



Study of Interface Reactions of Titanium Hydride (TiH₂) Powder and Al Melt

A. Rasooli¹, M. Divandari², H.R. Shahverdi³ and M.A. Boutorabi⁴

*Material Engineering and Metallurgy Faculty,
Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran
ali_rasooli@iust.ac.ir*

Abstract

Decomposition of the TiH₂ powder as a result of interaction with molten aluminum, when mixed with Al melt, generates bubble. This is a key reaction on the process of production of Al foam, therefore it is important to investigate and understand the interfacial interaction between the above mentioned powder and the Al melt. In this research, TiH₂ powder was get in contact with the Al melt in various temperature, a)973K-1023K, b)1023K-1073 and c)1073K-1273K respectively and the outgoing gas pressure was measured followed by solidifying the melt. Samples were taken and studied by SEM and EDAX. The results showed that with increasing the melt temperature, necessary time for consolidation of gas pressure was decreased but the gas pressure itself was increased. In other word the rate of reaction was increased. It seems that as soon as the melt touch the TiH₂ powder a thin layer of TiAl₃ starts to form around the TiH₂ particles. At the temperature range of (a), TiAl₃ layer seems to be continuous, consequently decomposition process seems to be under control of internal diffusion (atoms diffusion within the layer of TiAl₃). At the temperature range of (b); TiAl₃ layer showed a sort of discontinuity but its thickness was higher than pervious case. It seems that some gas channels have started to form in the TiAl₃ layer consequently a sort of porosity can be noticed. In this case decomposition process seems to be under control of both internal diffusion (atoms diffusion within the layer of TiAl₃) and the chemical reaction between TiH₂ and the Al melt. At the temperature range of (c); TiAl₃ layer formed around TiH₂ particles have started to shattered and scattered within the melt. Consequently, decomposition process seems to be under control of chemical reaction. With increasing of melt temperature, the volume of non-reacted part of the particles has decreased which means that creation of channels in the TiAl₃ layer accelerates the decomposition process of TiH₂ powder.

Keywords: titanium hydride decomposition, molten aluminum, chemical controlling, external diffusion controlling, internal diffusion controlling, interface reactions.

¹ - PhD Student of Iran University of Science and Technology, ali_rasooli@iust.ac.ir.

² - Assistant professor of Iran University of Science and Technology, divandari@iust.ac.ir.

³ - Assistant professor of Tarbiat Modares University, Shahversi@tmu.ac.ir.

⁴ - Professor of Iran University of Science and Technology, divandari@iust.ac.ir.



بررسی واکنش‌های فصل مشترک پودر هیدراید تیتانیوم و مذاب آلومینیم

علی رسولی^۱، مهدی دیواندری^۲، حمیدرضا شاهرودی^۳، محمد علی بوتراپی^۴

تهران - نارمک - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی مواد و متالورژی
ali_rasooli@iust.ac.ir

