

بررسی شکست لایه‌های سمیتیت در نیتروژن دهی پلاسمایی فولاد CK45

خدیجه فرجام حاجی آقا^۱، نگار عباسی اول^۱، حسین آقاجانی^{۲*}، محمد جعفرپور^۱

۱- دانشجوی کارشناس، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- استادیار و عضو هیئت علمی، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

* h_aghajani@tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۳/۰۱، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۷/۰۹)

چکیده

نیتروژن دهی پلاسمایی، عملیاتی ترموشیمیایی است که علاوه بر بهبود خواص سطحی باعث تغییر ترکیب شیمیایی لایه‌های سمیتیت می‌شود. در این تحقیق احتمال حذف یا شکسته شدن لایه‌های سمیتیت در اثر نفوذ نیتروژن به داخل فولاد CK45 مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در ابتدا نمونه های تهیه شده از این فولاد تحت عملیات حرارتی آنیل در دماهای ۸۰۰، ۸۲۰، ۸۴۰، ۸۶۰، ۸۸۰ و ۹۰۰ درجه سانتی گراد قرار گرفته و سپس با استفاده از پلاسمای DC، نیتروژن دهی شدند. نمونه‌های متالوگرافی شده با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز پراش X مورد مطالعه ریزساختاری قرار گرفتند. از طرفی، فازهای پایدار تشکیل شده در حین نیتروژن دهی پلاسمایی با استفاده از محاسبات ترمودینامیکی تعیین شدند. نتایج حاصل از محاسبات ترمودینامیکی، نتایج تجربی را تأیید کرده و نشان می‌دهند که نفوذ نیتروژن به لایه‌های سمیتیت باعث شکست این لایه‌ها و تبدیل آنها به γ' (Fe_4N) می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

فولاد CK45، نیتروژن دهی پلاسمایی، ضرایب نفوذ، لایه نیتریدی، انرژی آزاد گیبس، Fe_4N ، Fe_3C .

۱- مقدمه

آن به داخل ماده استفاده می‌شود. در یک محفظه خلأ، انرژی الکتریکی ولتاژ بالا، برای تشکیل پلاسمای استفاده می‌شود و از طریق تشکیل پلاسمای یون‌های نیتروژن جهت برخورد به سطح قطعه کار، شتاب داده می‌شوند. این بمباران یون‌ها، قطعه کار را گرم و سطح را تمیز می‌کند. همچنین، با تولید نیتروژن فعال امکان واکنش شیمیایی را تامین می‌سازد. طبق مدل Kolbel که برای نیتروژن دهی پلاسمایی ارائه شده است، نیتروژن فعال با اتم

امروزه نیتروژن دهی پلاسمایی به عنوان یک روش سخت کردن سطحی در گستره وسیعی از صنایع مرتبط با محصولات آهن، چدن، تیتانیم و سایر فلزات به کار می‌رود [۱] و به طور مؤثر باعث بهبود مقاومت به خوردگی [۲-۳]، سایش [۴-۵] و استحکام خستگی [۶-۷] این فلزات می‌شود.

در عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی از تکنولوژی تخلیه نورانی برای رساندن نیتروژن عنصری به سطح یک قطعه فلزی و نفوذ

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد CK45 (درصد وزنی).

Element	Wt%
C	0.448
Si	0.251
Mn	0.660
P	0.015
Cr	0.049
Mo	0.017
Ni	0.058
Fe	Bal.

نمونه‌های مورد آزمایش به شکل دیسک‌هایی به قطر ۲ سانتی-متر و ارتفاع ۱ سانتی‌متر از یک میلگرد به قطر ۵ سانتی‌متر و طول ۱۵ سانتی‌متر تراشکاری شدند. سپس فرآیند عملیات حرارتی آیل در شش دمای ۸۰۰، ۸۲۰، ۸۴۰، ۸۶۰، ۸۸۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. پس از انجام عملیات حرارتی، نمونه‌ها تحت عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی قرار گرفتند. نیتروژن‌دهی پلاسمایی با ترکیب گاز $75\% \text{N}_2 - 25\% \text{H}_2$ در دمای ۵۵۰ سانتی-گراد به مدت ۵ ساعت به وسیله دستگاه پالسی جریان مستقیم، در مقیاس نیمه صنعتی با دامنه ولتاژ ۵۰۰ الی ۶۵۰ ولت، شدت جریان ۲ الی ۳/۵ آمپر و در فشار 1 ± 5 میلی‌اتمسفر انجام شد. پس از انجام عملیات نیتروژن‌دهی پلاسمایی، نمونه‌ها متالوگرافی شدند.

