

بررسی تأثیر مقدار کربنات سدیم به عنوان ماده انرژی زا بر عمق لایه کربوره فولاد کم کربن ۱/۵۹۲۰

سیدرضا علمی حسینی^۱ و حامد خسروی^۲

۱- مربی، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

۲- دانشجوی کارشناسی، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

Elmi@eng.usb.ac.ir

چکیده

فولاد مورد استفاده در این تحقیق، فولاد کم کربن ۱/۵۹۲۰ نام دارد که عملیات کربوراسیون جامد بر روی آن قرار گرفت. با انجام این عملیات و سپس کوئنچ، ساختار مارتنزیتی در سطح فولاد تشکیل شده که باعث افزایش سختی سطح می گردد. مغز این فولاد به دلیل داشتن کربن کمتر دارای سختی کمتر و انعطاف پذیری بیشتری است. یکی از پارامترهای مهم در متالورژی این فولاد که بسیار مورد توجه صنعت می باشد، استفاده از ماده انرژی زا جهت افزایش سختی پذیری است. در این تحقیق نمونه های فولاد کم کربن در پودر گرافیت قرار گرفته و در زمانهای ۳، ۵، ۸ و ۱۲ ساعت در دمای ۹۲۵ درجه سانتی گراد حرارت داده شده و سپس در روغن کوئنچ شدند. محفظه های کربوره دارای مقادیر صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی ماده انرژی زا بودند. ماده انرژی زا مورد استفاده در این آزمایش کربنات سدیم بود. جهت محاسبه سختی پذیری، آزمون میکروسختی بر روی سطح مقطع نمونه های کربوره شده انجام شد. با رسم منحنی سختی - فاصله در نمونه های مختلف، ضخامت لایه کربوره در زمان های مختلف و ماده انرژی زا متفاوت اندازه گیری شد. با ترسیم رابطه بین عمق لایه کربوره با مقدار ماده انرژی زا و زمان کربوراسیون، شرایط لازم برای ایجاد ضخامت لایه کربوره مشخص در این فولاد به دست آمد. علاوه بر این شرایط مرزی وقوع پدیده های کربوراسیون و دکربوراسیون نیز مورد مطالعه قرار گرفت.

واژه های کلیدی:

فولاد ۱/۵۹۲۰، کربوراسیون جامد، سختی سطح، ضخامت لایه کربوره، منحنی سختی - فاصله، ماده انرژی زا، کربنات سدیم.

۱- مقدمه

دارند، داشتن سختی و مقاومت سایشی در سطح یک نیاز مبرم می باشد. فرآیند کربوراسیون یکی از فرآیندهای سخت کاری سطحی بر روی فولادهای کم کربن به شمار می آید که به روش های جامد، مایع و گازی قابل انجام است. برای انجام این فرآیند، فولاد مورد نظر را در یک مخلوط کربن ده و در دمای

۱-۱- تکنولوژی فرآیند کربوراسیون جامد

امروزه استفاده از فولادهای کم کربن در کشور جهت ساخت قطعاتی همچون چرخدنده ها، یاتاقانها و ... افزایش یافته است. از آنجا که سطوح بیرونی این قطعات در تماس با قطعات دیگر قرار

جدول (۱): خواص مکانیکی فولاد مورد استفاده [۱].

سختی	استحکام تسلیم	استحکام کششی	کاهش سطح مقطع	افزایش طول	انرژی ضربه
≤ ۲۳۵ HB	≥ ۶۸۵ N/mm ²	۱۲۳۰-۱۴۷۰ N/mm ²	≥ ٪۳۰	≥ ٪۷۰	≥ ۴۱ J

که نگهداری قطعات به مدت طولانی در دمای بالا می تواند باعث درشت شدن دانه ها شود [۲].

۱-۲- متالورژی فرآیند کربوراسیون جامد

محفظه کربوراسیون دارای مقداری هوا می باشد. اکسیژن موجود در هوای محفظه در دماهای بالا با کربن ترکیب شده و دی اکسید کربن تولید می کند (واکنش ۱). CO₂ تولیدی با کربن گداخته موجود در محفظه واکنش داده و مونواکسید کربن ایجاد می کند (واکنش ۲). به تدریج با گذشت زمان، مخلوط گازی از CO غنی می شود. در این حالت در سطح فولاد واکنش (۳) انجام شده و کربن اتمی در ساختار آستنیت فولاد نفوذ می کند [۱ و ۲].



