

کاربرد پرتو یونی پر انرژی به منظور سخت کردن فلزات و ادوات صنعتی

محمد خراسانی

دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده علوم، بخش فیزیک، تهران، ایران
(دریافت: ۷۹/۱/۵؛ پذیرش: ۷۹/۸/۱۸)

چکیده

با تزریق برخی یونها به صورت پرتو یونی شتابدار با انرژی ۱۵۰-۲۰ کیلو الکترون ولت و بیشتر، دو نوع تغییر فیزیکی و شیمیایی در جسم تحت تابش می توان ایجاد نمود. در این آزمایشها اثر کاشت یون ازت را بر فولاد مطالعه کرده ایم. برای این منظور یونهای N^+ به چگالی $1 \times 10^{13} m^{-2}$ و انرژی ۲۵-۲۰ کیلو الکترون ولت را در میدان مغناطیسی ۸۰ mT به صورت یک پرتو یونی حدود ۲۰ میکروآمپری به چند نمونه فولاد ۳۰۴ و ۳۱۶ تابانده ایم. در نتیجه افزایش سختی فیزیکی ۱/۳ تا ۲/۳۱ نسبت به نمونه های آزمایش نشده در آنها مشاهده شده است. در تمام آزمایشها برای تعیین سختی حاصل در نمونه ها از دستگاه سختی سنج میکرو با روش (Pin-on-disk) و (Pin-on-ring) استفاده شده است. یادآور می شویم که به علت محدودیت در ولتاژ شتاب دهنده، افزایش سختی محدود بوده است. در صورت افزایش ولتاژ شتاب دهنده تا حدود ۱۵۰ کیلو ولت و بیشتر می توان سختی فیزیکی فولاد را $\lambda=10$ مرتبه نسبت به نمونه های تابش نشده افزایش داد.

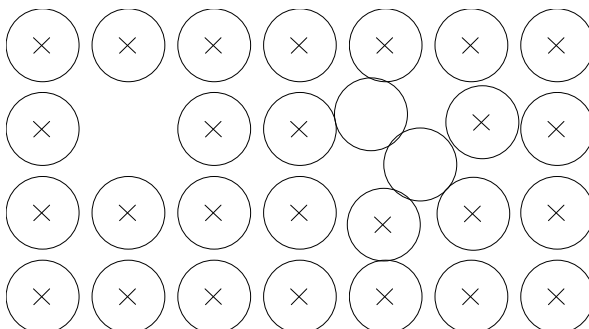
واژه های کلیدی: پرتوهای پر انرژی، سخت سازی فلزات، ابزار مهندسی

مقدمه

کاشت یون (Ion Implantation) عبارت از تزریق یونهای پر انرژی مانند ازت یا هیدروژن به داخل یک جسم جامد است، که یکی از موثرترین روشها برای ایجاد سطحی با تغییر خاصیت فیزیکی ویژه در آن است. تزریق یون در یک جسم سبب ایجاد بی نظمی در شبکه بلوری آن می گردد (Hartley, 1976). در این عمل عمق نفوذ یون را در جسم که در تغییر حالت فیزیکی آن موثر است می توان تا چند دهم میکرون تعیین نمود. کندوپاش یا پراش یونی (Ion Sputtering) حالت دیگری از کاشت یون است و با یک سیستم می توان هر دو عمل کاشت و پراش یون را انجام داد (Townsend, 1976). تکنیک کاشت یون که بر اساس استفاده آن در صنعت نیمه هادیها بنا شده است. همچنین روشی مناسب برای تولید مواد لومینسانس فسفری است و با ایجاد ناپایداری شیمیایی (Chemical doping) و بی نظمی بین اتمهای شبکه بلوری جسم، تغییر لازم در آن ایجاد می شود (Carter, 1976 & Crawder, 1986).

