نشریه علمی سازمان انرژی اتمی ایران
شماره ۱۸، صفحات ۱۷ - ۹، ۱۳۷۸

ریخته‌گری و بررسی ضایعات پرتودهی به آلیاژهای آلومینیوم سری ۸۰۰۱ برای مصارف ساختکاری رآکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی

اکرم‌السادات حسینی، حمید منصوری،
بخش مواد هسته‌ای، مرکز تحقیقات کشاورزی و پزشکی هسته‌ای کرج، سازمان انرژی اتمی ایران
رضا محمودی، دانشیار انستیتو مواد دانشکدهٔ فنی دانشگاه تهران

چکیده

کاربرد مواد در علوم و فنون هسته‌ای از جملهٔ مهمترین مسائل صنعت هسته‌ای است. زیرا در این کاربرد، تنها خواص خوب مکانیکی، حرارتی، الکتریکی و غیره موردنظر نیستند، بلکه چگونگی رفتار این مواد تحت اثر تابش هسته‌ای و تغییراتی که در ساختار بلوری و در نتیجه، در خواص نهایی آنها ظاهر می‌شود نیز دارای اهمّیت خاص است. بررسی اثرهای تابش هسته‌ای بر فلزات و آلیاژهایی که در صنعت هسته‌ای زیاد بکار می‌روند، راه را برای انتخاب بهینهٔ این مواد هموار ساخته است و با پیشرفت صنعت هسته‌ای، این بررسیها ابعاد پیچیده‌تری بخود می‌گیرند. انجام دادن آزمایش‌های عملی برای تعیین نابهنجاریهای ناشی از تابش در خواص مکانیکی این آلیاژها مانند بالا رفتن نقطه تسلیم و استحکام ،کاهش انعطاف‌پذیری و کاهش مقاومت در برابر ضربه و چقرمگی شکست را می‌توان نخستین اقدام در برآورد و ارزیابی پایداری مکانیکی و کارآیی مفید این آلیاژها در رآکتورهای هسته‌ای به حساب آورد. آلومینیوم و آلیاژهای آن با توجّه به ویژگیهای مکانیکی و مقاومت در برابر خوردگی، در فناوری هسته‌ای کاربرد بسیار دارند. از آلیاژهای آلومینیوم برای پوشش سوخت، کانالها، لوله‌ها و مخزن رآکتورها در محیط کاری تا دمای C ۲۰۰° استفاده می‌شود. در اجرای این پروژه، ساخت آلیاژ ۸۰۰۱ به روش ریخته گری، عملیات گرما-مکانیکی، تهیهٔ نمونه‌های کششی استاندارد، پرتودهی نوترونی بادُزهای مختلف، انجام آزمایشها برروی خواص مکانیکی آلیاژ به منظور بررسی اثرهای تخریبی تابش موردنظر بوده و نتایج حاصل عرضه شده‌اند.

مقدمه

چون در ساخت رآکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی، آلومینیوم به عنوان مهمترین فلز برای غلاف سوخت هسته‌ای بکار می‌رود، ارزیابی پایداری مکانیکی و کارایی مفید این فلز، به ویژه به صورت آلیاژ دارای اهمیت خاص است [۱]. در پی یک رشته تحقیقات برروی مواد ساختکاری رآکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی [۲ و ۳]، آلیاژ جدیدی از آلومینیوم به نام (AA8001) به توسّط کمپانی وستینگهاوس [۴] در ساختکار رآکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی درکنار آلیاژهای آلومینیومی (AA1100)، (AA6061) و (AA6063) در ساخت غلاف و سایر قسمتهای مجتمع سوخت با موفّقیت بکار می‌رود که به علّت آگاهی از مقاومت خوب آن در برابر تابش مورد توجه است. در ایران، یک کار تحقیقاتی در سال ۱۳۷۱ روی آلیاژ 1100 خیلی خالص[۱]، و آلیاژهای 6061 و 6063 وارداتی، در مرکز تحقیقات هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران انجام شده است [۵]، و تحقیقات دربارهٔ اثر تابشهای هسته‌ای بر ساختار بلوری آلیاژهای ساختکاری آلومینیوم و نتایج حاصل از آن با این پروژهٔ ادامه می‌یابد. رآکتورهای هسته‌ای را