دی اکسید کربن حاصل از واکنش (۳) مجدداً با کربن گداخته ترکیب شده و CO ایجاد می شود. در نتیجه عملیات کربوراسیون ادامه می یابد.

امروزه در صنعت جهت افزایش عمق لایه کربوره از موادی تحت عنوان انرژی زا استفاده می شود. در این تحقیق از کربنات سدیم به عنوان ماده انرژی زا استفاده شد. کربنات سدیم با قرارگیری در دمای بالا تجزیه شده و تولید گاز CO₂ می کند (واکنش ۴). با تولید این گاز لحظه به لحظه بر فشار گاز CO₂ موجود در محفظه افزوده می شود. گاز CO₂ موجود در محفظه در اثر انجام واکنش (۲) با جذب کربن موجود در محفظه تولید گاز CO کرده که این گاز هم در سطح فولاد باعث کربن دهی می شود [۳-۵].



بالا قرار می دهند. با گذشت زمان کربن به داخل سطح فولاد نفوذ کرده و محتوای کربن سطح فولاد افزایش می یابد. در ادامه، فولاد کربوراسیون شده را در یک محیط خنک کننده کوئنچ کرده که باعث افزایش سختی سطح فولاد می شود. یکی از پرکاربردترین فولادهای کم کربن، فولاد ۱/۵۹۲۰ می باشد که برخی از ویژگی های این فولاد در جدول (۱) آورده شده است [۱].

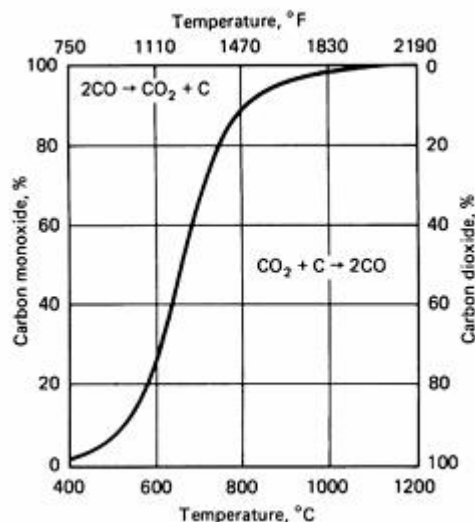
قبل از قرار دادن قطعات در مخلوط کربن ده آنها را تمیز کرده و در فواصلی در حدود ۵۰ میلی متر از یکدیگر و ۲۵ میلی متر از دیواره در یک جعبه فولادی موسوم به محفظه کربوراسیون بسته بندی می کنند. در صورتی که محفظه کربوراسیون به دفعات زیاد استفاده نشود، می توان آن را از فولادهای کم کربن انتخاب کرد، در غیر این صورت محفظه های کربوراسیون از فولاد نسوز که حاوی ۲۵ wt % Cr و ۲۰ wt % Ni است ساخته می شوند. پس از بسته بندی، درب محفظه کربوراسیون به کمک مواد نسوز (نظیر آزیست و یا خاک رس) کاملاً مسدود می شود، به نحوی که هیچگونه تبادل هوا بین اتمسفر داخل محفظه و محیط اطراف انجام نگیرد [۱]. معمولاً سعی می شود که محفظه های کربوراسیون استوانه ای ساخته شود. این امر موجب می شود که خود به خود فضای بیشتری بین محفظه ها در کوره وجود داشته باشد. به علاوه عمر محفظه های استوانه ای بیشتر بوده و امکان تغییر شکل و یا ترک برداشتن آنها در اثر گرم و سرد شدنهای متعدد کمتر می باشد [۱]. کربوراسیون جامد در دمایی بین ۸۱۵ تا ۹۵۵ درجه سانتی گراد صورت می گیرد. در سالهای اخیر حد فوقانی دمای کربوراسیون بالا رفته و تا حدود ۱۰۹۵ درجه سانتی گراد نیز افزایش یافته است. با این حال باید در نظر داشت

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از فولاد کم کربن ۱/۵۹۲۰ استفاده شد که ترکیب شیمیایی آن در جدول (۲) آورده شده است. جهت سهولت در انجام آزمایشاتی همچون کربوراسیون و میکروسختی، فولاد مورد نظر به شکل نمونه‌های مکعبی شکل در ابعاد ۳ cm برش زده شد.