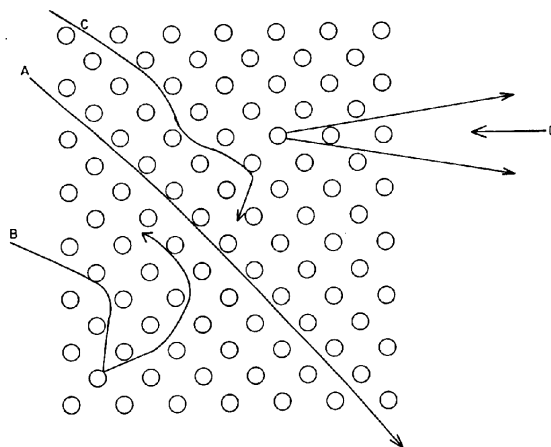
البته قبل از کاشت یون باید به چگونگی اعمال ناخالصی در میان اتمهای جسم توجه داشت (Picrax, 1980). تزریق یونها توسط شتاب دهنده و مطالعه خواص آن نشان داده است که جسم جدید حاصل در شرایط تعادل ترمودینامیکی نیست، ولی می توان دمای آن را ضمن کاشت یون کنترل کرد (Tobar, 1983). برای این منظور باید ناخالصی در جسم پخش شود. به عبارت دیگر کاشت یون می تواند روش ساده تری برای مطالعه شرایط ترمودینامیکی جسم ارائه دهد (Picrax, 1980). عمل کاشت یون در هر دو نوع اجسام بی شکل (آمورف) و بلورین (کریستالی) سخت یا نرم انجام می گیرد (Muller, 1986 & Crawder, 1986). در این صورت باید به برخی از اثرات جنبی کاشت یون مانند آسیب ناشی از حرارت و تابش در اجسام غیر فلزی توجه نمود (Ernisse, 1971). لیکن این آثار در مقایسه با تغییر حالت حاصل در اثر کاشت یون در جسم ناچیز است. همانگونه که ذکر شد اثر کاشت یون، ایجاد بی نظمی ضمن ورود یک یون سریع در میان اتمها و به هم زدن نظم آن است (شکل ۱)، که نتیجه آن افزایش سختی فلز تحت تابش می باشد. شکل ۲ حالات مختلف ورود یون در حجم شبکه بلوری را نشان می دهد. در شکل ۳ منحنی با خط پر نمودار تابع توزیع یونها، و خط چین جایجایی اتمها در اثر بمباران فولاد با یونهای ازت با انرژی ۱۰۰ Kev و چگالی 10^{17} یون در سانتیمتر مربع در سطح هدف نشان داده شده است (Dearnaley, 1986). عمل کاشت یون در فلزات باعث افزایش سختی در ابزار و ادوات صنعتی گران قیمت و قطعات حساس ماشینهای خودکار و یا دستی که شکستگی،

فرسایش، خوردگی یا ساییدگی و دوام، یک فاکتور مهم در کاربرد آنها است، اهمیت فوق العاده زیادی دارد و در ازدیاد عمر مته‌ها، تیغه‌ها، ابزار فولادی، قطعات دستگاه‌های خم فلزات، حلقه‌ها و محورهای برش، قالبهای پلاستیک و غیره موثر است (Hartley, 1978). در بعضی موارد ممکن است عمل کاشت یون فقط در قسمتهایی از ابزار که خوردگی بیشتری پیدا می کنند انجام گیرد ، و اگر چه کاشت یون سبب افزایش قیمت تولید وسیله و ابزار می شود لکن نتایج کار با آن مفید و مقرون به صرفه است. بررسی ها نشان داده اند که تاثیر آماده سازی سطح فلز قبل

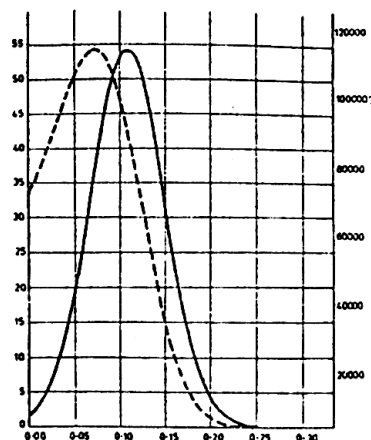


از کاشت برای به دست آوردن نتایج بهتر از ابتدای کار برد کاشت یون در فلزات شناخته شده و با گزارشهای متعددی تایید شده است (Picrax, 1980).

