بررسی برخی خواص گرافیت برای استفاده به‌صورت المنت حرارتی در کورهٔ تحت خلأ با دمای بالا

امیرعلی صدری*، مهدی بخش‌زاد محمودی، قهار خالقیان و فاطمه رجب‌بیگی

سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکدهٔ فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۸۵/۴/۱۰، **تاریخ دریافت نسخهٔ اصلاح‌شده:** ۱۳۸۶/۸/۲۹، **تاریخ پذیرش قطعی:** ۱۳۸۶/۱۲/۲۳

چکیده در این مقاله نتیجهٔ مطالعات انجام‌شده درزمینهٔ برخی خواص مکانیکی، فیزیکی و الکتریکی گرافیت برای استفاده به‌صورت المنت حرارتی در کورهٔ الکتریکی تحت خلأ و دمای بالا، عرضه شده است. با بررسی انواع گرافیت موجود در بازار و انتخاب دو نوع از آنها به‌منزلهٔ المنت حرارتی کوره، مطالعات لازم برای شناسایی خواص مکانیکی و فیزیکی روی آنها صورت گرفت. سپس خواص الکتریکی نمونهٔ مناسب‌تر در شرایط خلأ و با عبور جریان‌های الکتریکی نسبتاً زیاد از آن بررسی شد. نتیجهٔ بررسی‌ها، گرافیت با نام تجارتی EK.40 را گزینهٔ مناسبی برای استفاده در کوره معرفی می‌کند.

کلمات کلیدی کورهٔ الکتریکی، گرافیت، دمای بالا، المنت حرارتی.

Investigating Some Properties of Graphite for Using it as a Heating Element in High Temperature Vacuum Furnace

A.A. Sadri*, M. Bakhshzad Mahmoudi, G. Khaleghian and F. Rajab Beigi

Plasma Physics and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute
Atomic Energy Organization of Iran

Abstract Study on some of the mechanical, physical and electrical properties of graphite as the heating element in a high temperature vacuum furnace has been reported in this paper. Two types of graphite have been selected as the heating element of the furnace after searching the domestic market, and studies of their mechanical and physical properties have been carried out. Then, study of electrical properties of the more suitable type has been done under the high electric current and vacuum conditions. The results show that EK.40, graphite is a good option for use in high temperature vacuum furnace.

Keywords Electrical Furnace, Graphite, High Temperature, Heating Element.

***عهده‌دار مکاتبات**

نشانی: سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکدهٔ فیزیک پلاسما و گداخت هسته‌ای، صندوق پستی ۱۴۳۹۹_۵۱۱۱۳.

تلفن: ۸۲۰۶۲۱۳۶_۰۲۱، **دورنگار:** ۸۸۲۲۱۰۹۵_۰۲۱، **پیام‌نگار:** asadri@aeoi.org.ir

۱_ مقدمه

المنت‌های حرارتی مهم‌ترین جزء تشکیل‌دهندهٔ کوره‌های الکتریکی دمای بالا هستند. یکی از قابلیت‌های خوب گرافیت امکان استفاده‌از قطعات کوچک آن برای تشکیل المنت حرارتی با شکل هندسی و مقاومت الکتریکی دلخواه است [۲،۱]. بدین‌منظور مطالعه برروی برخی خواص مکانیکی، فیزیکی و الکتریکی گرافیت موردنظر صورت گرفت. ازجمله خواص دیگر گرافیت می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- قابلیت تحمل دماهای بالا. امکان ایجاد دماهای بالا در گرافیت اولین و مهم‌ترین مزیت این ماده برای استفاده به‌صورت المنت حرارتی کوره است.
- فشار بخار کم در دماهای بالا.
- قابلیت حفظ مقاومت مکانیکی در دماهای بالا. برخلاف فلزات که در دماهای بالا برای حفظ شکل هندسی اولیهٔ خود نیاز به نگهدارنده دارند، گرافیت با داغ‌شدن، مقاومت مکانیکی خود را حفظ می‌کند؛ بنابراین برای برپایی کوره با المنت حرارتی گرافیت نیاز به مواد یا وسایل نگهدارندهٔ المنت نیست و بدین‌ترتیب احتمال ورود ناخالصی به محوطهٔ داغ کوره به حداقل می‌رسد.
- قابلیت خوب در برقراری اتصال الکتریکی کامل بین قطعات گرافیت [۲،۱]. المنت گرافیت را بسته به امکانات موجود می‌توان هم به‌صورت یکپارچه از یک قطعهٔ منفرد و هم به‌صورت مجموعه‌ای از قطعات کوچک که ساختار یک شکل هندسی خاص را ایجاد می‌کنند، استفاده کرد. دراین‌صورت می‌توان منطقهٔ داغ کوره را با هر شکل و ابعادی که موردنظر است و همچنین با هر میزان مقاومتی که موردنیاز است، تهیه کرد.
- امکان برقراری اتصال الکتریکی کامل بین گرافیت و فلز (مس) از دیگر مزایای استفاده‌از آن است. بدین‌ترتیب تغذیهٔ الکتریکی المنت نیز به‌راحتی تأمین می‌شود.
- از نقاط ضعف گرافیت در عمل نیز می‌توان به این دو مورد زیر اشاره کرد:

۱. به‌دلیل میل ترکیب بسیار بالای گرافیت با اکسیژن کوره‌هایی که از گرافیت به‌منزلهٔ المنت حرارتی استفاده می‌کنند حتماً باید در شرایط خلأ یا اتمسفر گازهای بی‌اثر باشد.

۲. به‌دلیل مقاومت فوق‌العاده کوچک گرافیت و همچنین کاهش مقاومت آن با افزایش دما، استفاده‌از منابع تغذیهٔ جریان برای کوره‌هایی از این نوع الزامی است که این امر نیز هزینهٔ موردنیاز برای منبع تغذیهٔ کوره را افزایش می‌دهد.

در این مقاله، نتایج مطالعه برروی برخی خواص گرافیت به‌صورت المنت حرارتی کورهٔ تحت خلاء و دمای بالا عرضه شده است.

۲_ نحوهٔ انجام آزمایش

دربین انواع گرافیت موجود در بازار دو نوع گرافیت با نام تجاری EK_20 (نوع اول) و EK_40 (نوع دوم) انتخاب شد که مشخصات آنها در جدول ۱ آمده است.

اتصال الکتریکی کامل گرافیت_گرافیت اهمیت بالایی دارد. ابتدا ایدهٔ سرد وگرم‌کردن قطعات گرافیت مطرح شد. باتوجه‌به ضریب انبساط منفی گرافیت، انقباض آن دراثر گرم‌شدن و انبساط آن درنتیجهٔ سردشدن، موردتوجه بود. انتظار می‌رفت

که میل‌گرد گرافیت در اثرگرم‌شدن باریک‌تر شود و حفرهٔ درون تودهٔ گرافیت در نتیجهٔ سردشدن، گشاد شود؛ بنابراین میل‌گرد داغ گرافیت درون حفرهٔ ایجادشده در تودهٔ سرد گرافیت از همان جنس و به‌همان اندازه قرار گرفت. انتظار می‌رفت، پس از بازگشت دو قطعه به دمای محیط، میل‌گرد درون حفره محکم شود و اتصال الکتریکی کامل بین دو قطعه برقرار شود. در آزمایش‌ها از نیتروژن مایع برای سردکردن و از کورهٔ آزمایشگاهی با دمای بالای ۲۰۰°C برای گرم‌کردن استفاده شد. سپس با انتخاب یک میلهٔ گرد گرافیت به قطر ٤/٥ میلیمتر و توده‌ای ازهمان نوع گرافیت با سوراخی به‌همان قطر، آزمایشی ترتیب داده شد. با انجام آزمایش روی دو نمونهٔ گرافیت، از گرافیت نوع اول نتیجهٔ مطلوبی به‌دست آمد؛ لیکن گرافیت نوع دوم به‌دلیل مقاومت دربرابر شکستگی کمتر آن که از داده‌های فنی جدول شماره۱ نیز قابل پیش‌بینی بود، نتایج رضایت‌بخشی حاصل نکرد. باتوجه‌به اینکه درهنگام قراردادن میل‌گرد داغ گرافیت درون تودهٔ سرد گرافیت اعمال فشار به دو قطعه ضروری است، گرافیت نوع دوم دراثر شکستگی آسیب می‌دید؛ حال‌آنکه گرافیت نوع اول فشار را تحمل می‌کرد و در انتهای کار اتصال خوبی بین دو قطعه برقرار می‌شد.