۱-Nuclear Grade

برحسب موارد کاربرد به دو دسته تقسیم می‌کنند: دسته اول رآکتورهای قدرت هستند که در آنها نوترونهای حاصل از شکافت، برای تولید حرارت بکار می‌روند؛ دسته دوم رآکتورهایی هستند که در آنها تمام یا قسمتی از نوترونهای اضافی برای هدفهایی غیر از ایجاد انرژی حرارتی مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ رآکتورهای پژوهشی و رآکتورهای آزمون مواد از این دسته‌اند. دمای حین کار در اغلب رآکتورهای پژوهشی در مقایسه با رآکتورهای قدرت نسبتاً پایین است. در انتخاب مواد ساختکاری در یک رآکتور هسته‌ای، برحسب آنکه در قلب رآکتور یا در اطراف آن و یا در سیستم انتقال حرارت کاربرد داشته باشند باید در آن مواد به خاصیتهایی از جمله: جذب نوترون کم، مقاومت و استحکام مکانیکی در دمای حین کار، سازگاری با سوخت، حسّاسیت کم در مقابل خوردگی، رادیوآکتیویته القایی کم، خواص حرارتی مناسب، قابلیت ساخت و قابلیت جوشکاری خوب توجّه نمود. مواد ساختکاری در مهندسی هسته‌ای عموماً از فلزات خاص و آلیاژهای آنها برگزیده می‌شوند، زیرا آلیاژهای این فلزات در ترکیب استحکام با انعطاف‌پذیری کافی و کرنش[۲] – سختی، بخوبی شناخته شده‌اند. متالوژی آلیاژها، نحوه تولید و عملیات مکانیکی انجام یافته برروی آنها از اهمیت بسیاری برخوردارند. آلیاژ آلومینیوم سری ۶۰۶۱ (شامل ۱ درصد منیزیوم، ۰/۶ درصد سیلیسیوم، ۰/۲۵ درصد مس و ۰/۲۵ درصد کروم) برای غلاف سوخت در رآکتورهای تحقیقاتی بکار می‌رود [۳]. دمای خنک‌کننده در این رآکتورها معمولاً حدود ۱۰۰ درجه سانتیگراد یا پایین‌تر، و بالاترین دمای آن ۲۵۰ درجه سانتیگراد است، بنابراین، خوردگی مشکل عمده‌ای محسوب نمی‌شود.

اندرکنشهای بین مواد ساختکاری وتابشهای موجود در رآکتورهای هسته‌ای ممکن است تغییرات قابل توجّهی در خواص این مواد پدید آورد. اثر پرتوها بر مواد موردنظر، متفاوت است. این تفاوت تا حدی ناشی از انواع مختلف پیوندهای شیمیایی و ساختار درونی آنها است. در رآکتورهای هسته‌ای، اثر برهمکنش نوترون و هستهٔ اتم دارای اهمّیت خاص است. الکترونها و پروتونها در این برهمکنش نقش مؤثری ندارند. تابش نوترون به ویژه نوترون سریع، در فلزات و آلیاژها نابهنجاریهای زیادی ایجاد می‌کند که اثر ظاهری آن تغییر خواص مکانیکی و فیزیکی فلز یا آلیاژ است. مثلاً وقتی نوترونی با انرژی حدود ۲ MeV به فلز برخوردکند در مدتی حدود 10^{-12} ثانیه انرژی آن به ۱۰۰ eV تقلیل می‌یابد. انرژی از دست‌رفته به اتمهایی از شبکهٔ بلورین منتقل می‌شود. این اتمها، در اثر دریافت انرژی ممکن است محل خود را ترک کرده به مکان میان‌نشین[۳] بروند. با این عمل تهیجای ایجاد می‌شود (نقص فرانکل). این نقص وقتی پایدار می‌ماند که اتم به فاصله‌ای بیش از ثابت شبکه پرتاب شود. اتم‌هایی که از جای خود در شبکه خارج می‌شوند به نوبهٔ خود اتم‌های دیگر را به حالت برانگیخته درمی‌آورند یا آنها را از جای خود به خارج پرتاب می‌کنند، به طوری‌که ممکن است در اثر برخورد اولیهٔ نوترون، حوزهٔ به‌هم‌خورده‌ای از اتم‌های خارج شده بوجود آید، یعنی اتم‌ها در این حوزه نسبت به مکان اوّلیه خود جابجا شوند. به همین جهت آنرا تیزهٔ جابجایی[۴] نامیده‌اند [۶ و ۷].

