



## انتخاب بوته مناسب برای فرآیند ذوب تحت خلا آلیاژهای حافظه‌دار Ni-Ti

صادق بدخشانی رار<sup>۱</sup>، دکتر سید خطیب‌الاسلام صدرنژاد<sup>۲</sup>، حمید پیروان<sup>۳</sup>،  
احمد رشیدنیا<sup>۴</sup>، سعیده وطنخواه<sup>۴</sup>

۱- دانشکده هوافضا داشکاد هوایی شهید ستاری ۲- دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد

### چکیده

در این بررسی مسئله آلودگی مذاب آلیاژ Ti-Ni توسط مواد بوته مورد بررسی قرار گرفت و سعی شد بوته‌ای مناسب برای فرآیند ذوب این آلیاژ انتخاب گردد. برای بررسی این موضوع، ذوب نمونه‌های Ni-45 Wt%Ti در شش بوته از جنس بوته محتوی زیرکونیای بالا، زیرکون نوع A، آلومینای تبلور مجدد یافته، آلومینای ریخته‌گری دوغابی، سیلیکون کارباید خالص، سیلیکون کارباید به همراه ۵٪ وزنی اکسید آلومینیم و ۵٪ وزنی اکسید سیلیسیم و بوته گرافیت در کوره مقاومتی تحت خلا انجام پذیرفت. نمونه‌ها در دمای  $1450^{\circ}\text{C}$  و در خلا ۶-۱۰ میلی بار ذوب شده و بمدت ۹۰ دقیقه در حالت مذاب نگهداری گردیدند. پس از انجماد نمونه‌های ذوب شده از بوته جدا شده و پس از پولیش مکانیکی، نمونه‌ها تحت آزمایشات آنالیز شیمیائی، تصویربرداری توسط میکروسکپ الکترونی جاروبی به همراه نقشه اشعه ایکس عناصر حل شده در مذاب، بررسی چشمی و سختی‌سنجی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که در میان بوته‌های مورد آزمایش، بوته گرافیتی باعث ایجاد کمترین آلودگی در مذاب و بوته‌های سیلیکون کارباید باعث ایجاد بیشترین آلودگی در مذاب می‌شوند.

کلمات کلیدی: آلیاژهای حافظه‌دار، آلیاژ نایتینول، فرآیند ذوب القائی تحت خلا، بوته ذوب

## مقدمه

الیازهای حافظه‌دار TiNi خانواده مهمی از آلیازهای حافظه‌دار می‌باشند که بخاطر خواص مطلوبشان نظیر خواص حافظه‌داری، مقاومت به خوردگی بالا، رفتار فوق الاستیک و قابلیت انطباق با بدن کاربردهای زیادی در صنایع مختلف از جمله در صنایع هوافضا، صنایع پزشکی و سایر صنایع یافته‌اند [۱]. روشهای ساخت آلیاز شامل روشهای غیر ذوبی مانند روش متالورژی پودر و روشهای ذوبی می‌باشند و در میان این روشها فقط روشهای ذوبی برای تولید انبوه و اقتصادی این آلیازها مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۲]. یکی از خصوصیات این آلیازها حساسیت زیاد این آلیازها به ترکیب شیمیائی و تاریخچه فرآیند ساخت است، بطوریکه ورود آلودگیهای ناشی از فرآیند ذوب تاثیر منفی زیادی بر خواص این آلیاز، از جمله خواص حافظه‌داری آلیاز دارد. یکی از عوامل مهم ایجاد آلودگی در فرآیند ذوبی، آلودگی مذاب توسط بوته ذوب است. آلیاز NiTi به دلیل درصد بالای تیتانیوم در گروه آلیازهای غنی از تیتانیوم قرار می‌گیرد. محققان زیادی در مورد آلودگی مذاب تیتانیوم و آلیازهای غنی از تیتانیوم توسط مواد بوته تحقیق کرده‌اند. خانواده‌های مختلفی از مواد نسوز از جمله خانواده اکسیدها [۳]، بورایدها [۴]، سیلیسیدها، فلوریدها، سولفیدها، نیتريدها، ترکیبات بین فلزی نظیر Mo-Al و فلزات دیرگداز نظیر تنگستن مورد تحقیق قرار گرفته‌اند که تماما با تیتانیوم مذاب واکنش داده و باعث آلودگی مذاب تیتانیوم شده‌اند. [۴، ۵، ۳]. البته در بین این ترکیبات ZrO<sub>2</sub> پایدار شده با تیتانیوم [۳] و اکسید ایتیریم پایدار شده با تیتانیوم [۵، ۱۳] پایداری مطلوبی در مقابل مذاب تیتانیوم از خود نشان داده‌اند ولی تا کنون ماده نسوزی که بتواند کاملا در مقابل مذاب تیتانیوم مقاومت کند، بصورت اقتصادی توسعه داده نشده است [۶]. بنابراین توسعه مواد نسوز مناسب می‌تواند به کاهش هزینه و افزایش کیفیت قطعات ریخته‌گی منجر شود. مذاب آلیاز TiNi بدلیل وجود مقدار زیادی فلز نیکل از فعالیت شیمیائی کمتری نسبت به آلیازهای تیتانیوم برخوردار است و در واقع از نظر فعالیت شیمیائی ما بین آلیازهای پایه نیکل و پایه تیتانیوم قرار دارد. در تحقیق حاضر برای ارزیابی پایداری و توسعه مواد نسوز ارزان قیمت برای ذوب آلیاز TiNi از بوته‌های با پایه زیرکونیا، اکسید آلومینیم، کاربید سیلیسیم و گرافیت استفاده شد.