چقرمگی شکست[1] خاصیتی است که قدرت مقاومت مادهٔ ترکدار را دربرابر شکسته‌شدن توصیف می‌کند. این کمیت با نماد K_c نمایش داده شده و واحد اندازه‌گیری آن $MPam^{1/2}$ است. برمبنای نظریهٔ شکست گریفیت[2]، آهنگ رهایی انرژی کشش یا به‌عبارت‌دیگر آهنگ جذب انرژی توسط ماده دراثر رشد شکاف درون آن، مطابق رابطهٔ زیر با مدول الاستیسیتهٔ (مدول یانگ) ماده ارتباط دارد.

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E}$$

دراین رابطه G آهنگ رهایی انرژی کشش، σ تنش اعمال شده به جسم و a نیمی از طول شکاف و E مدول الاستیسیته است. ازطرفی مقاومت دربرابر شکستگی جسم ازطریق رابطهٔ زیر با G و مدول الاستیسیتهٔ جسم بستگی دارد:

$$K_c = \sqrt{EG_c}$$

طبق رابطهٔ اخیر، افزایش مدول الاستیسیتهٔ جسم سبب افزایش مقاومت دربرابر شکستگی آن می‌شود. به‌عبارت‌دیگر برای دو جسم با مقادیر متفاوت مدول الاستیسیته، مقاومت در برابر شکستگی جسمی که مدول الاستیسیتهٔ بزرگ‌تر دارد، بیشتر است. بدین‌ترتیب گرافیت نوع دوم درمقایسه‌با گرافیت نوع اول مقاومت کمتری در برابر شکستگی دارد [۵].

بنابراین برای مطالعهٔ اتصال گرافیت-گرافیت، درمورد گرافیت نوع دوم، روش پیچ‌ومهره کردن قطعات به یکدیگر

جدول ۱. برخی داده‌های فنی گرافیت EK.20 و EK.40 [۴].

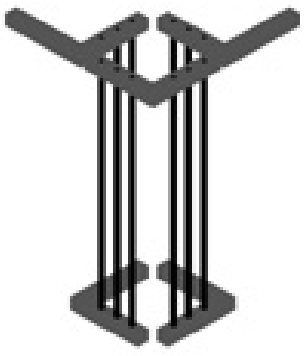
Type	Density (g/cm^3)	Young's Modulus MPa	Hardness HR	Thermal Conductivity W/m K	Temperature Resistance (°C)		Porosity %
					In Ox. Atm.	In Red. Atm	
EK.20	1.70	22000	105	12	400	1200	11
EK.40	1.68	9000	95	25	500	2500	14

1. Fracture Toughness.
2. Griffith.

درنظرگرفته شد [۳]. بدین‌منظور دو انتهای میل‌گرد گرافیت دنده شد و به‌صورت پیچ درآمد. سوراخ‌های روی تودهٔ گرافیت نیز قلاویز شدند و مهرهٔ اتصال را ایجاد کردند. ازآنجا که میله‌های گرافیت باید در دسته‌های سه‌تایی به‌صورت همزمان در دو تودهٔ گرافیتی دو انتها پیچیده و محکم می‌شدند، ضروری بود که دندانه‌های پیچ در یک انتهای میله چپ‌گرد و در انتهای دیگر راست‌گرد باشد. همچنین جهت گردش پیچ در توده‌های گرافیت دو انتهای میله نیز هماهنگ با جهت گردش پیچ ایجاد شده روی میله‌ها اجرا شد. باتوجه‌به شکنندگی بالای گرافیت و نیاز به دقت بالا در اجرای دندانه‌های پیچ به‌صورت موازی و هم‌محور، از دستگاه تراش برای اجرای پیچ روی میل‌گردها و از دستگاه فرز برای اجرای سوراخ با فواصل یکسان و موازی با هم روی تودهٔ گرافیت استفاده شد. بنابراین پیچ و مهره در قسمت‌هایی از خود قطعات گرافیت با اندازهٔ M5 ایجاد شد. این‌بار نتایج به‌دست آمده از گرافیت نوع دوم مطلوب‌تر از نتایج حاصل از گرافیت نوع اول بود؛ زیرا انجام عملیات ماشین‌کاری روی گرافیت نوع دوم به‌دلیل سختی کمتر آن راحت‌تر صورت گرفت و در انتها قطعات‌طراحی شده به‌خوبی ماشین‌کاری شده و ساختار شکل ۱ـب تهیه شد. طرح مجموعهٔ گرافیت و المنت‌برپا شده از قطعات گرافیت EK40 را در شکل ۱ ملاحظه می‌کنید.