چکیده

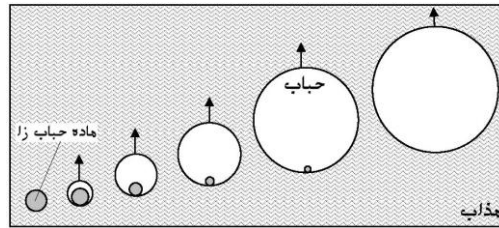
حباب‌ها در فوم‌های فلزی آلومینیمی در اثر تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم در تماس با مذاب آلومینیم تولید می‌شوند بنابراین بررسی واکنش‌های فصل مشترک پودر و مذاب نقش مهمی در دستیابی به مکانیزیم تجزیه هیدراید تیتانیوم در مذاب آلومینیم دارد. در این تحقیق، پودر هیدراید تیتانیوم در بازه‌های دمایی مختلف (الف) ۹۷۳K - ۱۰۲۳K، (ب) ۱۰۷۳K - ۱۰۲۳K و (ج) ۱۰۷۳K - ۱۲۷۳K در تماس با مذاب آلومینیم قرار داده شد و فشار گاز حاصله اندازه‌گیری شد. بعد از انجام مذاب، از جامد ایجاد شده تصاویر SEM تهیه شده و آنالیز EDAX بعمل آمد. مشاهده شد که با افزایش دمای مذاب، زمان لازم جهت تثبیت فشار کاهش یافته و فشار گاز افزایش می‌یابد به عبارت دیگر سرعت انجام واکنش بیشتر می‌شود. به نظر می‌رسد که در هنگام تماس پودر هیدراید تیتانیوم با مذاب، ابتدا لایه نازک $TiAl_3$ در اطراف ذرات پودر ایجاد می‌شود. در بازه دمایی (الف)، لایه $TiAl_3$ تشکیل شده تقریباً پیوسته است، در نتیجه فرآیند تجزیه تحت کنترل نفوذ داخلی (نفوذ آنها از درون لایه $TiAl_3$) باشد. در بازه دمایی (ب)، لایه $TiAl_3$ از پیوستگی کافی برخوردار نبوده و ضخامت کلی آن نسبت به بازه دمایی قبل بیشتر است ولی ضخامت لایه پیوسته $TiAl_3$ نسبت به بازه دمایی قبلی کمتر است. در این حالت پودر حالت نیمه متلاشی پیدا می‌کند. در نتیجه فرآیند تجزیه تحت کنترل نفوذ داخلی (نفوذ آنها از درون لایه $TiAl_3$) و واکنش شیمیایی (واکنش بین مذاب و پودر هیدراید تیتانیوم) قرار دارد. در بازه دمایی (ج)، لایه $TiAl_3$ تشکیل شده در اطراف ذرات پودر متلاشی شده و به درون مذاب پراکنده می‌شوند در نتیجه فرآیند تجزیه تحت کنترل واکنش شیمیایی (واکنش بین مذاب و پودر هیدراید تیتانیوم) قرار دارد. با افزایش دمای مذاب مقدار ذرات پودر باقیمانده کاهش می‌یابد. بدلیل کاهش ضخامت ناپیوستگی لایه $TiAl_3$ تشکیل شده در اطراف ذرات پودر سرعت فرآیند تجزیه با افزایش دمای مذاب افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: هیدراید تیتانیوم، مذاب آلومینیم، کنترل شیمیایی، کنترل نفوذ داخلی، واکنش‌های فصل مشترک

۱- مقدمه

واکنش پودر هیدراید تیتانیوم با مذاب آلومینیم عامل اصلی تولید حباب در فوم‌های فلزی آلومینیمی است [۱-۱۳]. در هنگام ورود پودر هیدراید تیتانیوم به درون مذاب، ذرات پودر به وسیله مذاب احاطه می‌شوند (شکل ۱) [۱۴]. بدلیل بالاتر بودن دمای مذاب نسبت به دمای تجزیه هیدراید تیتانیوم ($400^{\circ}C$)، به محض تماس پودر با مذاب انرژی اکتیواسیون لازم برای تجزیه پودر تامین شده و جوانه اولیه حباب در اطراف پودر تشکیل می‌شود. تا هنگامی که ارتباط پودر با مذاب به طور کامل قطع نشود، حباب در درون مذاب و در اطراف ذره هیدراید تیتانیوم رشد کرده و به سمت بالا حرکت می‌کند [۱۴]. دو عامل دما و اندازه ذرات پودر (در واقع سطح ویژه) ب مکانیزم واکنش موثر است. با افزایش دما، به دلیل افزایش سرعت واکنش شیمیایی مکانیزم واکنش از کنترل شیمیایی به کنترل نفوذی تغییر می‌کند [۱۵].

- 1- دانشجوی دکتری مهندسی مواد- دانشگاه علم و صنعت ایران و مربی دانشکده فنی و مهندسی مکانیک - دانشگاه تبریز
- 2- استادیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی - دانشگاه علم و صنعت ایران
- 3- استادیار دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس تهران
- 4- استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی - دانشگاه علم و صنعت ایران

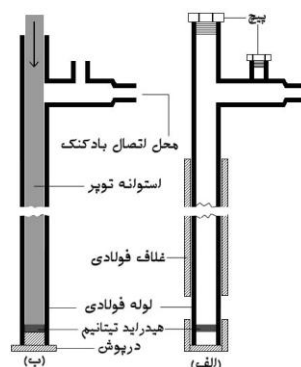


شکل ۱- طرح‌واره مراحل تولید حباب در مذاب با استفاده از ماده حباب‌زا [۱۴].

