

بررسی اثر برخورد پلاسما با فلزات در تتاپینچ خطی *

رضا آلانی، علی اصغر ترابی فرد، بتول صفائی
هرمز عضدی و مسعود نراقی

مرکز تحقیقات هسته‌ای
سازمان انرژی اتمی

چکیده- در این مقاله اثر برخورد پلاسما با فلزات ایجاد شده در تتاپینچ خطی الوند ۱ با مشخصات $T_i = 1 \text{ KeV}$ و $n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ با فولادهای زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ و آلیاژ اینکانل ۶۲۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد. شار متوسط قدرت $(\text{average power flux})$ که به آلیاژها برخورد می‌کند حدود 10^7 W/cm^2 و زمان اندرکنش (Interaction) تقریباً یک میکروثانیه است. آزمایشهای انجام شده نشان می‌دهد که صدمات وارده به سطح نمونه‌ها، حتی آنها تیکه یکبار در معرض برخورد با پلاسما قرار گرفته‌اند بسیار متنوع و شدید می‌باشد.

اگرچه بر روی نمونه‌های مورد آزمایش نشانه‌هایی از قوس الکتریکی (arcing) و پراکنش (sputtering) و سایر مکانیزم‌ها مشاهده می‌شود ولی عامل اصلی در تولید ضایعات وارده به سطح آنها، اکثراً "عمل تبخیر می‌باشد". بر روی نمونه‌های استیل ۳۰۴ و ۳۱۶ حتی آنها تیکه فقط یکبار در معرض برخورد با پلاسما قرار گرفته‌اند، ترک سطحی (surface cracking) دیده شده است. ولی این ترک‌ها بر روی آلیاژ اینکانل ۶۲۵، حتی بعد از ۱۸ بار برخورد با پلاسما هم مشاهده نشده است. بر اساس بالا رفتن دما و تبخیر نمونه‌ها، مقایسه‌ای نیز بین موادی که در معرض پلاسماهای حاصله از تتاپینچ، لوله شوک (shock tube)، راکتورهای توکا ماک فعلی و توکا ماک صنعتی آینده قرار می‌گیرد، انجام شده است.

مقدمه

آزمایش مواد، در توسعه تکنولوژی راکتور فوژن حائز اهمیت می‌باشد. بدین دلیل که می‌تواند برای روشن نمودن علل ضایعات بوجود آمده در اثر برخورد پلاسما با دیواره و همچنین نقش ناخالصیهای تولید شده در کاهش دمای پلاسما، اطلاعات مفیدی عرضه نماید.

مطالعاتی که تاکنون در این زمینه انجام گرفته است با استفاده از پرتو الکترون، پرتو یون، پلاسماهای کم تولید شده، توسط توکا ماک های کوچک و یا لوله‌های شوک محدود می‌گردد.

* در این مقاله علاوه بر نتایجی که قبلاً "در مقالهای تحت همین عنوان در

Journal of Nuclear Materials. Vol.113, No.1, 1 January 1983.

بجای رسیده، نتایج جدیدی نیز عرضه گردیده که تاکنون در هیچ نشریای چاپ نشده است.

استفاده از پرتو الکترون و یاپرتو یون (۱،۲) با عدم موفقیت روبرو شده است و استفاده از توکاماک های کوچک یا لوله های شوک با شار قدرت کمی که دارند خالصی از اشکال نمی باشند (۳،۴). تاپینج خطی بدلیل سهولت در انجام آزمایش و ایجاد پلاسمای دمای بالا $T_i = 1 \text{ KeV}$ دارای شار قدرت زیاد $\bar{Q} = 10^7 \text{ W/cm}^2$ بوده، امکانات بیشتری را در این زمینه فراهم می نماید.

در این مقاله اندرکنش پلاسمای حاصله از تاپینج خطی با نمونه هایی از فولادهای زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ و آلیاژ اینکانل ۶۲۵ شرح داده شده و نتایج با شرایط راکتورهای آینده مقایسه گردیده است. در آزمایشهای انجام شده یک نمونه در جهت عمود به میدان مغناطیسی در داخل تاپینج خطی قرار می گیرد. برخورد پلاسما با این نمونه که قسمتی از آن را تبخیر نموده و یک لایه ناخالصی سرد با چگالی بالا ($n_e = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ و $T < 5 \text{ eV}$) بوجود می آورد. وجود این لایه از رسانائی حرارتی بعدی به سطح نمونه جلوگیری نموده، بنحوی که تمامی انرژی هدایت شده به این لایه توسط تشعشع اتلاف می گردد (۹). علاوه بر تبخیر، قوس الکتریکی هم می تواند در شکل گیری این لایه نقش داشته باشد.

دلیل ما بر این مدعا، مشاهده مسیر لکه های ذوب شده بر سطح نمونه مورد آزمایش توسط میکروسکپ نوری یا الکترونی می باشد شکل ۱۱. البته پراکنش هم می تواند در تشکیل این لایه نقش داشته باشد منتهی اثر آن آنقدر کوچک است که می توان از آن صرف نظر نمود (۳). با در نظر گرفتن ذوب سطحی در شکل ۱۲ می توان گفت که در این آزمایش، تبخیر، تنها مکانیزم تولید ناخالصی محسوب می شود. بعد از تشکیل لایه ناخالصی، که منجر به کاهش دما می شود، هدایت حرارت به نمونه می تواند ناچیز فرض شود، در نتیجه قوس الکتریکی رخ نداده و میزان پراکنش نیز قابل اغماض می باشد، و لذا می توان چنین تصور نمود که پلاسما بجای مسدود شدن توسط یک جسم جامد بوسیله یک گاز با چگالی زیاد مسدود می گردد.

۱- تحلیل تئوری و مقایسه با توکاماک ها

مکانیزم تشکیل لایه ناخالصی در شکل ۱ نشان می دهد که شار قدرت هدایت شده به نمونه ای که در جهت عمود به میدان مغناطیسی در داخل تاپینج قرار دارد بصورت زیر می باشد:

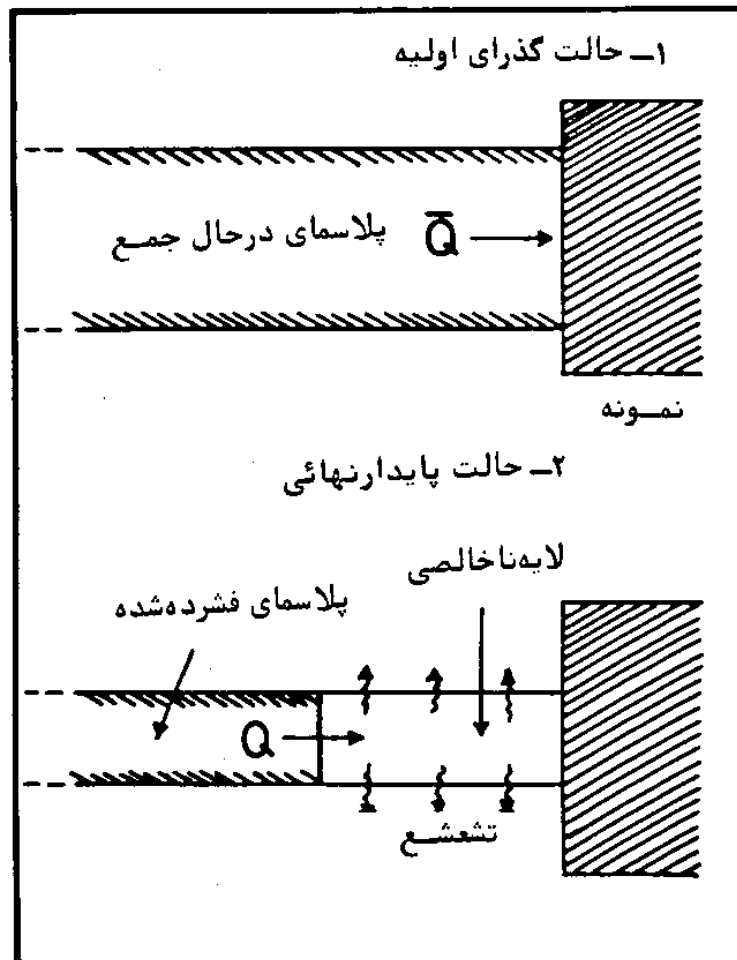
$$Q(t) = (K^e T^e + K^i T^i) / L \quad (1)$$

در اینجا L نصف طول ستون پلاسما و $T^{e,i}$ درجه حرارت الکترون و یون بر حسب الکترون ولت است.