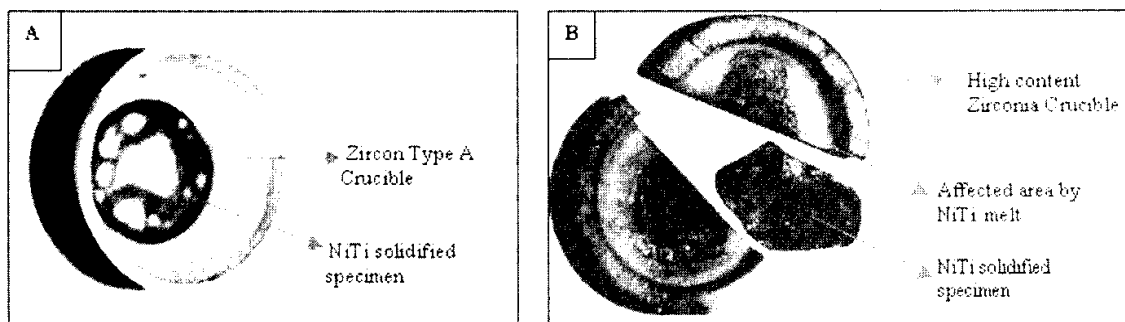
## روش آزمایش

آنالیز شیمیائی بوته‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- جدول ترکیب شیمیائی بوته‌های آزمایش شده، درصد وزنی

Crucible Type	ZrO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiC	سایر اکسیدها	C
Recrystallize Alumina	-	-	۹۹/۵	-	۱	-
Slurry Cast Alumina	-	-	۹۹	-	۱	-
High Content Zirconia	۹۵	۵	-	-	-	-
Zircon Type A	۶۶	۳۳	-	-	۱	-
SiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	-	۵	۵	۹۰	-	-
CP SiC	-	-	-	۹۹	۱	-
CP Graphite	-	-	-	-	-	۹۹

