



کاشت یون‌های نیتروژن و دی اکسید کربن بر روی فولاد ضد زنگ ۵۲۱۰۰ و مقایسه سختیهای بدست آمده

مهدی مردانیان^{۱*}، محمود قرآن نویس^۲، سید ضیاء طاهری^۳
۱- مرکز تحقیقات هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۳۴۸۶ - ۱۱۳۶۵، تهران - ایران
۲- مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما، دانشگاه آزاد علوم و تحقیقات، تهران - ایران
۳- گروه فیزیک، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران - ایران

چکیده: در این پژوهش اثر کاشت یونهای نیتروژن و دی اکسید کربن بر سختی فولاد زنگ نزن ۵۲۱۰۰ در انرژی ثابت ۹۰ KeV با دزهای مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. کاشت یونهای نیتروژن سختی این فولاد را به مراتب بیشتر از کاشت یونهای دی اکسید کربن بر روی آن افزایش می‌دهد. بیشترین افزایش سختی، مربوط به کاشت یونهای نیتروژن با دز 1×10^{18} ion/cm² به اندازه ۴۹/۷۰ درصد نسبت به نمونه شاهد (خام) است. کاشت یونهای دی اکسید کربن با دزهای 3×10^{18} و 1×10^{19} ion/cm² سختی را به ترتیب به اندازه ۱۷/۱۵ و ۵/۰۱ درصد نسبت به نمونه شاهد افزایش می‌دهد. برای تعیین ساختار بلوری شبکه و تشکیل نوع فازها و تغییر احتمالی آنها از نمونه‌ها تجزیه و تحلیل XRD به عمل آمد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که در نمونه‌های کاشت شده به وسیله یون‌های نیتروژن، افزایش سختی به علت تشکیل فاز beta-CrN است. در نمونه‌های کاشت شده به وسیله یونهای دی اکسید کربن هیچگونه پیک جدیدی که معرف حضور کربن به صورت گرافیت و یا تشکیل فازی از نوع کاربید باشد مشاهده نشد؛ همچنین با توجه به عدم مشاهده هیچگونه برآمدگی (کوهان) در پیکها نمی‌توان ادعا کرد که کربنهای موجود در زیر لایه به صورت بی‌شکل وجود دارند.

واژه‌های کلیدی: کاشت یون، یون نیتروژن، یون دی اکسید کربن، سختی، دز و انرژی

Microhardness Tests of Stainless Steel 52100 Implanted with Nitrogen and Carbon Dioxide

M. Mardanian^{1*}, M. Ghoran Nevis², S. Z. Taheri³

1- Nuclear Research Center, AEOI, P.O.Box: 11365 - 3486, Tehran - Iran
2- Plasma Physics Research Center, University of Azad of Research and Science, Tehran - Iran
3- Department of Physics, Eslamic Azad University, Tehran - Iran

Abstract: In this research work, samples of stainless steel 52100 disks were implanted with nitrogen and carbon dioxide ions at the energy of 90 keV. Microhardness measurements were performed to determine the hardness of the surfaces. The N₂⁺ implanted steels at the doses of 1×10^{18} ions cm⁻² gave the highest hardness of 49.70%, while for the CO₂⁺ ions implantation, the hardness of 17% and 5% were obtained at the doses of 3×10^{18} and 1×10^{19} ions cm⁻², respectively. To support the interpretation of our microhardness results the implanted surfaces were analyzed by the use of XRD method. Our results indicated that the hardness of the N₂⁺ implanted samples are due to formation of beta-CrN phase in the surface layer, while in the CO₂⁺ implanted samples no observation of carbon as graphite or carbide was made. In addition, the absence of any hump in the XRD spectrum indicating that carbon is not in the amorphous phase either.

Keywords: ion implantation, nitrogen ion, carbon dioxide ion, hardness, dose and energy

کاشت یون آماده ساخته‌ایم. مشخصات چند نوع فولاد که در صنعت کاربرد بسیار دارند در جدول ۱ مندرج است.

۱- مقدمه

امروزه ساخت قطعات کاربردی در مهندسی، پزشکی، ابزارهای الماسه کاربردی، صنایع فضایی، هسته‌ای و ... از اهمیت خاصی برخوردار است و سرمایه‌گذاران بسیاری در این زمینه جذب می‌گردد به طوری که این موضوع به عنوان یکی از مهمترین عوامل در عرصه رقابتهای اقتصادی میان کشورهای پیشرفته جلوه‌گر می‌شود.

