ضرورت انجام آزمون های Out of Pile سوخت هسته‌ای از تئوری تا انجام آزمایش

INC29-1294

زهره همنبرد[۱]، هادی عادلخانی[۲]

۱. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۸۳۶-۱۴۳۹۵کرج- ایران
۲. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵تهران- ایران

چکیده:

ویژگیهای ترموفیزیکی و ترمومکانیکی قرص سوخت از اهمیت زیادی برخوردار است که با انجام آزمایشات Out of Pileتعیین می‌گردد. این آزماشات شامل اندازه‌گیری رفتار شوک حرارتی، خزش و هدایت حرارتی بوده که در حقیقت رفتار سوخت را در صورت وقوع حادثه و تحت تابش اشعه در داخل راکتور پیش‌بینی می‌کند. از طرف دیگر اطلاعات بدست آمده به منظور تهیه کدهای هسته‌ای که جهت پیش‌بینی رفتار سوخت بکار می‌رود، ضروری می‌باشد. با انجام این آزمایش‌ها و تحلیل نتایج بدست‌آمده میتوان رفتار سوخت مصرفی را در صورت وقوع حادثه احتمالی پیش‌بینی و مدیریت نمود. همچنین نتایج بدست‌آمده از این آزمایشات، در طراحی سوخت‌های جدید نیز اهمیت دارد و میزان کارکرد مفید سوخت در راکتور را پیش‌بینی می‌کند.

کلیدواژه‌ها: آزمایشات Out of Pile، قرص سوخت هسته‌ای، رفتار شوک حرارتی، خزش، هدایت حرارتی.

Necessity of Out of Pile tests for Nuclear Fuel:

From theory to Experiments

Zohreh Hamnabard[1*], Hadi Adelkhani[2]
1. Radiation Applications Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, 14395-836, Karaj, Iran
2. Nuclear fuel Cycle Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, 11365-8486, Tehran, Iran

Abstract:

The thermo-physical and thermo-mechanical properties of the fuel pellet are determined by Out of Pile tests. These tests include the measurement of thermal shock behavior, creep and thermal conductivity of nuclear fuel, which predict the behavior of the fuel in an accident and radiation inside the reactor. On the other hand, the obtained information is necessary to nuclear codes that are used to predict fuel behavior. By performing these tests and analyzing the obtained results, it is possible to predict and manage the behavior of fuel in the event of a possible accident. Also, the results obtained from these tests are important in the design of new fuels and predict the useful performance of the fuel in the reactor.

Keywords: Out of Pile tests, Nuclear Fuel, thermal shock behavior, creep and thermal conductivity.

۱. مقدمه:

بطور کلی ویژگیهای ترموفیزیکی و ترمومکانیکی قرص سوخت از اهمیت زیادی برخوردار است که با انجام آزمایشات Out of Pile تعیین می‌گردد. سوخت هسته‌ای در داخل راکتور در شرایط بسیار حاد قرار دارد از جمله تاثیر همزمان دمای بالا، گرادیان دمایی شدید، سرعت بالای شکافت و ایجاد محصولات شکافت، شار نوترونی بالا. در این شرایط پروسه‌های پیچیده شامل واکنشهای حرارتی، مکانیکی، شیمیایی، متالورژیکی به صورت همزمان در داخل سوخت در حال انجام بوده که وقوع همزمان آنها به فرایندهای بسیار پیچیده‌تری منجر خواهد شد. از آنجاییکه برای ارزیابی عملکرد سوخت در داخل راکتور تحت شرایط فوق کدهای متنوع و گاها پیچیده‌ای مورد نیاز است، نتایج بدست آمده از انجام و تحلیل آزمایشات Out of Pile به منظور تهیه دقیق کدهای مربوطه برای پیش‌بینی ویژگیهای ترموفیزیکی و مکانیکی سوخت و غلاف لازم و ضروری است. مهمترین آزمایشات Out of Pile به شرح ذیل است[۱]:

اندازه‌گیری و محاسبه ضریب انبساط حرارتی سوخت و بررسی مقاومت در برابر شوک حرارتی

- خزش (استحکام دمای بالا)
- ضریب هدایت حرارتی

شوک حرارتی عبارت است از تغییرات آنی و سریع دما در یک ماده جامد که نتیجه آن ایجاد تنش داخلی در ماده به دلیل فرایند سرمایش و یا گرمایش سریع است. در حالت گرم شدن تنش‌های کششی در سطح جسم جامد باعث ایجاد ترک می‌شود. در هنگام سرد شدن، تنشهای فشاری بالا در نزدیکی سطح قطعه، منشاء ایجاد تنشهای داخلی و ترک‌های داخلی در جسم می‌شود. این تنش‌ها نتیجه انبساط و انقباض متفاوت ماده در نقاط مختلف است. به‌عبارت دیگرهنگامی‌که یک ماده در معرض تنش کششی و یا فشاری قرار می‌گیرد به ترتیب انبساط و یا انقباض در ماده ایجاد می‌شود. با توجه به دو مفهوم تنش و کرنش می‌توان گفت که اختلاف انبساط و انقباض در جهات مختلف ماده باعث می‌شود که در نقاطی از ماده که تنش واردشده از مقاومت کششی نهایی ماده بیشتر باشد، ترک در بدنه ماده ایجادگردد. اگرعاملی مانع ازانتشار این ترک‌ها نشود، رشد تدریجی ترک‌ها باعث تخریب ساختار ماده می‌شود. با توجه به این که اثرات شوک حرارتی در ماده به روش بازرسی ماکروسکوپی قابل پیگیری است، آزمون شوک حرارتی برای کنترل کیفی سرامیک‌های مهندسی اهمیت زیادی داشته و مقاومت در برابر شوک حرارتی به عنوان یکی از خصوصیات مهم مواد از جمله قرص سوخت هسته‌ای اکسید اورانیم مطرح است. عوامل مختلف از جمله استحکام، ضریب الاستیک ماده و ضریب انبساط حرارتی ماده بر مقدار شوک حرارتی موثر بوده ولی مهم‌ترین ویژگی ماده که بر مقدار شوک حرارتی موثر است ضریب انبساط حرارتی ماده است که قابل اندازه گیری می‌باشد. مقدار شوک حرارتی با رابطه ۱ قابل محاسبه است.

$$\sigma = \frac{E.\alpha.\Delta T}{1-\mu} \qquad (1)$$

که در این رابطه E مدول الاستیک ماده، α ضریب انبساط حرارتی ، ΔT اختلاف دما، μ ضریب پواسون و σ مقدار شوک حرارتی است.

پارامتر مهم بعدی در آزمون Out of Pile سوخت هسته‌ای خزش است[۲]. خزش عبارتست از تغییر شکل پلاستیک ماده نسبت به پارامتر زمان، این پدیده در دماهایی بالاتراز نصف نقطه ذوب ماده و در محدوده تنشی کمتر از حد الاستیک ماده اتفاق می‌افتد. در دمای اتاق(دمای پایین)، خواص کششی اغلب مواد تقریبا مستقل از زمان می‌باشد و با گذشت زمان تغییری در خواص کششی ماده ایجاد نمی‌گردد. اما با افزایش دما، وابستگی استحکام به بار اعمالی و زمان مشاهده می‌شود و در این شرایط و در دمای بالا اکسید اورانیم که تحت بار کششی قرار دارد، با گذشت‌زمان خواص مکانیکی آن از جمله استحکام کاهش یافته و پدیده خزش ظاهر می‌شود .دمایی که در آن خزش اتفاق میافتد به جنس ماده و نقطه ذوب ماده بستگی دارد. دمای ذوب اکسید اورانیم ۲۸۶۵ درجه سانتیگراد است. لذا می‌توان گفت در صورتیکه دمای قرص سوخت به هر دلیل حدود ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد برسد، خزش در این ماده اتفاق خواهد افتاد، البته زمان نیز حائز

اهمیت است. به بیان دیگر می‌توان گفت مفهوم خزش عبارتست از تغییرشکل آهسته، تدریجی و پیوسته ماده با گذشت زمان تحت تنش ثابت که در دماهای بالاتر از دمای اتاق اتفاق می‌افتد. رابطه ای که برای سرعت خزش پیشنهاد می‌شود رابطه سه متغیره بشرح ذیل است:

$$\varepsilon^{\circ} = (\sigma.t.T)$$

در این رابطه ε° سرعت خزش، σ بار اعمال شده بر نمونه، t زمان و T دمای نمونه است.