شکل ۱- مدل تغییر یافته یونها در یک شبکه عامل.



شکل ۲- مثالهایی از مسیرهای ورود یون در یک شبکه بلوری: A کانال عبوری، B مسیر آماری، C مسیر محوری و D یک مسیر از ذره تابشی را نشان میدهد.



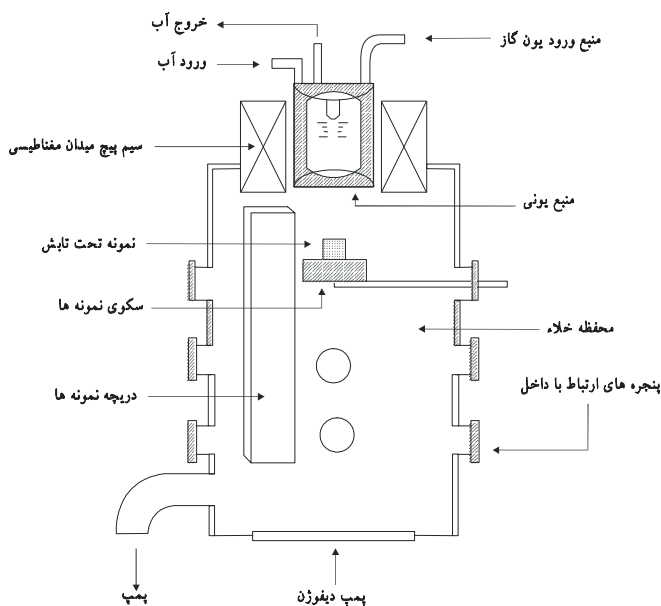
شکل ۳- نمودار تابع توزیع یونها (خط پر) و نمودار جابجایی اتمها (خط چین) در فولاد توسط یون نیتروژن.

آزمایشهای سختی سنجی و مقایسه نمونه ها همچنین نشان داده اند که افزایش سختی یک سطح صیقل یافته به روش مکانیکی و حرارت داده شده (انیل شده) نسبت به سطح صیقل یافته به روشهای دیگر یا تمیز نشده ۳ تا ۴ مرتبه بیشتر است (Namba, 1989). از طرفی ثابت شده است هر قدر عمق نفوذ یونها بیشتر باشد افزایش سختی در جسم بیشتر خواهد بود، یعنی نفوذ یون در لایه های نزدیکتر به سطح سختی کمتری ایجاد می کند (Pethica, 1981). نتایج حاصل از عمل انیل کردن سطح قبل از کاشت یون نیز افزایش یون وارده و در نتیجه افزایش سختی را نشان می دهد (Hartely, 1976).

همچنین ثابت شده است اگر سطح نمونه ها با دانسیته کمتر از 10^{17} یون در سانتیمتر مربع بمباران شوند افزایش سختی آنها ناچیز خواهد بود (Hasen, 1978). از طرفی نتایج سختی سنجی نشان داده اند که ضمن کاشت، یونهای فلزی که از دیواره داخلی سیستم خلاء جدا می شوند ممکن است به داخل جسم نفوذ کرده سختی کمتری را در شرایط یکسان و مشابه در جسم پدید آورند (Hartley, 1973). در این پروژه عمل کاشت یون ازت برای افزایش سختی نمونه های فولاد به کار رفته است.