به طورکلی آسیب‌های ناشی از تابش رادیوآکتیو را به سه دسته تقسیم می‌کنند. دستهٔ اول شکسته‌شدن باندهای شیمیایی است که اتم‌ها را درکنار یکدیگر نگاه می‌دارند. این نوع آسیب، در مورد مواد آلی به شدت مخرب است، امّا فلزّات

۲- Strain

۳- Interstitial

۴- Displacement Spike

ازآن مصون هستند. دستهٔ دوم آسیب ناشی از برخوردهای رودررو[۵] است که در اثر آن اتم‌های تشکیل‌دهندهٔ ماده از جاهای خود به وسیلهٔ ضربهٔ ذرّات هسته‌ای کنده شده و تهیجای بوجود می‌آید. نوع سوم آسیبهای ناشی از انجام واکنش هسته‌ای است که از میان آنها، اثر دگرگونیهای هسته‌ای و تحریک هسته‌ها موردنظر است. در اثر دگرگونیهای هسته‌ای، ناخالصی‌هائی در مواد بوجود می‌آیند. که در میان آنها گازهای بی‌اثر مانند کریپتون، گزنون و هلیوم مضر بوده و موجب شکنندگی ماده می‌شوند. یکی از عوامل مهّم در بررسی آسیبهای ناشی از اثر تابشهای هسته‌ای بر مواد ساختکاری، نرخ جابجایی K است که با جابجایی یک اتم در ثانیه[۶] اندازه گیری و به صورت $K = \sigma_d.\phi$ تعریف می‌شود، که در آن ϕ شار کل ذرات تابش‌شده و σ_d سطح مقطع جابجایی اتم‌های شبکه بلوری است. تعداد دفعاتی که اتم در زمان پرتوگیری t جابجا می‌شود از رابطهٔ $d.p.a = \sigma_d.\phi.t$ حساب می‌شود.

خلاصه، پرتودهی به مواد جامد ممکن است در تغییر ابعاد، شکل، چگالی و سایر خواص فیزیکی مواد متبلور مؤثّر باشد. امّا تغییراتی که در خواص مکانیکی فلزات و آلیاژها، به علت پیدایش تعداد زیادی تهیجای و اتمهای میان‌نشین، در شبکه بلوری به وجود می‌آیند، از مهمترین تغییرات در خواص مواد، بعد از پرتودهی نوترونی به شمار می‌روند. افزوده‌شدن استحکام نهایی، تنش تسلیم، سختی، شکنندگی و ضریب کشسانی (الاستیسیته)، همچنین کاهش نرمی و کاهش مقاومت در برابر ضربه، از جملهٔ مهمترین تغییرات خواص مکانیکی گزارش شده است. علاوه‌براین، پیدایش واکنشهای هسته‌ای باعث دگرگونیهائی در اجزای تشکیل‌دهندهٔ مادّهٔ ساختکاری می‌شود که ایجاد گازهائی مانند هیدروژن و هلیوم از آن جمله‌اند. تجمّع این گازها به صورت حبابهای گازی به ویژه روی مرز دانه‌ها، سبب شکنندگی آلیاژ (تردی هیدروژنی) می‌شود.

روش کار

چون آلیاژ AA8001 در ایران موجود نبود، برای اجرای پروژهٔ موردنظر، ریخته گری این آلیاژ و دستیابی به نزدیکترین ترکیب شیمیایی آن، در مقایسه با آلیاژ ۸۰۰۱ وستینگهاوس، نخستین مرحلهٔ کار ما بود. برای این منظور، از آلومینیوم تجارتی 1100 (که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ مندرج است) و نیکل خالص مرک به صورت ساچمه، استفاده شد. برای تهیهٔ آلیاژ، مقدار معیّنی آلومینیوم تجارتی را در بوته درون‌کوره ذوب کرده و مقدار نیکل لازم را با حدود یک درصد نیکل ساچمه‌ای در ورقهٔ آلومینیومی پیچیده به مذاب اضافه کردیم. پس از حل شدن نیکل در مذاب، عملیات گاززدایی به وسیلهٔ دستگاه گاززدا صورت گرفت. با افزودن مواد جوانه‌زای تیتانیوم به مذاب، آنرا در قالب ریخته گری به شکل تختال ریختیم. بعد از سردشدن شمش حاصل، برای جلوگیری از ایجاد عیبهای انقباضی، آنرا به صورت قطعات نمونه به ضخامت دوسانتیمتر بریدیم. برای همگن کردن ترکیب، قطعات بریده شده را درکاغذ آلومینیومی پیچیده و به مدت ده ساعت در دمای ۵۶۰°C تحت عملیات حرارتی بازپخت قرار دادیم و آنها را پس از عمل بازپخت در داخل کوره سرد کردیم. چون قطعات بریده شده دارای ضخامت زیاد بودند، عملیات نورد سرد روی نمونه‌ها اعمال شد تا به ضخامت استاندارد (حدود ۲ میلی‌متر) دست یابیم. سپس در دمای ۴۵۰°C نمونه‌ها به مدت سه ساعت دوباره بازپخت