ضریب هدایت گرمائی $K^{e,i}$ برای دوتریوم چنین است:

$$\begin{aligned} K^e &= 1.9 \times 10^{20} (T^e)^{2.5} (\text{cm.s})^{-1} \\ K^i &= 5.5 \times 10^{18} (T^i)^{2.5} (\text{cm.s})^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

اندازه گیری هانسان می دهند که چگالی و دمای پلاسمای تاپینج بر حسب زمان بطور خطی تا



شکل ۱- طرز تشکیل لایه ناخالصی (۱) حالت گذرای اولیه (۲) حالت پایدار نهائی

مقدار حداکثر در τ_R افزایش می یابند (۱۷). متوسط $Q(t)$ در فاصله زمان τ چنین است:

$$\bar{Q}(\tau) = \frac{1}{L} (6.8 \theta_e^{3.5} + 0.2 \theta_i^{3.5}) \left(\frac{\tau}{\tau_R} \right)^{3.5} \text{ W/cm}^2 \quad (3)$$

بطوریکه $\theta_{e,i}$ حداکثر دما بر حسب الکترون ولت و L بر حسب سانتیمتر می باشد. هنگامیکه یک چنین ضربه حرارتی به نمونه برخورد می نماید، مقدار افزایش دمای سطح ΔT و عمق حرارت دیدگی (d) برابر می باشد با:

$$\Delta T = 2\bar{Q} \left(\frac{\tau}{\pi \rho c k} \right)^{1/2} \quad d = 2K \left(\frac{\tau}{\pi \rho c k} \right)^{1/2} \quad (4)$$

در این روابط c, ρ و k به ترتیب چگالی جرمی، ظرفیت گرمایی و رسانائی ویژه حرارتی نمونه می باشند. از آنجائیکه در تعیین روابط بالا c, ρ و k بستگی به دما دارند، می بایستی مقدار متوسط آنها بطور ثابت مورد استفاده قرار گیرد.

بررسی اثر برخورد پلاسما با فلزات در تئپینچ خطی

جدول شماره ۱ این پارامترها را در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد برای BN و فولاد ۳۰۴ و فولاد ۳۱۶ و اینکانل ۶۲۵ نشان می‌دهد. (پارامترهای مربوط به اینکانل ۶۲۵ فقط در ۱۰۰ درجه سانتیگراد در دسترس بوده و فرض گردیده که این پارامترها در دمای بالاتر متناسب با پارامترهای اینکانل ۶۰۰ می‌باشند) (۱۰-۱۲).

جدول ۱- خواص هدایت حرارتی BN و SS 304 و SS 316 و Inconel 625 در ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد

	ρ (g/cm ³)	C (J/g.K)	k (W/cm.K)	$2(\pi\rho ck)^{-1/2}$ (K.cm ² /W.s ^{1/2})
BN	۲/۱	۱/۶	۰/۱۵	۱/۶
SS 304	۶/۹	۰/۶۵	۰/۲۲	۱/۱۴
SS 316	۷/۰	۰/۷	۰/۲۴	۱/۰
Inconel 625	۸/۴	۰/۶	۰/۱۶	۱/۲

مقدار ماده تبخیر شده بر اثر این ضربه حرارتی به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\Delta N = n(T_F) \tau_{eff}$$

$$n(T) = 3.5 \times 10^{22} P_v(mT)^{-1/2} \text{ atoms/cm}^2 \text{ s} \quad (5)$$

$$\tau_{eff} = \tau \left(\frac{T_F}{\Delta T} \right) \left(\frac{T_F}{\Delta H} \right)$$

در روابط بالا T_F و ΔH به ترتیب دمای نهائی بر حسب درجه °K و گرمای تصعید، p_v فشار بخار بر حسب میلی مترجیوه (torr) و m جرم اتمی نمونه است. احتمال چسبندگی ذرات بیکدیگر نیز برابر یک فرض شده است.

با فرض اینکه جسم تبخیر شده ΔN ، در تشکیل لایه ناخالصی شرکت دارد خواهیم داشت:

$$\frac{A_p \delta n}{Z} = \Delta N \quad (6)$$

در این رابطه A_p سطح پلاسما، δ طول محور لایه ناخالصی، n چگالی الکترون و Z بار متوسط

یون در لایه می باشد .

بعد از تشکیل لایه ناخالصی ، فشار محوری و تعادل توازن انرژی چنین ایجاب می کند که :

$$nT \left(1 + \frac{1}{Z}\right) = P_0$$

$$\delta W_R = Q(\tau_R) \quad (7)$$

بطوریکه P_0 فشار اصلی پلاسما ، T دمای لایه و W_R توان تشعشع یافته از واحد حجم توسط این لایه در حالت پایداری می باشد .

از آنجا که مقدار T کوچک است ، تنها یونهای یکبار یونیزه شده را مورد بحث قرار می دهیم ، لذا در حالت پایداری می توان نوشت :

$$\frac{N^1}{N^0} = \frac{S}{\alpha_T}$$

بطوریکه N^0 و N^1 عبارتند از چگالی اتمهای خنثی و اتمهای یکبار یونیزه شده ، S و α_T به ترتیب سرعت یونسازی (ionization rate) و سرعت کل ترکیب مجدد (total recombination rate) برای اولین درجه یونسازی می باشند .

$$\alpha_T = \alpha_r + \alpha_3$$

$$\alpha_r = \text{radiative recombination rate}$$

$$\alpha_3 = \text{three body recombination rate}$$

چنانچه n زیاد و T کم باشد ، α_3 بسیار بزرگتر از α_r می شود و بنابراین :

$$\frac{1}{Z} = 1 + \frac{\alpha_3}{S}$$

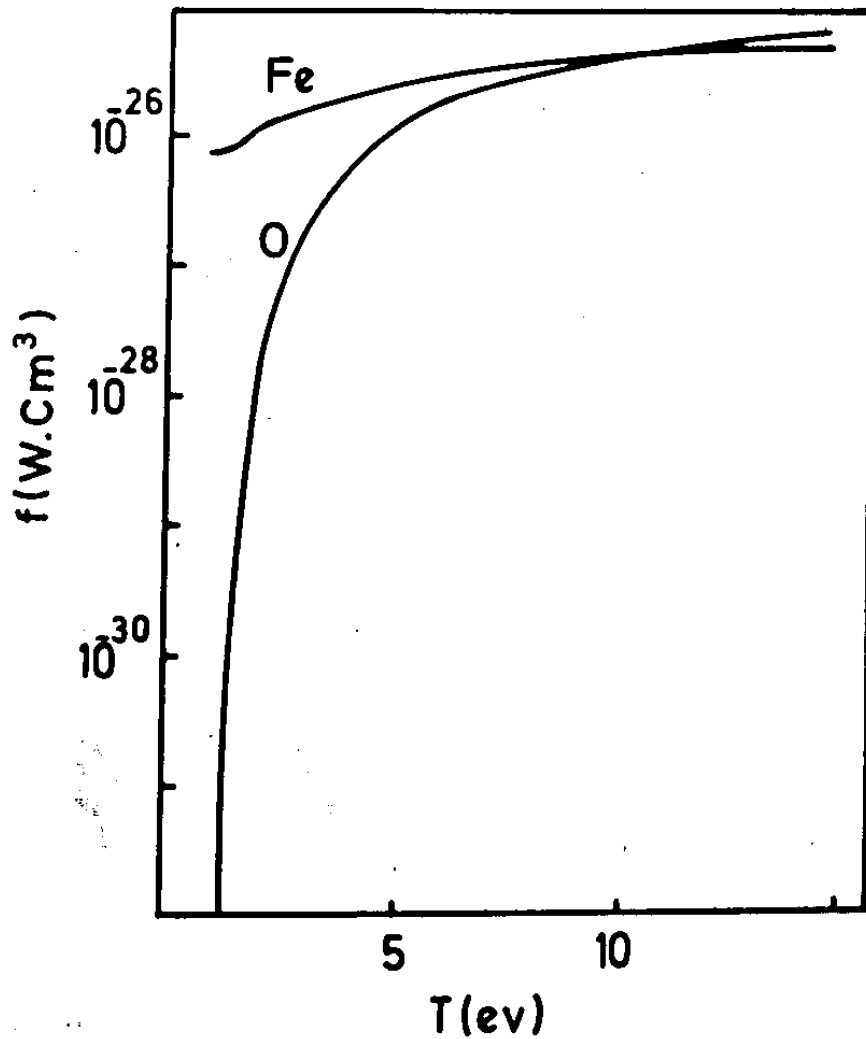
$$\alpha_3 = 8.75 \times 10^{-27} n T^{-4.5} \text{ cm}^3/\text{s} \quad (8)$$

$$S = 1.7 \times 10^{-6} \Delta E^{-2} T^{1/2} \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right) \text{ cm}^3/\text{s}$$

α_3 و S سرعتهای متوسط توزیع ماکسولی (۱۸) بوده و واحد T و پتانسیل یونسازی (ΔE) بر حسب الکترون ولت تعریف می شوند .