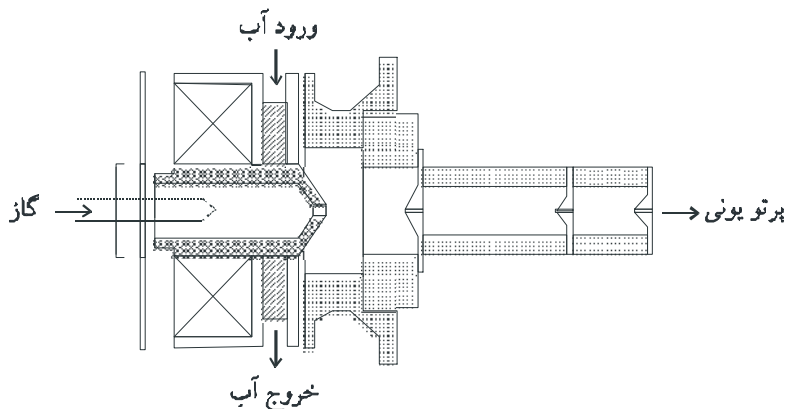
دستگاه آزمایش و روش کار

محفظه خلاء، استوانه به قطر ۵۰ سانت و طول ۱ متر از جنس فولاد است. این محفظه ابتدا به کمک یک پمپ روغنی دوار به طور مستقیم تا فشاری حدود 10^{-3} تور تخلیه می‌شود. سپس برای فشارهای پایین تر از یک پمپ دیفوزیون با پشتیبانی پمپ دوار دیگر استفاده شده و منبع یون در بالای محفظه خلاء و هم محور با آن نصب گردیده است (شکل ۴). منبع مولد یون در این آزمایشها برای اعمال ولتاژ ۲۵-۲۰ کیلو ولت ساخته شده است. قسمت اصلی منبع شامل



چهار شتاب دهنده ایزوله شده می‌باشد و یک فیلامان کار تابش الکترون لازم برای یونیزاسیون را انجام می‌دهد (شکل ۵). منبع ولتاژ و مدار الکتریکی شامل توانساز ۵۰ کیلو ولتی است که با چند مقاومت مناسب به خازنهای ۵/۶ فاراد و ۶۰ K ν متصل می‌شود.

شکل ۴ - شمای ساده محفظه.



شکل ۵ - منبع مولد یون‌های پر انرژی.

روش آزمایش

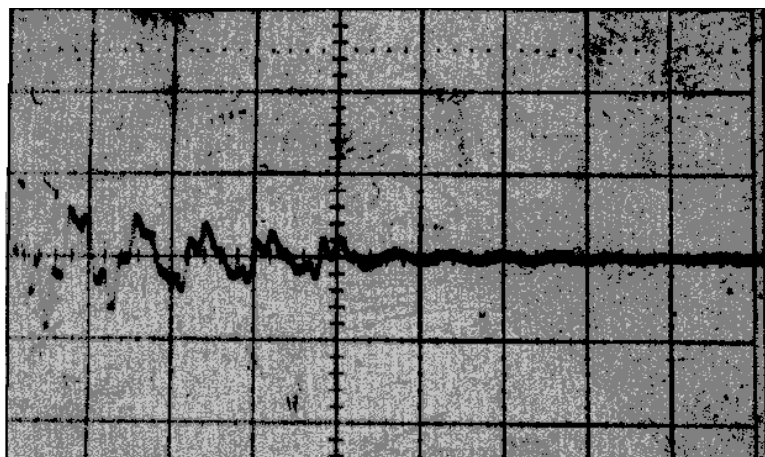
برای کاشت یون در نمونه‌های فولادی انتخاب شده آنها را روی سکوی داخل محفظه خلاء قرار داده‌ایم. پس از کاهش فشار درون محفظه در دو مرحله تا حدود 10^{-5} تور، پرتو یونی با انرژی ۲۵-۲۰ کیلو الکترون ولت را با اعمال ولتاژ لحظه‌ای خازنها، بر شتاب دهنده منبع یون، بر سطح هدف تابانده‌ایم. زمان تخلیه خازنها به کمک کاوه مغناطیسی (Rogonski coil) حدود ۳ میکرو ثانیه تعیین گردیده که در (شکل ۶) تپ زمانی تخلیه خازن روی مدار منبع یونی نشان داده شده است. چگالی جریان پرتو یونی تابش شده را به کمک رابطه زیر به دست می‌آوریم:

$$j = \frac{4\epsilon_0}{9} \left(\frac{2Q}{m}\right)^2 \left(\frac{V^2}{d^2}\right)^{\frac{3}{2}}$$

