



گروه ملی صنعتی فولاد ایران



انجمن آهن و فولاد ایران



دانشگاه شهید چمران اهواز

سینیوز یوم فولاد ۸۷

۱۳ و ۱۴ اسفند ماه ۸۷
اهواز - دانشگاه شهید چمران

مدل سازی درصد کربن سطح قطعات در عملیات کربوراسیون گازی فولادها

- سید محمد حسین مدررسی^۱، مهرداد کاشفی^۲، جلیل وحدتی خاکی^۳
- ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد - گروه مهندسی مواد - دانشگاه فردوسی مشهد
- ۲- استادیار گروه مهندسی مواد - دانشگاه فردوسی مشهد
- ۳- استاد گروه مهندسی مواد - دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

در حال حاضر شیوه سازی فرآیندهای متالورژیکی بدلیل صرفه جویی در هزینه تولید و آزمایشات مورد توجه خاصی قرار گرفته است. یکی از این پروسه‌ها، فرآیند کربوراسیون گازی می‌باشد که در آن میزان درصد کربن سطح قطعات، مهمترین مشخصه تولید یک قطعه مطابق استاندارد می‌باشد. در این روش عملیات حرارتی سطحی برای تعیین میزان کربن مورد نظر بر روی فولاد باید زمان و هزینه زیادی صرف انجام آزمایشات شود. در تحقیق حاضر، شیوه سازی واکنش‌های گازی در مولد تولید گاز اندوترمیک و شرایط کاری کوره به جهت رسیدن به درصد کربن بهینه مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا واکنش‌های گازی همزمان مدل سازی شده و پس از حل معادلات ثابت تعادل به وسیله کامپیوتر، درصد کربن تعادلی سطح فولاد به دست آمده است. در این پژوهش، متغیرهایی مانند نسبت هوا به سوخت در مولد تولید گاز اندوترمیک، درجه حرارت کربوراسیون و فشار داخل کوره مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد.

کلمات کلیدی: شیوه سازی، کربوراسیون گازی، درصد کربن، نسبت هوا به سوخت.

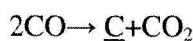
¹ Mo_Mdarresi2003@yahoo.com

² M_Kashafi@um.ac.ir

³ Vahdati@um.ac.ir

مقدمه

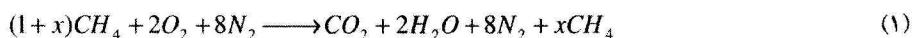
کربوراسیون گازی به جهت افزایش سختی سطح و ایجاد مقاومت به سایش بر روی قطعات انجام شده و در تولید انبوه قطعات صنعتی بویژه قطعات خودرو کاربرد زیادی یافته است. روند کلی در فرآیند کربوراسیون گازی بدین صورت است که مقدار مشخصی از گاز شهری، متان، پروپان - بدليل سهولت در نگهداری و ارزان قیمت بودن مтан، بیشتر از این گاز استفاده می‌شود- را وارد مولد تولید گاز گرم‌ماگیر می‌کنند، از سوی دیگرها بصورت کنترل شده وارد محفظه شده تا احتراق در دمای حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد صورت گیرد. در اثر این واکنش مخلوطی از گازهای دی اکسید کربن، بخار آب، منوکسید کربن و هیدروژن تولید می‌شود. سپس این مخلوط گازی را که با گاز مтан اضافی و گاز نیتروژن همراه است وارد محفظه کوره می‌کنند تا در آنجا باسطح قطعه‌ی مورد نظر برای کربوراسیون به تعادل برسد [۱]. پس از تعادل رسیدن این گازها باسطح قطعه فشار جزئی هریک از گازها در محفظه کوره تعیین شده، سپس با داشتن فشار جزئی منوکسید کربن و دی اکسید کربن با توجه به واکنش بود وارد