برای بررسی نفوذ نیتروژن و احتمال حذف یا شکسته شدن لایه-های سمیتیت در اثر نفوذ نیتروژن نمونه‌ها تحت بررسی میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار گرفتند. بدین منظور محاسبات ترمودینامیکی نیز انجام شد. همچنین جهت تعیین ساختار فازی لایه ترکیبی، از آنالیز پراش اشعه X استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی‌های ریزساختاری

در شکل (۱) نمونه‌ای از تصاویر متالوگرافی یکی از نمونه‌های نیتروژن‌دهی شده، ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۱) دیده می‌شود، نفوذ نیتروژن به داخل نمونه باعث تشکیل ناحیه

آهن حاصل از کندوپاش، ترکیب شده و فاز FeN را تشکیل می‌دهد.

این فاز در سطح قطعه رسوب کرده و به علت ناپایداری به نیتریدهای ϵ ($\text{Fe}_{2.3}\text{N}$) و γ' (Fe_4N) احیا می‌گردد و به این ترتیب لایه ترکیبی (لایه سفید) را تشکیل می‌دهد. نیتروژن همچنین به داخل قطعه نفوذ کرده و ناحیه نفوذی را تشکیل می‌دهد [۸]. نفوذ نیتروژن به داخل زمینه آهن می‌تواند اثرات مختلفی ایجاد کند. از جمله این اثرات می‌توان به نفوذ حجمی، نفوذ مرزدانه‌ای، تغییر فصل مشترک لایه ترکیبی با زیرلایه [۹-۱۰]، تشکیل نیتریدهای عناصر آلیاژی [۶ و ۱۱]، تشکیل نیتریدها یا کربونیتریدهای آهن [۶] و همچنین احتمال شکستن لایه‌های سمیتیت، اشاره کرد.

تشکیل کربونیتریدها می‌تواند دلیل دیگری بر تجزیه سمیتیت باشد. عمده تحقیقات انجام گرفته در این زمینه براساس بررسی نفوذ نیتروژن بوده است. ضخامت و ترکیب این لایه‌ها تابعی از اکتیویته نیتروژن محیط [۱۲-۱۳]، زمان و دمای عملیات نیتروژن-دهی پلاسمایی [۴ و ۱۳]، ترکیب شیمیایی فولاد [۶] و ریزساختار اولیه فولاد [۹ و ۱۱] است. خواص قطعات فولادی نیتروژن‌دهی شده توسط استحکام مغز قطعه، خصوصیات ساختاری لایه ترکیبی و لایه نفوذی تعیین می‌شود [۶]. استحکام لایه نیتریدی و همچنین استحکام خستگی را ناحیه نفوذی و خواص تریبولوژیکی و مقاومت به خوردگی لایه نیتریدی را لایه ترکیبی تعیین می‌کند [۱۴].

با توجه به آن که تاکنون بررسی دقیقی در مورد تغییر ترکیب لایه‌های سمیتیت در فولادهای نیتروژن‌دهی شده، انجام نشده است، هدف از انجام این تحقیق بررسی احتمال حذف یا شکسته شدن لایه‌های سمیتیت در اثر نفوذ نیتروژن به داخل فولاد ساده کربنی CK45 است.

۲- مواد و روش تحقیق

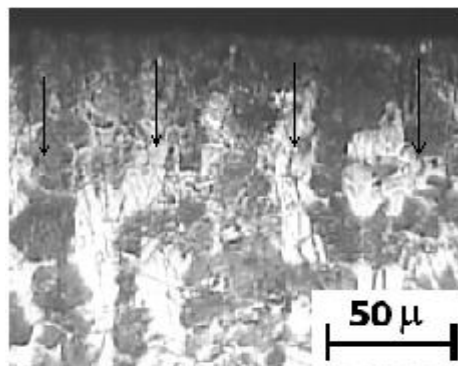
در این تحقیق از فولاد (AISI 1045) CK45 استفاده شد. ترکیب شیمیایی فولاد CK45 در جدول (۱) ارائه شده است.

۳-۲- بررسی‌های انجام شده توسط میکروسکوپ الکترونی رویشی (SEM)

برخی از تصاویر SEM سطح مقطع یکی از نمونه‌های نیتروژن‌دهی در شکل‌های (۳) و (۴) ارائه شده است.