W_R را می توان بصورت زیر تعریف نمود :

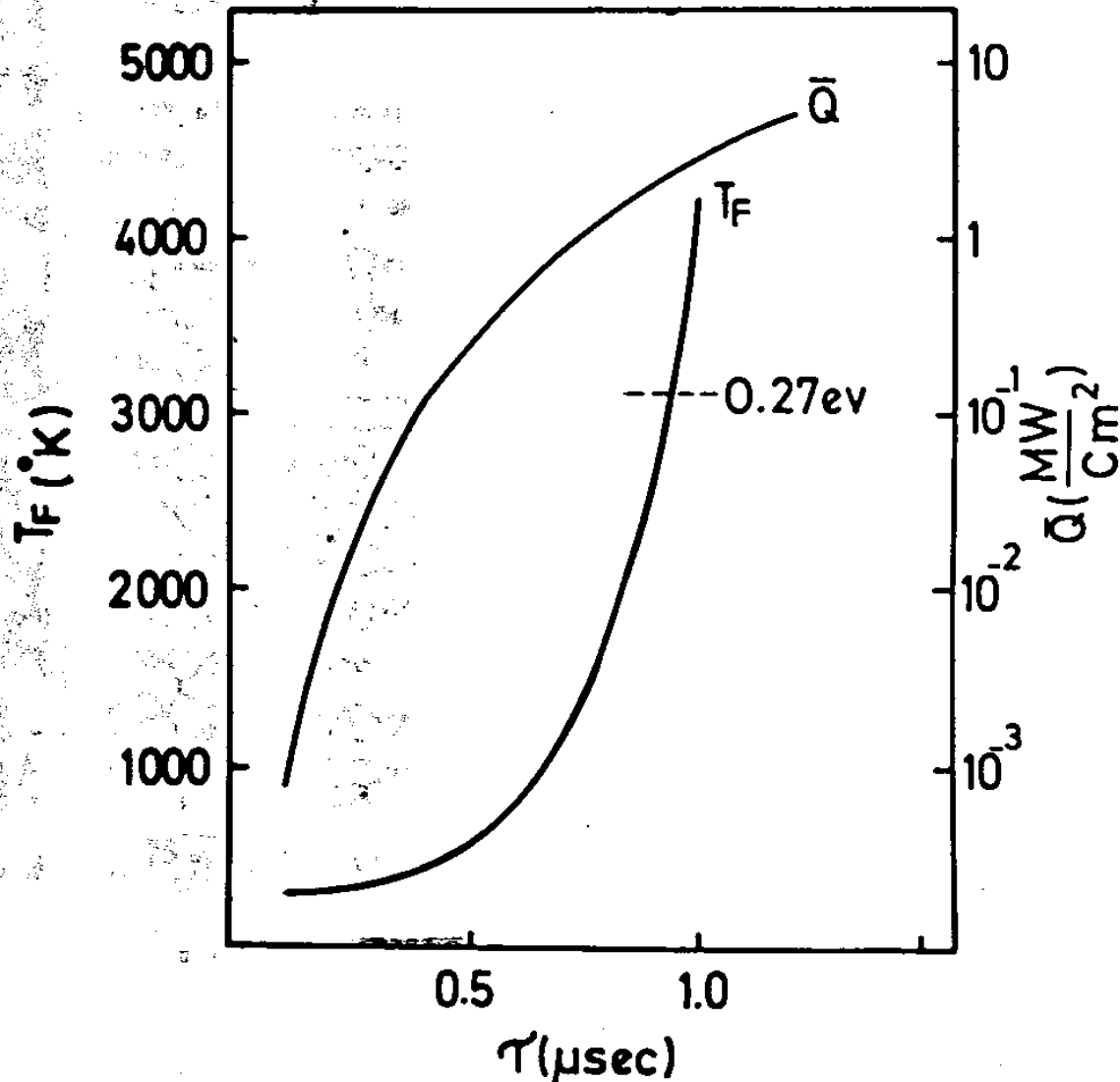
در اینجا $f(T)$ از منحنیهای شکل ۲ بدست می آید. از معادله های (۶) تا (۹) می توان T و n و Z و δ و در نتیجه مقدار ΔN جسم تبخیر شده را بدست آورد.



شکل ۲- سرعت تشعش آهن و اکسیژن در حالت تعادل کورونال (Coronal Equilibrium)

به منظور تأیید صحت بحث فوق، سعی می گردد که با استفاده از پارامترهای نتایج خطی ۵ متری Scylla-IV که در جدول شماره ۲ ارائه شده مقدار δ و n را برای پلاگ BN بدست آورده و با مقدار ثبت شده آنان در مرجع شماره ۶ مقایسه گردد. چون مقدار فشار بخار در آن آزمایش تعیین نشده لذا فرض می شود که به هنگام رسیدن دمای سطحی به مقداری بالاتر از انرژی تفکیک BN (یعنی ۲۷/۰ الکترون ولت) گاز از آن دمافشار بسیار زیادی دارد از سطح فرار کرده و لایه ناخالصی بوجود می آورد.

شکل ۳ $\bar{Q}(\tau)$ و $T_F(\tau)$ را نشان می‌دهد، که بعلاوه این‌که یون‌ها بدون برخورد می‌باشند از هدایت حرارتی توسط آن‌ها صرف نظر شده است.



شکل ۳ شار قدرت برخورد کرده $\bar{Q}(\tau)$ و درجه حرارت سطحی $T_F(\tau)$ برای پلاکهای BN در Scylla-IV P بر حسب زمان (۶).

همانگونه که مشاهده می‌شود دمای سطح در زمان یک میکروثانیه به بالاتر از 27 eV می‌رسد که با 1 تا $1/5$ میکروثانیه زمان شکل گیری لایه ناخالصی مطابقت دارد. عمق حرارت دیده در پلاک BN در طول این مدت برابر با $2/3 \times 10^{-4}$ سانتیمتر می‌باشد. آن مقدار از سطح نمونه راکه در اثر برخورد با پلاسما صدمه دیده A_P فرض می‌کنیم بنا بر این تعداد اتمهای ازت حاصله برابر $\Delta N = 1/2 \times 10^{19} A_P$ خواهد شد. با قرار دادن این مقدار و مقتضای $E = 14/5\text{ eV}$ و $P_0 = 5/2 \times 10^{19}\text{ eV/cm}^3$ و $Q = 5/4 \times 10^8\text{ W/cm}^2$ در معادله‌های

بررسی اثر برخورد پلازما با فلزات در تئابینج خطی

(۶) تا (۹) و با فرض اینکه میزان تشعشع ازت تقریباً "برابر با میزان تشعشع اکسیژن می باشد خواهیم داشت : $T = 2/1 \text{ eV}$ و $Z = 0/07$ و $n = 1/6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ و $\delta = 0/5 \text{ cm}$ که این اعداد بطور قابل قبولی با آنچه که در مرجع (۶) گزارش شده ($n = 5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ و $\delta = 1/0 \text{ cm}$) مطابقت دارد.

جدول ۲- پارامترهای پلازما در تئابینجهای خطی الوند ۱ و Scylla-IV P

	الوند ۱	Scylla-IV P
B (T)	۶	۲/۸
$T_R (\mu\text{S})$	۲/۷	۲/۱
$\theta_e (\text{KeV})$	۰/۳	۰/۵۷
$\theta_i (\text{KeV})$	۰/۷	۲/۷
$n_o (\text{cm}^{-3})$	7×10^{16}	$1/5 \times 10^{16}$
L (cm)	۵۰	۲۵۰
$A_p (\text{cm}^2)$	۰/۸	۳

۲- مقایسه با توکاماکها :

در توکاماکهای فعلی رسانائی حرارتی غیر عادی الکترون، مسئولیت اصلی را در اتلاف انرژی تشکیل می دهد. بعنوان مثال در توکاماک آلکاتور (ALCATOR) با مشخصات $T_e = 10^3 \text{ eV}$ ، $n = 5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ و شعاع کوچک ۴۰ سانتیمتر، با فرض یکنواخت بودن توزیع اتلافهای حرارتی (Thermal losses) این مقدار برابر 10 W/cm^2 است.