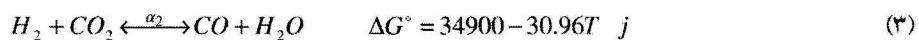
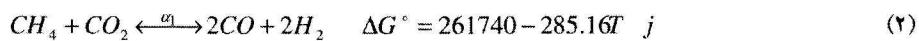
اکتیویته کربن روی سطح فولاد محاسبه می‌گردد. با داشتن ارتباط بین اکتیویته کربن و درصدوزنی کربن می‌توان درصدوزنی کربن روی سطح فولاد را در اثر فرآیند کربوراسیون بدست آورد. از پارامترهایی که برروی درصدوزنی کربن بسیار تأثیرگذار هستند می‌توان به درجه حرارت فرآیند، فشار داخل کوره، نسبت هوا به سوخت مصرفی در مولد تولید گاز گرم‌ماگیر و در نهایت رطوبت هوای محیط اشاره کرد [۲]. امروزه با توجه به پیشرفت علم متالورژی و نیاز به شیوه سازی فرآیند کربوراسیون به جهت کاهش زمان تولید و افزایش دقت، تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است [۳-۷].

روش تحقیق

در این تحقیق از گاز مtan به عنوان گاز کربن ده استفاده شده است. گاز مtan در مولد تولید گاز طبق واکنش زیر سوزانده شده و محصولات احتراق وارد محفظه کوره می‌شوند [۸]:



محصولات احتراق شامل مخلوطی از گازهای $\text{N}_2, \text{CH}_4, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{CO}_2, \text{CO}$ بوده که طبق واکنش‌های مستقل زیر در تعادل با یکدیگر خواهند بود:



با توجه به واکنشهای ۱ و ۲ و ۳ و تعیین تعداد مولهای کل سیستم برابر با $11+x+2\alpha_1+2\alpha_2$ فشار جزئی اجزاء گازی سیستم بصورت زیر بدست خواهد آمد:

$$\begin{aligned} P_{CO} &= \frac{2\alpha_1 + \alpha_2}{11+x+2\alpha_1} \cdot P_t \\ P_{CO_2} &= \frac{1-\alpha_1 - \alpha_2}{11+x+2\alpha_1} \cdot P_t \\ P_{CH_4} &= \frac{x - \alpha_1}{11+x+2\alpha_1} \cdot P_t \\ P_{H_2} &= \frac{2\alpha_1 - \alpha_2}{11+x+2\alpha_1} \cdot P_t \\ P_{H_2O} &= \frac{2+\alpha_2}{11+x+2\alpha_1} \cdot P_t \\ P_{N_2} &= \frac{8}{11+x+2\alpha_1} \cdot P_t \end{aligned}$$

$\alpha_1 =$ متغیر پیشرفت واکنش ۲
 $P_t =$ فشار کل کوره

با داشتن ارتباط $\Delta G^\circ = -RT \ln k$ معادلات ۴ و ۵ برای واکنشهای ۲ و ۳ بدست می‌آیند.

$$\frac{(2\alpha_1 + \alpha_2)^2(2\alpha_1 - \alpha_2)^2 \cdot P_t^2}{(x - \alpha_1)(1 - \alpha_1 - \alpha_2) \cdot (11+x+2\alpha_1)^2} = \exp(34.3 - \frac{31481.838}{T}) \quad (4)$$

$$\frac{(2\alpha_1 + \alpha_2) \cdot (2 + \alpha_2)}{(2\alpha_1 - \alpha_2) \cdot (1 - \alpha_1 - \alpha_2)} = \exp(3.724 - \frac{4197.739}{T}) \quad (5)$$

این معادلات ارتباط متغیر پیشرفت واکنش های ۲ و ۳ را با متغیرهای فشار کل، دما و نسبت هوا به سوخت بدست می‌آورند. تمامی این فرآیند بصورت برنامه کامپیوتی توسعه نرم افزار Matlab ویرایش ۷/۲ نوشته شده است. اکنون ورودی برنامه درجه حرارت کوره (T) برحسب کلوین، فشار کوره (P_t) برحسب اتمسفر و نسبت هوا به سوخت خواهد بود که با توجه به واکنش ۱ خواهیم داشت:

$$X = \frac{2+8}{1+x} \Rightarrow \frac{\text{سوخت}/\text{هواء}}{\text{سوخت}} \quad (6)$$