بمنظور زدایش رطوبت جذب شده در بوتنه‌ها و جلوگیری از ایجاد خطا در نتایج آزمایشها، بوتنه‌ها بمدت ۲ ساعت در دمای  $200^{\circ}\text{C}$  تحت عملیات رطوبت زدائی قرار گرفتند و سپس برای جلوگیری از جذب دوباره رطوبت توسط بوتنه‌ها، فویل آلومنیوم بدور آنها پیچیده شد. فرآیند ذوب نمونه‌ها در کوره مقاومتی تحت خلاء ساخت کمپانی WEINERT آلمان با المنتهای میله‌ای از جنس تنگستن صورت گرفت. پس از قرار دادن نمونه‌ها درون کوره و رسیدن فشار کوره به خلا ۶-۱۰ میلی بار گرمایش نمونه‌ها شروع شد و پس از رسیدن دمای کوره به  $1450^{\circ}\text{C}$ ، نمونه‌ها در این دما و در خلا ۶-۱۰ میلی بار بمدت ۲ ساعت حرارت داده شدند. سپس نمونه‌ها درون کوره و تحت خلا تا دمای محیط سرد شدند. پس از آن با برش بوتنه‌ها توسط تیغه الماسه، نمونه‌ها از آنها جدا شده و پس از مانع گرم سطح آنها به اندازه  $0/3$  میلیمتر پولیش مکانیکی گردید. در شکل ۱ نمونه‌های ذوب شده در بوتنه‌های پایه زیرکونیا دیده می‌شود. در این تصویر ناحیه‌ای از بوتنه که متاثر از ذوب بوده نشان داده شده است.

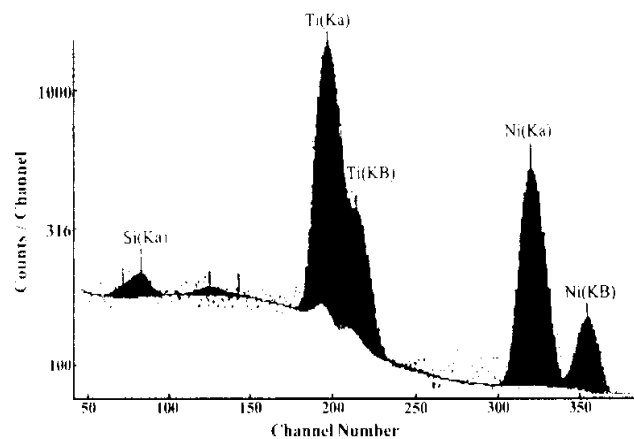


شکل ۱- A: بوتنه ذوب زیرکونی پس از عملیات ذوب به همراه نمونه ذوب شده درون آن، B: بوتنه حاوی زیرکونیای بالا پس از برش و جداسازی نمونه درون آن، در این تصویر ناحیه‌ای از بوتنه که متاثر از ذوب بوده دیده می‌شود.

پس از آماده‌سازی، نمونه‌ها توسط روش PIXE (Particle Induced X-Ray Emission) تحت آنالیز شیمیائی قرار گرفتند. در این روش نمونه‌ها توسط ذرات پروتون پرسرعت با انرژی معادل  $2\text{MeV}$  بمباران شدند. قطر ناحیه برخورد اشعه در حدود ۲ میلیمتر بود. برای آنالیز عناصر سنگین مانند زیرکونیم قبل از آشکارساز از فیلتر مایلر با ضخامت ۱۷۵ میکرون استفاده گردید. پس از آن از نمونه‌ها با استفاده از یک میکروسکپ الکترونی Jeol JXA-840 با ولتاژ ۲۰ کیلو ولت تصویر و نقشه اشعه ایکس گرفته شد. همچنین نمونه ذوب شده در بوتنه گرافیتی توسط روش EDS در این میکروسکپ الکترونی روبشی تحت آنالیز شیمیائی قرار گرفت. سختی نمونه‌ها حداقل در دو نقطه مختلف در مقیاس ویکرز و توسط دستگاه Instron-Wolpert اندازه‌گیری شد. نیروی فرورونده برای نمونه ذوب شده در بوتنه کاربید سیلیسیم-اکسید آلومینیم-اکسید سیلیسیم  $10\text{Kp}$  و برای سایر نمونه‌ها  $3\text{Kp}$  بود.

## نتایج و بحث

نمونه‌های ذوب شده در این تحقیق تحت آنالیز شیمیائی به روش PIXE قرار گرفتند. در شکل ۲ یک نمونه از گرافهای آنالیز شیمیائی PIXE، مربوط به نمونه ذوب شده در بوتنه حاوی زیرکونیای بالا دیده می‌شود. بر مبنای این آنالیز درصد وزنی عناصر حل شده در مذاب بدست آمد.