محفظه کربوراسیون به صورت مکعبی با ابعاد ۱۰ cm و با جوشکاری ورق‌هایی به ضخامت ۵/۰ cm از جنس فولاد کم کربن ساخته شد. جهت جلوگیری از نفوذ کربن به داخل جداره محفظه در حین عملیات کربوراسیون، ابتدا محفظه را از پودر گرافیت پر کرده و آن را بدون حضور فولاد کم کربن حرارت داده تا در حین کربوراسیون نمونه‌ها، صرفاً عامل کربن‌ده وارد نمونه‌ها شود. کوره مورد استفاده در این آزمایش یک کوره الکتریکی بوده که برخی از مشخصات آن در جدول (۳) آورده شده است. جهت کنترل دما از کنترلر مدل شینهو^۳ که از ملحقات کوره است، استفاده شد.

برای آماده‌سازی مخلوط کربن‌ده، انرژی‌زای مورد استفاده (کربنات سدیم) در آب جوش حل و سپس پودر گرافیت به آن اضافه شد که این مخلوط در اثر هم‌زدن شکل خمیری به خود می‌گیرد. سپس این مخلوط در معرض آفتاب قرار گرفته تا رطوبت آن به‌طور کامل حذف گردد. در این تحقیق، مخلوط‌های کربن‌ده با مقادیر صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی ماده انرژی‌زا با خلوص ۱۰۰ درصد وزنی به کار برده شد و عملیات کربوراسیون در مدت زمانهای ۳، ۵، ۸ و ۱۲ ساعت در دمای ۹۲۵ درجه سانتی‌گراد انجام گرفت. مدت زمان و نیز دمای کربوراسیون بر روی کنترلر کوره قابل برنامه‌ریزی است. در هر محفظه یک نمونه قرار گرفت. بدین ترتیب که ابتدا تا وسط محفظه مخلوط کربن‌ده ریخته شد. سپس نمونه بر روی مخلوط گذاشته شد و دوباره روی نمونه با مخلوط کربن‌ده پوشانده شد. در تمام آزمایشات مخلوط کربن‌ده به‌دقت داخل محفظه فشرده شد و در جعبه بر روی آن قرار گرفت که با گل رس کاملاً



شکل (۱): رابطه نسبت تعادلی CO و CO₂ با دما برای واکنش [۲] $2CO \leftrightarrow CO_2 + C_{atom}$.

در شکل (۱) میزان CO و CO₂ تعادلی در هر دما برای واکنش (۳) نشان داده شده است [۲].

بر اساس این شکل در یک دمای ثابت هرچه میزان $\frac{CO}{CO_2}$ از میزان تعادلی آن بیشتر باشد، واکنش (۳) در جهت تولید کربن اتمی پیشرفت کرده و در نتیجه میزان نفوذ کربن در سطح فولاد بیشتر می‌شود. بر عکس هر چه میزان $\frac{CO}{CO_2}$ کمتر از میزان تعادلی آن شود، واکنش (۳) در جهت عکس پیشرفت می‌کند. یعنی گاز CO₂ با اتمهای نفوذ کرده در سطح واکنش داده و تولید CO می‌کند. در نتیجه از میزان کربن موجود در سطح کاسته می‌شود. به این پدیده دیکربوراسیون^۲ گفته می‌شود [۶ و ۷]. با نفوذ کربن به داخل فولاد، محتوای کربن سطح نسبت به مغز بیشتر می‌شود. بنابراین پس از عملیات کوئنچ سختی سطح نسبت به مغز افزایش می‌یابد. عمق لایه کربوره به فاصله سطح قطعه تا جایی از مغز که سختی معادل ۵۵۰ HV است گفته می‌شود [۸ و ۹].

جدول (۲): ترکیب شیمیایی فولاد ۱/۵۹۲۰ مورد استفاده.

نام عنصر	C	Si	Mn	Ni	Cr	Cu	Mo	Al	P	S	V	Fe
مقدار (wt %)	۰/۲۱	۰/۲۰۹	۰/۴۵۵	۱/۸۲۳	۱/۹۱۱	۰/۱۴۹	۰/۰۲۷	۰/۰۲۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	باقیمانده

جدول (۳): مشخصات کوره مورد استفاده در آزمایش.