انتظار می رود که اگر Z_{eff} پلازما تقریباً "برابریک باشد، این شار انرژی به محدود کننده ها (Limiters) و اولین دیواره خواهد رسید. ولی اگر Z_{eff} بزرگتر از یک باشد در اثر لایه های ناخالصی تشعشع کننده (radiating impurity layer) در لبه پلازما فقط $\frac{1}{10}$ این مقدار به دیواره رسیده بقیه بصورت تشعشع اتلاف می شوند (۱۳). در توکاماکها، گرم کردن پلازما توسط دستگاههای کمکی امکان دارد که محدود کننده ها در معرض شار قدرت (power fluxes) خیلی بیشتری قرار گیرند. برای مثال می توان اشاره نمود که محدود کننده های فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در PLT در معرض شار حرارتی بیش از 10^3 W/cm^2 قرار می گیرند. در این مورد، منبع اصلی حرارتی یونها محصور نشده (unconfined) پرتوهای خنثی می باشند (۲۰). این محدود کننده ها تا عمق ۰/۲ سانتیمتر ذوب شده و

حالت موجی بوجود آمده در آنان بسیار شبیه به شکل های ۷ و ۱۲ می باشد.

در طراحی راکتور INTOR، جنس اولین دیواره محدود کننده ها فولاد دزنگ زن ۳۱۶ در نظر گرفته شده است که توسط آب سنگین D_2O نیز خنک می شوند و در معرض شاری برابر با $10-100 \text{ W/cm}^2$ برای مدت زمان حدود ۲۰۰ ثانیه قرار می گیرند. صفحات کلکتور انحراف دهنده (divertor collector plates) که در معرض شاری برابر با 10^3 W/cm^2 می باشند، انتظار می رود که بیشترین صدمه دیدگی در آنها ظاهر گشته و دمای آنان تا 2×10^3 درجه کلوین افزایش یابد.

جدول ۳ مقایسه ای بین افزایش دمای سطح، عمق حرارت دیده، شار انرژی، زمان حرارت دیدن و شار قدرت ورودی در نمونه های مورد آزمایش در آلوند ۱، لوله شوک (shock tube) محدود کننده های PLT و اجزاء توروئید INTOR را نشان می دهد. اگر اجزاء مختلف توکاماکهای فعلی خنک نشوند، ذوب سطحی در محدود کننده ها بوجود می آید و تبخیر بهمان اندازه پراکنش در تولید ناخالصی های سنگین اهمیت خواهد داشت (۲۰). در توکاماکهای آینده چون تمام اجزاء خنک می شوند تبخیر بمنزله یک پدیده پایدار قابل صرف نظر کردن خواهد بود. ولی صدمه دیدگی عمده در اثر شارهای قدرت زیاد 10^4 W/cm^2 و زمان کم 10^{-2} ثانیه در محدود کننده ها و اولین دیواره بوجود می آید (۲۱-۲۰). چنین ضربه های حرارتی علی رغم وجود سیستم خنک کننده باعث ذوب سطحی و تبخیر محدود کننده ها و اولین دیواره می شوند. انتظار می رود هر بار که انقطاع (disruption) رخ داده و این ضربه های حرارتی بوجود آمده و دیواره به عمق $5-8 \times 10^{-5}$ سانتی متر در اثر تبخیر دچار سایش شود.

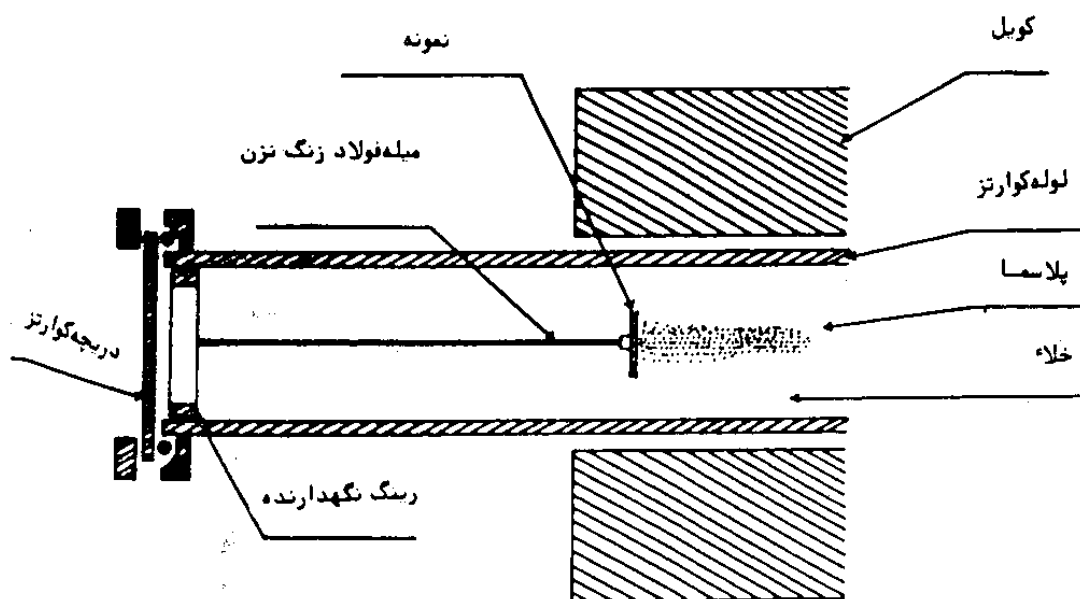
جدول ۳- مقایسه پارامترهای نمونه های مورد آزمایش در آلوند ۱، محدود کننده های PLT و اجزاء توروئید INTOR و لوله شوک

آلوند ۱	لوله شوک (۳)	محدود کننده های PLT (۲۰)	اجزاء توروئید INTOR (۲۱)
شار قدرت برخورد کرده (W/cm^2)	4×10^6	10^3	$10-10^2$
زمان گرم شدن (S)	10^{-6}	۱	10^2
شار انرژی (J/cm^2)	۴	10^3	10^2-10^5
افزایش درجه حرارت سطح (K)	2×10^3	10^3	10^2-10^4
عمق گرم شده (cm)	2×10^{-4}	2×10^{-1}	۲

تاپینگ خطی الوند ۱ دستگاهی است که انرژی ذخیره شده در بانک خازن برابر با ۴۰۰ کیلوژول را با زمان صعود (rise time) ۲/۷ میکروثانیه در داخل سولنوئیدی به طول یک متر و قطر داخلی ۱۱ سانتیمتر تخلیه می نماید (۵).

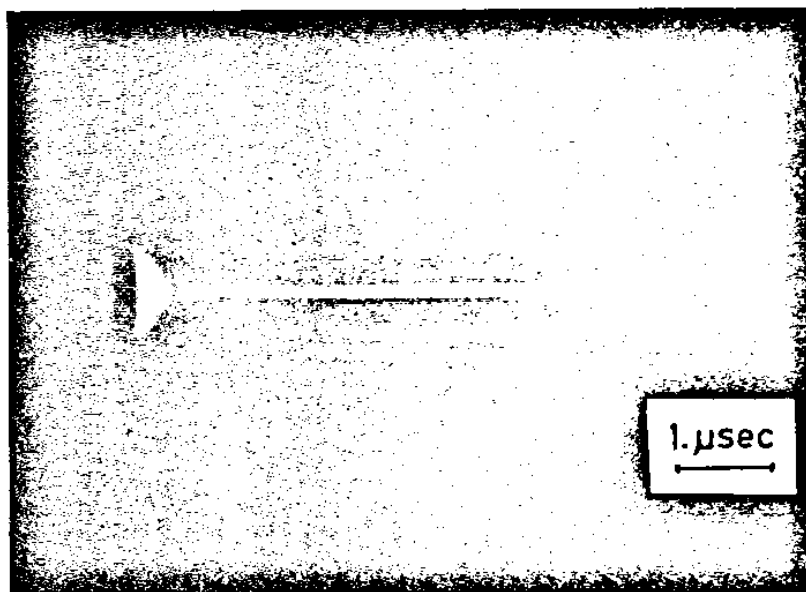
مشخصات پلاسمای ایجاد شده در جدول شماره ۲ ارائه شده است. عکس آن که به صورت استریک (streak) گرفته شده و در شکل ۵ نیز نشان داده می شود. (عکس استریک تصویری است که تغییرات پلاسما، از یک شکاف باریک عمود بر محور طولی سولنوئید، بر حسب زمان بر روی آن ثبت می شود). به منظور برخورد بیشترین مقدار شار انرژی به نمونه های مورد آزمایش، آنها بصورت پلاگ انتهایی (end plug) مطابق شکل ۴ در داخل سولنوئید قرار داده می شوند.