۵- Knock-on collisions

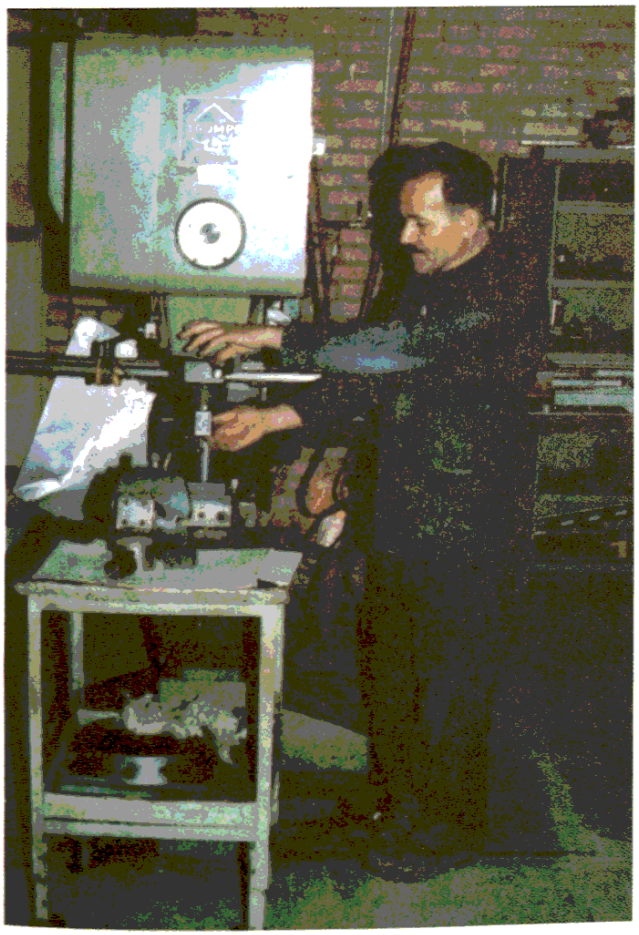
۶- Displacement per atmos per second = $dpas^{-1}$

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلومینیوم تجارتی خالص

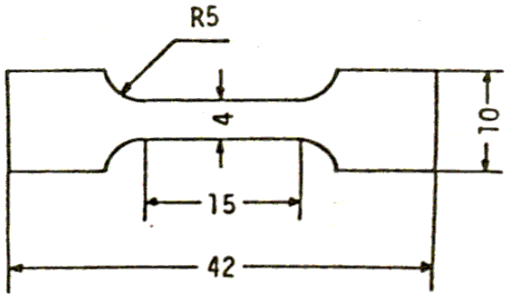
Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Al
۰/۲	۰/۵	۰/۲۱	۰/۰۵	-	۰/۱	۰/۰۵	bal

شدند. برای تهیهٔ نمونه‌های کشش، از قالب سنبهٔ ماتریس پانچ (شکل ۱) که در کارگاه آهنگری و تراشکاری سازمان انرژی اتمی ایران ساخته شده بود استفاده شد. نمونه‌های تهیه شده، بار دیگر به مدت سه ساعت در دمای ۴۰۰°C، به منظور رفع عیبهای نقطه‌ای ونابجایی‌های خطی بازپخت شدند.