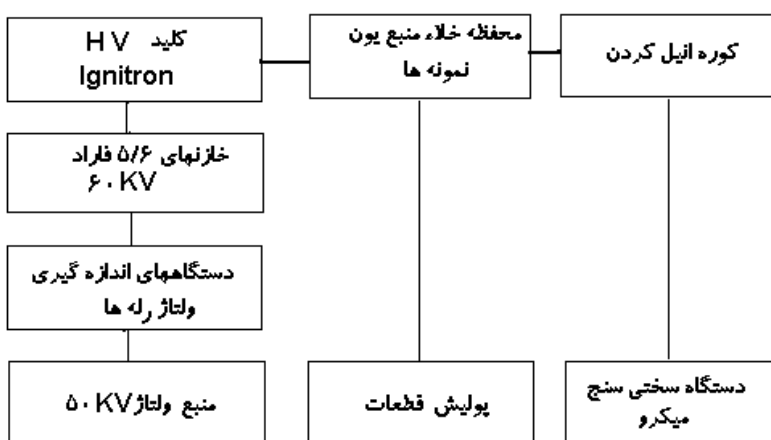
در این رابطه Q بار و m جرم یون، V ولتاژ اعمال شده بر منبع مولد یون و d فاصله الکترودهای آن است. در اینصورت چگالی جریان برابر $8 \times 10^{-1} A/m^2$ و شدت جریان پرتو یونی حدود ۲۴ میکرو آمپر به دست می‌آید.
با توجه به رابطه:

$$j = \frac{I}{A} = neV$$

سرعت یونها در دهانه خروجی، معادل $4.2 \times 10^5 m/s$ و چگالی یونهای پر انرژی تابش به سطح هدف برابر $n = 1.2 \times 10^{13} m^{-3}$ است. ضمن آزمایش فشار داخل منبع خلاء حدود 10^{-4} میلیمتر جیوه و انرژی یونهای خروجی حدود ۲۵ KeV از مشخصات کار سیستم است. برد موثر پرتو یونی ۷۰ سانتیمتر بوده که به صورت پرتوی متمرکز با پراکندگی کم بر نمونه‌های سخت تابش می‌تابد. شکل ۷ مراحل مختلف عمل افزایش سختی نمونه‌های فولاد را به کمک تابش پرتو یونی و عمل کاشت یون نشان می‌دهد.



شکل ۶ - تپ زمانی تخلیه خازن روی مدار منبع یون.



شکل ۷ - مراحل مختلف عمل سخت سازی فلزات

به منظور اخذ نتایج بهتر لازم بود کلیه قسمت‌های داخلی سیستم را از رسوبات مربوط به آزمایش‌های مختلف قبلی پاک کنیم، ضمناً پس از صیقل دادن نمونه‌ها به روش مکانیکی آنها را تحت تابش قرار داده‌ایم. در این عمل، در فشاری حدود 10×10^{-3} تور سطح نمونه‌ها را به مدت چند ساعت با اعمال ولتاژی حدود ۵ KV به شتاب‌دهنده و به کمک پرتو یونی تمیز کرده‌ایم (Ion cleaning). در این آزمایش‌ها نمونه‌ها را با انرژی‌های ۲۵-۲۰ KeV به روش بالا تحت تابش قرار داده‌ایم و سختی آنها را در آزمایشگاه فلزشناسی و سختی‌سنجی دانشکده فنی دانشگاه تهران

و بخش حالت جامد مرکز تحقیقات لیزر سازمان انرژی اتمی ایران با دستگاه سختی سنج میکرو و با واحد ویکرز تعیین نموده ایم. نتایج حاصله در چند سری نمونه های انتخابی افزایش سختی فولاد تحت آزمایش را از ۱/۳ تا ۲/۳۱ برابر نسبت به نمونه های تابش نشده (Index) نشان می دهد. در این اندازه گیری ها سختی نمونه ها با وزنه حدود ۲۰ نیوتن و در نقاط مختلف سطح (رو و اطراف لکه تابش شده) تعیین شده اند.