با قرار دادن T ، p_t ، x در معادلات ۴ و ۵ و حل آنها، مقادیر α_2, α_1 بدست می‌آید. با قرار دادن این مقادیر در معادلات مربوط به فشار جزئی گازها، مقادیر تعادلی برای $P_{CO_2}, P_{CO}, P_{CO_2}, P_{CH_4}, P_{H_2O}, P_{H_2}$ تعیین می‌شود. با داشتن P_t تعادلی کوره با توجه به معادله بودوارد، اکتیویته کربن در سطح قطعه فولادی از طریق فرمول زیر قبل محاسبه خواهد بود:

$$a_c = \frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}} \cdot \exp(-20.984 + \frac{20531.63}{T}) \quad (7)$$

نهایتاً با استفاده از روابط زیر می‌توان اکتیویته کربن را به درصد وزنی کربن روی سطح فولاد نسبت داد که تمامی این محاسبات توسط برنامه انجام شده است.

$$\ln a_c = \ln \left[\frac{4.65w}{100-w} \right] + \frac{9167 \times \left[\frac{4.65w}{100-w} \right] + 5093}{T} - 1.867 \quad (8)$$

همچنین با استفاده از روابط زیر می‌توان ارتباط بین اکتیویته کربن و نقطه شبنم^۱ را بدست آورد:

$$\frac{5422.18}{14.7316 - \ln P_{H_2O}} - 273.16 \quad (9)$$



$$\Rightarrow \frac{a_c \cdot p_{H_2O}}{p_{H_2} \cdot p_{co}} = \exp(-17.26 + 16333.895) \quad (10)$$

$$(9) \text{ و } (10) \Rightarrow Dew\ point = \frac{5422.18}{14.7316 - \ln \left[\frac{(\exp(-17.26 + 16333.895)) \cdot p_{co} \cdot p_{H_2}}{a_c} \right]} - 273.16$$

کلیه نتایج حاصله در این تحقیق توسط حل معادلات فوق و استفاده از نرم افزار تهیه شده، بدست آمده است.

نتایج و بحث

این پژوهش بر اساس شیوه سازی ترمودینامیکی واکنش‌های گازی و با استفاده از نرم افزار Matlab صورت گرفته تا به سهولت و بدون انجام محاسبات طولانی، تنها با وارد کردن شرایط مورد نظر مانند دمای کوره، فشار کوره، نسبت سوخت/هوا بتوان درصدوزنی کربن در تعادل با اتمسفر کوره (درصد کربن در سطح نقطه) را بدست آورد. همچنین این برنامه قادر است با در اختیار داشتن متغیرهای عملی کربوراسیون گازی مانند نسبت هوا به سوخت، دمای کوره، فشار کوره بعنوان ورودی برنامه، اطلاعات و نمودارهای کاربردی مفیدی را از شرایط کوره در اختیار قرار دهد. از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: منحنی درصد کربن سطح- نقطه شبنم کوره، منحنی اکتیویته کربن سطح- فشار جزئی گازهای داخل کوره، منحنی اکتیویته کربن- نسبت هوا به سوخت و نیز نمودارهای سه بعدی اکتیویته کربن- فشار کوره- نسبت هوا به سوخت، اکتیویته کربن- فشار کوره- دمای کوره، اکتیویته کربن- دمای کوره- نسبت هوا به سوخت، در واقع تأثیر همزمان دو پارامتر مهم در کربوراسیون گازی را بر روی اکتیویته کربن بررسی می‌شود.