نمونه های مورد آزمایش از فولادهای زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ و آلیاژ اینکسل ۶۲۵ انتخاب گردیده است. آنها بعنوان آلیاژهای کاندید برای راکتورهای فیوژن در نظر گرفته شده اند و با ابعاد $1 \times 1 \times 0.2 \text{ cm}^3$ و $1 \times 1 \times 0.05 \text{ cm}^3$ می باشند.



شکل ۴- طرز قرار گرفتن نمونه در داخل سولنوئید ساسخ خطی الوند ۱.

برای آماده کردن نمونه ها جهت آزمایش ابتدا آنها را به ترتیب با کاغذ سمباده به شماره های ۴۰۰، ۳۲۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و سپس توسط پودر الماس ۴۵، ۳۰، ۱۵، ۳ و ۱ میکرون صیقل داده سپس با محلولی از ۳۳٪ استن، ۳۳٪ بنزن و ۳۳٪ اتانل شست و داده شدند. قبل از اینکه نمونه ها در معرض برخورد با پلاسما قرار گیرند از هر کدام نمونه ای جهت خورش الکتروشیمیائی (electro-etch) انتخاب گردید. این امر به منظور تعیین و تشخیص مرزهای بین دانه ای و همچنین سایر مشخصات متالورژیکی انجام پذیرفت. تصاویری از این نمونه ها که توسط میکروسکپ نوری مورد بررسی قرار گرفته اند در شکل ۶ می توان مشاهده نمود.



شکل ۵- عکس استریک از سنون پلاسماکه از وسط سولنوئید و عمود بر محور طولی آن برداشته شده است .

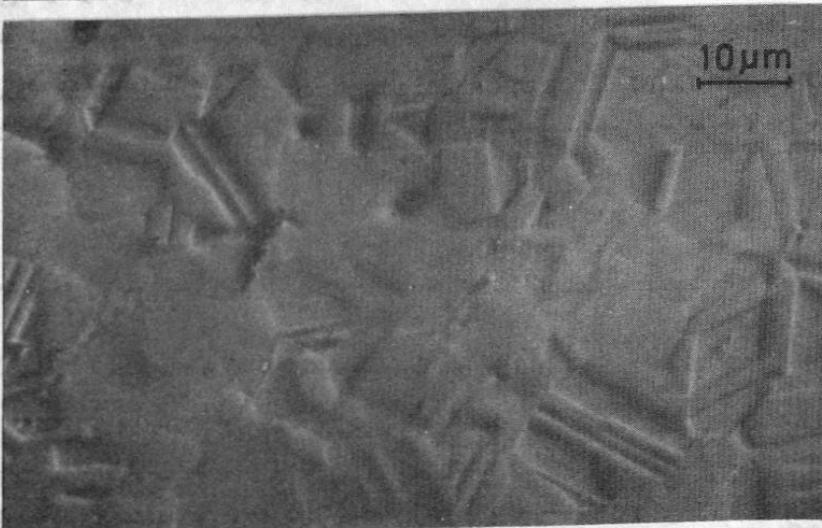
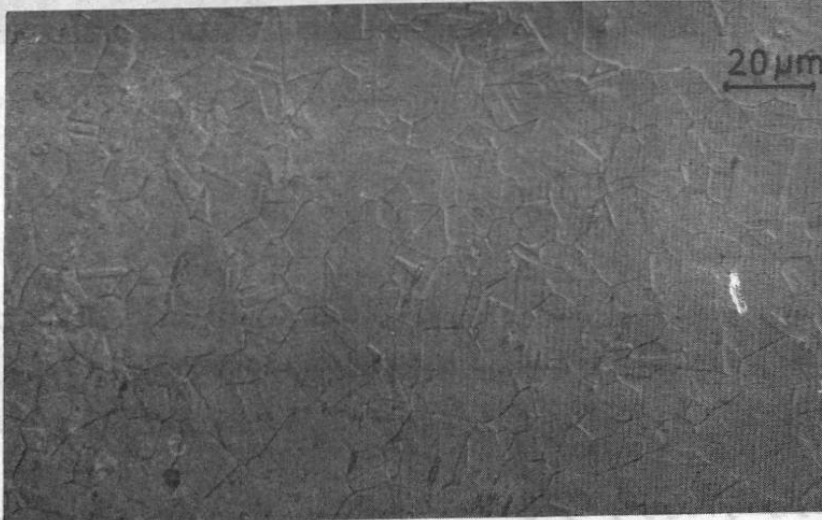
خوردن الکتروشیمیایی نمونه‌های فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ در محلول ۵٪ اسید سولفوریک با اعمال ولتاژی برابر ۶ ولت برای مدت چند ثانیه خوردن الکتروشیمیایی نمونه‌های اینکگل ۶۲۵ در محلولی از ۴۷٪ اسید سولفوریک و ۴۱٪ اسید نیتریک و ۱۲٪ اسید فسفریک با اعمال ولتاژی برابر ۲۰ ولت بمدت ۲۰ ثانیه انجام پذیرفت .

جهت بررسی اثر شارهای مختلف انرژی بر روی آلیاژها ، تعدادی نمونه در معرض یکبار ، دوبار ، شش بار و هیجده بار برخورد با پلاسمای قرار داده شدند . پس از برخورد پلاسمای با آلیاژها ، سطوح نمونه‌ها توسط میکروسکپ نوری و میکروسکپ الکترونی (Scanning Electron Microscope) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت . همچنین تمام نمونه‌ها قبل و بعد از برخورد با پلاسمای بوسیله ترازویی بادقت ۱۰ میکروگرم توزین گردیدند .

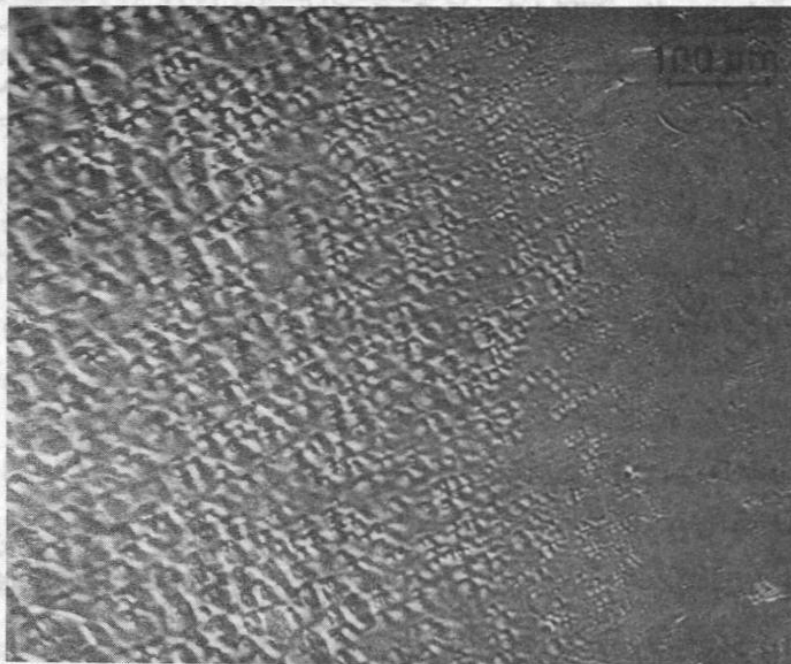
۴- یافته‌ها و بحث و توجیه آنان

در اثر آزمایشهای انجام شده ، بر روی نمونه‌ها انواع صدمه دیدگی نظیر ردهای قوس الکتریکی (arc tracks) ، سایش در مرز بین دانه‌های (grain boundary erosion) ایجاد ترک (cracks) و تغییر شکل پلاستیکی در سطح (surface deformation) مشاهده گردید . بطور کلی ، در هر نمونه‌ای که در معرض برخورد با پلاسمای قرار گرفته است ، سه ناحیه‌ای می‌توان متمایز نمود . این نواحی عبارتند از : (الف) ناحیه‌ای به قطر یک سانتیمتر که بیشترین مقدار صدمه دیدگی در آن ظاهر می‌شود ، (ب) ناحیه‌ای که کمترین مقدار صدمه دیدگی را نشان می‌دهد ، (ج) ناحیه انتقالی بین دو ناحیه فوق . عکس شماره ۷ بخوبی این سه ناحیه را مشخص می‌نماید .

بررسی اثر خوردپلاسمافلزات در تاپینچ خطی



شکل ۶-۲۵ عکسهای گرفته شده توسط میکروسکوپ نوری از نمونه های فولاد زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ و همچنین اینکابل ۶۲۵ که فقط خوردش الکتروشیمیایی (electro-etch) شده اند.