برای قراردادن نمونه‌ها در محوطه قلب رآکتور، از یک کپسول آلومینیومی خالص به ارتفاع ۸ سانتیمتر و به قطر دهانه ۲/۲ سانتی‌متر استفاده شد. انتخاب آلومینیوم خالص به عنوان ظرف نمونه، به مناسبت کوچک بودن ضریب جذب نوترونی آن است. چون هدف عمدهٔ این پروژه بررسی تغییرات خواص مکانیکی به ویژه آزمون کشش نمونه‌ها بعد از پرتودهی بوده است، ابتدا اقدام به اندازه‌گیری استحکام کششی نمونه‌های آزمایشی شد. نمونه‌های آزمایشی برطبق استاندارد ASTM E8-69 (شکل ۲) تهیه شدند. نمونه‌های شاهد و نمونه‌های پرتودیده با دستگاه کشش ده تنی انستیتو مواد دانشگاه تهران مورد آزمایش قرار گرفتند. به منظور مقایسه نتایج حاصل، شرایط آزمایش اعمّ از دما، سرعت کشش، یا بعبارت دیگر، سرعت کرنش، برای کلیّهٔ نمونه‌ها ثابت گرفته شدند. آزمایشها دردمای اتاق انجام گرفتند، کل بار ۱ KN، سرعت حرکت فک ۲ mm/min و سرعت حرکت



شکل ۱- قالب سنبهٔ ماتریس تهیه شده برای آماده‌سازی نمونه‌های کشش



ابعاد نمونه (mm)

شکل ۲- مشخصات نمونه استاندارد برای آزمون کشش

کاغذ رسم نمودار mm/min ۵۰ بوده است. سپس با توجّه به نموداربارگذاری و تغییر طول، میزان e (کرنش مهندسی) و s (تنش مهندسی) محاسبه و نمودار آن ترسیم گردید. ۲۴ نمونهٔ آزمایشی به دو دسته تقسیم و در دو مدت ۱۵ و ۴۵ روزه برای پرتودهی نوترونی در نظرگرفته شدند در این مدتها، قدرت رآکتور ۳/۵ MW، شار نوترون 10^{13} n/cm^2 و انرژی متوسّط نوترون ۲ MeV (انرژی قلب رآکتور) بوده است.

در نمونه‌هائی که در معرض تابش نوترون قرار می‌گیرند واکنشهای عناصر تشکیل دهندهٔ آنهابا نوترون تولید عناصر رادیوآکتیوی با نیمه‌عمر بالا می‌کند که اثرهای سوء زیست‌شناختی بر افرادی که با این نمونه‌ها تماس دارند خواهند داشت. به همین جهت، با توجّه به ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۸۰۰۱ و نوع عناصر میکروآلیاژی آن (ناخالصیها)، که مهمترین آنها نیکل، آهن، مس و سیلیکون می‌باشد، واکنش‌های هسته‌ای بین نوترونها و آلومینیوم و عناصر میکروآلیاژی آن بررسی شدند تا هسته‌های رادیوآکتیو تابش کنندهٔ بتا وگاما بعد از پرتودهی نمونه‌ها مشخص شوند؛ در این بررسی، عناصر رادیوآکتیو و پایدار Ni^{60}، Fe^{55}، Fe^{58}، Co^{59} به ترتیب تابش‌کننده‌های بتا، بتا، بتاگاما وگاما با نیمه‌عمرهای ۵/۷۲ سال، ۲/۷ سال، ۷۱ روز و $7/5\times10^4$ سال، مهمترین هسته‌های پرتوزا شناخته شدند. رابطه (۱) نشاندهندهٔ مهمترین واکنش هسته‌ای است که در اثر تابش نوترون حرارتی به آلیاژ آلومینیومی ۸۰۰۱ رخ می‌دهد.

$$^{58}\mathrm{Ni}\,(n,\gamma)\ ^{59}\mathrm{Ni} \xrightarrow{\varepsilon} {}^{59}\mathrm{Co} \qquad (1)$$

نمونه‌ها در موقع خارج شدن از رآکتور، به علت تابش بتا و گاما، اصطلاحاً داغ نامیده می‌شوند به همین جهت، تا آماده‌شدن برای انجام آزمایش کشش، آنها را حدود ۵ ماه در دمای اتاق، درون محفظهٔ سربی نگهداری کردیم؛ در این مدت طی چند مرحله میزان تابش آنها برآورد شد؛ بیشینهٔ تعداد جابجاییها در آلومینیوم به ازای هر برخورد کشسان نوترون ۲ MeV با شار 10^{13} n/cm^2، در مدت‌های ۴۵ و ۱۵ روز محاسبه گردید. انرژی آستانهٔ یونش در فلز برابر $Ei = (1000A)$ می‌باشد که A عدد جرمی فلز است. بالاتر از آن، اتم تصادفی اوّلیه یونیده می‌شود و پایین‌تر از آن فقط جابجایی صورت می‌گیرد. حداقل انرژی لازم برای جابجایی اتمها (Ed)، درکلیه فلزات بین ۲۰ و ۳۰ الکترون ولت و برای آلومینیوم ۲۵ eV در نظرگرفته می‌شود. بنابراین، با توجه به تعریف نرخ جابجایی، تعداد جابجایی‌ها به ازای هر اتم در مدت ۱۵ روز و ۴۵ روز به ترتیب برابر $1/3\times10^6$ و $3/8\times10^6$ حساب شد.