بحث و نتیجه گیری

کاشت یون با چگالی بیش از 10^{13} یون در مترمکعب نشان می دهد که یونهای کاشته شده در سطح هدف تاثیر مهمی بر رفتار ملکولها در مواد تک و چند کریستالی ایجاد می کند (Takagi, 1988). به علاوه دستگاه های سختی سنج نشان داده اند که نتایج به دست آمده در این آزمایشها مربوط به میزان نفوذ یون به داخل سطح حدود ۰/۵ میکرون بوده است. مقایسه این نتایج با سایر آزمایشها نشان داده اند:

- ۱- یک تغییر مناسب مثلا ۱۰-۸۰ درصد و در مقدار انرژی یونهای فعال شده، سختی نمونه را تا حدود ۲-۳ برابر نتایج حاصل افزایش می دهد.
 - ۲- افزایش سختی در همه فلزات حاصل نمی شود و به علاوه عمل کاشت یون در دماهای بالاتر سبب افزایش سختی بیشتری در مقایسه با دماهای کمتر می شود.
- در این پروژه که از کاشت یون ازت در فولاد استفاده شده می توان بسیاری از قطعات و ابزار فولادی را در یک سیستم خودکار به روش فوق و یا اعمال ولتاژ مناسب تا حدود ۱۵۰ کیلو ولت و یا بیشتر با عایق کاری مناسب بطور مستمر و یا پالسی تحت آزمایش قرار داد و سختی آنها را ۱۰-۵ مرتبه نسبت به نمونه های تابش نشده افزایش داد.

References

- Dearnaley, G., Prell, G., and Hirvanen, j.K., (1976) *Ion implantation metalurgy*. AIME. Newyork. 1-20.
- Eniesse, E.P., (1971) *Sensetive technique for study of ion implantation damage*, Appl. phys. lett **18**, 581-583.
- Hartley, N.E.W, and Evans, H., (1978) *surface treatment for protection*. Inst. of metaleurgist. London **1011**, 78-79.
- Hartley, N.E.W., and Hirvanen, j.K., (1980) *Ion Implantation*, Academic Press. N.Y. chap. **8**, 321-371.
- Hartley, N.E.W., (1976) *Application of Ion beam to materials*. Inst. of Physics. Bristol U.K., 123-210.
- Hartley, N.E.W., (1978) *Proc. Conf. on Ion Implantation*. York Town. Plenum Press. chap **8**, 168-176.
- Hasen, p., (1978) *physical metaleurgy*. Camb. U.K. pp. 63-78.
- Muller, G., and Kalbitzer, S., (1986) *The Crystalline to amorphous transition in Ion bombarded Silican*, Inst. metaleurgist. London **48**, 325-342.
- Namba, S., Itah, N., and Iwaki, M., (1988) *Ion beam modification of materials*. Proceeding of 6th intrn. conf. on Ion beam modification, 106-114.
- Pethica, B., (1981) *Microhardness testes with penetration depth*. Ion Implantation Phys. Proc., 128-156.
- Picrax, S.T., (1980) *Ion Implantation Studies of Hydrogen in solides for material science and technology*. Academic Press N.Y. v., **18**, 283-288.
- Takagi, T., (1988) *Proceeding of 7th intern. Conf. on Ion implantation technology*. Kyoto Japan, 28-38.
- Tawnsend, P.D., Kelly, J.C., and Hartley, N.E., (1976) *Implantation, Sputtering and their applications*. Academic Press. London, 112-118.
- Tobar, D., (1983) *The hardness of metals*. Oxford. chap. **6**, 216-254.