



دانشگاه شهر

تأثیر پارامترهای لحیم کاری سخت بر خواص متالورژیکی اتصال فولاد زنگ‌زن استنیتی پایدار شده نوع ۳۲۱ به آلیاژ زیرکونیوم نوع ۴ Zircaloy-4

علی طالبی^{۱*}، ابراهیم حشمت دهکردی^۲، سید فرشید کاشانی بزرگ^۱، مهدی صبوحی^۱

غلامرضا احمدپور^۲، مجید زهرابی^۲

چکیده

اتصال فولاد زنگ‌زن ۳۲۱ به آلیاژ Zircaloy-4 از مهمترین اتصالات در صنعت هسته‌ای است. این اتصال توسط لحیم کاری سخت و با استفاده از فلز پرکننده پایه زیرکونیوم در کوره خلاً انجام گرفت. نمونه‌های لحیم شده در دماها و زمانهای مختلف به وسیله میکروسکوپهای نوری و الکترونی (SEM) و ریزساختی سنجی مطالعه شدند. تا دما و زمان بجهینه برای این عملیات به دست آید. با افزایش دما و زمان لحیم کاری، منطقه متأثر از حرارت و دامنه نفوذ عناصر افزایش یافت. همچنین ساختی در درز اتصال بیشتر شد. بنابراین دما و زمان کم برای انجام این اتصال به وسیله لحیم کاری سخت مناسب‌تر است.

کلیدواژه: لحیم کاری سخت، فولاد زنگ‌زن، آلیاژ ۴ Zircaloy، ترکیبات ترد بین فلزی، نفوذ.

مقدمه

فولاد زنگ‌زن ۳۲۱ و آلیاژ ۴ Zircaloy کاربرد گسترده‌ای در صنعت هسته‌ای و به ویژه در ساخت اجزاء داخلی راکتورهای اتمی مختلف دارند، لذا اتصال این دو فلز دارای اهمیت به سزاگی است. با توجه به این دو فلز غیر هم‌جنس می‌باشند و از ساختار کریستالی و ضریب انبساط کاملاً متفاوتی برخوردار می‌باشند، دستیابی به روش اتصال آنها بسیار مهم می‌باشد. اگر خواص فیزیکی مثل دمای ذوب و ضریب هدایت و انبساط حرارتی دو ماده تفاوت زیادی داشته باشند، ایجاد اتصال به وسیله روش‌های متداول جوشکاری دشوار می‌باشد. حتی اگر این مشکل را حل کنیم، ممکن است زمانی که دو ماده از نظر متالورژیکی ناسازگار باشند، اتصال مناسبی انجام نشود. زیرا ناسازگاری متالورژیکی ممکن است منجر به ایجاد ریزساختار منطقه جوش و منطقه متأثر از حرارت (HAZ) بدون استحکام کافی شود [۱].

اتصالات ایجاد شده توسط جوشکاری با قوس الکتریکی ترد بودند و مقاومت به خوردگی ضعیفی از خود نشان دادند. حتی جوشکاری مقاومتی و جرقه‌ای نیز اتصال خوبی ایجاد نکرد [۲]. روش دیگر اتصال این دو فلز، جوشکاری نفوذی می‌باشد. دیاگرامهای فاز تعادلی نشان می‌دهند که عناصر اصلی موجود در فولاد زنگ‌زن با

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران

۲- دانشیار سازمان انرژی اتمی

۳- استادیار دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه تهران

۴- کارشناس، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

۵- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان



دانشگاه شهر

چهاردهمین کنفرانس هسته‌ای ایران



انجمن هسته‌ای ایران

۱ و ۲ اسفند ماه ۱۳۸۶، یزد

زیرکونیوم تشکیل ترکیبات دوتایی می‌دهند. این ترکیبات بیشتر فازهای بین فلزی و چندین واکنش یوتکتیک تشکیل می‌دهند. همچنین فولاد زنگ نزن و آلیاژ زیرکالوی یک فاز مایع با نقطه ذوب پائین تشکیل می‌دهند که این فاز یوتکتیک برای ایجاد اتصال مفید می‌باشد [۲]. ترکیبات بین فلزی در اثر واکنش Fe, Cr و Ni نفوذ کرده از فولاد زنگ نزن با Zr ایجاد می‌شود. این ترکیبات بین فلزی ذاتی ترد هستند و استحکام اتصال را کاهش می‌دهند [۳]. بعضی از محققین با استفاده از لایه واسط از جنس Ti, Fe [۱]، Ta [۳] و غیره سعی در کاهش نفوذ عناصر و تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد کرده‌اند ولی همچنان جوشکاری نفوذی جوابگوی برقراری اتصال سالم و بدون ترکیبات ترد نیست.