ازآنجاکه مجموعهٔ برپاشده بسیار شکننده و آسیب‌پذیر است، برای پرهیز از ایجاد هرگونه خسارت در آن به‌جای اتصال مستقیم ترمینال‌های تعبیه‌شده به منبع جریان، از کابل‌های مسی پرچ‌شده در گرافیت استفاده شد. اتصال‌های گرافیت به مس هنگام آزمایش مطالعه شد و برای تغذیهٔ الکتریکی از کیفیت خوبی برخوردار بود.

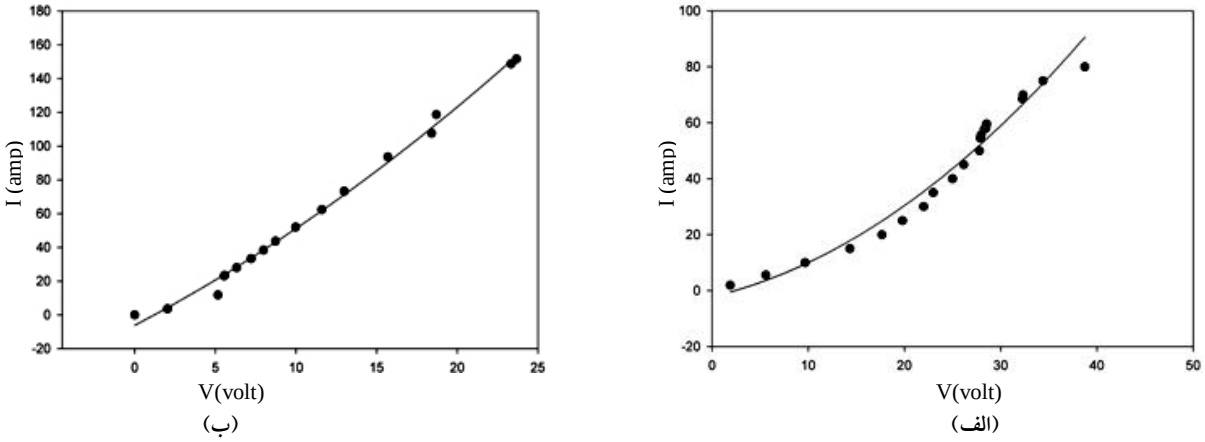
برای انجام آزمایش از محفظهٔ خلأ استفاده شد که صرفاً به‌همین منظور در مرکز تحقیقات گداخت هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران به‌دست مؤلفان این گزارش طراحی و ساخته شده است. برای تغذیهٔ الکتریکی المنت نیز از یک دستگاه ژنراتور برق مستقیم استفاده شد که توان تولید ولتاژ مستقیم ۵۰V با جریان حداکثر ٤۰۰A دارد. در ابتدای آزمایش از یک میله گرافیتی برای مطالعهٔ چگونگی عبور جریان و رسم مشخصهٔ ولت‌ـآمپر استفاده شد که نتایج آن در نمودار شکل ۲ـالف آمده است. پنجرهٔ شیشه‌ای تعبیه‌شده در بالای محفظهٔ خلأ امکان مشاهدهٔ وضعیت المنت را دراثر عبور جریان الکتریکی فراهم می‌کند. بدین‌ترتیب داغ‌شدن و تغییر رنگ و



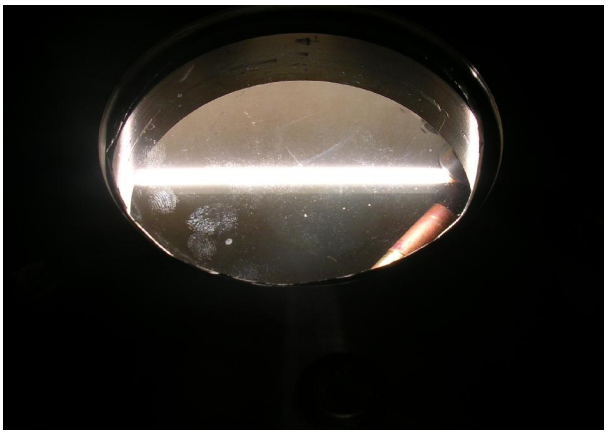
(الف)

(ب)

شکل ۱. (الف) مجموعهٔ گرافیت طراحی‌شده و **(ب)** مجموعهٔ المنت ساخته‌شده از گرافیت EK40.



شکل ۲. **(الف)** نمودار ولت_آمپر یک میلهٔ گرافیت و **(ب)** نمودار ولت_آمپر مجموعهٔ المنت گرافیت.