اگر چه گزارشات مختلفی در مورد اثرات هیدراید تیتانیم در مذاب و بدون حضور مذاب توسط محققان ارائه شده است [۱۶-۲۶]، اما گزارشات زیادی در رابطه با مکانیزیم تجزیه آن در مذاب، که قادر باشد شرایط و نحوه تجزیه را به طور کامل توضیح دهد، وجود ندارد [۲۷]. به هر حال گزارشات دانشمندان مختلف حاکی از تغییر سرعت تجزیه پودر هیدراید تیتانیم است که دلالت بر مکانیزیم پیچیده تجزیه هیدراید تیتانیم در مذاب دارد [۲۱-۲۶]. می‌توان گفت که یکی از عوامل مهم جهت توضیح شرایط حباب زایی هیدراید تیتانیم در مذاب آلومینیم واکنش‌های فصل مشترک پودر و مذاب است که بررسی آن می‌تواند مکانیزیم دقیق تری از فرآیند تجزیه هیدراید تیتانیم در مذاب ارائه دهد. در این تحقیق، علاوه بر واکنش های فصل مشترک پودر هیدراید تیتانیم و مذاب آلومینیم خالص، اثر تغییر دمای مذاب بر آنها بررسی می‌شود.

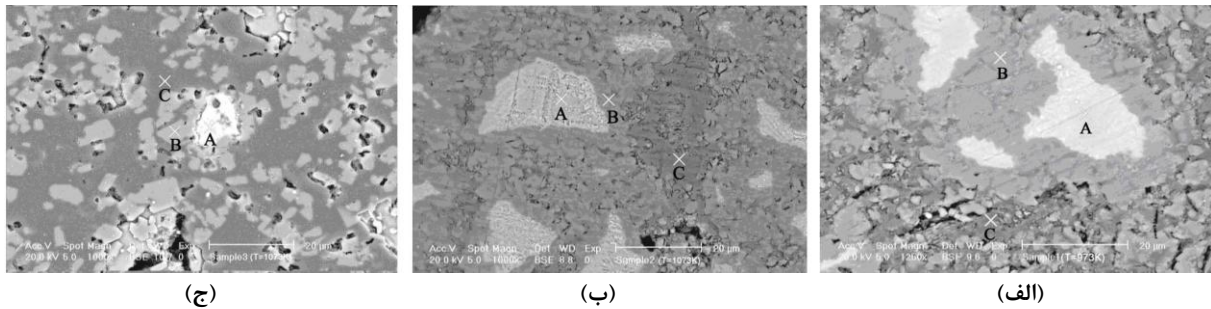
۲- روش آزمایش

با بررسی‌های اولیه بر روی پودر هیدراید تیتانیم مرکب با خلوص ۹۸+ ترکیب شیمیایی آن بر اساس الگوی XRD و کارت شماره ۹۸۳-۲۵ معادل $TiH_{1.924}$ و اندازه ذرات پودر حدود ۸ میکرون تعیین شد. از شمش آلومینیم خالص تجاری (خلوص ۹۹/۹٪) و کوره مقاوم‌تری برای تهیه مذاب استفاده شد. برای بررسی واکنش مذاب در تماس با پودر، لوله و غلافی از جنس فولاد زنگ ۳۰۴ مطابق تصویر الف شکل ۲ طراحی و تهیه شد. برای اطمینان از اتمام واکنش و عدم تماس مجدد اتمسفر با مذاب، انتهای باز لوله فولادی به بادکنک متصل شد.