ابعاد (cm)	۳۰۰ × ۴۵۰ × ۳۰۰
توان	۹ kW
حداکثر دمای کاری	۱۲۰۰°C
پوشش بیرونی	فولاد
پوشش داخلی	آجر منیزیتی

الف) در بیشتر حالات با افزایش فاصله از سطح سختی روند کاهشی دارد. ولی در حالات ۱۰ درصد وزنی ماده انرژی‌زا (زمان ۱۲ ساعت) و نیز ۱۵ درصد وزنی (برای کلیه زمانها) با افزایش فاصله از سطح ابتدا سختی افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر فقط در این حالات است که پروفیل سختی ابتدا حالت افزایشی و سپس حالت کاهشی دارد. در غیر این حالات پروفیل سختی دارای حالت نزولی است.

ب) با توجه به نمودارها مشاهده می‌شود بین عمق لایه کربوره در منحنی‌های صفر درصد وزنی و ۵ درصد وزنی اختلاف چندانی دیده نمی‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که افزودن ماده انرژی‌زا تا حدود ۵ درصد وزنی تأثیر چندانی بر روی عمق لایه کربوره نداشته و در مقادیر بالاتر این تأثیر قابل ملاحظه است.

ج) در تمامی زمان‌ها عمق لایه کربوره در حالت ۱۰ درصد وزنی ماده انرژی‌زا بیش از بقیه حالات (حتی حالت ۱۵ درصد وزنی ماده انرژی‌زا) است.

۳-۲- تأثیر مقدار ماده انرژی‌زا بر عمق لایه کربوره در زمان‌های مختلف

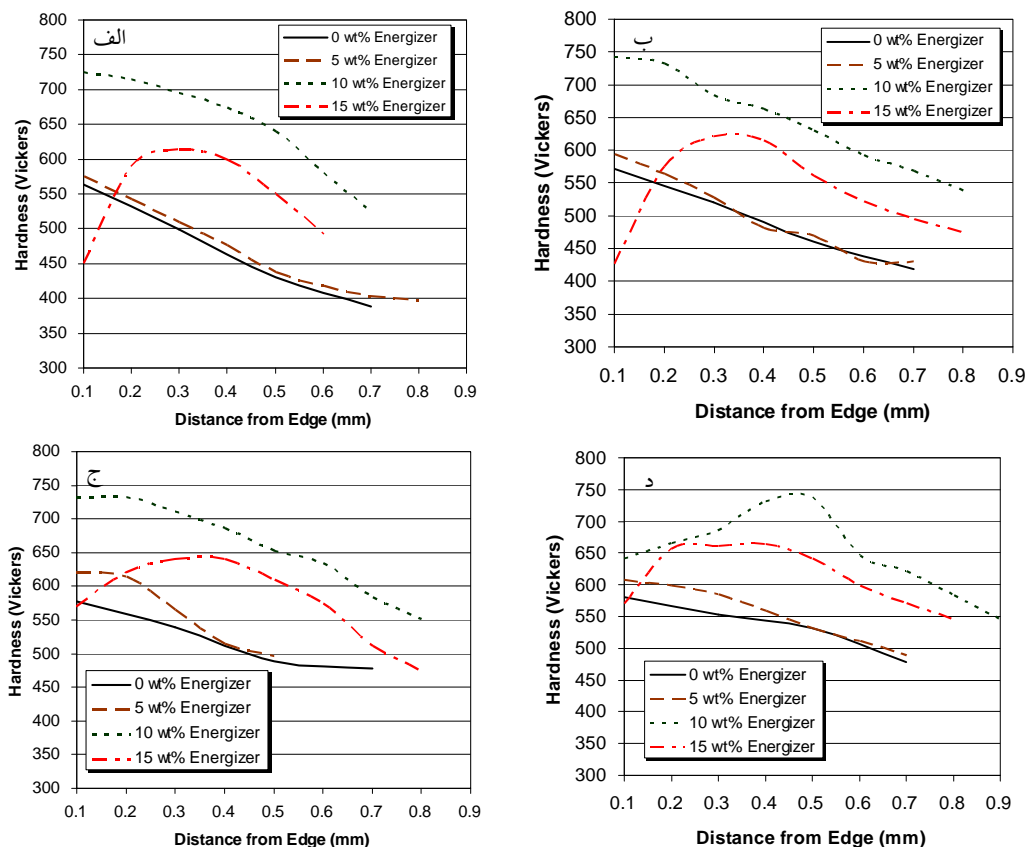
جهت مقایسه بهتر نتایج، مقادیر عمق لایه کربوره از نمودارهای شکل (۲) استخراج گردید که این مقادیر در جدول (۴) ارائه شده است.

