد که بطور کلی افزایش درصد مس در آلیاژ موجب بهبود استحکام کششی آن می‌گردد.
- ۳ - سختی آلیاژها تقریباً از همان تغییرات استحکام کششی، لیکن



شکل ۷ - نمودار تغییرات استحکام کششی و کرنش شکست نمونه‌هایی که در دمای ۳۷۵ درجه سانتیگراد بمدت زمانهای مختلف آستمپر شده‌اند.



ادامه شکل ۷ - نمودار تغییرات سختی و انرژی ضربه‌ای نمونه‌هایی که در دمای ۳۷۵ درجه سانتیگراد بمدت زمانهای مختلف آستمپر شده‌اند.

با نرخ کمی پیروی می‌نمایند.

۴ - افزایش زمان آستمپر کردن روی استحکام ضربه‌ای آلیاژهای مختلف اثر چندانی ندارد.

استثناء در این موارد آلیاژی با ۵/۰ درصد مس است. استحکام ضربه‌ای این آلیاژ با افزایش زمان آستمپر کردن کاهش می‌یابد. بررسی کلیه نتایج بدست آمده در این دما، مشخص می‌نماید که آلیاژی با ۲ درصد مس که بمدت ۳۰ دقیقه در این دما آستمپر شده، دارای مناسب‌ترین ترکیب خواص مکانیکی نسبت به سایرین می‌باشد. در این حالت آلیاژ فوق دارای خواص مکانیکی زیر است.

- استحکام کششی (Mpa) ۱۰۸۰

- درصد کرنش شکست ۵/۵

- سختی HB ۳۳۰

#### ۴-۳ - بررسی ساختار میکروسکوپی

ساختار میکروسکوپی کلیه نمونه‌ها چه حالت ریختگی و چه پس از آستمپر شدن مورد مطالعه قرار گرفتند.

در حالت ریختگی در همه ذوب‌ها نکات زیرمشترک بود:

۱ - درصدگرافیت‌های کروی بیش از ۹۰ درصد بوده و تعداد آنها در هر میلی‌متر مربع سطح مقطع بین ۱۰۰-۱۵۰ عدد نوسان می‌نمود (شکل ۸).

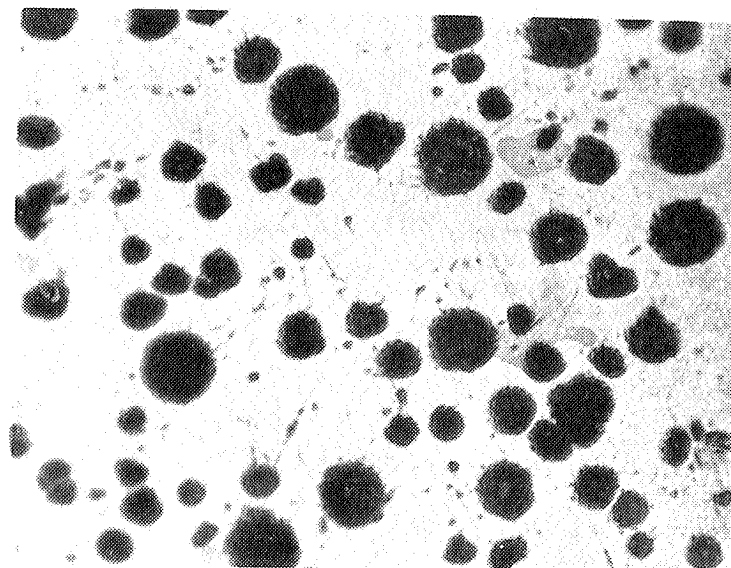
۲ - درصد فاز فریت با افزایش مقدار مس در آلیاژ کاهش می‌یافت. بطوریکه از ۱٪ مس به بالا، مقدار فریت حتی از ۱۰٪ نیز کمتر شد.

۳ - کاربید و معایب‌گازی در نمونه‌ها مشاهده نشد.