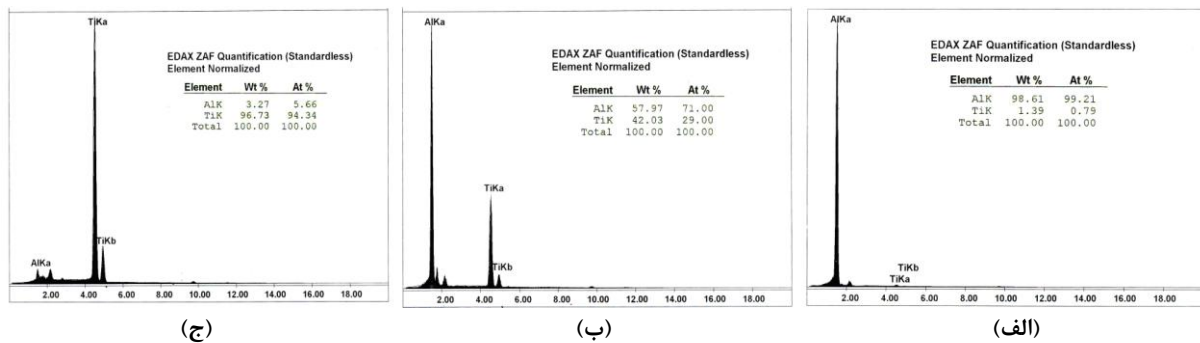


شکل ۲- الف) غلاف و لوله سرهم شده ب) لوله، درپوش و پیچ‌ها.

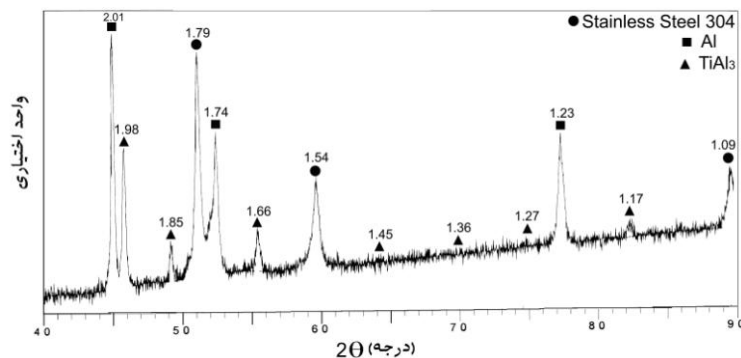
ابتدا درپوش در انتهای لوله مطابق تصویر ب شکل ۲ مستقر و مقدار ۰/۱ گرم پودر هیدراید تیتانیم از بالا به درون لوله وارد و به وسیله استوانه توپر کوبیده، و پیچ بالای لوله بسته شد. در مرحله بعد غلاف فولادی به درون مذاب وارد شده و بعد از مدتی لوله فولادی حاوی پودر هیدراید تیتانیم از طریق غلاف به درون مذاب آلومینیم وارد شد. بعد از ثابت شدن تغییر حجم بادکنک، لوله به همراه غلاف از مذاب خارج شده تا مذاب واکنش کرده با پودر منجمد گردد. سپس از مقطع افقی مذاب منجمد شده در انتهای لوله فولادی تصاویر میکروسکوپی BSE تهیه شد (شکل ۳) در محله بعد آنالیز EDAX در مناطق مختلف انجام (شکل ۴) و در انتها برای بررسی فازها و ترکیبات در نمونه، الگوی XRD تهیه شد (شکل ۵).



شکل ۳- تصاویر SEM مذاب منجمد شده در بازه‌های دمایی (الف) ۹۷۳K-۱۰۲۳K، (ب) ۱۰۲۳K-۱۰۷۳K و (ج) ۱۰۷۳K-۱۲۷۳K.



شکل ۴- آنالیز EDAX مناطق در بازه‌های دمایی مختلف (الف) منطقه A ترکیب شیمیایی Ti، (ب) منطقه B ترکیب شیمیایی $TiAl_3$ و (ج) منطقه C ترکیب شیمیایی Al.



شکل ۵- الگوی XRD مذاب منجمد شده در تماس با پودر هیدراید تیتانیم در بازه‌های دمایی (الف) 973K-1023K، (ب) 1073K-1023K و (ج) 1073K-1273K.