یکی از روشهای نسبتاً جدید به منظور بهبود خواص سایش‌شناسی فلزات به ویژه فولادها و تغییر در آنها، استفاده از کاشت یون در رابطه با "فیزیک سطح" و "مهندسی سطح" است. با استفاده از این فرایند می‌توان خواصی از جمله سختی، سایش، فرسایش، ضریب اصطکاک، خوردگی، خستگی، اکسایش و ... را در فلزات و فولادها به نحو احسن تغییر داد.

علی‌رغم محدود بودن دامنه نفوذ یونها، عمر نمونه کاشت شده در مواد مختلف، تقریباً سه تا پنج برابر افزایش می‌یابد که در مقایسه با روشهای متداول سخت‌سازی سطح یا پوشش دادن آن، این فرایند از مزیت بالایی برخوردار است [۱ تا ۶].

۲- روش کار

۲-۱- آماده کردن نمونه‌ها

ابتدا نمونه‌ها را به شکل دو دیسک دایره‌ای به قطر ۳/۸ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۵ میلی‌متر برش داده و یکی از آنها را به صورت چهار ربع دایره مساوی در آورده و با سنباده پرداخت کرده‌ایم. سپس با استفاده از روشهای صیقل کاری و تمیزسازی، سطح آنها را از هر گونه آلودگی زدوده و آنها را برای عملیات

۲-۲- کاشت یون

دستگاه کاشت یون شامل واحدها و دستگاههای مختلفی از جمله دستگاه خنک‌کننده، چشمه یونی، ترمینال چشمه یونی، ترمینال ولتاژ بالا، منبع تغذیه، شتابدهنده پلاسما، محفظه خلاء و سیستم خلاء می‌باشد.

دستگاه کاشت یون مورد استفاده در این پژوهش دارای مشخصات علمی و فنی زیر است:

۱- نوع گازهای عمل‌کننده: CO_2 , Ar, N_2

۲- محدوده شدت جریان یونهای شتاب گرفته:

- در چشمه یونی تا ۵ mA

- در شتابدهنده پلاسما ۰/۸-۲ A

- در شتابدهنده پلاسما ۲-۵ A

۳- انرژی یون کاشته شده:

- چشمه یونی تا ۱۱۰ KeV

- شتابدهنده پلاسما ۳۰۰-۴۵۰ eV

۴- ابعاد تحت پوشش پرتو یونی: ۱۱۰×۲۵۰ mm

۵- محدوده فشار محفظه عمل: 1×10^{-7} - 5×10^{-5} Torr

۶- مصرف گاز:

- توسط چشمه یونی حداکثر تا 0.5×10^{-6} m³/sec

- در شتابدهنده پلاسما حداکثر تا 10^{-6} m³/sec

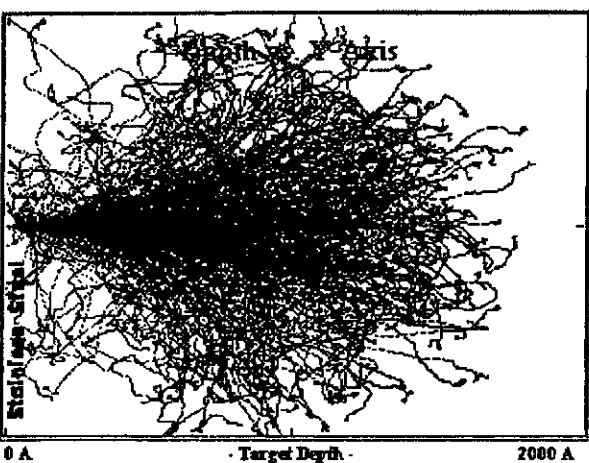
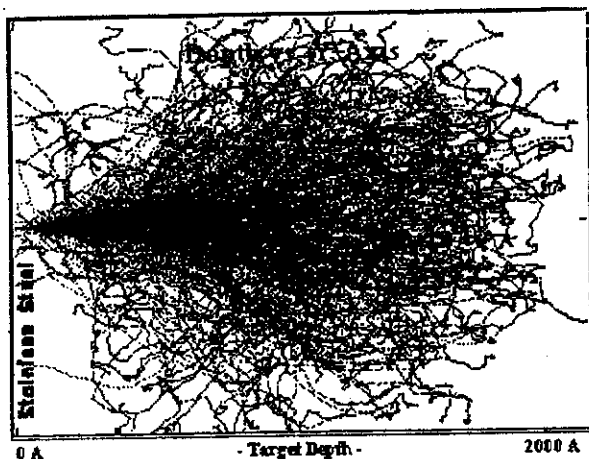
۷- ولتاژ منبع تغذیه: ۳۵۰ V