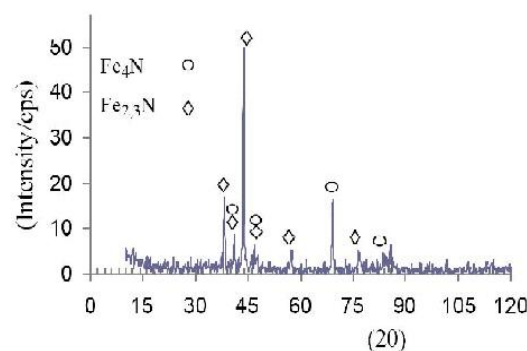
همان‌طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، در سطح نمونه، لایه ترکیبی تشکیل شده است. در زیر این لایه ریزساختار ناحیه نفوذی متشکل از محلول جامد نیتروژن در آهن یا رسوبات نیتریدی نیز قابل مشاهده است. در شکل (۳-الف) دیده می‌شود که نفوذ نیتروژن حالتی بینابین مرزدانه‌ای و حجمی دارد. از آنجایی که نفوذ اتمی، تحرکات اتمی را نیز به همراه دارد، با افزایش دمای یک سیستم نفوذی، انتظار می‌رود ضریب نفوذ نیز افزایش یابد [۱۶]. ضرایب نفوذ مرزدانه‌ای و حجمی وابستگی دمایی متفاوتی دارند. نفوذ حجمی نسبت به نفوذ مرزدانه‌ای حساسیت بیشتری به تغییر دما دارد، به این صورت که با افزایش دما، نفوذ در داخل دانه با سرعت بیشتری نسبت به نفوذ در امتداد مرزها افزایش می‌یابد. بر عکس، با کاهش دما، نفوذ در مرزها با سرعت کمتری کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت در دماهای بسیار بالا نفوذ حجمی غالب و در دماهای پایین نفوذ مرزدانه‌ای به نفوذ حجمی غالب می‌شود [۱۷]. در تحقیقی که توسط محبوبی و عبدالوهابی انجام گرفته، مشخص شده است که در دماهای پایین، تحرک اتم‌ها کم است و نفوذ از مسیرهای با فشردگی کم مانند مرزدانه‌ها به آسانی صورت می‌گیرد [۱۰].

نفوذی شده است، به طوری که این ناحیه (ناحیه تیره) از زمینه قابل تفکیک است.



شکل (۱): تصویر متالوگرافی نمونه آنبیل شده در دمای 900°C پس از نیتروژن‌دهی.

میانگین عمق نفوذ نیتروژن برابر با $88/8 \mu\text{m}$ است. اما در این تصویر، لایه ترکیبی (لایه سفید) تشکیل شده در بالای ناحیه نفوذی قابل مشاهده نیست. در شکل (۲) الگوی پراش اشعه X نمونه آنبیل شده در دمای 900°C پس از نیتروژن‌دهی ارائه شده است. این الگوی پراش نشان می‌دهد که لایه ترکیبی تشکیل شده در سطح نمونه شامل دو فاز Fe_4N و $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ است. الگوهای پراش سایر نمونه‌ها تقریباً مشابه این الگو است. به عبارت دیگر فازهای تشکیل شده در سطح کلیه نمونه‌ها شامل Fe_4N و $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ است. تشکیل همین فازها در سطح فولاد CK45 نیتروژن‌دهی شده به روش پلاسمایی در تحقیقی که توسط محبوبی و فتاح انجام گرفته [۱۵]، نیز گزارش شده است.



شکل (۲): الگوی پراش اشعه X از نمونه مرجع نیتروژن‌دهی پلاسمایی شده (\diamond : $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ و \circ : Fe_4N)

شود، ولی با تداوم فرآیند، نیتrideهای تشکیل شده در مرزدانه به نوعی به عنوان سد نفوذی عمل کنند. در چنین حالتی مکانیزم نفوذ از مکانیزم نفوذ مرزدانه‌ای به مکانیزم نفوذ حجمی تغییر یافته و یا مخلوطی از دو مکانیزم خواهد شد. در شکل (۳-ب) مشاهده می‌شود که نفوذ حجمی علاوه بر لایه‌های فریت، به داخل لایه‌های سمنتیت نیز انجام شده است، در حالی که این لایه‌ها مناطق مرجح نفوذ نیستند. در تحقیقی که توسط آقاجانی و همکاران در مورد فولاد H11 صورت گرفته، نشان داده شده است که به دلیل ضریب نفوذ کمتر در سمنتیت نسبت به ضریب نفوذ در فریت و مرزدانه، نیتروژن به جای نفوذ از سمنتیت تمایل دارد از فریت یا مرزدانه نفوذ کند [۹].