نتایج

جدول ۲، نتیجه تجزیهٔ شیمیایی شمش ریخته شده از آلیاژ آلومینیوم ۸۰۰۱ راکه به وسیلهٔ روش کوانتومی تجزیه و به روش آنالیز PIXE[۷] کِترل مجدد شده است نشان می‌دهد. ترکیب شیمیایی آلیاژ ریخته‌شده نزدیک به ترکیب داده شده برای این آلیاژ در Metals Handbook است [۸].

۷- Proton Induced X ray Emission

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آلیاژ ۸۰۰۱ ریخته شده

Si	Fe	Cu	Ni	Zn	Cr	Pb	Co	Ti	Al
۰/۲۸	۰/۵۵	۰/۲۵	۰/۹۰۲	۰/۰۳۵	۰/۰۰۲	۰/۰۴۷	۰/۰۰۷	۰/۰۸۲	۹۸/۰۶

جدول ۳، ترکیب آلیاژ بکاررفته به توسّط شرکت وستینگهاوس را نشان می‌دهد که به منظور مقایسه با آلیاژ ریخته شده دراین جا آورده شده است.

جدول ۳- ترکیب شیمیایی آلیاژ ۸۰۰۱ که به توسّط کمپانی وستینگهاوس در رآکتور Savannah River، در ساخت مجتمع سوخت بکار می‌رود [۴]

Si	Fe	Cu	Ni	Zn	B(max)	Cd(max)	Co(max)	Li(max)	Al
۰/۱۷	۰/۴۵-۰/۷	۰/۱۵	۰/۱۳-۰/۹	۰/۰۰۵	۰/۰۰۱	۰/۰۰۳	۰/۰۰۱	۰/۰۰۸	bal

بعد از پرتودهی نمونه‌ها، روی نمونه‌های شاهد (پرتوندیده) و نمونه‌های پرتودیده آزمونهای سنجش کشش و سختی‌سنجی به عمل آمدند. میانگین نتایج بدست آمده و مقایسه آنها با خواص مکانیکی آلیاژ ۸۰۰۱ که توسّط کمپانی وستینگهاوس بکار می‌رود، در جدول ۴ مندرج است.

جدول ۴- متوسط نتایج حاصل از آزمون کشش و سختی‌سنجی

نوع نمونه‌ها	نقطه تسلیم Mpa	استحکام کششی Mpa	سختی HBN	درصد ازدیاد طول
آلیاژ ۸۰۰۱ وستینگهاوس	۴۰	۱۱۰		۳۰
آلیاژ ۸۰۰۱ همگن شاهد	۵۵	۱۲۱	۲۸/۷	۲۹/۸
نمونه ۱۵ روز پرتودیده (شارکل نوترون $(۱/۳\times۱۰^{۱۹}ncm^{-۲})$	۵۷/۳	۱۱۸/۸۴	۳۲/۴	۲۹/۱
نمونه ۴۵ روز پرتودیده (شارکل نوترون $(۳/۸۸\times۱۰^{۱۹}ncm^{-۲})$	۶۱	۱۲۲	۳۴/۶	۲۶/۷

جدول ۵- نتایج حاصل از بررسی تغییر رفتار مکانیکی آلیاژهای آلومینیوم ۱۱۰۰، ۶۰۶۱ و ۶۰۶۳
قبل و بعد از پرتودهی، (شارکل نوترون $۸/۶۴\times۱۰^{۱۸} ncm^{-۲}$)