۸- ابعاد کل دستگاه: ۴۲۷۵ × ۴۲۳۰ × ۲۶۰۰ mm

جدول ۱- مشخصات چند نوع فولاد صنعتی: مقدار درصد عناصر تشکیل‌دهنده هر فولاد و سختی آنها بر حسب ویکرز

ترکیب شیمیایی									سختی	نام فولاد
Mo	V	Ni	Cr	S	P	Mn	Si	C		
-	-	۰/۳	۱/۵۲	۰/۰۲۵	۰/۰۳	۰/۳۵	۰/۲۵	۱/۰	۸۴۰	AISI 52100
دارای همان ترکیب شیمیایی									۲۷۰	Annelead
۱/۱	۰/۰۸	-	۱۸/۰	۰/۰۳	۰/۰۴۵	۱/۰	۱/۰	۰/۹	۷۷۰	AISI 440B
دارای همان ترکیب شیمیایی									۲۸۰	Annelead
۰/۷۵	-	-	۱۷	۰/۰۳	۰/۰۴	۱/۰	۱/۰	۱/۰۸	۶۵۰	AISI 440C
-	-	۱۰/۲	۱۸	۰/۰۳	۰/۰۴۵	۲/۰	۱/۰	۰/۱	۲۵۰	AISI 321
-	-	۹/۳	۱۹	۰/۰۳	۰/۰۴۵	۲/۰	۱/۰	۰/۰۸	۲۴۰	AISI 304

۹- جرم کل دستگاه: ۶۵۰۰ Kg



شکل ۱- عمق متوسط نفوذ ناخالصیهایی کاشته شده: تصویر بالایی مربوط به یونهای CO_2 و تصویر پایینی مربوط به یونهای N_2 است.

انرژی ثابت، هر قدر جرم اتمی یون مورد نظر بیشتر باشد، یون کمتر به درون زیر لایه نفوذ می‌کند (کربن دارای جرم اتمی ۱۲ و نیتروژن دارای جرم اتمی ۱۴ است). عناصر کربن و اکسیژن به دلیل داشتن شعاع یونی کوچکتر از نیتروژن در زیر لایه بیشتر نفوذ می‌کنند [۸ و ۹].

۳-۲- اندازه‌گیری سختی فولاد زنگ نزن قبل و بعد از کاشت

برای اندازه‌گیری سختی نمونه خام به وسیله دستگاه سختی‌سنج بر حسب مقیاس ویکرز از وزنه ۵۰ gf استفاده کرده‌ایم. آزمایش را چند بار برای نقاط مختلف سطح انجام داده و از سختیهای بدست آمده میانگین گرفته‌ایم و بدین ترتیب سختی متوسط نمونه خام تعیین شده است.

ابتدا با وارد کردن گاز مورد نظر بین رشته کاتود (فیلامان) و آنود (که به شکل مخروط ناقص است) پلاسمای پایدار را در یک میدان مغناطیسی به شدت ۷۵۰ گوس ایجاد کرده‌ایم. یونهای پلاسما از آنود به صورت جت خارج شده به وسیله سه عدسی الکترواستاتیک که به پتانسیل‌های منفی متصل شده‌اند شتاب می‌گیرند، به طوری که پس از خروج از آخرین روزنه دارای انرژی ۹۰ کیلو الکترون‌ولت و چگالی جریان ۳ میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع می‌شوند. نمونه را پس از پالش در مقابل این چشمه یونی به فاصله یک سانتی‌متر از آن قرار داده‌ایم. با وارد کردن گاز مورد نظر فشار محفظه خلاء که در آغاز 6×10^{-6} تور است، در مدت کاشت به 2×10^{-6} تور کاهش می‌یابد، و در این مدت دمای محفظه یونها ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد است. سپس خازنها (که ظرفیت کل آنها ۱۲ میکروفاراد است) از طریق مدار کنترل با ولتاژ ۳۰ کیلوولت باردار شده و با فرمان دادن به کلید H.V از طریق جعبه تقسیم مقاومت، در آنود و کاتود شتابدهنده‌های چشمه یونی، تقسیم ولتاژ و تخلیه می‌شوند، و بدین ترتیب، عمل کاشت یون بر روی فولاد انجام می‌شود [۷]. یونهای دی اکسید کربن و نیتروژن را بر روی چهار نمونه فولاد تهیه شده، با دزهای زیر کاشت کرده‌ایم:

1×10^{18} ion/cm ²	یونهای N_2^+ با دز
1×10^{19} ion/cm ²	یونهای N_2^+ با دز
3×10^{18} ion/cm ²	یونهای CO_2^+ با دز
1×10^{19} ion/cm ²	یونهای CO_2^+ با دز

۳- نتایج

۳-۱- تعیین عمق نفوذ متوسط یونهای کاشته شده

پس از پایان عملیات کاشت یون، با استفاده از برنامه نرم‌افزاری TRIM، عمق نفوذ متوسط یونهای کاشت شده را بدست آورده‌ایم (شکل ۱). عمق نفوذ متوسط یونهای دی اکسید کربن حدود ۱۵۰۰ آنگستروم است، در حالی که عمق نفوذ متوسط یونهای نیتروژن حدود ۱۲۰۰ آنگستروم است. کم بودن عمق نفوذ یونهای نیتروژن کاشت شده نسبت به یونهای دی اکسید کربن را می‌توان به جرم اتمی، شعاع یونی و درجه الکترونگاتیو بودن این دو گاز نسبت داد. زیرا به ازای مقدار

جدول ۲- سختی نمونه خام، d_1 و d_2 قطرهای سطح مقطع فرورونده بر حسب میکرومتر

\overline{HV}	HV	\bar{d} (μm)	d_1 (μm)	d_2 (μm)
ویکرز ۲۹۹/۹۳۵	۲۹۴/۳	۱۷/۷۵	۱۷	۱۸/۵
	۳۰۲/۷۵	۱۷/۵	۱۷/۵	۱۷/۵
	۳۰۲/۷۵	۱۷/۵	۱۷	۱۸

است. با تجزیه و تحلیل نمونه‌ها به وسیله پرتوهای X می‌توان صفحه‌ها و جهت‌های فاز حاصل در اثر کاشت یون را مشخص کرد.

شکل‌های ۲ و ۳ و ۴ پراش پرتوهای X را به صورت نمودار نشان می‌دهند و پیکها مربوط به یک فاز مشخص می‌باشند. در شکل ۲ مربوط به نمونه خام دو پیک برجسته‌تر وجود دارد؛ با مراجعه به کتاب Hanawalt می‌توان دریافت این پیکها مربوط به آهن است که در این آزمایش فاز اصلی محسوب می‌شوند. بر طبق کارت استاندارد Fe، پیکهای اصلی آهن عبارتند از:

خطوط پرشدت: 2.03/X 1.17/3 1.43/2
 0.91/1 1.01/1 0.83/1 0.00/1

اعداد نشان داده شده بعد از "خط کسری" معرف شدت نسبی پیکهای مربوطند، و اختلافاتی که در اعداد مشاهده می‌شود به علت خطای دستگاه است که در حدود ۴٪ است.

ساختار میکروسکوپی آهن دارای صفحات (110)، (211) و (200) است که این صفحات به ترتیب مربوط به فازهای delta - Fe, gama - Fe, alpha - Fe است.

در نمونه‌های کاشت شده به وسیله یونهای نیتروژن با دزهای 1×10^{18} ion/cm²، 1×10^{19} ion/cm² (شکل ۳) مشاهده می‌شود که ساختار اولیه این آلیاژ، مشتمل بر فازهای آهن تغییر کرده و در آن پیک جدیدی نمودار شده است. با توجه به اینکه، هرچه زاویه بین پرتو تابش و سطح نمونه بزرگتر شود پرتوهای بیشتری

برای اندازه‌گیری سختی نمونه‌های کاشت شده به وسیله دستگاه پیش گفته، با توجه به عمق نفوذ هر یون در زیر لایه از وزنه مناسب با آن استفاده و همانند روش بالا آزمایش را دنبال کرده‌ایم. نتایج سختی‌های بدست آمده در جدول ۳ مندرج است.