در شکل (۴-الف) دیده می‌شود که نفوذ حجمی نیتروژن ساختار پرلیت را تحت تأثیر قرار داده است، به طوری که لایه‌های سمنتیت موجود در پرلیت در ناحیه نزدیک به سطح، با همین لایه‌ها در نواحی دور از سطح، از لحاظ سایز و شکل تفاوت دارند. تصویر (۴-ب) بزرگنمایی بالاتر قسمت مشخص شده با حرف B از تصویر (۴-الف) را نشان می‌دهد. با توجه به این تصاویر به نظر می‌رسد که نفوذ حجمی نیتروژن به داخل لایه‌های سمنتیت باعث شکست این لایه‌ها و تبدیل آنها به نیتريد یا کربونیتريد آهن شده است.

۳-۳- مکانیزم شکست لایه‌های سمنتیت

به منظور بررسی شکست لایه‌های سمنتیت، برای این منظور واکنش‌های تشکیل نیتريد (واکنش آهن با نیتروژن حل شده در آن، واکنش ۱ و ۲) یا تشکیل کاربید (واکنش آهن با کربن حل شده در آن، واکنش ۳) که می‌تواند در فولاد CK45 با ساختار دوفازی فریت - پرلیت (فریت - سمنتیت) انجام شوند، از نظر ترمودینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. واکنش‌های ذکر شده به صورت زیر است.



شکل (۳): تصاویر SEM نمونه آئیل شده پس از نیتروژن دهی در دمای

۹۰۰°C

بنابراین نفوذ مرزدانه‌ای سریع‌تر از نفوذ حجمی انجام می‌شود و عمق نفوذ اتم‌ها در امتداد مرزدانه نسبت به داخل دانه بسیار بیشتر است. همچنین با افزایش غلظت اتم حل شده در مرزدانه‌ها، اتم‌ها از مرزدانه به داخل دانه نیز نفوذ می‌کنند [۱۸]. در مورد نفوذ عناصری مانند نیتروژن که قابلیت انجام واکنش شیمیایی با زمینه را دارند، به نظر می‌رسد، در ابتدای فرآیند نیتروژن دهی، نفوذ سریع اتم‌های نیتروژن در امتداد مرزدانه منجر به افزایش نفوذ

(الف): انرژی آزاد استاندارد تشکیل نیتrideهای آهن Fe_2N ، Fe_4N و کاربید آهن Fe_3C :



$$\Delta G_4^0(j) = 24.43T - 1732$$

$$T(K) = 298 - 1000 [19]$$



$$\Delta G_5^0(j) = 12.22T - 2666$$

$$T(K) = 298 - 1000 [19]$$



$$\Delta G_6^0(j) = 9 \times 10^{-6}T^3 - 0.019T^2 + 3.963T + 6469$$

$$T(K) = 298 - 1000 [19]$$

(ب): انرژی آزاد استاندارد تشکیل محلول یک درصد وزنی نیتروژن در آهن و محلول یک درصد وزنی کربن در آهن:

$$N_2 = 2[N]_{1 \text{ wt\% in } \alpha_{Fe}} \quad (۷)$$

$$\Delta G_7^0(j) = 40855.36 (\pm 12558) - 9.62T$$

$$T(K) = 298 - 1180 [19]$$

$$C_{(gr)} = [C]_{1 \text{ wt\% in } \alpha_{Fe}} \quad (۸)$$

$$\Delta G_8^0(j) = 22600 - 42.26T$$

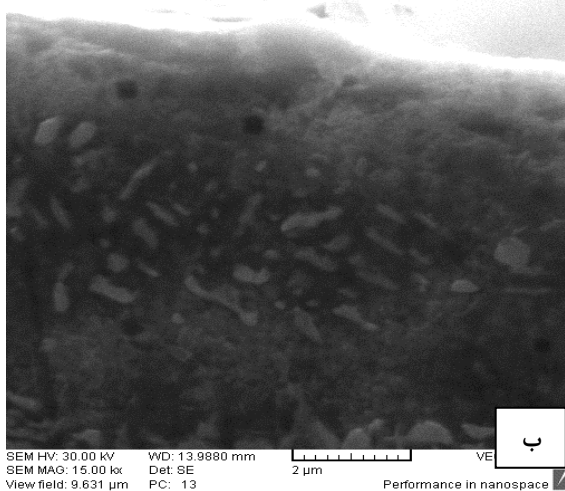
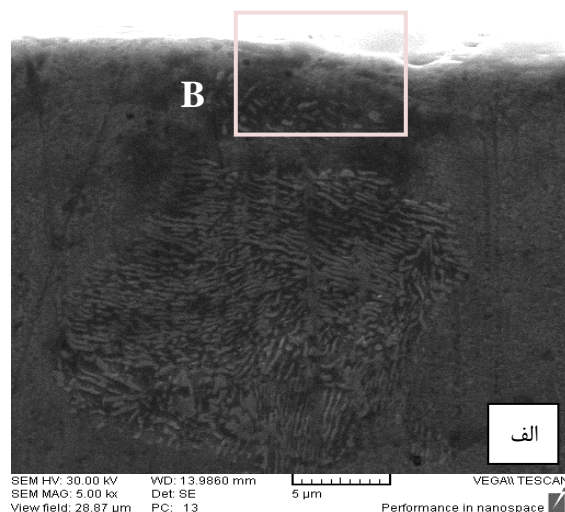
$$T(K) = 298 - 1180 [19]$$

بنابراین انرژی آزاد استاندارد واکنش‌های ۱ الی ۳ از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\Delta G_1^0(j) = 2\Delta G_4^0 - \frac{1}{2}\Delta G_7^0 = 53.67T - 23891.68 \quad (۹)$$

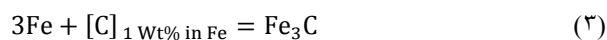
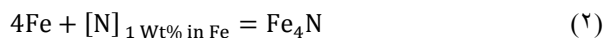
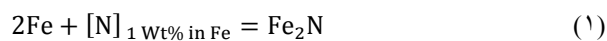
$$\Delta G_2^0(j) = 4\Delta G_5^0 - \frac{1}{2}\Delta G_7^0 = 53.69T - 31091.68 \quad (۱۰)$$

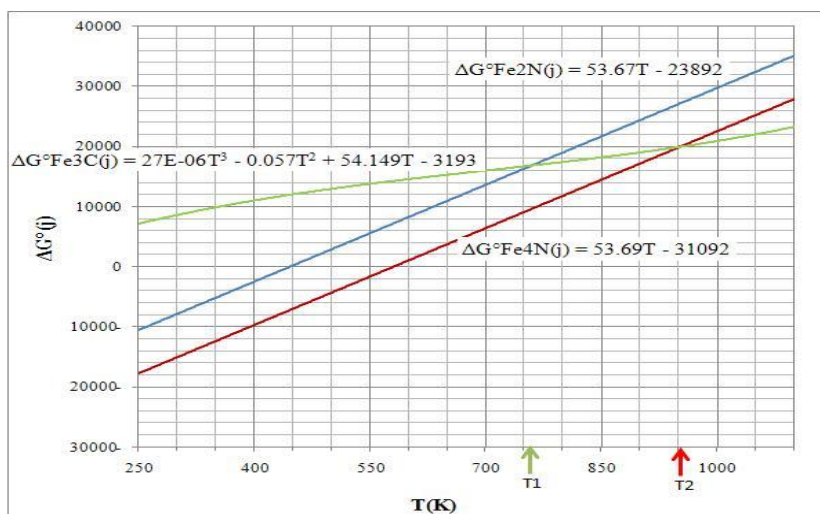
$$\Delta G_3^0(j) = 3\Delta G_6^0 - \Delta G_8^0 = 27 \times 10^{-6}T^3 - 0.057T^2 + 54.149T + 3193 \quad (۱۱)$$



شکل (۴): تصاویر SEM نمونه آنبیل شده پس از نیتروژن‌دهی در دمای 900°C

انرژی آزاد استاندارد واکنش‌های زیر از ترکیب انرژی آزاد استاندارد واکنش‌های (الف و ب) به دست می‌آیند:





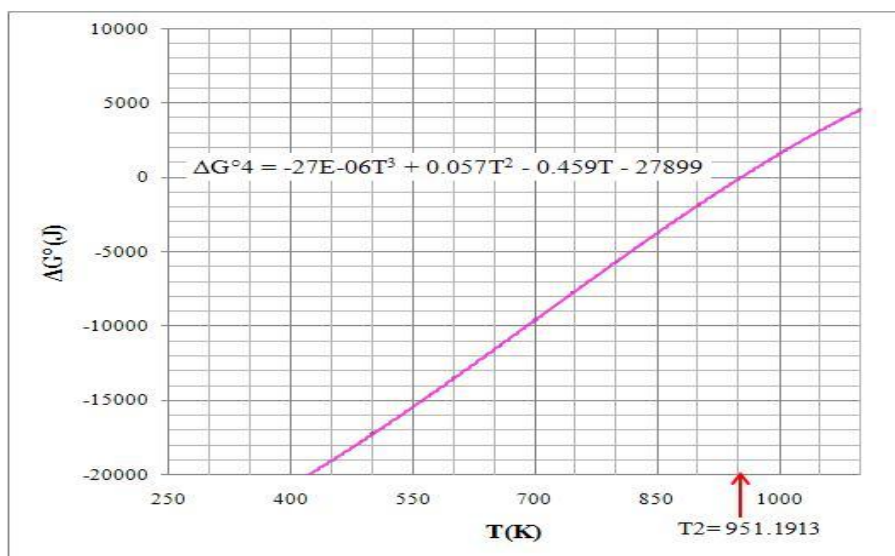
شکل (۵): تغییرات انرژی آزاد استاندارد واکنش‌های ۱ الی ۳ به صورت تابعی از دما.

در دماهای کمتر از T_2 به علت کمتر بودن انرژی آزاد واکنش ۲ نسبت به واکنش ۳ (شکل ۵)، انرژی آزاد واکنش ۴ منفی است. بنابراین [C] و Fe_4N نسبت به [N]، Fe_3C و Fe پایدارتر هستند. در دماهای بالاتر از T_2 وضعیت برعکس است.

با توجه به موارد فوق می‌توان گفت در حین فرآیند نیتروژن‌دهی در دمای $823 K < T_2$ ، واکنش ۴ انجام می‌شود، به عبارت دیگر نیتروژن نفوذی به داخل لایه‌های فریت با رسیدن به فصل مشترک Fe و Fe_3C با آنها واکنش داده و Fe_4N تشکیل می‌شود.

برای نفوذ یک جزء گازی به یک جامد، نفوذ حالت ناپایدار که در آن غلظت اتم‌های حل شده با فاصله و زمان تغییر می‌کند، اتفاق می‌افتد. برای حالت نفوذ ناپایدار، قانون دوم فیک به کار می‌رود [۱۶]. طبق این قانون، عمق نفوذ از رابطه $x \approx \sqrt{Dt}$ که در آن x: عمق نفوذ، D: ضریب نفوذ و t: زمان انجام عملیات نفوذ می‌باشد، به دست می‌آید [۱۸]. در تحقیقی که توسط Lakhtin و همکاران صورت گرفته، رابطه ضریب نفوذ نیتروژن در فریت به صورت $D_N^{\alpha} = 4.67 \times 10^{-8} \exp\left(\frac{-75150}{RT}\right) \frac{m^2}{s}$ [۲۱] گزارش شده است و مقدار آن در دمای $823 K$ برابر $7.934 \times 10^{-13} \frac{m^2}{s}$ است.