در این مقاله از لحیم کاری سخت برای ایجاد اتصال با استفاده از یک فلز پرکننده به ضخامت 50 μm ، و با ترکیب شیمیایی نزدیک به فلز پایه Zircaloy-4 استفاده شده است. ضمناً این پرکننده آمورف بوده و انعطاف‌پذیری بالایی دارد. به همین جهت استفاده از این پرکننده در مقیاس صنعتی آسان می‌باشد [۴]. در این شیوه دما و زمان کمتری جهت انجام اتصال مورد استفاده قرار می‌گیرد. این موضوع ضمن این که استفاده از لحیم کاری سخت را در کارهای صنعتی تسهیل می‌کند، سبب نفوذ کمتر عناصر آلیاژی و کاهش میزان فازهای ترد می‌شود. ضمناً در این شرایط به دلیل انساط کمتر فلزات پایه، تنفس پسماند کمتری در محل اتصال ایجاد شده و از ایجاد ترک جلوگیری می‌کند.

در مقاله حاضر اثر تغییر پارامترهای لحیم کاری سخت از جمله دما و زمان عملیات، بر روی خواص متالورژیکی محل اتصال بررسی شده است. در این راستا ریزساختار محل اتصال و همچنین توزیع سختی در این منطقه مورد اندازه‌گیری واقع شده و شرایط ایده‌آل جهت انجام عملیات به دست آمده است.

روش کار

نمونه‌های به شکل ورق از جنس فولاد زنگ نزن ۳۲۱ و Zircaloy-4 به ابعاد 10 mm×10 mm×4 mm آماده شدند. ترکیب آلیاژهای مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده است. جدول ۲ نیز خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژهای زیرکونیوم و فولاد زنگ نزن ۳۲۱ را نشان می‌دهد. سطح نمونه‌ها پس از تمیزکاری، توسط محلول شیمیایی چربی زدایی و اسیدشویی شدند.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد زنگ نزن ۳۲۱ و Zircaloy-4

نوع آلیاژ	Zr	Fe	Cr	Sn	Ni	Ti	Cu	Nb	Be	Mn	C	S	P	Si
Stainless Steel 321	---	Base	18	---	9.5	0.8 %	---	---	---	2	0.08	0.03	0.04	1.00
Zy-4	Base	0.20	0.10	1.52	<0.005	---	---	---	---	---	0.002	---	---	---
Filler Metal 1409	Base	---	---	---	14.6	12	11.6	1.5	1.1	---	---	---	---	---



دانشگاه شهرورد

چهاردهمین کنفرانس هسته‌ای ایران



انجمن هسته‌ای ایران

۱ و ۲ اسفند ماه ۱۳۸۶، یزد

جدول ۲- خواص مکانیکی و فیزیکی آلیاژهای زیرکونیوم و فولاد زنگنزن ۳۲۱

Stainless steel 321	Zircaloy-4	Zr-2.5Nb	Zircaloy-2	Pure zirconium	
193	99.3	97.9	99.3	94.5	مدول الاستیسیته (GPa)
205	241	310	241	230	تنش تسلیم (MPa)
515	413	448	413	330	استحکام کششی (MPa)
-	36.2	34.5	36.2	35.3	مدول برشی (GPa)
-	0.370	0.330	0.370	0.340	ضریب پواسون
40.0	20.0	20.0	20.0	32.0	درصد تغییر طول (50 mm در)
217	181	220	181	145	سختی (BHN)
3.1	0.22	-	0.22	0.18	جذب نوترون (barns)
18.9×10^{-6}	6.00×10^{-6}	6.30×10^{-6}	6.00×10^{-6}	5.80×10^{-6}	ضریب انبساط خطی (m/m-°C)
16.3	21.5	17.1	21.5	16.7	هدایت حرارتی (W/m K)
7.92	6.56	6.44	6.56	6.53	دانسیته (g/cm³)
1398-1446	1850	1840	1850	1852	نقطه ذوب (°C)
0.5	0.285	0.285	0.285	0.285	ظرفیت حرارتی (J/g- °C)

بعد از تمیزکاری سطح، فلز پرکننده بین دو نمونه قرار گرفت. فلزات پایه و فلز پرکننده توسط یک گیره نگه دارنده از جنس زیرکونیوم که از انبساط حرارتی کمی برخوردار است (جدول ۲)، در یکدیگر جفت و جور شدند. فلز پرکننده از جنس STEMET 1409 می‌باشد و ترکیب آن در جدول ۱ آورده شده است. سپس مجموعه در کوره خلا 5×10^{-6} Torr قرار گرفت. سه سیکل دما و زمان بر روی سه مجموعه انجام شد که مشخصات آنها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳: مشخصات نمونه‌های لحیم شده