۳-۳- تجزیه و تحلیل به وسیله XRD

برای بررسی ساختار اتمی یک شبکه بلوری از طیف‌های امواجی که با آنها برهمکنش می‌کنند و طول موجهای قابل مقایسه با فاصله بین اتمی دارند استفاده می‌شود. در دستگاه XRD پرتو مورد استفاده پرتو ایکس است. فواصل اتمی در بلورهای فلزی بسیار کوچک و حدود آنگستروم می‌باشند. برای اندازه‌گیری این فواصل از خاصیت شکست پرتوها به هنگام تداخل در شبکه بلوری استفاده می‌شود. اثر پرتوهای منحرف شده به وسیله بلور را می‌توان بر روی فیلم عکاسی که در اطراف بلور قرار داده می‌شود ثبت کرد و با مطالعه این اثر در روی فیلم، به شکل هندسی بلور پی برد.

پرتوهای پراشیده از یک بلور را می‌توان به کمک قانون براگ مطالعه و بررسی کرد. این قانون بیان می‌کند که بازتابهای ناشی از صفحات اتمی، هنگامی با یکدیگر تداخل سازنده می‌کنند که اختلاف راه پرتوهای بازتابیده از دو صفحه اتمی متوالی، مضرب درستی از طول موج λ باشد یعنی:

$$2d \sin \theta = n \lambda$$

که در آن θ زاویه بین پرتو فرودی با صفحه

جدول ۳- درصد افزایش سختی‌های یونهای کاشته شده در فولاد زنگ نزن ۵۲۱۰۰

نام یون	انرژی (KeV)	دز cm ⁻²	سختی (Vickers)	درصد افزایش سختی نسبت به نمونه شاهد
N ₁ ⁺	۹۰	1×10^{18}	۴۴۹/۰۱	۴۹/۷۰
N ₁ ⁺	۹۰	1×10^{19}	۳۹۳/۲۶	۳۱/۱۱
CO ₁ ⁺	۹۰	3×10^{18}	۳۵۱/۳۷۵	۱۷/۱۵
CO ₁ ⁺	۹۰	1×10^{19}	۳۰۴/۴۳۷	۵/۰۱



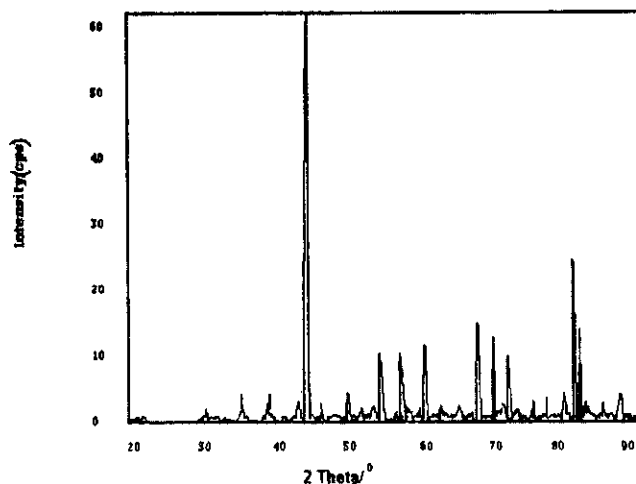
به سطح نمونه برخورد می‌کنند، می‌توان گفت در اثر افزایش این زاویه، نیتروژن بیشتری وارد سطح نمونه می‌شود، به طوری که در این عمل، تحت زاویه $2\theta = 64/48^\circ$ پیکی با بیشترین شدت $I_{Real} = 100$ مشاهده شده است، و همین امر شرایط لازم را برای تشکیل ترکیبی از نیتروژن ورودی و عناصر موجود در زیر لایه، فراهم می‌کند.