ارزیابی هدایت حرارتی سوخت یکی از مهم‌ترین پارامترهای سوخت برای تعیین و تخمین درجه حرارت مرکز سوخت نسبت به نواحی اطراف آن است. رفتار هدایت‌حرارتی سوخت در حقیقت نحوه انتشار محصولات شکافت را از لحاظ مکانیزم‌های غالب دیفوزیون و یا انتشار آن، رفتار خزش در سوخت و میزان بادکردگی‌سوخت، ایجاد ریزساختارهای جدید در سوخت، نحوه توزیع محصولات شکافت را ارزیابی می‌کند که همگی این اتفاقات در سوخت به پارامتر دمای سوخت و نحوه توزیع پارامتر دما در اکسید اورانیم بستگی دارد و این مسئله تنها ازطریق اندازه‌گیری هدایت‌حرارتی سوخت قابل تحلیل و ارزیابی و تحلیل نتایج حاصل جهت اتخاذ تصمیم مناسب در مواقع ضروری میباشد[۳].

۲. روش کار

در مراجع مختلف و معتبر رو شهای مختلفی برای اندازه‌گیری پارامترهای ا شاره شده آورده شده ا ست. اکسید اورانیم بعنوان یک سرامیک هسته‌ای تحت تاثیر دما و تشعشع بطور همزمان قرار دارد. لذا با توجه به تاثیر تشعشع بر ویژگی های فوق، روش‌های ویژه‌ای برای اندازه‌گیری و بررسی رفتار اکسید اورانیم در نظر گرفته شده که در استانداردهای هسته‌ای، مراکز تولیدکنند سوخت هسته‌ای و اسناد آژانس بین المللی انرژی اتمی شرح داده شده است.

معمولا آزمون شوک حرارتی قرص‌های سوخت اکسید اورانیم(UO_2) تا دمای 433°C در اتمسفر هوا و در دماهای بیشتر برای جلوگیری از اکسیداسیون سطحی و همچنین اطمینان از عدم تغییر نسبت اکسیژن به اورانیوم „(O/U) در اتمسفر کنترل شده خنثی (با خلوص بالا و فاقد اکسیژن و رطوبت) انجام میگردد[۴]. در جدول ۱ مشخصات قرصهای سوخت اکسید اورانیم(UO_2) که در آزمون شوک حرارتی اهمیت دارند ارائه شده است. در سند TE-1416 آزمون شوک حرارتی به عنوان یک آزمون مهم برای قرصهای سوخت در گروه آزمون های out of pile معرفی شده است[۵].

جدول ۱: مشخصات قرص اکسید اورانیم مورد استفاده درآزمون شوک حرارتی

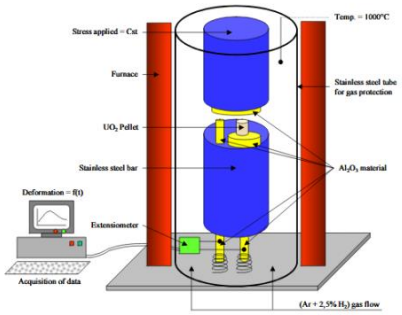
Fracture Surface Energy(j/m^2)	**G=4**
Thermal Conductivity(W/m^{2}C)	**K=(0.117+2.65*10^{-4}T) +2.14*10^{-11}(T+273)^3**
Thermal Expansion(1/^{o}C)	**α=8.37*10^{-6}+4.06*10^{-9}T**
Young's Modulus(Pa)	**E=2.26*10^{11}(1-1.131*10^{-4}T) (1-2.62P)**
Poisson's ratio	**υ=0.316**
Surface heat transfer coeff. (W/m^{2}C)	**H=4.187*10^3**