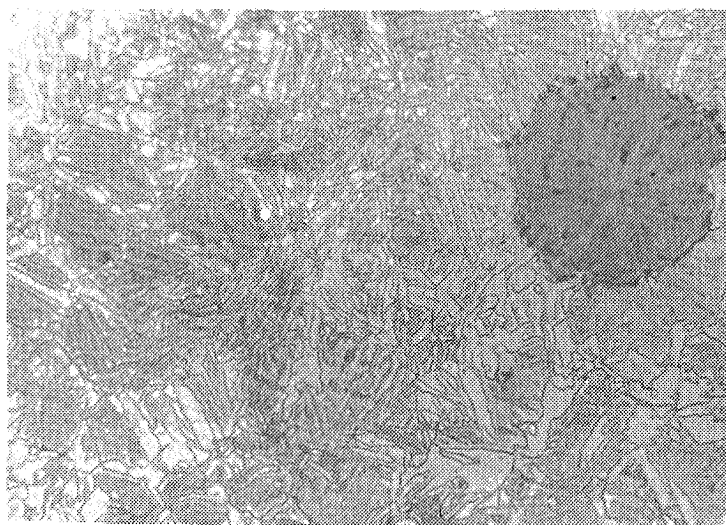
در حالت آستمپر شده بررسی ساختار میکروسکوپی نمونه‌ها تائید

کننده این نکته بود که ساختار اصلی نمونه‌هایی که در دمای ۲۸۵ درجه سانتیگراد آستمپر شده‌اند از بینیت پائینی و نمونه‌هایی

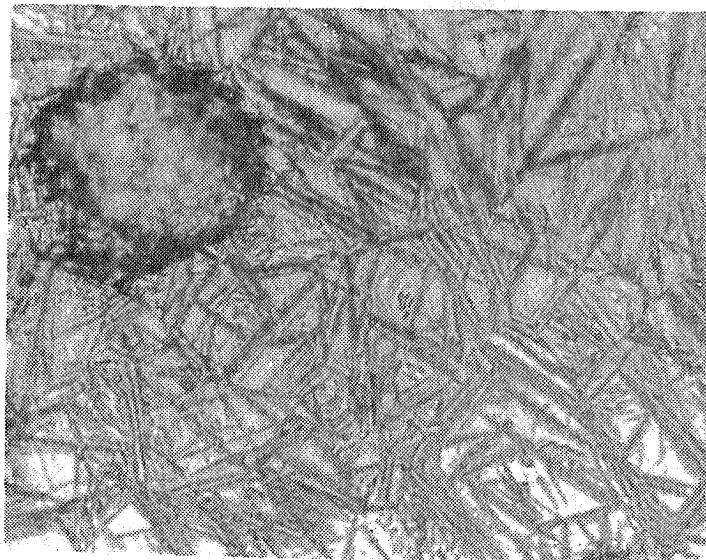




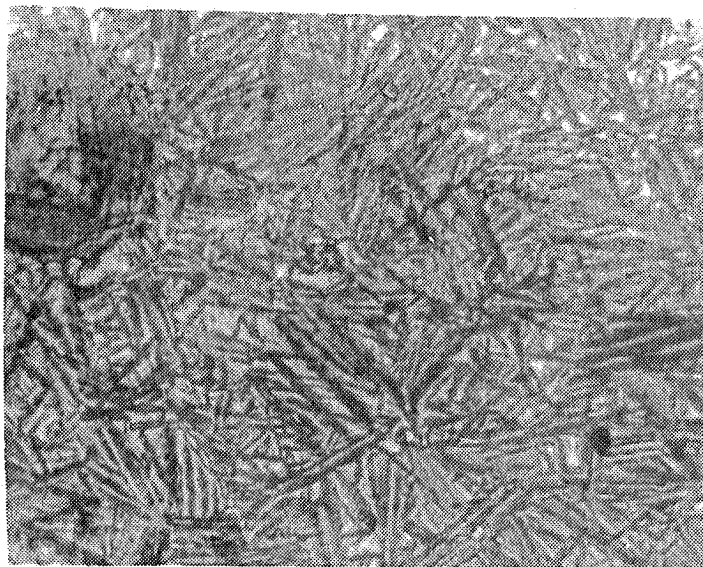
شکل ۸ - ساختار میکروسکپی آلیاژی با ۱/۵ درصد مس بحالت ریختگی محلول ظاهر کننده معرف نشده و بزرگ نمائی ۱۰۰ برابر است