پیکهای مربوط به شدتهای ۲/۰۵۲، ۲/۲۵۳، ۱/۶۳۶ نشان ترکیبی از نیتروژن کاشت شده با کروم موجود در زیر لایه به نام Chromium Nitride با ترکیب شیمیایی beta-CrN است که فاز ثانویه این آزمایش را تشکیل می‌دهد. ساختار میکروسکوپی beta-CrN دارای صفحات (۱۱۱)، (۰۰۲) و (۱۱۲) است. بر طبق کارت استاندارد beta-CrN پیکهای اصلی این فاز عبارتند از:

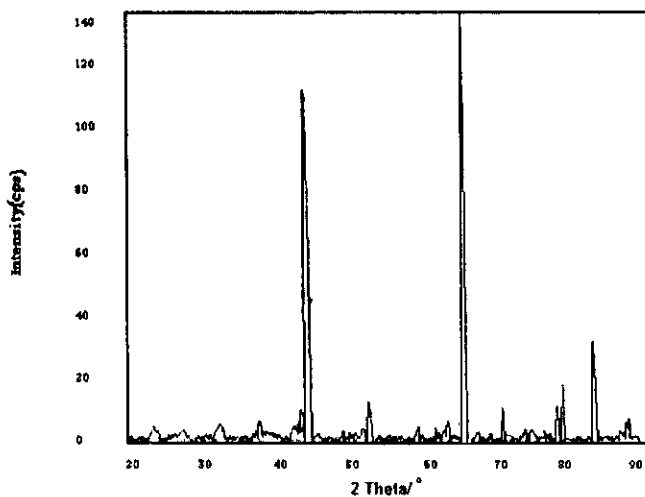
خطوط پرشدت:	2.06/8	2.24/X	1.64/2
	1.39/1	1.27/1	1.81/1
افزایش دز کاشت در نمونه کاشت شده به وسیله یونهای نیتروژن با دز $1 \times 10^{19} \text{ ion/cm}^2$ تغییر چندانی در پیکهای beta-CrN ایجاد نمی‌کند و پیکهای موجود در این محدوده دز، همواره تقریباً ثابت می‌مانند [۱۰-۱۲].			

در نمونه‌های کاشت شده به وسیله یونهای دی اکسید کربن با دزهای $3 \times 10^{18} \text{ ion/cm}^2$ ، $1 \times 10^{19} \text{ ion/cm}^2$ (شکل ۴) مشاهده می‌شود که هیچگونه ترکیب جدیدی حاصل از کربن ورودی با مواد موجود در زیر لایه وجود ندارد ولی نتایج حاصل از سختی سنجی، افزایش سختی اندکی را در فولاد کاشت شده نشان می‌دهد.

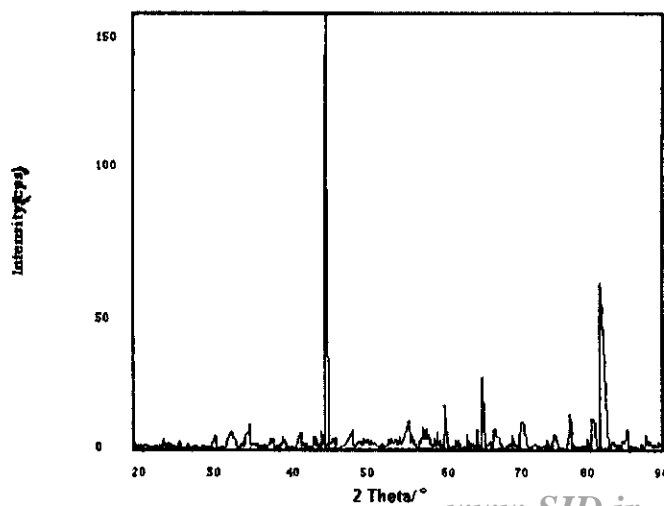
بررسیها نشان می‌دهند چنانچه کاشت یونهای دی اکسید کربن در یک فولاد صنعتی سختی آن را افزایش دهد، در اغلب موارد بر حسب شرایط آزمایش با در نظر گرفتن مقادیر دز، انرژی، دما و ... یک فاز از نوع کاربید در زیر لایه بوجود می‌آید (در صنعت هر گونه ترکیب شیمیایی کربن با آهن را کاربید می‌نامند که مهمترین نوع آن، فاز ϵ -carbide است). در بعضی موارد پس از کاشت یون در سطح فولاد، امکان تشکیل ساختار بلوری منظم در سطح کم می‌شود عناصر موجود در زیر لایه به سوی بی‌شکل شدن می‌گیرند. مطالعه طیفهای XRD نشان می‌دهد که در نمونه‌های کاشت شده به وسیله یونهای دی اکسید کربن هیچگونه پیک جدیدی که بتواند حضور کربن را به صورت گرافیت یا تشکیل



شکل ۲ - پراش پرتوهای X در نمونه خام؛ محور X با معرف زاویه 2θ و محور Y، شدت پرتوها را نشان می‌دهد.