۳- تجزیه و تحلیل نتایج

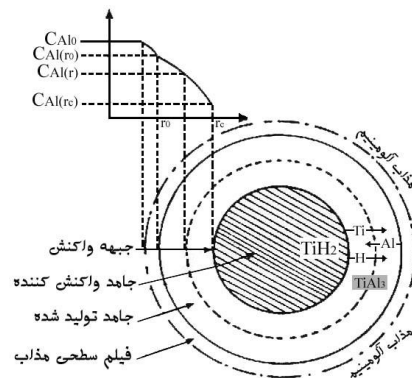
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی BSE مذاب منجمد شده در درون غلاف، در بازه های دمایی مختلف، را نشان می دهد. مناطق A، B و C مناطقی هستند که در هر سه شرایط دمایی فوق الذکر مورد مطالعه قرار گرفته اند. آنالیز EDAX این مناطق، در بازه های دمایی مختلف، نشان داد که این مناطق دارای ترکیب شیمیایی تقریباً یکسانی هستند. بر طبق دیاگرام تعادلی Ti-Al [۲۸] و آنالیز EDAX برای نمونه ها، در بازه های دمایی مختلف مطابق شکل ۴، ترکیب شیمیایی منطقه A «Ti»، ترکیب شیمیایی منطقه B « $TiAl_3$ » و ترکیب شیمیایی منطقه C «Al» تشخیص داده شد. با توجه به گزارش های سایر محققین [۱۲، ۲۱، ۲۰-۳۰] و همچنین شرایط آزمایش و عدم امکان آنالیز هیدروژن در EDAX گرفته شده، منطقه A در واقع هیدراید تیتانیم است. در بررسی تصاویر BSE در بازه دمایی ۹۷۳K-۱۰۲۳K، در دماهای نزدیک ۹۷۳K، کانال هایی به سمت دیواره لوله



و بالا مشاهده شد که معمولاً از محلهایی که پودر در مذاب وجود داشته، شروع می شدند (تصویر الف شکل ۳). همچنین در بررسی تصاویر BSE در دماهای بالاتر از ۱۰۷۳K حفره‌های بسیاری در اطراف مناطق B (ترکیب $TiAl_3$) مشاهده شد (تصویر ج شکل ۳)، که به نظر می‌رسد می‌تواند به دلیل تولید گاز ناشی از تجزیه حرارتی پودر هیدراید تیتانیم و یا کاهش حلالیت گاز هیدروژن در مذاب در حین انجماد باشد.

با بررسی الگوی XRD نمونه‌ها و به کمک نرم افزار PCPDFWIN، بر طبق کارت شماره ۰۴-۰۷۸۷ پیک‌های مربوط به فاز آلومینیم، بر طبق کارت شماره ۲۶-۰۰۳۹ پیک‌های مربوط به ترکیب $TiAl_3$ و بر طبق کارت شماره ۳۳-۰۳۹۷ پیک‌های مربوط به فولاد زنگ نزن ۳۰۴ (در الگوی XRD نمونه‌ها تشخیص داده شد. ظاهر شدن پیک های فولاد زنگ نزن ۳۰۴، به دلیل استفاده از لوله و غلاف فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در آزمایش است.

مطابق با دیگرام تعادلی Al-Ti، در دماهای بالاتر از ۹۳۸K، در صورتی که مقدار تیتانیم بیشتر از ۰/۱۵ درصد وزنی باشد، ترکیب $TiAl_3$ تشکیل می‌شود [۲۸]. بنابراین در حین انجام واکنش هیدراید تیتانیم با مذاب آلومینیم لایه‌ای از $TiAl_3$ در اطراف پودر ایجاد می‌شود. در بررسی واکنش‌های فصل مشترک طی فرآیند تجزیه پودر در تماس با مذاب آلومینیم چهار پدیده؛ (۱) انتقال خارجی جرم، (۲) نفوذ در درون لایه تشکیل شده، (۳) جذب و دفع سطحی و (۴) واکنش شیمیایی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است [۳۱-۳۲]. بر اساس مدل هسته کاهنده (Shrinking Core-Model) [۳۲]، مطابق شکل ۶، مشابه واکنش‌های گاز-جامد، سه عامل اصلی الف) انتقال جرم در فاز مذاب، ب) واکنش شیمیایی مواد واکنش کننده و ج) انتقال جرم در درون محصولات واکنش (لایه تشکیل شده در اطراف ذره) در واکنش‌های فصل مشترک نقش مهمی دارند [۳۳].



شکل ۶- مدل هسته کاهنده برای یک ذره [۳۲].