نمودار ۱ منحنی نقطه شبنم بر حسب درصد کربن سطح را نشان می‌دهد. در این نمودار دما ۹۲۷ درجه سانتیگراد و فشار کوره ۱ اتمسفر و نسبت هوا به سوخت ۲/۵۱ تا ۲/۶ تغییر کرده است. دیده می‌شود که با کاهش نقطه شبنم، درصد کربن افزایش می‌یابد. در نمودار ۱ مشاهده می‌شود که در نقطه شبنم ۱۳- درجه سانتیگراد، درصد کربن ۱/۲ است که مطابق با اطلاعات ذکر شده در مرجع [۱] است.

^۱ Dew point

نمودار ۲ تغییرات اکتیویته کربن سطح را با نسبت PCO_2/PCO در دمای ۹۲۷ سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر و نسبت هوا به سوخت ۲/۵۱ تا ۲/۵۳ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود اکتیویته کربن سطح با افزایش نسبت PCO_2/PCO ، کاهش می‌باید که به علت پیشرفت واکنش بودووارد در جهت تولید مونوکسید کربن است که این پیشرفت در جهت عکس، با اصل لوشاتلیه قابل توجیه است و باعث کاهش میزان کربن سطح می‌شود.

شکل ۳ تغییرات اکتیویته کربن سطح با نسبت هوا به سوخت را در دمای ۹۲۷ سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش این نسبت، با توجه به واکنش ۱، میزان متان افزایش یافته و در نتیجه با توجه به واکنش ۲ و اصل لوشاتلیه، واکنش به سمت راست میل می‌کند که باعث کاهش مقدار CO_2 و افزایش میزان CO شده و در نتیجه اکتیویته کربن را در واکنش بودووارد کاهش می‌دهد. در مرجع [۱] نیز این نسبت برای حداکثر راندمان کربوراسیون برای گاز متان ۲/۵ ذکر شده است و در تحقیق حاضر نیز این نسبت حدود ۲/۵۰۸ بدست آمده است که حاکی از دقت بالای برنامه‌ی کامپیوتی نوشته شده دارد.

شکل ۴ تغییرات همزمان اکتیویته کربن بر حسب فشار کوره و نسبت هوا به سوخت در دمای ۹۲۷ سانتیگراد را نشان می‌دهد. این نمودار سه بعدی نشان می‌دهد که در نسبت‌های هوا به سوخت پایین و نزدیک ۲/۵، تغییرات فشار در اکتیویته کربن تأثیر ناچیزی (در حد ۰.۰۰۱) خواهد داشت در حالیکه در نسبت‌های بیشتر هوا به سوخت، تغییرات فشار کوره باعث تغییر پتانسیل کوره می‌شود. در واقع علت قرار دادن نسبت هوا به سوخت ۲/۵ در کوره‌های کربوراسیون به همین علت است تا تغییرات ناگهانی فشار کوره باعث تغییر پتانسیل کوره نشود.

شکل ۵ تغییرات همزمان اکتیویته کربن بر حسب دمای کوره و نسبت هوا به سوخت در فشار ۱ اتمسفر را نشان می‌دهد. این نمودار سه بعدی نیز بیانگر این است که با کاهش دما پتانسیل کوره افزایش می‌باید و همچنین در نسبت‌های هوا به سوخت بالاتر تغییرات دما باعث تغییر شدیدتری در پتانسیل کوره می‌شود در حالیکه در نسبت‌های هوا به سوخت کمتر، تغییرات دما تأثیر کمتری بر پتانسیل کوره می‌گذارد. علاوه بر نتایج ارائه شده، نرم افزار تهیه شده قادر به محاسبه سریع تغییرات تمامی متغیرهای تأثیرگذار بر کربوراسیون گازی و در نتیجه موثر بر پتانسیل کوره می‌باشد.