شکل ۳ - نیتروژن کاشت شده بر روی فولاد زنگ نزن؛ به پیکی که در زاویه $2\theta = 64/48^\circ$ رؤیت می‌شود، توجه شود.



شکل ۴ - نمودار دی اکسید کربن کاشت شده بر روی فولاد زنگ نزن

در فولاد، نمی‌توان تغییری در حالت بلوری و یا بی‌شکل آن ایجاد کرد. تحقیقات مندرج در مقالات موجود نشان می‌دهند که بخش عمده کاربرد کاشت کربن یا ترکیبات آن (از جمله گازهای دی اکسید کربن و متان)، در بهبود کیفیت سایش‌شناختی فولادهای صنعتی، از جمله افزودن مقاومت سایشی و کاستن ضریب اصطکاک به وسیله کربن، که در حکم روغن کاری است مؤثر است. اصولاً در صنعت برای سخت کردن فولادها به وسیله کاشت یون اغلب از کاشت نیتروژن با دزهای بالا استفاده می‌شود و برای بالابردن مقاومت سایشی و کاستن ضریب اصطکاک، کاشت کربن یا فرآورده‌های گازی آن مفید خواهد بود.

۵- تشکر و قدردانی

بدین وسیله مراتب سپاسگذاری و قدردانی خود را از آقایان دکتر نوین روز و مهندس مجتهد زاده که در بخش کاشت یون مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای سازمان انرژی اتمی در کرج در انجام مراحل مختلف آزمایشها ما را یاری داده‌اند، همچنین از آقایان دکتر بنایی و مهندس نوحی که در مرکز تحقیقات هسته‌ای در تعیین سختی نمونه‌ها به ما کمک کرده‌اند اعلام می‌داریم.

از سرکار خانم مهندس عادل‌ی مسئول طیف سنجی XRD دانشکده متالورژی دانشگاه علم و صنعت ایران و آقایان امیر حسین ساری و علی شکوهی در مرکز تحقیقات فیزیک پلاسما و سرکار خانم پرچمی در بخش میکروسکوپ الکترونی دانشگاه علوم و تحقیقات قدردانی می‌نمایم.

فازی از نوع کاربید را در زیرلایه نشان دهد بدست نیامده است. همچنین با انجام آزمایش در شرایط پیش گفته، امکان ایجاد کربن به صورت الماس بلوری در زیرلایه‌ها وجود ندارد. شکل ۴ نشان می‌دهد که عدم وجود برجستگی کوهان مانند در نمودار دلیل بر این است که کربنهای موجود در زیرلایه به صورت بی‌شکل وجود دارند و تجزیه و تحلیل به وسیله XRD دقت لازم برای نشان دادن اثرهای حاصل از کاشت این یون را ندارد، زیرا XRD نمی‌تواند عناصر یا فازهایی را که مقادیر آنها کمتر از ۳ درصد باشند آشکار کند [۱۵-۱۳].

۴- بحث و نتیجه‌گیری

هدف اساسی این پژوهش، مقایسه بین سختی فولاد زنگ نزن ۵۲۱۰۰ قبل و بعد از کاشت پرتوهای یونی نیتروژن و دی اکسید کربن بر روی آن می‌باشد.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که علی‌رغم کم بودن درصد کروم (۱/۵۲ درصد) در این فولاد می‌توان به وسیله کاشت یون‌های نیتروژن با انرژی در حدود ۹۰ KeV در دزهای بالاتر از $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ ، فازی از کروم نیتراید را که باعث سخت شدن لایه‌های سطحی از این فلزات و آلیاژهای آن می‌شود، ایجاد کرد. بر طبق مطالعات انجام شده، کاشت یونهای نیتروژن با دزهایی از مرتبه $10^{11} \text{ ion/cm}^{-2}$ و انرژی ۶۰ KeV فقط در فولادهایی که درصد کروم آنها بالاتر از ۸ درصد است، سبب تشکیل فاز کروم نیتراید و در نتیجه افزایش سختی می‌شود [۱۸-۱۶]. در این کار پژوهشی مشاهده شد که با این شرایط می‌توان در فولادهایی که درصد کروم پایین‌تری هم دارند این فاز را نیز ایجاد کرد.