درزگیری شد. سپس محفظه در داخل کوره قرار گرفت. جهت اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش سه بار تکرار گردید. سپس نمونه‌ها از کوره خارج و در روغن با دمای محیط (دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) کوئنچ شدند. جهت بررسی ضخامت لایه کربوره، نمونه‌های کربوره شده از قسمت میانی برش خورده و با استفاده از سنباده‌های ۸۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ پولیش شدند. سپس آزمایش میکروسختی از لبه کربوره شده به سمت مغز نمونه بر حسب معیار ویکرز و بر اساس استاندارد ASTM E 384-99 انجام شد. نام دستگاه میکروهاردنس مورد استفاده 401MVD-VD289 است که در سال ۲۰۰۵ توسط شرکت وینسون وولپرت^۴ آلمان ساخته شده است. جهت بررسی‌های ساختاری از محلول حکاکی نیتال ۲٪ استفاده شد.

۳- نتایج و مباحث

۳-۱- بررسی تأثیر افزایش مقدار ماده انرژی‌زا بر منحنی سختی - فاصله برای نمونه‌های کربوره شده در زمان‌های ثابت

منحنی سختی - فاصله برای نمونه‌های کربوره شده به ازای مقادیر صفر، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی ماده انرژی‌زا و در زمان‌های ۳، ۵، ۸ و ۱۲ ساعت در شکل (۲) آمده است. با توجه به منحنی‌های شکل (۲) نتایج زیر قابل استنتاج است:



شکل (۲): منحنی سختی بر حسب فاصله برای نمونه‌های کربوره شده با استفاده از مقادیر مختلف ماده انرژی‌زا در زمان‌های (الف) ۳ ساعت، (ب) ۵ ساعت، (ج) ۸ ساعت و (د) ۱۲ ساعت.

با توجه به شکل (۳) نتیجه می‌شود که با افزایش مقدار ماده انرژی‌زا تا حدود ۵ درصد وزنی میزان عمق لایه کربوره به‌ازای تمام زمان‌ها تغییر چندانی نمی‌کند. شاهد دیگر برای این پدیده را می‌توان در اختلاف نداشتن منحنی‌های سختی-فاصله برای حالت‌های صفر و ۵ درصد وزنی دانست (شکل ۲). با توجه به این نکته می‌توان منحنی شکل (۳) را به‌ازای مقادیر ماده انرژی‌زا در محدوده ۵ تا ۱۵ درصد وزنی ترسیم نمود (شکل ۴). بر اساس شکل (۴) نتیجه می‌شود که در تمامی زمانها با افزایش مقدار ماده انرژی‌زا تا حدود ۱۱ درصد وزنی میزان عمق لایه کربوره افزایش می‌یابد. علت آن است که با افزایش ماده انرژی‌زا تا ۱۱ درصد وزنی به‌دلیل پدیده کربوراسیون عمق لایه کربوره افزایش می‌یابد. در واقع تا ۱۱ درصد وزنی، ماده انرژی‌زا

جدول (۴): میزان عمق لایه کربوره در مقادیر مختلف ماده انرژی‌زا در زمان‌های مختلف.

عمق لایه کربوه (mm) بر حسب درصد وزنی ماده انرژی‌زا				زمان کربوراسیون (hr)
صفر	۵	۱۰	۱۵	
۰/۱۴	۰/۱۸	۰/۶۵	۰/۴۷	۳
۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۷۶	۰/۵۷	۵
۰/۲۵	۰/۳۲	۰/۸	۰/۶۴	۸
۰/۳۲	۰/۴۲	۰/۸۹	۰/۷۴	۱۲