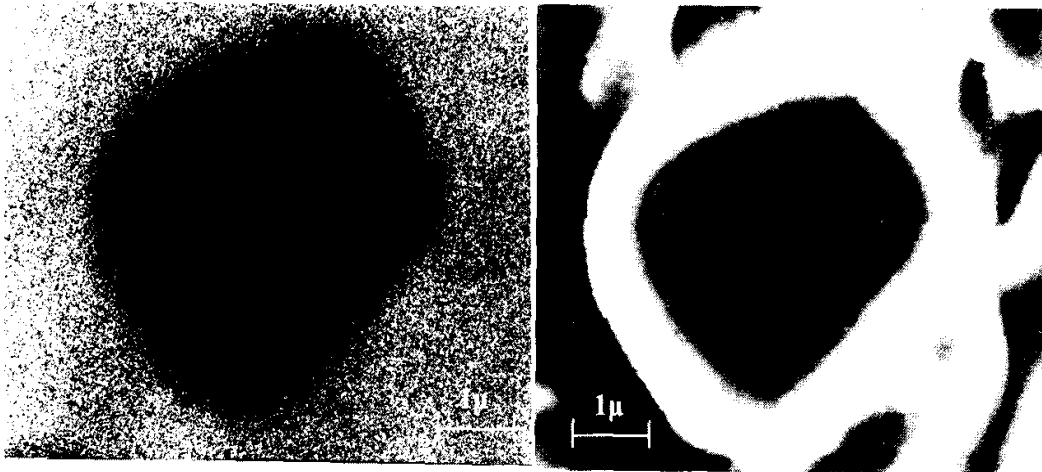
شکل ۲- نمودار آنالیز شیمیائی PIXE نمونه ذوب شده در بوته حاوی زیرکونیای بالا

همچنین در جدول ۲ آنالیز شیمیائی عناصر نمونه‌های ذوب شده بر حسب نوع بوته آورده شده است.

جدول ۲- آنالیز شیمیائی نمونه‌های Ni-Ti ذوب شده در بوته‌های مختلف توسط روش PIXE

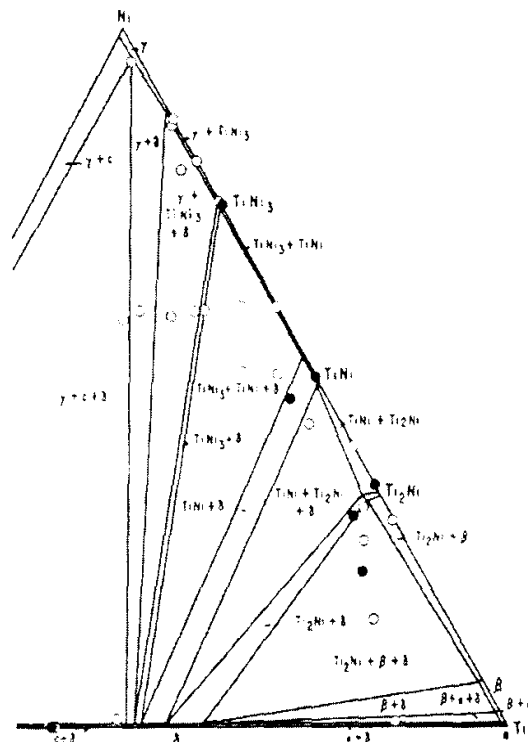
Crucible Type	%Ti	%Si	%Zr	%Al	%C	%O	%Ni
Recrystallized Alumina	۳۷/۵۵۳۶	-	-	۱/۸	-	۱/۶	Bal.
Slurry Cast Alumina	۴۱/۷۳۳۲	-	-	۱/۷۹۹۴	-	۱/۶	Bal.
High Content Zirconia	۴۰/۴۲۳	۰/۹۰۸	۰/۰۰۷	-	-	۱/۰۴۶۲	Bal.
Zircon Type A	۴۰/۸۷۳	۱/۶۳۵	۰/۰۰۵	-	-	۱/۸۷۲	Bal.
Pure SiC	۴۱/۵۶۶۳	۱/۸۸۷	-	-	۱/۱۲۹	-	Bal.
SiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	۴۳/۳۳۲	۱/۷۴۳	-	۰/۰۷۱	۰/۱۲۰۴	۰/۷۲۴	Bal.