شکل ۳. یک میلهٔ گرافیت نوع دوم هنگام عبور جریان.

نورگسیل‌شده از المنت کنترل شد. در جریان حدود ۱۵۰ آمپر المنت گرافیت مانند لامپ روشنایی به رنگ زرد درآمد و نور گسیل می‌کرد (شکل۳).

پس‌از این آزمایش باید کیفیت عبور جریان از محل اتصال گرافیت به گرافیت تجربه شود. بدین‌منظور یکی از میله‌های موجود به‌همان روش پیچ و مهره به یک تودهٔ گرافیت متصل شد و مجموعهٔ داخل محفظه و بین ترمینال‌های تأمین‌کنندهٔ جریان محکم شد. با عبور جریان بالا دوباره میلهٔ گرافیت به‌همان وضعیت التهاب قبل رسید و در محل اتصال دو قطعهٔ گرافیت به یکدیگر نیز هیچ‌گونه مشکلی ازجمله پدیدهٔ قوس‌الکتریکی یا داغ‌شدگی بیش‌ازحد در نقطهٔ خاص اتصال، مشاهده نشد. با حصول نتایج مطلوب این آزمایش، مجموعهٔ اصلی تهیه شده از

گرافیت درون محفظه قرار گرفت.

از جرم ریختنی[۳] A_18 که در دمای ۱۸۰۰°C مقاومت دارد، پایه‌ای برای مجموعهٔ گرافیت تهیه‌شد و المنت به‌همراه پایه درون محفظه قرار گرفت. اتصال مجموعه به ترمینال‌های جریان نیز ازطریق کابل‌های مسی پرچ‌شده در گرافیت برقرارشد. مشخصهٔ ولتاژ-جریان مجموعه در نمودار شکل ۲-ب آمده است. نتایج به‌دست‌آمده مؤید این مطلب است که مجموعهٔ تهیه‌شده از گرافیت برای استفاده به‌صورت المنت حرارتی کوره و به‌دست‌آوردن دماهای بالا (در محدودهٔ ۱۷۰۰°C) مناسب است.

تقدیر و تشکر

موفقیت خود را در حصول نتایج رضایت‌بخش این فعالیت‌ها مدیون حمایت و پشتیبانی جناب آقای دکتر فرهبد ریاست محترم وقت مرکز تحقیقات گداخت هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران هستیم که بدین وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را به ایشان اعلام می‌نماییم. از جناب آقای رضا جلالوند نیزبه‌دلیل زحمات و همکاری بی‌دریغشان در ساخت محفظهٔ خلأ و تراشکاری قطعات گرافیت، کمال تشکر را داریم. همچنین از جناب آقای علی علیمحمدی به‌دلیل همکاری ارزشمند ایشان در جوشکاری قطعات استیل محفظهٔ خلأ سپاسگزاریم.

مراجع

1. “Heating Systems in Specialty Graphite for Electric Heating of High-Temperature Furnaces”, A Catalogue by SGL Carbon Group.
2. Axelrad, D. R., “A High Temperature Furnace for…”, ***J. Sci. Instrum***, Vol. 39 (1962) 640-641.
3. United States Patent, Baumann et al., “Carbon Electrodes and Connection Elements of the Electrodes Having Directionally Structured Contact Surfaces”, Patent No: US 6, 925, 104 B2(August 2005).
4. Data Sheet from “Specialty Graphite from SGL Carbon”.
5. Encyclopedia, The Free Dictionary, Web page address http://encyclopedia.thefreedictionary.com
6. A-18 Castable Material Specifications by Rah Sanat Company, www.rahsanat.com.

۳. جرم ریختنی A.18 ازجمله مواد عایق و مقاوم دربرابر حرارت است که به‌طریق ریخته‌گری به شکل و اندازهٔ دلخواه تهیه می‌شود. حداکثر دمای قابل تحمل این ماده پس از قالب‌گیری و آماده‌شدن ۱۸۲۰°C است و برای تهیهٔ خمیر ریخته‌گری آن به ازاء هر ۱۰ کیلوگرم پودر ۱ لیتر آب لازم است. چگالی تودهٔ ریخته‌گری‌شدهٔ این ماده در ۱۱۰°C، ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. محتویات اصلی پودر اولیهٔ این ماده اکسید آلومینیوم به میزان ۹۴٪، اکسید کلسیم به‌میزان ۵/۵٪ و اکسید آهن به‌میزان ۰/۱٪ است [۶].