شماره نمونه	دما	زمان	نرخ سرمایش	نرخ گرمایش	خلا
۱	1000 °C	3 h	20 °C /Min	20 °C /Min	5×10^{-6} Torr
۲	900 °C	3 h	20 °C /Min	20 °C /Min	5×10^{-6} Torr
۳	860 °C	20 Min	20 °C /Min	20 °C /Min	5×10^{-6} Torr



دانشگاه شهر

چهاردهمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۱ و ۲ اسفند ماه ۱۳۸۶، یزد

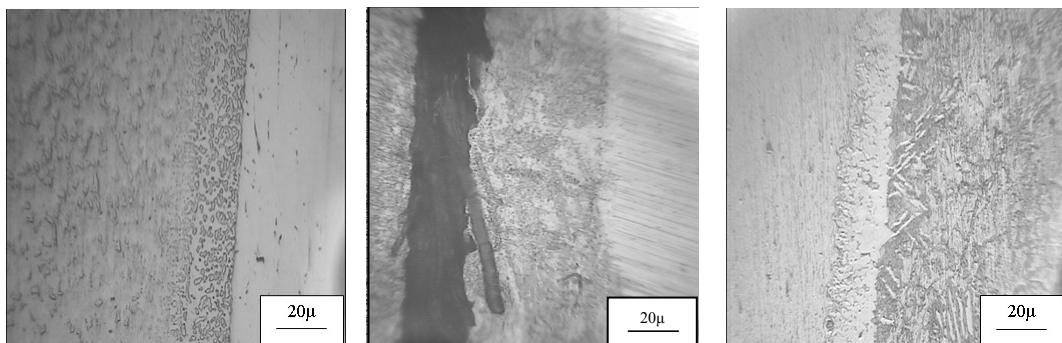


انجمن هسته‌ای ایران

نمونه‌های حاصل مقطع زده و پس از حکاکی توسط میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی بررسی شدند. محلول حکاکی شامل ۳۱٪ اسید نیتریک، ۶٪ اسید فلوریدریک و ۶۳٪ آب م قطر می‌باشد. همچنین از محل اتصال و مناطق مجاور آن پروفیل سختی گرفته شد.

نتایج

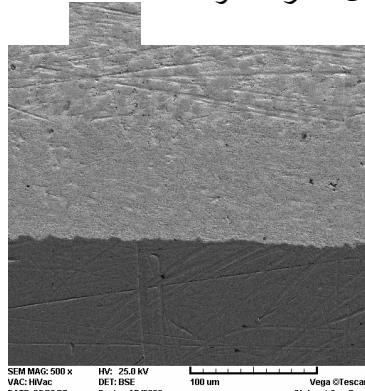
شکلهای ۱ و ۲ درز اتصال نمونه‌ها را بعد از لحیم کاری نشان می‌دهند. از این تصاویر می‌توان در مورد چگونگی برقراری اتصال در شرایط دما و زمانهای مختلف و رشد دانه‌ها در فلزات پایه قضاوت کرد.



شکل ۱-ج: ریزساختار
فصل مشترک نمونه ۳

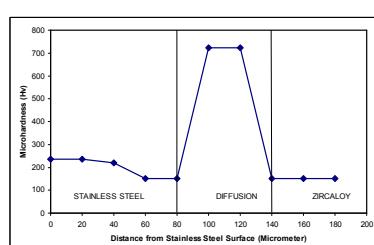
شکل ۱-ب: ریزساختار
فصل مشترک نمونه ۲

شکل ۱-الف: ریزساختار
فصل مشترک نمونه ۱

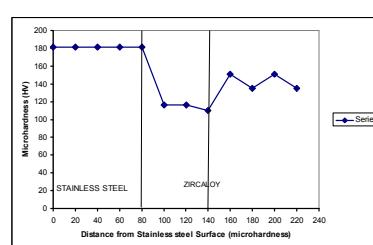


شکل ۲: تصویر با استفاده از الکترون‌های برگشتی از محل اتصال نمونه ۳

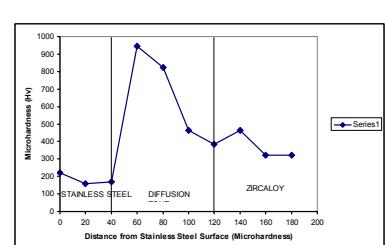
از آنجا که سختی معیاری برای تشخیص تردی اتصال است، از نتایج ریزساختی سنجی در مورد احتمال تشکیل فازهای ترد استفاده می‌کنیم. نتایج ریزساختی سنجی انجام گرفته روی نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳-ج: تغییرات ریز ساختی
نمونه شماره ۳