در شکل (۵) تغییرات انرژی آزاد استاندارد واکنش‌های ۱ الی ۳ به صورت تابعی از دما رسم شده است. همان طور که در شکل (۵) دیده می‌شود، منحنی انرژی آزاد استاندارد Fe_4N همواره پایین‌تر از Fe_2N است، به همین علت پایدارتر از Fe_2N می‌باشد. اما موقعیت منحنی انرژی آزاد استاندارد Fe_3C نسبت به منحنی-های Fe_2N و Fe_4N با تغییر دما، تغییر می‌کند، به این صورت که در دماهای کمتر از T_1 ، Fe_3C ناپایدارتر از Fe_2N و Fe_4N در محدوده دمایی T_1 تا T_2 ناپایدارتر از Fe_4N و در دماهای بالاتر از T_2 پایدارتر از Fe_2N و Fe_4N می‌باشد. منحنی انرژی آزاد استاندارد Fe_3C ، خطوط مربوط به Fe_2N و Fe_4N را به ترتیب در دماهای T_1 و T_2 قطع کرده است. بنابراین می‌توان واکنش بین آنها را در نقاط تلاقی نوشت و انرژی آزاد واکنش حاصل را به دست آورد. با در نظر گرفتن منحنی انرژی آزاد استاندارد Fe_4N و Fe_3C (واکنش ۲ و ۳) می‌توان واکنش بین آنها را در نقطه تلاقی ($T_2 = 951.2 K$) نوشت. تغییرات انرژی آزاد واکنش ۴ به صورت تابعی از دما در شکل (۶) رسم شده است. در شکل (۶) دیده می‌شود که در دمای T_2 ، انرژی آزاد استاندارد واکنش ۴ به علت برابر بودن انرژی آزاد واکنش‌های ۲ و ۳، برابر صفر است. بنابراین عوامل شرکت کننده در واکنش ۴ [C]، Fe_4N ، [N]، Fe_3C و Fe در تعادل هستند. به طور کلی واکنشی پایدار است که تغییرات انرژی آزاد آن منفی باشد.



شکل (۶): تغییرات انرژی آزاد استاندارد واکنش‌های ۱ الی ۳ به صورت تابعی از دما.

سایر تحقیقات تأیید می‌شود. لذا با انجام واکنش شیمیایی در سطح لایه‌های سمنتیت، این لایه‌ها به تدریج تجزیه شده و می‌شکنند.

۴- نتیجه گیری

۱- لایه ترکیبی تشکیل شده در سطح نمونه‌ها شامل دو فاز Fe_4N و $Fe_{2-3}N$ می‌باشد.

۲- نفوذ نیتروژن حالت بینابین مرزدانه‌ای و حجمی دارد. در ابتدای فرآیند نیتروژن‌دهی، اتم‌های نیتروژن در امتداد مرزدانه‌ها نفوذ می‌کنند ولی با تداوم فرآیند، نیتروژن‌های تشکیل شده در مرزدانه‌ها به علت ضریب نفوذ پایین به عنوان سد نفوذی عمل می‌کنند. در این صورت اتم‌های نیتروژن از مرزدانه‌ها به داخل دانه‌ها نفوذ می‌کنند. نفوذ حجمی نیتروژن به داخل لایه‌های سمنتیت باعث شکست این لایه‌ها و تبدیل آنها به نیتريد آهن Fe_4N شده است.

۳- محاسبات ترمودینامیکی حاکی از پایدارتر بودن فاز Fe_4N تشکیل شده در فصل مشترک فریت - سمنتیت و احتمال تبدیل کامل سمنتیت به Fe_4N است.

طبق روابط فوق، عمق نفوذ نیتروژن در فریت در عملیات نیتروژن‌دهی با دمای ۸۲۳ K به مدت ۵ ساعت تقریباً برابر با $119/5 \mu m$ است.

عمق نفوذ نیتروژن در فولاد CK45 برابر با $88/8 \mu m$ است که این مقدار کمتر از عمق نفوذ نیتروژن پیش بینی شده توسط رابطه فوق الذکر است. کمتر بودن عمق نفوذ می‌تواند به علت ساختار فولاد CK45 (فریت - پرلیت (فریت - سمنتیت)) باشد. نفوذ در فریت بسیار سریع‌تر از سمنتیت است، ولی در فصل مشترک فریت و سمنتیت با توجه به شکل (۴) واکنش شیمیایی صورت می‌گیرد و طبق محاسبات ترمودینامیکی Fe_3C به Fe_4N تبدیل می‌شود. این واکنش در صورت رسیدن مداوم نیتروژن به فصل مشترک همواره ادامه می‌یابد، ولی با تشکیل Fe_4N نفوذ نیتروژن باید از Fe_4N صورت بگیرد. رابطه ضریب نفوذ نیتروژن در Fe_4N در تحقیق انجام شده توسط Campos و همکاران به صورت $D_N^y = \exp\left(\left(\frac{-73274}{RT}\right) - 18.775\right) \frac{m^2}{s}$ [۲۲] گزارش شده است و مقدار آن در دمای ۸۲۳ K برابر با $1.57 \times 10^{-13} \frac{m^2}{s}$ است که در مقایسه با ضریب نفوذ نیتروژن در فریت بسیار کم است. با توجه به این امر شکستن لایه‌های سمنتیت در ابتدا به سرعت و سپس به کندی تداوم می‌یابد. بنابراین مشاهدات تجربی با استناد به محاسبات ترمودینامیکی و نتایج حاصل از