شکل ۷ - عکس بادرشت نمائی کم که توسط میکروسکپ الکترونی از نمونه فولاد زنگ نزن ۳۱۶ که در معرض یکبار برخورد با پلاسما قرار گرفته برداشته شده است. در این عکس سه ناحیه‌ای که در معرض برخورد با پلاسما قرار گرفته خوبی قابل تفکیک می باشد.

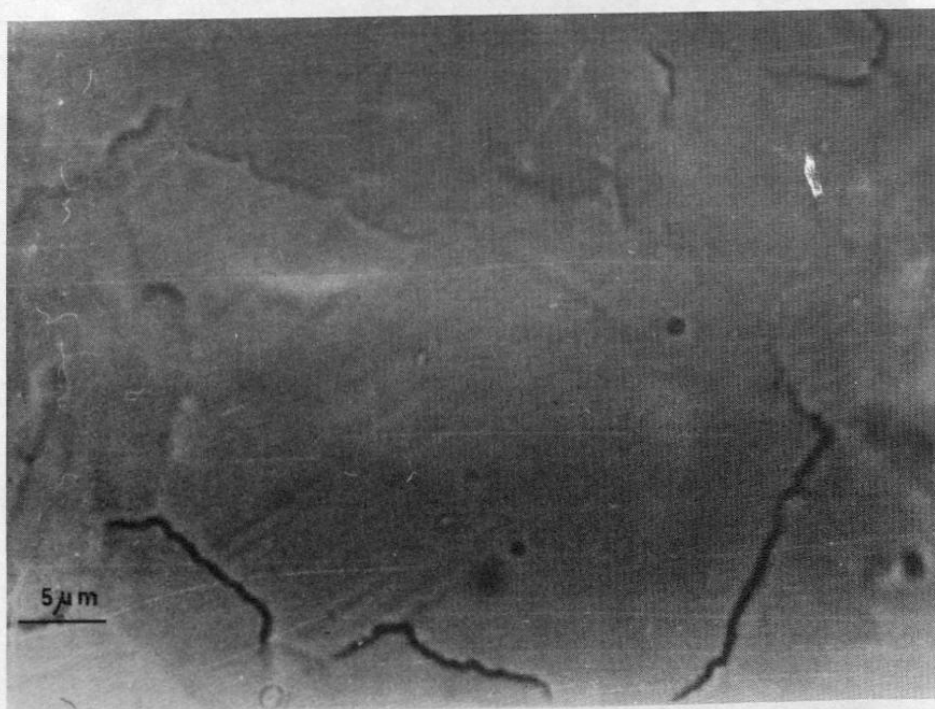


شکل ۸ - عکس بادرشت نمائی زیاد که توسط میکروسکپ الکترونی از یک نمونه فولاد زنگ نزن ۳۱۶ که هیجده بار در معرض برخورد با پلاسما قرار گرفته برداشته شده است. در این عکس ترک سطحی به خوبی مشخص می باشد.

بررسی اثر برخورد پلاسما با فلزات در تپانچ خطی

در ناحیه (ب) تمام نمونه‌ها، سایش مرز دانه‌ای که یک صدمه‌اصلی است مشاهده می‌شود. این نوع صدمه دیدگی در اثر مکانیسم‌های مختلفی نظیر پراکنش، ذوب سطحی کم عمق و انجماد مجدد (resolidification) و یا توسط خوردش (etch) بوسیله گاز دوتریوم ممکن است بوجود آمده باشد. در ناحیه (الف) تمام نمونه‌های فولادهای زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ ترک سطحی (surface cracking) مشاهده شده است. آزمایش نشان می‌دهد که تعداد و اندازه مین ترکها با افزایش تعداد دفعات برخورد پلاسما با نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این ترکها حتی هنگامیکه نمونه یکبار در معرض برخورد با پلاسما قرار گیرند نیز مشاهده می‌شود. عکس ۸ یک نمونه از این ترکها را در فولاد زنگ نزن ۳۱۶ هنگامیکه در معرض ۱۸ بار برخورد قرار گرفته نشان می‌دهد.

عکس شماره ۹ یک نمونه دیگر از این ترکها را در فولاد زنگ نزن ۳۱۶ هنگامیکه یکبار در معرض برخورد با پلاسما قرار گرفته است نشان می‌دهد. مشابه این ترکها در فولاد زنگ نزن ۳۰۴ نیز مشاهده شده است. تصویر شماره ۱۰ نشان دهنده سطح نمونه‌ای از فولاد زنگ نزن ۳۰۴ است که پس از آنکه ۱۸ بار در معرض برخورد با پلاسمای داغ قرار گرفته، تغییرات گوناگون سطحی از جمله ترک خوردن را می‌توان بکمک آن مشاهده نمود.



شکل ۹- عکس با درشت نمایی زیاد که توسط میکروسکپ نوری از یک نمونه فولاد زنگ نزن ۳۱۶ که یکبار در معرض برخورد با پلاسما قرار گرفته برداشته شده است. در این عکس ترک سطحی کاملاً مشخص می‌باشد.

از طرف دیگر در ناحیه (الف) نمونه‌های اینکانل ۶۲۵ حتی بعد از ۱۸ بار برخورد نمونه با پلاسما هم اینگونه ترک سطحی بوجود نیامده است و این نشان می‌دهد که آلیاژ اینکانل ۶۲۵ ارجحیت غیر قابل انکاری در مقایسه با فولادهای زنگ نزن ۳۰۴ و ۳۱۶ نسبت به مقاومت در برابر تنش‌های حرارتی از خود نشان

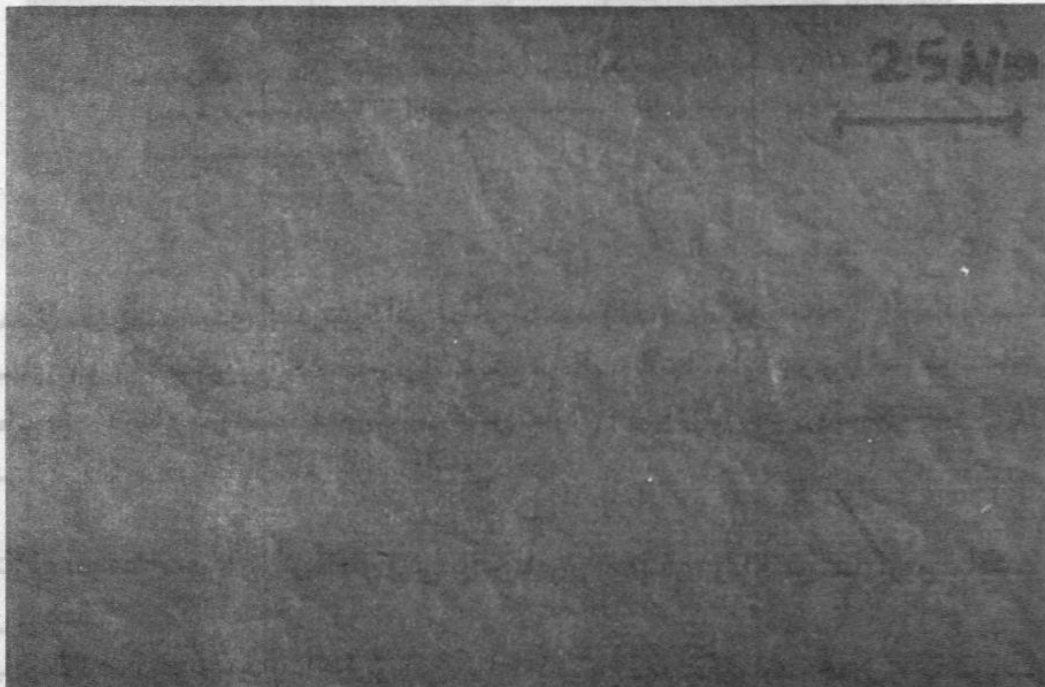
۲. آلانی و همکاران

می‌دهد. ترکهای مشاهده شده بر روی نمونه‌های فولادهای زنگ‌زن ۳۰۴ و ۳۱۶ نشانگر آنند که این ترکها در اثر مکانیسم خستگی (fatigue) بوجود نیامده‌اند بلکه در اثر ضربه‌ها و تنش‌های حرارتی ایجاد شده‌اند که با درکنش‌های نابجائی (dislocation) حاصل از تنش‌های حرارتی (thermal stress) باعث بوجود آمدن آنان گردیده‌است.