همانطور که از جدول بالا مشخص است تمامی بوته‌ها با مذاب NiTi واکنش داده و در آن حل شده‌اند. در مورد نمونه ذوب شده در بوته گرافیتی برای بررسی حل شدن کربن در مذاب، از روش آنالیز شیمیائی به روش EDS استفاده شد. تصاویر میکروسکپ الکترونی جاروبی به همراه نقشه‌های اشعه ایکس عنصر نیکل در نمونه ذوب شده در بوته گرافیتی در شکل ۳ دیده می‌شود. این تصویر نشان‌دهنده یک ذره TiC و نقشه اشعه X عنصر نیکل در آن می‌باشد. از این ذره آنالیز شیمیائی به روش EDS صورت گرفت. نتایج آنالیز شیمیائی بر روی این ذرات نشان‌دهنده وجود ۷۴٪ تیتانیوم بود که با آنالیز شیمیائی TiC مطابقت دارد. همچنین نقشه اشعه X این ذره نیز عدم حضور نیکل را در این فاز نشان داده است. این موضوع مطابق دیاگرام فاز سه‌تایی Ti-Ni-C می‌باشد. این دیاگرام در شکل ۴ دیده می‌شود. مطابق این دیاگرام ترکیبات کربن در آلیاژ Ni-Ti بصورت ذرات TiC ظاهر می‌شوند. (شکل ۴) و نیکل در این فاز وجود ندارد که با نتیجه نقشه اشعه X این نمونه مطابقت دارد.

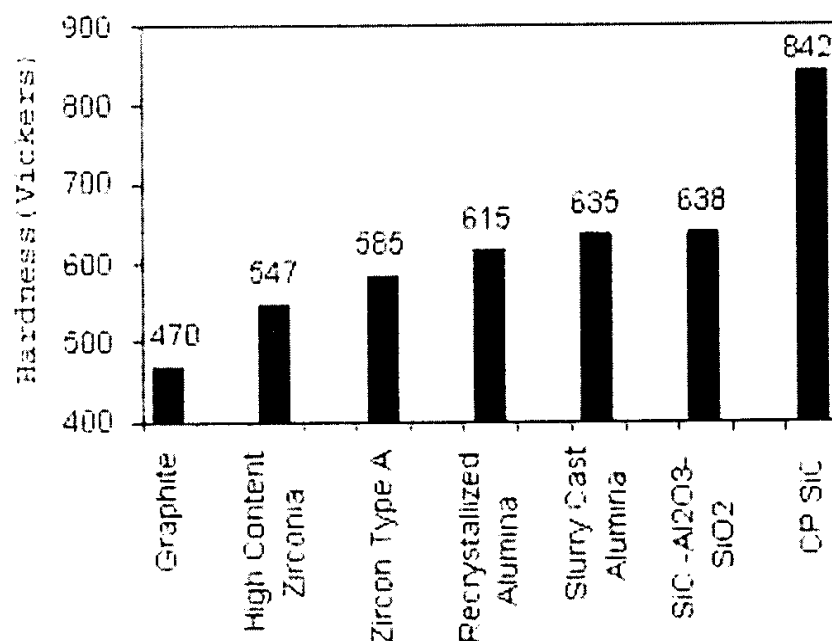


شکل ۳- تصاویر SEM نمونه ذوب شده نمونه ذوب شده در بوته گرافیتی. نقشه اشعه X عنصر نیکل در تصویر چپ نشان داده شده است.

وجود ذرات TiC نشان دهنده حل شدن عنصر کربن در نمونه ذوب شده در بوته گرافیتی می‌باشد. همانطور که نتایج آنالیز شیمیائی در جدول ۲ نشان داد تاثیر بوته‌های مختلف بر نمونه‌ها یکسان نیست. نتایج آنالیز شیمیائی نمونه‌های ذوب شده در بوته‌های محتوی زیرکونیای بالا و بوته زیرکون نوع A نیز نشان داد که مقدار بسیار کمی زیرکونیوم در این نمونه‌ها حل شده است (جدول ۲). همچنین غلظت عنصر Si در نمونه ذوب شده در بوته سیلیکون کارباید در مقایسه با نمونه ذوب شده در بوته زیرکون نوع A از مقدار بیشتری برخوردار است.