شکل ۳-ب: تغییرات ریز
ساختی نمونه شماره ۲



شکل ۳-الف: تغییرات ریز
ساختی نمونه شماره ۱



دانشگاه شهر

بحث و نتیجه‌گیری

تصویر متالوگرافی نمونه ۱ (لحیم شده در دمای 1000°C به مدت ۳ ساعت)، ذوب بیش از حد فلزات پایه و درشت شدن دانه‌ها در منطقه متأثر از حرارت^{۲۴} را نشان می‌دهد. همچنین پروفیل سختی نمونه ۱ (شکل-۳-الف) سختی بالای درز اتصال را نشان می‌دهد. این امر به دلیل بالا بودن دما و زمان فرآیند بوده و احتمالاً نفوذ بیش از حد عناصر منجر به تشکیل فازهای ترد از جمله FeZr_2 ، ZrCr_2 و Zr_2Ni شده است. عناصر Fe، Cr و Ni از سمت فولاد زنگنزن نفوذ کرده و با Zr نفوذ کرده از آلیاژ زیرکالوی و موجود در فلز پرکننده، واکنش داده و تشکیل ترکیبات ترد بین فلزی می‌دهند. در تصویر متالوگرافی نمونه ۲ (لحیم شده در دمای 900°C به مدت ۳ ساعت) عدم الحاق نسبی در منطقه درز اتصال دیده می‌شود. همچنین در پروفیل سختی، کاهش سختی مشهود است. زیرا به علت عدم پیوستگی مطلوب، اثر گذارنده^{۲۵} سختی توانسته است کمی در کنار بلغزد و سبب افت عدد سختی شود. ضمن اینکه عدم تشکیل فازهای ترد کننده سبب افزایش سختی شده است. بنابراین لحیم‌کاری در شرایط دما و زمان نمونه ۲ نیز نتیجه مطلوبی را در پی ندارد.

انجام لحیم‌کاری سخت در دمای 860°C به مدت ۲۰ دقیقه در خلا^۷ نتایج مطلوبی را نشان داده است. تصویر متالوگرافی، اتصال کامل و بدون عیب را نشان می‌دهد. همچنین پروفیل سختی، مقدار سختی زیادی را در درز اتصال نشان نمی‌دهد که حاکی از انعطاف پذیری کافی و عدم تشکیل فازهای ترد در این منطقه می‌باشد. به منظور اطمینان از بی نقص بودن اتصال، از نمونه ۳ توسط میکروسکوپ الکترونی رویشی (SEM) عکس گرفته شد. تصویر SEM نیز یکپارچگی اتصال و عدم عیب در درز اتصال را تصدیق می‌کند. بنابراین شرایط مذکور برای لحیم‌کاری سخت فولاد زنگنزن به آلیاژ زیرکونیوم، شرایط مطلوبی به نظر می‌رسد.

مراجع

1. J.I. Akhter, M. Ahmad, M. Iqbal, M. Akhtar, M.A. Shaikh, "Formation of dendritic structure in the diffusion zone of the bonded Zircaloy-4 and stainless steel 316L in the presence of Ti interlayer", journal of alloys and compounds, 399, 96-100, 2005.
2. W.A. Owczarski, "Eutectic brazing of zircaloy 2 to type 304 stainless steel", welding research supplement, 78-s to 83-s, 1962.
3. M. Ahmad, J.I. Akhter Q. Zaman, M.A. Shaikh, M. Akhtar, M. Iqbal, E. Ahmed, "Diffusion bonding of stainless steel to Zircaloy-4 in the presence of a Ta intermediate layer", journal of nuclear materials, 317, 212–216, 2003.
4. B.A. Kalin, V.T. Fedotov , O.N. Sevrukova , A. Moeslang , M. Rohde, "Development of rapidly quenched brazing foils to join tungsten alloys

²⁴ HAZ²⁵ indenter



دانشگاه شهرد



with ferritic steel”, journal of nuclear materials, 329–333, 1544–1548, 2004.

5. H.I. Shaaban, F.H. Hammad, “Investigation of diffusion-bonding between zircaloy-4 and 304 stainless steel”, journal of nuclear materials, 71, 277-285, 1978.
6. B. Kalin, V. Fedotov , O. Sevryukov , A. Plyuschev , I. Mazul, A. Gervash , R. Giniatulin, “Be-Cu joints based on amorphous alloy brazing for divertor and first wall application”, journal of nuclear materials, 271&272, 410-414, 1999.
7. K. Bhanumurthy, J. Krishnan, G.B. Kale, R.K. Fotedar, A.R. Biswas, R.N. Arya, “Tubular transition joint between zircaloy-2 and stainless steel”, journal of materials processing technology, 54, 322-325, 1995.