نتیجه دیگری که از این پژوهش به دست آمده این است که کاشت یونهای دی اکسید کربن بر روی فولاد مورد مطالعه، سختی را به اندازه قابل توجهی افزایش نمی‌دهد، زیرا با انجام گرفتن این آزمایش در شرایط پیش گفته، با کربن و یا اکسیژن موجود در یون‌های CO_2 به هنگام برخورد آنها با عناصر موجود



References:

۱. دکتر ادیبی، "فیزیک الکترونیک و تکنولوژی نیمه‌هادیها"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۷۵).
۲. ل. آرتزیویچ، ترجمه دکتر م. قرآن نویس، "القبای فیزیک پلاسما"، انتشارات ابجد (۱۳۷۵).
۳. ع. کی یگانه، "کاشت یون و روشهای آنالیز کاربردی در آن"، مجله فولاد، شماره ۴۸ (۱۳۷۷).
4. K. Kobs, H. Dimigen, "Friction reduction and zero wear for 52100 bearing steel by high-dose implantation carbon," Nucl. Inst. And Meth. B **59/60**, 718-721 (1991).
5. K. Langguth, A. Kluge, "Ion implantation of carbon in AISI 440B bearing steel," Nucl. Inst. and Meth. B **59/60**, 746-750 (1991).
6. C. G. Dodd, K. Legg, "Ion iplantation and ion beam processing," Nucl. Inst. and Meth. B **59/60**, 219-227 (1985).
7. A. Kluge, H. Ryssel, and R. Oechsner, "Corrosion of metals processed by directed energy beams," Nucl. Inst. and Meth. **7/8**, 1622-1624 (1990).
8. H. Herman, "Enhanced fatigue life of 440C steel by ion implantation," Nucl. Inst. and Meth. **182/183**, 887-898 (1981).
9. M. Borgesen, R. Behrisch, and B. M. U. Scherzer, "Characterization of ion implanted steels by mossbauer spectroscopy," Appl. Phys. A **27**, 183 (1983).
10. D. M. Follstaedt, J. A. Knapp, L. E. Pope, "Amorphization of stainless steels by carbon implantation," Appl. Phys. **66**, 2743 (1989).
11. G. Dearnaley, N. E. W. Haretely, "Ion implantation, sputtering and their applications," Thin Solid Films. **54**, 215 (1978).
12. S. Staritas, R. P. M. Peocter, W. A. Grant, "The role of carbides in low alloy creep resisting steels," Mater. Sci. Eng. **90**, 297 (1987).
13. G. E. Chapman, B. V. King, R. J. Macdonald, J. T. A, "Mossbauer effect data index," Nucl. Inst. and Meth. **B39**, 535 (1989).
14. M. Braun, "Steel and its heat treatment," Nucl. Inst. and Meth. B **59/60**, 914-919 (1991).
15. L. R. Doolittle, "Phase transformations in metals and alloy," Nucl. Inst. and Meth. B **59/60**, 344 (1985).
16. D. M. Follstaedt, "Conservation and substitution technology for critical metals in bearing and related components for industrial equipment and opportunities for improved bearing performance," Nucl. Inst. and Meth. **7/8**, 11 (1985).
17. L. E. Pope, J. A. Knapp, "Transition metal carbides and nitrides," Surf. Coatings. Tech. **36**, 361 (1988).
18. I. L. Singer, G. K. Hulber, "Ion Implantation and beam processing of materials," Materials Research, **27**, 585 (1984).
19. N. E. Hartely, J. K. Hirvonen, "Plasma source nitrogen ion implantation of Ti-6Al-4V," Nucl. Inst. and Meth. **209/210**, 933 (1983).
20. F.M.Kustos, D.L. Williamson, "Microstructural characterization of nitrogen implanted 440C steel," Nucl. Inst. and Meth. B **31**, 393-401 (1988).