شکل ۴- دیاگرام فازی سه‌تایی نیکل - تیتانیوم - کربن [۱۵].



شماره ۴- نمودار سختی متوسط نمونه‌های NiTi ذوب شده بر حسب نوع بوته ذوب

نتایج آنالیز شیمیایی نمونه‌های حل شده در بوته‌های آلومینا نیز نشان دهنده این است که عناصر این بوته‌ها در مذاب حل شده‌اند. این نتایج نشان داد که تمامی بوته‌های مورد استفاده در این آزمایش با مذاب NiTi واکنش داده و باعث آلودگی مذاب می‌شوند، ولی شدت آلودگی مذاب برای تمامی بوته‌ها یکسان نیست. اگر نتایج سختی متوسط نمونه‌های ذوب شده در بوته‌های مذکور را به ترتیب بوته‌ها و به صورت نزولی مرتب کنیم خواهیم دید که نمونه ذوب شده در بوته گرافیتی دارای کمترین سختی متوسط و نمونه ذوب شده در بوته سیلیکون کارباید با خلوص تجاری دارای بیشترین سختی متوسط است. این موضوع در نمودار ۴ دیده می‌شود. بر همین مبنا و با توجه به نتایج آنالیز شیمیایی، می‌توان بوته‌های مورد استفاده در این تحقیق را از لحاظ شدت تاثیر آنها بر مذاب NiTi بصورت زیر تقسیم بندی کرد.

Pure SiC > SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> > Slurry Cast Alumina > Recrystallized alumina > Zircon Type A > High Content Zirconia > Graphite

براساس این نتایج بوته سیلیکون کاربید خالص بیشترین حلالیت و تاثیر را بر مذاب و بوته گرافیتی و پایه زیرکونی کمترین حلالیت و تاثیر را در مذاب NiTi داشته‌اند. یکی از عوامل تاثیرگذاری کمتر بوته‌های آلومینا و زیرکونیا بر مذاب NiTi را می‌توان در تغییرات انرژی آزاد حلالیت مواد تشکیل دهنده این بوته در مذاب دانست. تغییرات انرژی آزاد گیبس برای واکنش‌های حلالیت این مواد در جدول ۳ آورده شده است. همانطور که از این جدول مشخص است مقادیر تغییرات انرژی آزاد گیبس برای واکنش حلالیت بوته‌های پایه زیرکونیا و آلومینا در مذاب مثبت و برای بوته پایه سیلیکون کارباید مقداری منفی می‌باشد. این موضوع واکنش شدید بوته‌های سیلیکون کارباید با مذاب NiTi را توجیح می‌کند.

جدول ۳- تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنشهای میان بوته و مذاب

Reaction	$\Delta G$ (in cal.) in 1723 K	Reference
$\langle \text{Al}_2\text{O}_3 \rangle \rightarrow 2\{\text{Al}\} + 3/2(\text{O}_2)$	267775	[12]
$\langle \text{ZrO}_2 \rangle \beta \rightarrow \langle \text{Zr} \rangle \beta + (\text{O}_2)$	182409	[12]
$\langle \text{SiC} \rangle \rightarrow \{\text{Si}\} + \langle \text{C} \rangle$	11137	[12]
$\langle \text{Zr} \rangle \beta \rightarrow [\text{Zr}] 1\text{Wt\% in nickel}$	-68125	[8]
$\{\text{Al}\} \rightarrow [\text{Al}] 1\text{Wt\% in nickel}$	-55381	[8]
$\langle \text{Si} \rangle \rightarrow [\text{Si}] 1\text{Wt\% in nickel}$	-56804	[8]
$\langle \text{C} \rangle \rightarrow [\text{C}] 1\text{Wt\% in nickel}$	-9928	[8]
$1/2(\text{O}_2) \rightarrow [\text{O}] 1\text{Wt\% in nickel}$	-16342	[8]
Total Reaction		
$\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow 2[\text{Al}] 1\text{Wt\% in nickel} + 3[\text{O}] 1\text{Wt\% in nickel}$	107986.16	-
$\langle \text{ZrO}_2 \rangle \rightarrow [\text{Zr}] 1\text{Wt\% in nickel} + 2[\text{O}] 1\text{Wt\% in nickel}$	81599.7	-
$\langle \text{SiC} \rangle \rightarrow [\text{Si}] 1\text{Wt\% in nickel} + [\text{C}] 1\text{Wt\% in nickel}$	-56808.4	-