P: Porosity T: Temperature(^{o}C)

اما در مورد خزش مدلهای تئوری مختلفی ارائه شده است. یکی از معتبرترین مدلهای رفتار خزش در اکسید اوراننیم که اهمیت تنش و میزان آنرا در خزش بیان می کند، بر ا ساس نفوذ جاهای خالی در تنش‌های پایین و صعود نابجاییها در تنش‌های بالا است. این در حالیست که همزمان تشعشع و در نتیجه محصول شکافت سبب تشکیل عیوب نقطه‌ای در

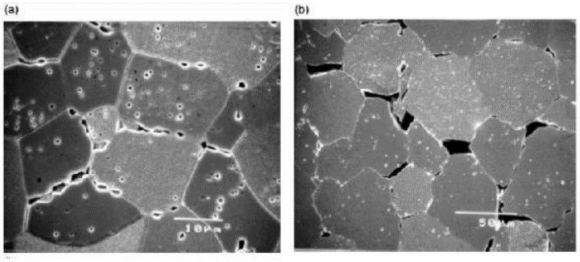
ریز ساختار اکسید اورانیم شده که سبب تغییر سرعت خزش خواهد شد. اما در حالت کلی برای اندازه‌گیری خزش از دستگاه کشش دمای بالا استفاده می‌شود.

در شکل ۱ تصویر شماتیک دستگاه اندازه‌گیری خزش اکسید اورانیم نشان داده شده است.



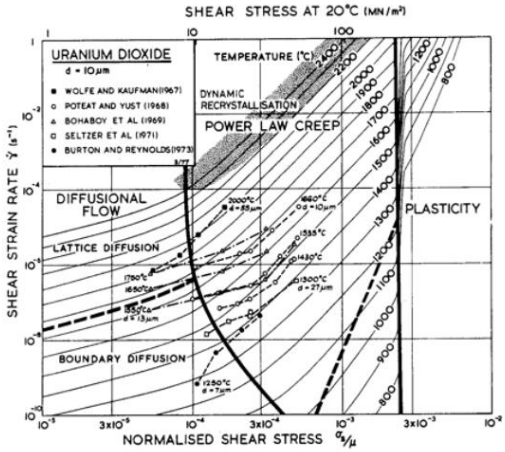
شکل ۱: نمایش شماتیک دستگاه خزش

همانطور که در تصویر مشاهده می‌گردد نمونه مورد آزمایش به‌شکل قرص در محل مورد نظر قرار گرفته، تنش اعمال‌شده از دو فک بالایی و پایینی به نمونه وارد می‌گردد. دمای آزمایش توسط یک کوره در اطراف نمونه کنترل می‌گردد. در نهایت منحنی تغییر شکل نمونه که سرعت کرنش و خزش را نشان میدهد، ثبت می‌گردد. در شکل ۲ تاثیر تشعشع و بار اعمال شده بصورت همزمان بر تجمع عیوب نقطه‌ای و حفره در مرز دانه نشان داده شده است.



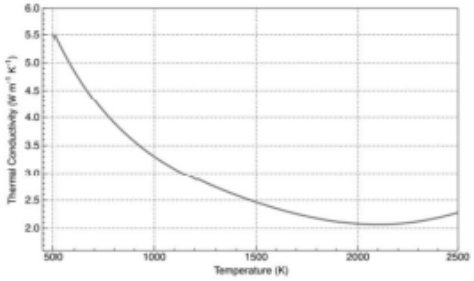
شکل ۲: تصویر SEM از نمونه اکسید اورانیم اندازه دانه ۱۰ میکرون تحت آزمایش خزش در دمای ۱۴۶۵ درجه سانتیگراد a) بار ۲۵ مگاپاسکال b) بار ۵۰ مگاپاسکال[۶].