نوع آلیاژ	درصد ازدیاد طول	استحکام کششی MPa	نقطه تسلیم MPa	دمای پرتودهی °C
۱۱۰۰ قبل از پرتودهی	۱۴	۹۱	۸۷	۲۰
۱۱۰۰ بعد از پرتودهی	۱۰	۹۴	۹۱	۱۰۰
۶۰۶۱ قبل از پرتودهی	۷	۱۶۴	۱۳۵	۲۰
۶۰۶۱ بعد از پرتودهی	۶	۱۷۰	۱۴۴	۱۰۰
۶۰۶۳ قبل از پرتودهی	۸	۲۰۳	۱۵۲	۲۰
۶۰۶۳ بعد از پرتودهی	۶	۲۰۶	۱۶۴	۱۰۰

بحث

آلیاژ ۸۰۰۱ در مقایسه با سایر آلیاژهای آلومینیوم، مانند ۶۰۶۱ و ۶۰۶۳، استحکام کششی کمتری دارد (جدول ۵)، ولی به علت داشتن حدود یک درصد نیکل، از انعطاف‌پذیری بهتری (حدود دو برابر نسبت به آلیاژ ۱۱۰۰ و حدود ۳ تا ۴ برابر نسبت به آلیاژهای ۶۰۶۱ و ۶۰۶۳) برخوردار است. لذا در ساخت مجتمع میله‌های سوخت بکار می‌رود. اکثر بلورها در اثر پرتوگیری سخت شده و افزایش طول کمتری پیدا می‌کنند و ترد می‌شوند. این تردی در مورد میله‌های سوخت بسیار خطرآفرین است، بنابراین آلیاژ آلومینیوم کاربردی در ساخت میلهٔ سوخت باید از انعطاف‌پذیری کافی برخوردار باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که بر اثر پرتودهی، هم در نقطهٔ تسلیم و هم در استحکام نهایی افزایش مشاهده می‌شود. در واقع، افزایش میزان استحکام نهایی به اندازهٔ افزایش میزان تنش تسلیم نیست و تغییرات تنش تسلیم بعد از پرتودهی بیشتر است. همچنین درصد ازدیاد طول در اثر کشش، بعد از پرتودهی و با افزودن مدت پرتودهی کاهش می‌یابد که امری بدیهی است. افزایش سختی هم در نمونه‌های پرتودیده مشاهده می‌شود. اثر تابش بر سختی، نسبت به تغییرات حالت بلور، نسبتهای ترکیبی و بی‌نظمی‌های شبکه بلوری، حساس است، ولی بطورکلی بررسی اکثر محققان نشان می‌دهد که بلورها در اثر پرتوگیری سخت‌تر می‌شوند؛ این مورد در پرتودهی به آلیاژ ۸۰۰۱ نیز مشاهده گردید. عامل اصلی سخت شدن، پیدایش نقصهای نقطه‌ای است که در اثر پرتودهی چگالی آن در ماده ساختکاری افزایش می‌یابد. علاوه بر نقصهای نقطه‌ای، ایجاد نابجایی‌ها، واکنش نابجایی‌ها با هم و همچنین ایجاد اتمسفر کِترل، از عوامل بروز این نوع سختی می‌باشد [۷]. در این میان سدشدن راه نابجایی‌ها توسّط نقصهای نقطه‌ای، عامل اصلی تغییرات خواص مکانیکی است [۹].

نتیجه‌گیری

بطورکلی، آلومینیوم و آلیاژهای آن به لحاظ دارا بودن خواص مطلوب، کاربردهای فراوانی در ساختکارهای رآکتورهای هسته‌ای تحقیقاتی دارند. همچنین به دلیل دمای کار پایین در این گونه رآکتورها (بالاترین دمای کار ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) در مقایسه با رآکتورهای قدرت، تغییرات خواص مکانیکی قابل توجّهی حتی در مدتهای طولانی پرتوگیری، در آنها مشاهده نمی‌شود (جدول ۴). اما، چون در اثر پرتوگیری نوترونی، آلیاژهای آلومینیومی سخت می‌شوند و میزان