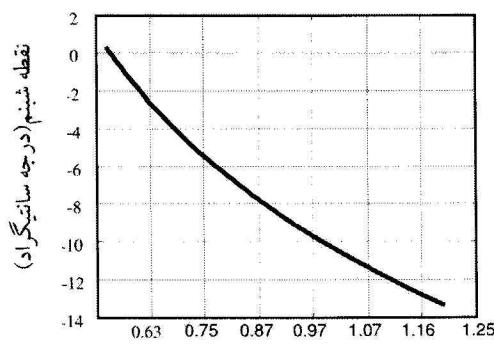
نتیجه گیری

شیوه سازی حاصله با استفاده از محاسبات کامپیوتی، تطابق خوبی با نتایج موجود تئوریکی دارا می‌باشد که از آن جمله می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- ۱- با کاهش نقطه شبنم در گاز کوره، درصد کربن سطح قطعه کربوره شده افزایش می یابد.
- ۲- با افزایش نسبت هوا به سوخت ، اکتیویته کربن و در نتیجه درصد کربن سطح کاهش می یابد.
- ۳- با افزایش فشار داخل کوره کربوراسیون ، درصد کربن رسوب داده شده افزایش می یابد.
- ۴- در نسبت های سوخت/هوای نزدیک ۲/۵، تغیرات فشار در اکتیویته کربن تأثیر ناچیزی خواهد داشت.
- ۵- با افزایش دمای کربوراسیون تحت شرایط یکسان، اکتیویته کربن سطح کاهش پیدا می کند.
- ۶- شبیه سازی حاصله می تواند در جهت اهداف آموزشی نیز بکار رود زیرا بدون انجام محاسبات طولانی و زمان بر می توان تأثیر پارامترهای مختلف را بر راندمان کربوراسیون در حداقل زمان ممکن بررسی نمود.

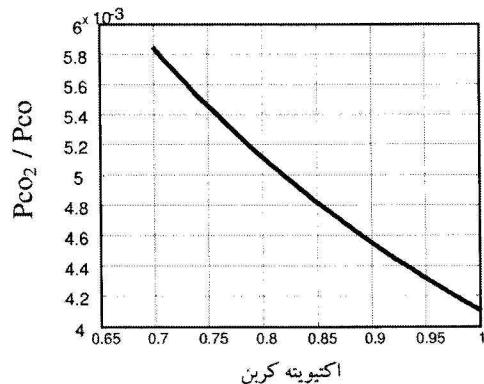
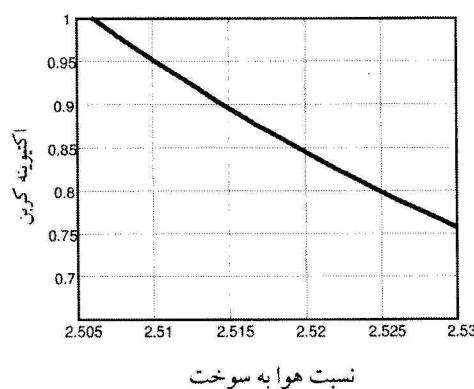
مراجع

- [1] ASM Metals Handbook ,Volume 4 – Heat Treating.
- [2] دبیود، ر، گاسکل ، "مقدمه ای بر ترمودینامیک مواد.[ویرایش سوم، جلد دوم]" ، تابستان ۱۳۸۱ ، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان.
- [3] Dong-Ying Ju, Chuncheng Liu b, Tatsuo Inoue, " Numerical modeling and simulation of carburized and nitrided quenching process", Journal of Materials Processing Technology, 2003 , pp. 143–144.
- [4] B. L. Ferguson , Z. Li, A.M. Freborg, " Modeling heat treatment of steel parts, Computational Materials Science" , 2005, 34.
- [5] B. Lynn Ferguson, Andrew M. Freborg, Greg Petrus and Melvin L. Callabresi, "Predicting the Heat-Treat Response of a Carburized Helical Gear", GEAR TECHNOLOGY, NOVEMBER/DECEMBER 2002.
- [6] Erik Sundelöf," Modelling of Reactive Gas Transport ", Universitetsservice US AB, Stockholm, 2003.
- [7] V. K. Sinha, R. S. Prasad, A. Mandal, and J. Maity, "A Mathematical Model to Predict Microstructure of Heat-Treated Steel" , Journal of Materials Engineering and Performance , August 2007 , Volume 16, 4.
- [8] ر.منی، " محیطهای کنترل شده در عملیات حرارتی " ، اسفند ۱۳۷۷ ، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.