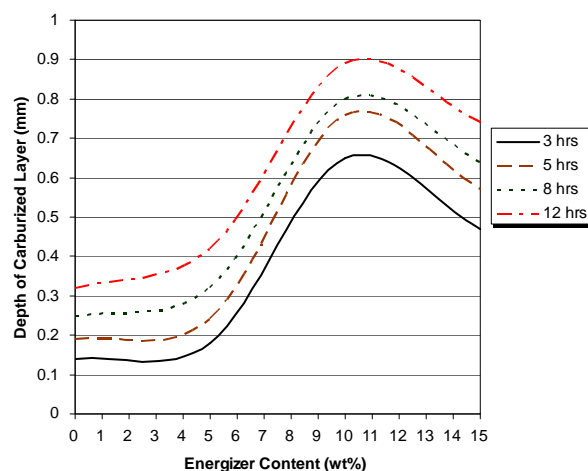
با استفاده از داده‌های جدول (۴) می‌توان منحنی عمق لایه کربوره بر حسب مقدار ماده انرژی‌زا را در زمان‌های مختلف رسم کرد (شکل ۳).

که در مقادیر بیش از ۱۱ درصد وزنی ماده انرژی‌زا، کربنات سدیم بیشتری تجزیه شده و بالطبع گاز CO_2 بیشتری تولید می‌شود. گاز CO_2 تولیدی آنقدر زیاد است که بخش کمی از آن وارد واکنش (۲) شده و تولید گاز CO می‌کند و بخش اعظم آن باعث اکسید شدن محیط کوره می‌شود که در نتیجه این گاز طی واکنش (۵) باعث جذب کربن اتمی از سطح فولاد می‌شود. بنابراین در شکل (۴) به دلیل پدیده دکربوراسیون در مقادیر بیش از ۱۱ درصد شاهد افت عمق لایه کربوره در تمامی زمانها هستیم.

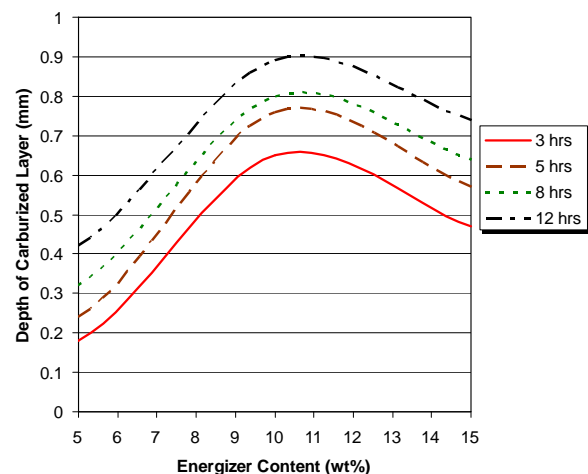


محدوده ۱۱ درصد که نشان‌دهنده نقطه اکسترم منحنی است دارای اهمیت فراوانی است، زیرا نشان‌دهنده مقدار ماده انرژی‌زای لازم برای ایجاد حداکثر عمق لایه کربوره به‌ازای زمانهای مختلف است. علت را می‌توان این‌گونه بیان کرد:

در حالت ۱۰ درصد وزنی، میزان ماده انرژی‌زا کمتر از حالت ۱۵ درصد وزنی بوده، در نتیجه میزان گاز CO_2 تولید شده از واکنش (۴) کاهش می‌یابد. بنابراین کربن گداخته موجود در محفظه نسبت به مجموع گاز CO_2 حاصل از واکنش‌های (۱) و (۴) بیشتر است، در نتیجه طبق اصل لوشاتلیه بیشتر گاز CO_2 موجود در محفظه در واکنش (۲) وارد شده و تولید CO می‌کند. گاز CO تولیدی نیز در سطح فولاد باعث کربوراسیون شدید می‌شود، بنابراین با توجه به شکل (۴) و با به‌دست آوردن مختصات نقطه اکسترم حداکثر عمق لایه کربوره به‌ازای تمام زمانها در حالت ۱۱ درصد وزنی ماده انرژی‌زا ایجاد می‌شود. علاوه بر این با توجه به شکل (۴) مشخص است که حداکثر عمق لایه کربوره به‌ازای تقریباً ۱۰ درصد وزنی ماده انرژی‌زا و زمان ۱۲ ساعت ایجاد می‌شود. در واقع به‌علت زمان زیاد کربوراسیون کربن بیش از حد در نمونه نفوذ کرده و باعث افزایش سختی‌پذیری می‌شود. از طرفی نفوذ بیش از حد کربن به‌داخل فولاد باعث تشکیل آستنیت باقیمانده بر روی نواحی سطحی آن می‌شود که هر چه به سمت لبه می‌رویم آستنیت باقیمانده بیشتری



شکل (۳): منحنی عمق لایه کربوره بر حسب مقدار ماده انرژی‌زا در زمانهای مختلف.