از آنجاییکه خزش با مکانیزم های مختلف بر حسب دما و تنش اعمال شده در نمونه اتفاق می‌افتد منحنی رفتار خزشی مواد مختلف رسم می‌گردد. در شکل ۳ الگوی تنش-سرعت کرنش اکسید اورانیم نشان داده شده است. این منحنی توسط گروهی از محققین تهیه و ارائه شده است و شرایط وقوع خزش و مکانیزم های غالب خزش را در شرایط مختلف دما-زمان-تنش در اکسید اورانیم نشان می‌دهد.



شکل ۳: الگوی تنش-سرعت کرنش در $UO_{2.00}$ با اندازه دانه ۱۰ میکرون(۶)

یکی دیگر از مهمترین فاکتورهای حرارتی سوخت هسته‌ای، هدایت حرارتی آن است. به جرات میتوان گفت مهمترین ویژگی ترموفیزیکی ماده‌ای که در دمای بالا کاربرد دارد ویژگی هدایت حرارتی آن است. در صنعت هسته‌ای اهمیت هدایت حرارتی را میتوان از جنبه‌های میزان گرادیان حرارتی سوخت، افزایش راندمان غلاف و مبدلهای حرارتی و ارزیابی انتقال حرارت در سوختهای لایه‌ای برشمرد.(۷) شکل ۴ کاهش شدید هدایت حرارتی اکسید اورانیم را با افزایش دما نشان می دهد.



شکل ۴: تغییرات هدایت حرارتی اکسید اورانیم با دما(۸)

۵. نتیجه‌گیری

یکی از موضوعات بسیار مهم برای ایمنی راکتور هسته‌ای، آگاهی از یکپارچگی خواص فیزیکی سوخت هسته‌ای طی عملکرد آن در راکتور است. ارزیابی خواص ترمومکانیکی و ترموفیزیکی سوخت هسته‌ای با عنوان آزمون های Out of Pile قبل از قراردادن سوخت در داخل راکتور در مراکز تولید سوخت هستای انجام می‌گردد . این آزمونها کاملا با آزمونهای کنترل کیفی سوخت متفاوت بوده و شامل اندازه گیری هدایت حرارتی سوخت در دماهای مختلف، اتحلیل رفتار خزشی سوخت و اندازه پیری میزان شوک حرارتی سوخت می‌باشد.

۶. تشکر و قدردانی

بدینوسیله نویسندگان مقاله از شرکت سوره که حمایت مالی انجام پروژه Out of Pile را بر عهده داشته‌اند قدردانی و تشکر مینماید.

۷- منابع و مراجع:

1- J.K. Fink ”Review: Thermophysical properties of uranium dioxide" Journal of Nuclear Materials 279 (2000) 1-18.
2- Thermophysical and thermochemical properties of fast reactor materials, Report No.EUR 12402 EN, Commission of the European Communities, nuclear science andTechnology.
3- Rodriguez, P..,’ Mixed plutonium-uranium carbide fuel in fast breeder test reactor, Reference Number 30052816, IAEA,1999.
4- Nuclear Fuel Behavior in Loss-of-coolant Accident (LOCA) Conditions, NEA No.6846 (2009).
5- ASTM C1525-04, “Standard Test Method for Determination of Thermal ShockResistance for Advanced Ceramics by Water Quenching” ASTM International, (2004).
6- C. Ronchi, M. Sheindlin, M. Musella, and G. J. Hyland’ Thermal conductivity of uranium dioxide up to 2900 K from simultaneous measurement of the heat capacity and thermaldiffusivity’ Journal of Applied Physics 85, 776 (1999); doi: 10.1063/1.369159.
7- Harold J Frost, Dartmouth College, USA, and Michael F Ashby’ DeformationMechanism Maps, The Plasticity and Creep of Metals andCeramics’ Cambridge University,UK., https://engineering.dartmouth.edu/defmech/.
8- O.D. SLAGLE,’ Deformation Behavior of U02 Above 2000₀C’J.Am.Ceram.Soc.,1983.