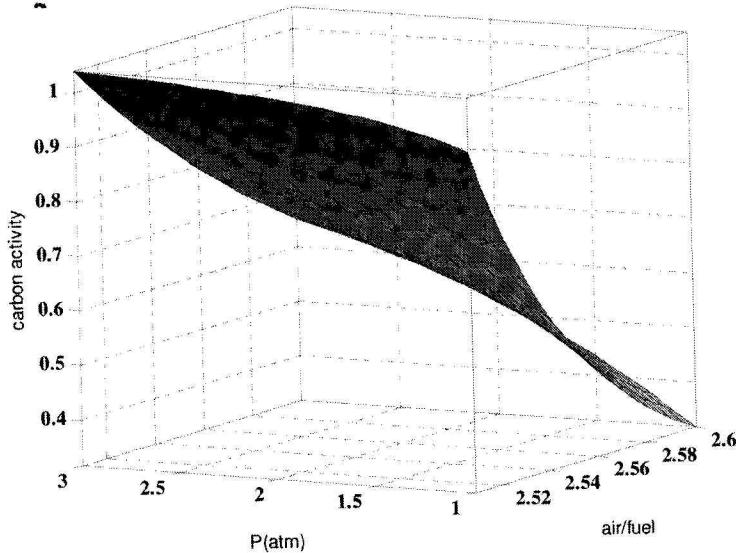
درصد کربن

شکل ۱. تغییرات درصد کربن با نقطه شبنم در فشار ۱ اتمسفر، دمای ۹۲۷ سانتیگراد، هوا به سوخت ۲/۵۱-۲/۶

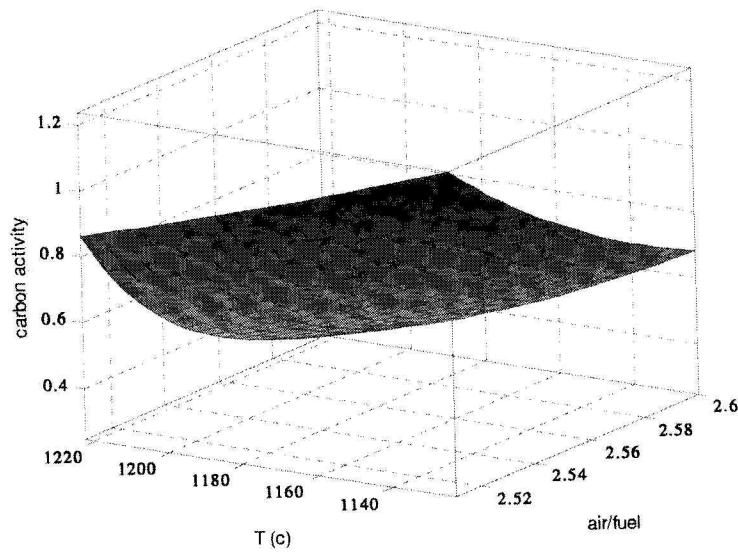
شکل ۲. تغییرات اکتیویته کربن سطح بر حسب نسبت P_{CO_2}/P_{CO} 

نسبت هوا به سوخت

شکل ۳. تغییرات اکتیویته کربن سطح با نسبت هوا به سوخت در دمای ۹۲۷ سانتیگراد، فشار ۱ اتمسفر.



شکل ۴. تغییرات همزمان اکسیویته کربن بر حسب فشار کوره و نسبت هوا به سوخت در دمای ۹۲۷ سانتیگراد.



شکل ۵. تغییرات همزمان اکسیویته کربن بر حسب دمای کوره و نسبت هوا به سوخت در فشار ۱ اتمسفر.