همانطور که از نمودار شکل ۴ مشخص است کمترین میزان سختی متعلق به نمونه ذوب شده در بوته گرافیتی می‌باشد. بوته گرافیتی مورد استفاده در این آزمایش از الکتروود کوره قوس الکتریکی ساخته شده است. از مشخصات این بوته میتوان به فشردگی بالا و ریز دانه بودن ذرات گرافیت مورد استفاده در این بوته اشاره کرد که باعث بوجود آمدن سطحی صاف در جداره داخلی بوته می‌شود. فشردگی و ریز دانه بودن ذرات گرافیت باعث کمتر شدن نفوذ ذوب به برجستگی‌های سطحی و کم شدن تاثیر متقابل میان بوته و مذاب می‌شود. این موضوع بر پارامترهای سینتیکی حلالیت بوته در مذاب تاثیر گذاشته و باعث کند شدن این روند می‌شود [۱۴، ۱۳]. بنابراین علی‌رغم اینکه با توجه به جدول ۴ بوته‌های گرافیتی از نظر ترمودینامیکی تمایل به حلالیت در مذابهای پایه نیکل را دارند با اینحال با توجه به نتایج تحقیق حاضر باعث ایجاد کمترین آلودگی در مذاب شده‌اند. نتایج تحقیقات قبلی [۴، ۳] و مشاهدات چشمی در این پژوهش نشان داد که بوته‌های پایه زیرکونیا تمایل کمتری به خیس شدن توسط مذابهای حاوی درصد بالای تیتانیم نسبت به بوته‌های پایه آلومینا و پایه سیلیکون کارباید دارند [۳]. این موضوع بر حل شدن بوته زیرکونیای در مذاب تاثیر گذاشته و باعث کند شدن روند حلالیت بوته در مذاب شده و باعث می‌شود که این نوع بوته‌ها تاثیر مخرب کمتری بر مذاب بگذارند. بوته‌های زیرکونیا بطور معمول برای ذوب آلیاژهای نیکل مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۱۷] همچنین این بوته‌ها برای ذوب آلیاژهای پایه تیتانیم نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند و نشان داده شده است که باعث ایجاد آلودگی اندکی در مذابهای تیتانیم می‌شوند [۳]. نتایج این تحقیق نیز نشان داد که مقدار زیرکونیم حل شده در نمونه‌های ذوب شده در بوته پایه زیرکونیا مقدار بسیار اندکی می‌باشد و منبع عمده ایجاد آلودگی در این بوته‌ها اکسید سیلیسیم است. بنابراین با توجه به نقطه ذوب پائینتر آلیاژ Nitinol ( $1310^\circ\text{C}$ ) در مقایسه با آلیاژهای تیتانیم و فعالیت شیمیایی کمتر این آلیاژ بخاطر درصد بالای نیکل (۵۵٪ وزنی) و با توجه به نتایج بدست آمده در این تحقیق، می‌توان از بوته‌های زیرکونیای با خلوص تجاری با پایدارکننده مناسب برای ذوب این آلیاژ با درصد آلودگی پائین استفاده کرد. با اینحال با توجه به قیمت پائین

بوته‌های گرافیتی و مقاومت عالی آنها در مقابل شکهای حرارتی در مقایسه با بوته‌های زیرکونی انتخاب این نوع بوته‌ها به عنوان بوته ذوب راه حل مناسبتری به نظر می‌رسد.