شکل ۹ - ساختار میکروسکپی آلیاژی با یک درصد مس که در دمای  $375^{\circ}\text{C}$  بمدت ۱۵ دقیقه آستمپ شده است. ساختار حاوی آستنیت باقیمانده (فاز روشن) و بینیت بالائی (فاز تیره) میباشد. محلول ظاهر کننده: نایتال ۲٪  
بزرگ نمائی: ۴۰۰ برابر



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- ساختار میکروسکوپی آلیاژی بایک درصد مس که در دمای ۲۷۵ درجه درجه سانتیگراد و زمانهای (الف) ۱۵ دقیقه (ب) ۷۵ دقیقه آستمپ شده اند. محلول ظاهرکننده : نایتال ۲٪ بزرگ نمائی : ۴۰۰ برابر

که در دمای ۳۷۵ درجه سانتیگراد آستمپر شده‌اند از بینیت بالایی تشکیل شده‌اند. نمره‌هایی از ساختار میکروسکوپی آلیاژی با ۱٪ مس که از یک طرف روند پیشرفت فرآیند آستمپر کردن را در دمای ۲۸۵ درجه سانتیگراد نسبت به زمان نشان می‌دهد و از طرف دیگر تفاوت بینیت بالایی و پائینی را در دو دمای آستمپر کردن ۲۸۵ و ۳۷۵ درجه سانتیگراد مشخص می‌نماید در اشکال ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌است.

##### ۵ - نتیجه‌گیری

۱ - بطور کلی خواص مکانیکی کلیه آلیاژهای مورد بررسی بستگی به دما و زمان آستمپر دارد و عموماً "در هر دمای آستمپر کردن ماکزیمم انعطاف‌پذیری در زمان معینی از آستمپر شدن حاصل می‌شود."

۲ - از بین آلیاژها، چدن نشکنی با ۱٪ مس که در دمای ۲۸۵ و یا ۳۳۵ درجه سانتیگراد بمدت ۷۵ دقیقه آستمپر شده باشد، مناسب‌ترین ترکیب خواص مکانیکی را نسبت به سایر آلیاژها - در همان شرائط - از خود نشان می‌دهد.

۳ - در دمای آستمپر کردن ۳۷۵ درجه سانتیگراد، آلیاژی با ۲٪ مس که بمدت ۳۰ دقیقه آستمپر شده باشد، از خود مناسب‌ترین ترکیب خواص مکانیکی را، نسبت به سایر آلیاژها در همان شرائط، نشان می‌دهد.

۴ - با مقایسه کلیه نتایج حاصله از آزمایشات مکانیکی، ملاحظه می‌گردد که بطور کلی افزایش درصد مس در آلیاژها اثرات متفاوتی از خود نسبت به دما و زمان آستمپر کردن نشان می‌دهد، در این رابطه:

- در دماهای آستمپر کردن ۲۸۵ و ۳۳۵ درجه سانتیگراد، هنگامیکه زمان آستمپر کردن از مرز ۷۵ دقیقه تجاوز نماید، افزایش

مس در آلیاژها عمدتاً "موجب کاهش استحکام کششی و سختی می‌گردد و این اختلاف با زیاد شدن زمان آستمپر شدن بیشتر می‌شود.

۴ - در دمای آستمپر کردن ۲۷۵ درجه سانتیگراد، هنگامیکه زمان آستمپر شدن از ۳۰ دقیقه تجاوز نماید، افزایش مس در آلیاژها موجب افزایش استحکام کششی و سختی می‌گردد.