شکل (۴): منحنی عمق لایه کربوره بر حسب مقدار ماده انرژی‌زا در محدوده ۵ تا ۱۵ درصد وزنی و در زمانهای مختلف.

به‌طور پیوسته تجزیه شده و بر اساس واکنش (۱) لحظه به‌لحظه بر فشار گاز CO_2 موجود در محفظه افزوده می‌شود. گاز CO_2 به‌وجود آمده با کربن گداخته موجود در محفظه بر اساس واکنش (۲) واکنش داده و گاز احیایی CO را به‌وجود می‌آورد که این گاز در سطح فولاد باعث کربوراسیون می‌شود. به‌عبارت دیگر تا ۱۱ درصد، نسبت گاز CO بیشتر از CO_2 بوده و محیط کوره محیطی احیایی است.

همچنین شکل (۴) نشان می‌دهد که در مقادیر بیشتر از ۱۱ درصد، میزان عمق لایه کربوره کاهش می‌یابد. علت آن است

۳-۳- تأثیر زمان کربوراسیون بر عمق لایه کربوره در مقادیر مختلف ماده انرژی‌زا

با توجه به جدول (۴) می‌توان منحنی عمق لایه کربوره بر حسب زمان را در مقادیر مختلف ماده انرژی‌زا رسم نمود (شکل ۶). با توجه به شکل (۶) نتایج زیر قابل بیان است:

الف) در حالات مختلف ماده انرژی‌زا، با افزایش زمان عمق لایه کربوره افزایش می‌یابد، البته ابتدا شیب افزایش عمق لایه کربوره تا زمان ۳ تا ۴ ساعت زیاد بوده و با افزایش بیشتر زمان، شیب افزایش عمق لایه کربوره کاهش می‌یابد. علت آن است که در ابتدای فرآیند کربوراسیون (زمان‌های اولیه)، لحظه به لحظه کربن بیشتری وارد فرآیند کربوراسیون شده و سرعت کربوراسیون افزایش می‌یابد، اما هر چه زمان عملیات کربوراسیون بیشتر می‌شود کربن کمتری در محفظه باقی مانده و لذا از سرعت عملیات کربوراسیون کاسته می‌شود.

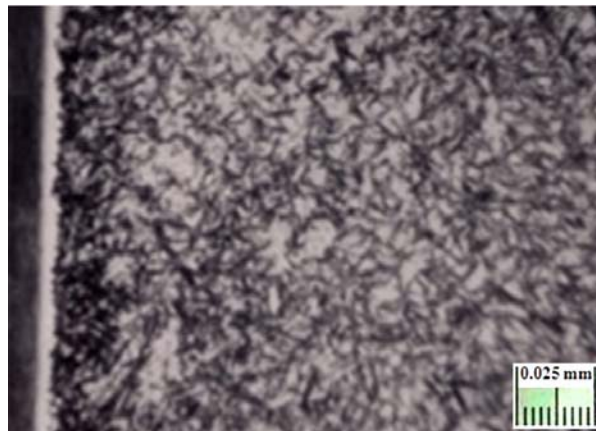
ب) به خاطر پدیده دگرگونی منحنی عمق لایه کربوره- زمان برای نمونه کربوره شده در محفظه حاوی ۱۵ درصد وزنی ماده انرژی‌زا پایین‌تر از منحنی ۱۰ درصد وزنی ماده انرژی‌زا است.