۵- مراجع

- [12] T.G.R. Clarke, A. da Silva Rocha, A. Reguly and T. Hirsch, "In situ XRD measurements during plasma nitriding of a medium carbon steel", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 194, pp. 283-289, 2005.
- [13] T. Hirsch, T.G.R. Clarke and A. da Silva Rocha, "An in-situ study of plasma nitriding", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, pp. 6380-6386, 2007.
- [14] Dong-Cherng Wen, "Plasma nitriding of plastic mold steel to increase wear and corrosion properties", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204, pp. 511-519, 2009.
- [15] F. Mahboubi and M. Fattah, "Duplex treatment of plasma nitriding and plasma oxidation of plain carbon steel", *Vacuum*, Vol. 79, pp. 1-6, 2005.
- [16] W. F. Smith, "Principles of materials science and engineering", McGraw-Hill, New York, 1990.
- [17] R. E. Reed-Hill and R. Abbaschian, "Physical Metallurgy Principles", PWS-Kent Pub, 1992.
- [18] D.A. Porter and K. E. Easterling, "Phase Transformations in Metals and Alloys", Nelson Thomas, 1992.
- [19] H. Aghajani, "Study on the effect of the triple coating of plasma nitriding, hard chromium electroplating and plasma nitriding on the surface properties of the H11 hot work tool steel", Ph. D. Thesis, Iran university of Science & Technology, Tehran, Iran, 2009.
- [20] David R. Gaskell, "Introduction to thermodynamics of materials", Taylor & Francis, 2003.
- [21] Yu. M. Lakhtin and Ya. D. Kogan, *Nitriding of Steel*, Mashinostroenie, Moscow, 1976.
- [22] Campos, R. Torres, O. Bautista, G. Ramirez and L. Zuniga, "Evaluation of diffusion coefficient of nitrogen in Fe₄N_{1-x} nitride layers during microwave post-discharge nitriding". *Applied surface science*, Vol. 249, pp. 54-59, 2005.
- [1] B. Edenhofer, "Physical & Metallurgical aspects of ion nitriding- part 1", *Heat treatment*, Vol. 1, pp. 23-28, 1974.
- [2] C.X. Li, T. Bell, "Corrosion properties of plasma nitride AISI 410 martensitic stainless steel in 3.5% NaCl and 1% HCl aqueous solutions", *Corrosion Science*, Vol. 48, pp. 2036-2049, 2006.
- [3] C.X. Li and T. Bell, "Corrosion properties of active screen plasma nitrided 316 austenitic stainless steel", *Corrosion Science*, Vol. 46, pp. 1527-1547, 2004.
- [4] S. Karaoğlu, "Structural characterization and wear behavior of plasma-nitrided AISI 5140 Low-alloy steel", *Material Characterization*, Vol. 49, pp. 349-357, 2003.
- [5] Dong-Cherng Wen, "Plasma nitriding of plastic mold steel to increase wear and corrosion properties", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204, pp. 511-519, 2009.
- [6] F. Ashrafizadeh, "Influence of plasma and gas nitriding on fatigue resistance of plain carbon (ck45) steel", *Surface & coating Technology*, Vol. 1196, pp. 174-175, 2003.
- [7] S. Sirin, K. Sirin and E. Kaluc, "Effect of the ion nitriding surface hardening process on fatigue behavior of AISI 4340 steel", *Material Characterization*, Vol. 59, pp. 351-358, 2008.
- [8] James M. O'Brien and Dan Goodman, "Plasma (Ion) nitriding of steels ASM Metals Handbook", Vol. 4, 9th edition, pp. 944-954, 1991.
- [9] H. Aghajani, H. Madanipour, M. Soltanieh, F. Mahboubi and M. Naseredini, "Effect of Pre-heat treatment on Plasma Nitriding of Hot Work Tool Steel", 17th IFHT SE Congress, pp. 27-30, 2008.
- [10] F. Mahboubi and K. Abdolvahabi, "The effect of temperature on plasma nitriding behaviour of DIN 1.6959 low alloy steel", *Vacuum* Vol. 81, pp. 239-243, 2006.
- [11] Akbari, R. Mohammadzadeh, C. Templier and J.P. Riviere, "Effect of the initial microstructure on the plasma nitriding behavior of AISI M2 high speed steel", *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204, pp. 4114-4120, 2010.