### نتیجه‌گیری

- ۱- بوته‌های مورد استفاده در این تحقیق همگی با مذاب Ni- 45Wt% Ti واکنش داده و در آن حل شده‌اند. این موضوع موجب افزایش سختی در نمونه‌های ذوب شده گردید.
- ۲- بوته‌های گرافیتی در این میان کمترین تاثیر و بوته‌های کاربید سیلیسیم بیشترین تاثیر را بر مذاب گذاشته‌اند. ترتیب اثر گذاری بوته‌های بر مذاب آلیاژ Ni- 45 Wt% Ti به صورت زیرمی‌باشد:
- ۳- Pure SiC > SiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> > Slurry Cast Alumina > Recrystallized alumina > Zircon Type A > High Content Zirconia > Graphite
- ۴- حلالیت بسیار کم زیرکونیم در مذاب ذوب شده در بوته‌های پایه زیرکونیا در مقایسه با سایر بوته‌ها از عدم تمایل این بوته‌ها به خیس شدن بوته توسط مذاب آلیاژ Ni-45Wt%Ti ناشی می‌شود.
- ۵- با توجه به نتایج بدست آمده بوته گرافیتی بدلیل قیمت ارزان و مقاومت به شکهای حرارتی بسیار عالی بعنوان بوته‌ای با ایجاد آلودگی کم در مذاب مورد استفاده قرار بگیرند.

### منابع و مراجع

- ۱- صادق بدخشان راز، "بررسی پارامترهای موثر در ساخت آلیاژهای حافظه‌دار نیکل-تیتانیم به روش ذوب و ریخته‌گری"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران، دی ماه ۱۳۸۰
- 2- T.W.Duering, R.A.Pelton, "Ni-Ti Shape Memory Alloy", Material Properties Handbook: Titanium Handbook, ASM International, USA, 1994
- 3- C. Berthold, C. Weber, William M. Thompson, Hans O. Bielstein, and Murray A. Schwartz. "Ceramic crucible for melting titanium" J. Am. Ceramic. Soc., Vol.40, 1975, P363
- 4-M.Garfinkle, H.M.Davis, "Reaction of liquid titanium with some refractory compounds", Trans. ASM, Vol. 58, 1965, P520
- 5-D.R.Schuyler, J.A.Petrusha, "Investment casting of low melting titanium alloys", Vacuum Metallurgy, Science press, 1977, USA
- 6-J.P.Kuang, R.A.Harding, J.Campbell, "Investigation to refractories as crucible and mould materials and casting -TiAl alloys" Mat. Sci. & Tech., Vol.16, 2001, P1007
- ۷- سید خطیب الاسلام صدرنژاد، "حرارت و حرکت در مواد" مرکز چاپ و انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۷۸، تهران، ایران
- 8-V.Grigorian, Lbelyanchikov, A.Somakhin, "Theoretical principles of electrical steel making", Mir Publication, 1983, Moscow, Russia
- 9- C.H.Lupis, J.F.Elliott, "Generalized interaction coefficient Part 2", Acta Met, Vol. 14, 1966, P1019



- 10- C.H.Lupis, J.F.Elliot, "Generalized interaction coefficient Part 1", Acta Met, Vol. 14, 1966, P529
- 11-F.D.Richardson, Physical chemistry of melt in metallurgy, Vol. 1, Academic Press, USA, 1974
- ۱۲- حسین آشوری، بلورشناسی، مرکز انتشارات جهاد دانشگاهی اصفهان، ایران، ۱۳۶۸
- 12- O.Kubachewski, C.B.Alcok, "Metallurgical thermochemistry", Pergamon Press. USA. 1979
- 13- R.L. Saha, T.K. Nandy, R.D.K. Misra, and K. T. Jacob, "On the evaluation of stability of rare earth oxide as face coat for investment casting of titanium", Met. Trans. B., Vol. 21, 1990, P559
- 14- Wolfgang Schulle, Refractory Material, Translated by Taher Mahmodian, Janan Publication, 1999, Tehran, Iran
- 15- E. R. Stover, J. Wulff, "The Nickel – Titanium – Carbon System", Trans. Soc. AIME, Vol 215, P127, 1959
- 16-W. Rostoker, J. Metals, Vol 7, P113, 1955
- 17- D.M. Stefanescu, Casting , Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 15, ASM International Publication.