۴- نتیجه‌گیری

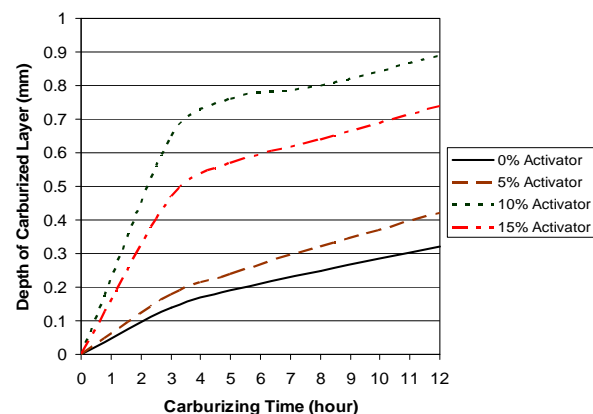
۱- افزودن ماده انرژی‌زا تا حدود ۵ درصد وزنی تأثیر چندانی بر روی عمق لایه کربوره نداشته و در مقادیر بالاتر این تأثیر قابل ملاحظه است.

۲- در تمامی زمانها با افزایش مقدار ماده انرژی‌زا تا حدود ۱۱ درصد وزنی میزان عمق لایه کربوره افزایش یافته و بیشتر از ۱۱ درصد، این میزان کاهش می‌یابد. علاوه بر این حداکثر زمانی که در حالت ۱۱ درصد وزنی باعث بیشترین عمق لایه کربوره می‌شود، ۱۲ ساعت است.

۳- با انجام عملیات کربوراسیون تا زمان ۳ تا ۴ ساعت، عمق لایه کربوره به سرعت افزایش یافته، در حالی که با افزایش بیشتر زمان، شیب افزایش عمق لایه کربوره مقداری کاهش می‌یابد.



شکل (۵): ریزساختار لبه نمونه کربوره شده شامل آستنیت باقیمانده در لابلای تیغه‌های مارتنزیت.



شکل (۶): منحنی عمق لایه کربوره بر حسب زمان در مقادیر مختلف ماده انرژی‌زا.

مشاهده می‌شود (شکل ۵). در این شکل آستنیت باقیمانده (به رنگ روشن) در لابه‌لای تیغه‌های مارتنزیت (به رنگ تیره) مشاهده می‌شود. بنابراین با توجه به شکل (۲-د) مشاهده می‌شود که در نمونه ۱۰ درصد و ۱۲ ساعت تا عمق ۰/۵ میلی‌متر از سطح ابتدا سختی افزایش و پس از آن کاهش یافته است.

- [8] M. Erdogan and S. Tekeli, "The Effect of Martensite Volume Fraction and Particle Size On the Tensile Properties of a Surface-carburized AISI 8620 Steel with a Dual-Phase Core Microstructure", *Materials Characterization*, Vol. 49, pp. 445-454, 2003.
- [9] O. Topçu and M. Beyli, "On the Microstructural and Mechanical Characterizations of a Low Carbon and Micro-Alloyed Steel", *Materials and Design*, Vol. 30, pp. 3274-3278, 2009.

۶- پی نوشت

- 1- Energizer
- 2- Decarburization
- 3- Shinho
- 4- Winson Wolpert

۵- مراجع

- [1] G. Kranss, "Principles of Heat Treatment of Steels", MA Grass Mann and EC Published, 1964.
- [2] Metals Handbook, "Properties and Selection, Irons and Steels", American Society for Metals, 9th Ed., Vol. 1, 1987.
- [3] K. H. Prabhuder, "Handbook of Heat Treatment of Steels", Tata McGraw Hill Publishing Company Limited, 1988.
- [4] Z.-X. Yuan a, Z.-S. Yu b, P. Tan a and S.-H. Song c, "Effect of Rare Earths on the Carburization of Steel", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 267, pp. 162-166, 1999.
- [5] D. U. I. OGO, TERVER-AUSE, E. J. IBANGA, "The Use of River Clam Shells (*Aspatharia Sinuata*) as an Energizer in Case Carburization of Mild Steels", *ISIJ International*, Vol. 44, No. 5, pp. 865-868, 2004.
- [6] M. Erdogan and S. Tekeli, "The Effect of Martensite Volume Fraction and Particle Size on the Tensile Properties of a Surface-Carburized AISI 8620 Steel with a Dual-Phase Core Microstructure", *Materials Characterization*, Vol. 49, pp. 445-454, 2003.
- [7] M. Erdogan and S. Tekeli, "The Effect of Martensite Particle Size on Tensile Fracture of Surfacecarburised AISI 8620 Steel with Dual Phase Core Microstructure", *Materials and Design*, Vol. 23, pp. 597-604, 2002.