ازدیاد طول آنها کاهش می‌یابد، این رفتار توأم با نیروی حاصل، ممکن است در مورد مواد ساختکاری بکار رفته در مجتمع سوخت خطر عمده‌ای بحساب آید. به همین جهت، از آلیاژ ۸۰۰۱ با داشتن خاصیت انعطاف‌پذیری حدود تقریباً دوبرابر آلیاژهای دیگر آلومینیوم (که حتی بعد از پرتوگیری به مقدار کمی کاهش می‌یابد) برای کاربردهای ساختکاری در مجتمع سوخت استفاده می‌کنند. هدف از انجام این پژوهش در درجهٔ اول ریخته گری بهینهٔ این آلیاژ بنحوی بوده است که نزدیکترین ترکیب را به ترکیب آلیاژ ۸۰۰۱ داشته باشد. ولی به علت استفاده از آلومینیوم به اصطلاح خالص تجارتی، که ناخالصیهای عمده‌ای در آن وجود دارد، این هدف به نحو مطلوب امکان‌پذیر نشد. این کار در مرحله بعد، با استفاده از آلومینیوم خالص مرک که از وجود ناخالصیهای مزاحم عاری می‌باشد دنبال خواهد شد. برای تهیه نمونه‌های کشش، تولید شمش آلومینیوم ۸۰۰۱ در مقیاس چند کیلوگرم موردنظر بوده است. اما در قدم بعدی، که در ادامه پروژه ریخته گری بهینهٔ این آلیاژ موردنظر است، تهیهٔ شمش به مقیاس کسری از کیلوگرم با آلیاژ ۸۰۰۱، حاصل از مواد اولیه بسیار خالص موردنظر است که از نظر اقتصادی هزینهٔ اضافی در بر نخواهد داشت.

References

1. R.S. Nelson and D.J. Mazey, in proceeding, International Atomic Energy Agency Conference on radation damage in reactor material, Vol II, IAEA-SM, Vienna, Austria, p. 157, (1967).
2. K. Farrel and R.T. King, Metallurgical Transactions, Vol. 4, p. 1223, (1973).
3. K. Farrel and R.T. King, in proceedings of the Ninth International Symposium on "Effects of radiation on structural materials", p. 427, (1978).
4. J.S. Lyons, H.W. Johnson and E.G. Han; "Yield and Flow properties of Aluminium alloy AA8001, Scripta Metallurgica, Vol. 32, No. 6, p. 913, (1995).

۵- علیرضا آقامحمدی، "بررسی اثر تشعشعات هسته‌ای بر خواص مکانیکی آلومینیوم و آلیاژهای آن"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد متالوژی، دانشگاه تهران، دانشکده فنی، (۱۳۷۱).

6. H. Wiedersich and P.R. Okamoto, in a publiation of The Metallurgical Society of AIME Phase stability during irradiation, Effects of radiation induced segregation on phase stability, p. 23, (1980).
7. M.W. Thompson, in "Defects and radiation damage in Metals" Cambridge University Press, (1969).
8. Metals Handbook, A publication of American Society for Metals, (1985).
9. R.T. King, A. Jostsons and K. Farrell, In effects of irradiation on metals and alloys, ASTM STP 529, American society foretesting and materials, p. 165, (1973).

AEOI Scientific Bulletin
No. 17, pp. 9 - 17, 1999

CASTING AND IRRADIATION DAMAGE STUDIES OF 8001 SERIES OF ALUMINIUM ALLOYS FOR NUCLEAR RESEARCH REACTOR STRUCTURAL APPLICATIONS

A.A.Hosseini, H. Mansuri, Nuclear Materials Group,
Nuclear Research Center for Agriculture & Medicine,
AEOI, P.O. Box 31585-4395, Karaj-Iran
R. Mahmudi, Faculty of Technology, University of Tehran - Iran

Abstract

Application of materials in nuclear science & technology is one of the most important difficulties in nuclear industry because in these applications not only good mechanical, thermal and electrical properties of materials should be considered but also the behavior of these structural materials under nuclear irradiation and degradation in their crystalline structure and hence change in final properties of materials are important.

Investigation of the effect of nuclear radiation on metals and alloys used in nuclear industry made it possible to select the best materials for these applications and these days with more progress in nuclear industry more complicated research work have been undertaken. To perform experimental research to determine the nature and the extent of radiation damage in mechanical properties of alloys such as yield point, increase in strength and reduction in ductility as well as reduction in toughness and impact resistance are the first step to evaluate the mechanical stability and effectiveness of alloys in nuclear reactor applications. With respect to their mechanical properties specification as well as resistance against corrosion Aluminium and its alloys have many applications in nuclear technologies.

For fuel cladding, structural alloys for channels, pipes and reactor storage in service conditions with up to 200°C temperature aluminium alloys have many applications. In this research work casting of 8001 series aluminium alloys and thermomechanical treatment, preparation of standard tension test specimen and neutron irradiation with different doses and finally different mechanical testing to investigate the effects of radiation damage have been carried out and the results have presented.