۵ - نتایج حاصله از آزمایشات ضربه مشخص می‌نماید که برای کاپیه آلیاژها، استحکام ضربه‌ای با افزایش دمای آستمپر کردن بشرط ثابت نگهداشتن زمان آستمپر شدن، فزایش می‌یابد، اما بطور کلی، استحکام ضربه‌ای کلیه آلیاژها، در تمام دماها، نسبتاً "پائین است و مقدار آن بین ۵-۱۶ ژول نوسان می‌کند.

۶ - با توجه به نتایج حاصل از این پژوهش، بنظر می‌رسد که در چدنهای نشکنی که حاوی یک درصد مس بوده و در دماهای ۲۸۵ و ۳۳۵ درجه سانتیگراد آستمپر شده‌اند واکنش شماره (II) کند گشته و در نتیجه کاربیدهای تشکیل شده در این مرحله ریزتـــر گردیده‌اند. حاصل این پدیده، افزایش توام انعطاف پذیری و استحکام کششی می‌باشد، و این در حالی است که افزایش بیش از این مقدار مس بعلت انحلال بیش از حد آن در فریت موجبات کاهش انعطاف پذیری را فراهم می‌نماید. این نتیجه‌گیری با نظریه عنوان شده توسط Janovak [۱۴] هماهنگی دارند.

## مراجع

۱۲- مجتبی جافریان ، فریدون توکلی و پرویز دوامی " استفاده از مس بجای نیکل در چدنهای نشکن آستمپر " اولین سمینار جامعه ریختگران ایران ، آبان ماه ۱۳۶۷ .

- 1 . Grigy, C., and Le Gal " Surface Fatigue of Spheroidal Graphite Cast Iron. Attempted Improvements by Mechanical and Heat Treatments ", *Founderie- Foundeur d'Aujourd'hui* No. 8, pp 21-24 Oct. 1981.
- 2 . Dodd, J., " High Strength, High Ductility, Ductile Irons", *Modern Casting*, pp 60-66, May 1978.
- 3 . Sharma, V. K., " Roller Contact Fatigue Study of Austempered Ductile Iron ", *J. Heat Treating* , vol. 3, No. 4, pp 326-334, 1984.
- 4 . Rossi, F. S., et al " Austempering of Nodular Cast Iron Automobile Components ", *Metal Progress*, vol. 119, No. 5, pp 25-31, 1981.
- 5 . Sr. Kovace, B. V., " Development of Austempered Ductile Iron for Automobile Crankshafts ", *J. Heat Treating*, Vol. 5, No. 1, 1987.
- 6 . Tiziani, A. et al " Austempered Ductile Irons with Different Compositions and Evaluation Mechanical

Characteristics of Gears ", 55th International Foundry Congress, Italy, Sept. 1988.

- 7 . Voigt, R. C., et al " Austempered Ductile Iron-Process Control and Quality Assurance ", J. Heat Treating, vol. 3, No. 4, pp 291-309, December 1984.
- 8 . Harding, R. A., " The Effect of Metallurgical Variables on Austempered Ductile Irons ", Metals and Materials, pp 65-71, Feb. 1986.
- 9 . Jahansson, M. " Austenitic-Bainitic Ductile Iron ", Trans. AFS, vol. 85, pp 112-117, 1977.
10. Rouns, T. N., et al " On the Structure and Properties of Austempered Ductile Cast Iron ", AFS Transactions, pp 815-840, 1984.
11. Dorazil, E., et al " High Strength Bainitic Ductile Cast Iron ", AFS Int. Cast. Met. J., vol. 7, pp 52-62, 1982.
13. Rundman, K. B., et al " The Microstructure and Mechanical Properties of Austempered Ductile Iron ", J. Heat Treating, vol. 5, No. 2, pp 79-95, 1988.
14. Janowak, J. F., and Gundlach, R. B., " Development of a Ductile Iron for Commercial Austempering ", AFS Transactions, pp 377-388, 1983 .