مقاومت در برابر ضربه‌های حرارتی، M ، برای اینکانل ۶۲۵ دو برابر فولادهای زنگ‌زن ۳۰۴ و ۳۱۶ می‌باشد و این امر با نتایج آزمایش‌های این طرح هم‌آهنگی دارد. مقاومت در برابر ضربه حرارتی M بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$M = 2 \sigma_y K (1-\nu) (\alpha E)^{-1}$$

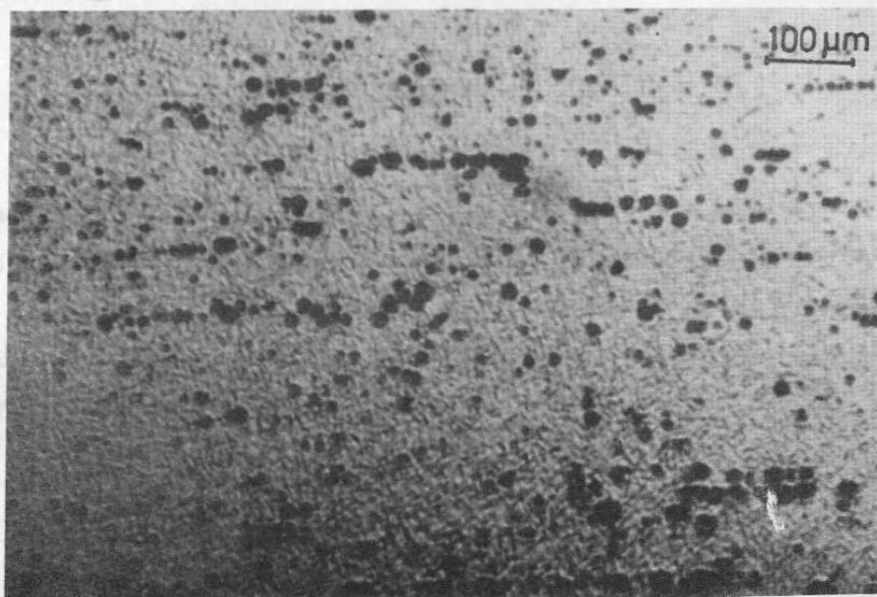
که در رابطه فوق، σ_y استحکام تسلیم (yield strength) و ν ضریب پواسن، E مدول یانگ و α ضریب انبساط حرارتی می‌باشد. تفاوت‌های جزئی در مقادیر این ضرایب توسط مراجع مختلف وجود دارد. در اینجا از ضرایب ارائه شده توسط مرجع (۱۲) استفاده شده‌است. تمام پارامترها برای کلیه نمونه‌ها تقریباً "یکسان بوده‌است" استحکام تسلیم که برای آلیاژ اینکانل بیشتر از دو برابر فولادهای زنگ‌زن ۳۰۴ و ۳۱۶ می‌باشند.



شکل ۱۰- عکس یادداشت نمائی متوسط که توسط میکروسکپ نوری از یک نمونه فولاد زنگ‌زن ۳۰۴ که هیجده بار در معرض برخورد با پلاسما قرار گرفته بر داشته شده‌است. در این عکس صدمات مختلف متالورژیکی از جمله ترک خوردن سطح مشاهده می‌شود.

بررسی اثر برخورد پلاسما با فلزات در تئاپینج خطی

ردهای قوس الکتریکی (Arc tracks) در تمامی نمونه‌ها بخصوص آنهایی که در معرض یکبار یا دوبار برخورد با پلاسما قرار گرفته‌اند وجود داشته و محل آنها در ناحیه (ج) یعنی ناحیه انتقالی می‌باشد. با در نظر گرفتن این مطلب که میدان مغناطیسی و در نتیجه نیروی $J \times B$ در ستون پلاسمای مرتبط با ناحیه (الف) خیلی کوچک است نقاط قوس الکتریکی (Arc spots) حرکت نمی‌کنند بنا بر این انتظار می‌رفت که ردهای جرقه الکتریکی در این ناحیه تشکیل نشوند. شکل ۱۱ ردهای جرقه الکتریکی در ناحیه انتقالی نمونه فولاد زنگ نزن ۳۱۶ که یکبار در معرض برخورد با پلاسما قرار گرفته‌است را نشان می‌دهد.

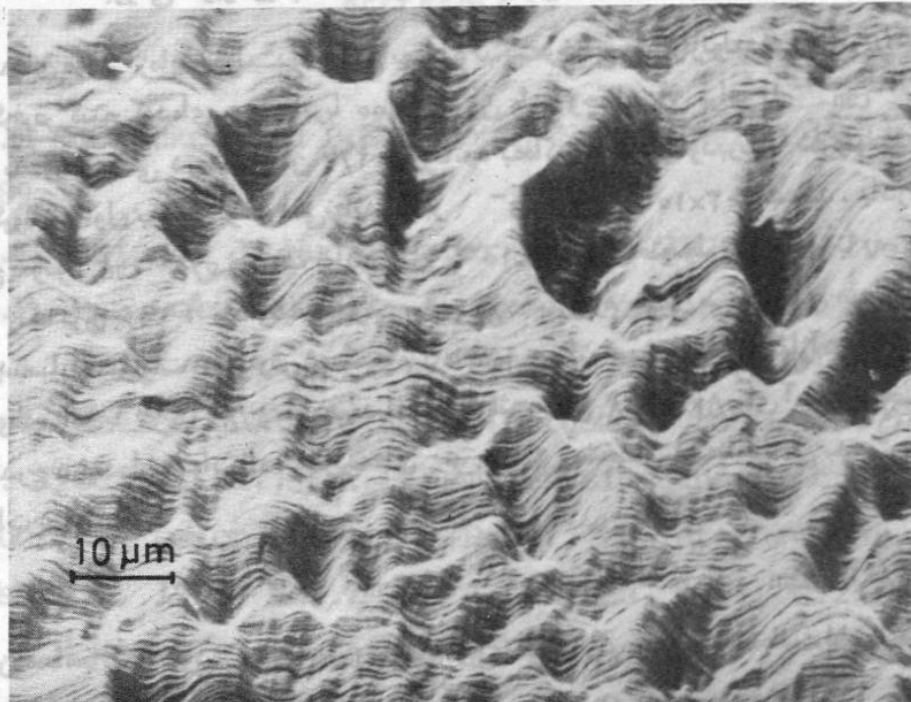


شکل ۱۱- عکس با درشت نمائی کم که توسط میکروسکپ نوری از یک نمونه فولاد زنگ نزن ۳۱۶ که یکبار در معرض برخورد با پلاسما قرار گرفته‌برداشته شده‌است. در این عکس ردهای ترک در ناحیه انتقالی مشاهده می‌شود.

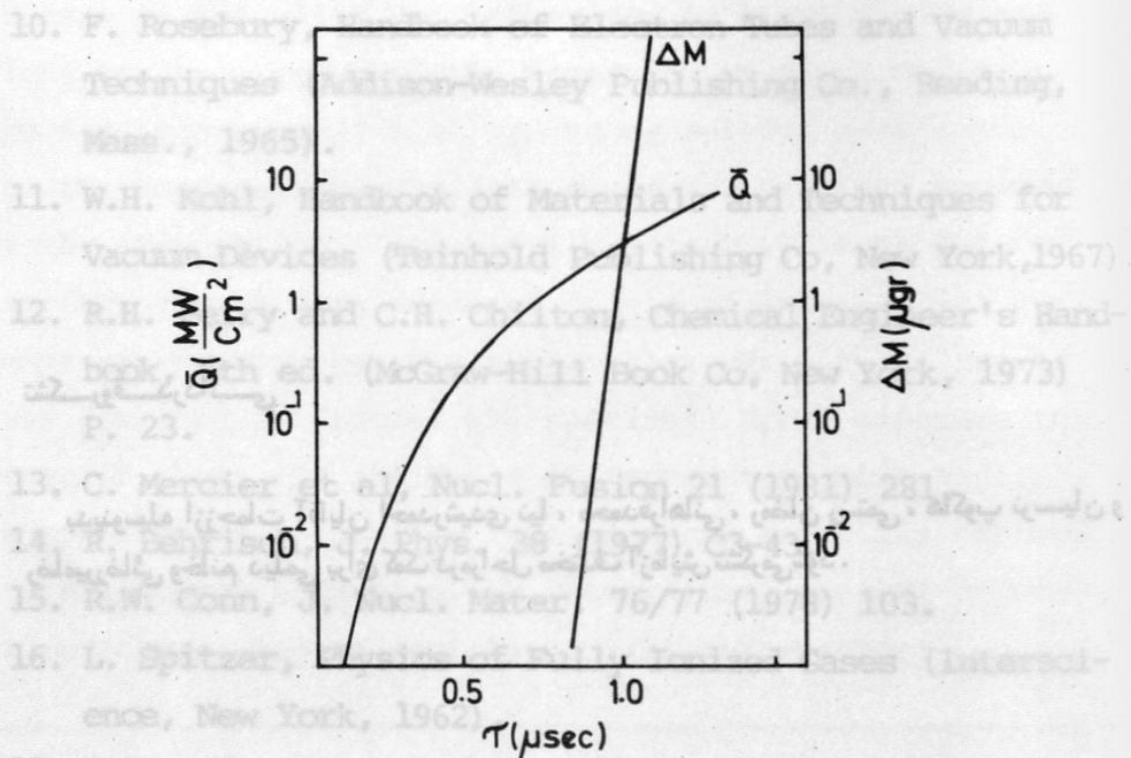
بدلیل تغییرات شدیدی که در توپوگرافی سطحی ناحیه (الف) بر اثر ذوب سطحی و انجماد مجدد (عکسهای ۷ و ۱۲) بوجود می‌آید نقاط قوس الکتریکی در مقایسه با آنها بسیار ناچیز می‌باشد. ذوب سطحی و انجماد مجدد در تمام نمونه‌ها مشاهده شده‌است عکس شماره ۱۲ توپوگرافی سطحی یک نمونه اینگانل ۶۲۵-را که در معرض یکبار برخورد با پلاسما قرار گرفته‌نشان می‌دهد.

توزین نمونه‌های مورد آزمایش کاهش وزنی برابر با $150 \pm 30 \mu g$ را با زاویه برخورد با پلاسما نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن خواص هدایت حرارتی این آلیاژها که بسیار بهم نزدیک است جدول ۱ و فشار بخار و مشخصات یونسازی عناصر اصلی این آلیاژها یعنی آهن، نیکل و کرم که تقریباً "بایکدیگرمساوی است این مقدار کاهش جرم دور از انتظار نمی‌باشد. شکل ۱۳ منحنی شار انرژی و کاهش جرم محاسبه شده بر حسب زمان را نشان می‌دهد. بطوریکه مشاهده می‌شود بستگی ΔM به زمان بسیار زیاد است و کاهش جرم $150 \mu g$ در زمان ۱/۱ میکروثانیه صورت می‌گیرد.



شکل ۱۲- توپوگرافی سطح (Z-Modulated) یک نمونه اینکانل ۶۲۵ که در معرض یکبار برخورد پلازما قرار گرفته است. این عکس توسط میکروسکپ الکترونی از ناحیه‌ای که بیشترین مقدار صدمه دیدگی را داشته برداشته شده است.



شکل ۱۳- منحنیهای شار قدرت برخورد کرده $\bar{Q}(\tau)$ و کاهش جرم $\Delta M(\tau)$ بر حسب زمان که برای نمونه‌های فولاد زنگ نزن ۳۱۶ و اینکانل ۶۲۵ در الوند ۱ محاسبه شده‌اند.

● بررسی اثر برخورد پلاسما با فلزات در تتاپینج خطی

در نمونه‌های مورد آزمایش تولید ناخالصی بوسیله تبخیر خیلی بیشتر از تولید آن در اثر پراکندش می‌باشد. اگر فرض کنیم که دمای یون برابر با ۷۰۰ الکترون ولت و چگالی آن برابر با $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ باشد و هر دو به صورت خطی در مدت زمان ۲/۷ میکروثانیه بهماکزیم مقدار خود برسند شار متوسط ذراتی که در یک میکروثانیه اول به نمونه برخورد می‌نماید برابر $3 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ خواهد شد. با در نظر گرفتن سطح نمونه 0.8 cm^2 و ضریب پراکندش آن 4×10^{-3} و انرژی متوسط D^+ برابر با ۲۵۰ eV برای فولاد زنگ نزن ۳۱۶، مقدار کاهش جرمی برابر ۰/۱ میکروگرم حاصل می‌شود و این مقدار با مقایسه با ۱۵۰ μg بسیار ناچیز است. اگر فرض شود که تمام ۱۵۰ μg جسم تبخیر شده در این آلیاژ آهن باشد تعداد اتمهای مربوطه برابر با $1/8 \times 10^{18}$ خواهد شد با در نظر گرفتن $\Delta E = 7/8 \text{ eV}$ برای آهن و مشخصات الوند ۱ مندرج در جدول ۲ و استفاده از معادله‌های ۶ تا ۹ مشخصات لایه ناخالصی بدست می‌آید. این مشخصات عبارتند از:

$$\delta = 0.04 \text{ cm}, \quad n = 1/2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}, \quad Z = 0.02, \quad T = 1/2 \text{ eV}$$

چون در این محاسبات از نفوذ (diffusion) موازی صرف نظر گردیده عملاً ضخامت لایه ناخالصی از مقدار محاسبه شده فوق بیشتر خواهد بود.

تشکر و قدردانی

بدینوسیله از زحمات آقایان احمد رشیدی نیا، محمد فراهانی، رمضان رستمی، هاگوپ نرسیان و رضا میرضائی و خانم دیلمی برای کمک در مراحل مختلف آزمایش تشکر می‌شود.

REFERENCES

1. G.M McCracken and P.E. Stott, Nucl. Fusion 19 (1979) 889.
2. R. Behrisch, J. Nucl. Mater. 85/86 (1979) 1047.
3. N.F. Panayotou et al., J. Nucl. Mater. 63 (1973) 137.
4. R.A. Gross et al., Proc. Intern. Symp. on Plasma Wall Interaction, Julich, 1976 (Pergamon Press, 1977) P.689.
5. H. Azodi et al., in: Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Proc. 7th Intern. Conf. Innsbruck, 1978, Vol.2 (IAEA, Vienna, 1979) P.217.
6. K.F. McKenna et al., ibid., P.229.
7. M. Naraghi. Appl. Phys. Letters 24 (1974) 360.
8. W.R. Ellis, Nucl. Fusion. 15 (1975) 225.
9. R.D. Milroy and L.C. Steinhauer, Phys. Fluids 24 (1981) 339.
10. F. Rosebury, Handbook of Electron Tubes and Vacuum Techniques (Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Mass., 1965).
11. W.H. Kohl, Handbook of Materials and Techniques for Vacuum Devices (Teinhold Publishing Co, New York, 1967).
12. R.H. Perry and C.H. Chilton, Chemical Engineer's Handbook, 5th ed. (McGraw-Hill Book Co, New York, 1973) P. 23.
13. C. Mercier et al, Nucl. Fusion 21 (1981) 281.
14. R. Behrisch, J. Phys. 38 (1977) C3-43.
15. R.W. Conn, J. Nucl. Mater. 76/77 (1978) 103.
16. L. Spitzer, Physics of Fully Ionized Gases (Interscience, New York, 1962).
17. K.F. McKenna et al, Phys. Fluids 23 (1980) 1443.
18. D.L. Book, NPL Plasma Formulary (NRL, Washington , 1978).

-
19. J.P. Boujot, Private Communication of Computer Code
MAKOKOT.
 20. S.A. Cohen et al, Nucl. Fusion 21 (1981) 233.
 21. INTOR Group, Nucl. Fusion 22 (1982) 135.

MATERIAL TESTING IN A LINEAR THETA PINCH*

R. ALANI, H. AZODI, M. NARAGHI, B. SAFARI and
A. TORABI-FARD

*Plasma Physics Group, Nuclear Research Center, Atomic
Energy Organization of Iran, P.O.Box 11365-8486
Tehran, Iran*

Abstract- In the course of this research program the interaction of three candidate first wall fusion reactor materials (Stainless steels 304 and 316 and inconel 625 which is a nickel base alloy) were subjected to a thermo-nuclear-like plasma, $n=10^{16} \text{ cm}^{-3}$ and $T_i=1 \text{ keV}$, produced in the Alvand I linear theta pinch. The average power flux is 10^7 W/cm^2 and the interaction time nearly $1 \mu\text{s}$. The properties of the impurity layer and the extent of the damage on the alloy was determined by means of a theoretical analysis based on the formation of an observed impurity layer near the alloy. Among several damage mode on the surface, the dominant mechanism has been assessed to be evaporation. Very heavily defective areas and even surface cracks were produced on the stainless steel specimens after exposure to a single shot. No sign of cracks was detected on Inconel 625 specimens after exposure to even 18 shots. On the basis of temperature rise and evaporation a comparison is made among materials exposed to plasmas of a theta pinch, shock tube, present generation tokamak and an anticipated tokamak reactor.

* This report is partly based on a similar article, which appeared in *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 113, No. 1 1. January, 1983 .