عامل اول به وسیله نفوذ اتم‌های آلومینیم و گاز هیدروژن از درون فیلم سطحی مذاب کنترل می‌شود و به ضخامت آن بستگی دارد. این عامل تحت نفوذ خارجی مطرح می‌شود. عامل دوم به وسیله سینتیک شیمیایی واکنش پودر هیدراید تیتانیم و مذاب کنترل می‌شود و به مکانیزیم حاکم بر آن بستگی دارد این عامل تحت عنوان واکنش شیمیایی مطرح می‌شود. عامل سوم به وسیله نفوذ اتم‌های واکنش کننده از درون لایه جامد تشکیل شده برای رسیدن به جبهه واکنش کنترل می‌شود و به ضخامت لایه و نوع اتم‌های نفوذ کننده بستگی دارد. این عامل تحت عنوان نفوذ داخلی مطرح می‌شود. بنابراین سه عامل؛ (۱) نفوذ خارجی، (۲) واکنش شیمیایی و (۳) نفوذ داخلی می‌توانند کنترل کننده سرعت واکنش هیدراید تیتانیم با مذاب باشند و نقش مهمی بر روی واکنش‌های فصل مشترک داشته باشند.

به طور کلی می‌توان بیان کرد که در هنگام ورود لوله به درون غلاف فولادی پودر بوسیله مذاب احاطه می‌شود. ابتدا فیلم سطحی مذاب در اطراف پودر به وجود می‌آید. ضخامت این فیلم به ق درت ترشوندگی پودر توسط مذاب، دمای مذاب، هم زدن مذاب و غیره بستگی دارد. به دلیل اینکه هنگام تماس پودر با مذاب، مقدار زیادی گاز هیدروژن آزاد می‌شود [۲۶] و از طرفی پودر در سطح مذاب قرار داشته، گاز به سرعت از سطح مذاب دور می‌شود. بنابراین فیلم سطحی مذاب نازک بوده و می‌توان از



آن صرفنظر کرد. در نتیجه عامل نفوذ خارجی سریع بوده و نمی تواند کنترل کننده سرعت فرآیند باشد. این موضوع به خصوص در تولید فوم های فلزی آلومینیم به روش آلپوراس (Alporas) [۱۲] صدق می کند. چون بلافاصله بعد از ورود پودر هیدراید تیتانیوم مذاب با سرعت هم زده می شود، ضخامت فیلم سطحی مذاب بسیار ناچیز خواهد بود. با تماس پودر با مذاب واکنش $TiH_2(s) + 3Al(l) \rightarrow TiAl_3(s) + H_2(g)$ انجام شده و لایه نازک از $TiAl_3$ در اطراف پودر تشکیل می شود. ادامه واکنش به نفوذ اتم های واکنش کننده از درون لایه $TiAl_3$ بستگی دارد. در ابتدای واکنش، به دلیل نازک بودن لایه $TiAl_3$ ، نفوذ در این لایه تقریباً سریع بوده و به عبارت دیگر عامل نفوذ داخلی سریع است در نتیجه عامل اصلی کنترل کننده سرعت فرآیند واکنش شیمیایی خواهد بود. بررسی های اولیه نشان می دهد در این حالت تغییرات فشار به صورت خطی افزایش می یابد یعنی معادله سرعت واکنش شیمیایی از درجه صفر است [۲۶]. در ادامه با افزایش ضخامت لایه $TiAl_3$ نفوذ اتم های واکنش کننده در لایه کاهش پیدا کرده و در نتیجه عامل اصلی کنترل کننده سرعت فرآیند تجزیه نفوذ داخلی خواهد بود. بررسی ها اولیه نشان می دهد در این حالت تغییرات فشار به صورت لگاریتمی افزایش می یابد و معادله سرعت از درجه یک خواهد بود [۲۶]. در انتها با افزایش بیشتر ضخامت لایه $TiAl_3$ نفوذ داخلی کاهش یافته و از نظر سینتیکی سرعت صفر می شود.

با خروج غلاف و لوله از درون مذاب، مذاب درون لوله شروع به انجماد می کند. به نظر می رسد تا وقتی که دمای لوله و غلاف بالاتر از دمای تجزیه هیدراید تیتانیوم ($400^\circ C$) باشد، تجزیه حرارتی پودر ادامه یابد که در دماهای نزدیک $973K$ به صورت کانال هایی از مناطق B (ترکیب $TiAl_3$) به سمت دیواره های لوله و سطح مذاب در تصاویر میکروسکوپ الکترونی ظاهر می شود (تصویر الف شکل ۳). ولی در دماهای بالاتر از $1073K$ ، به دلیل متلاشی شدن ذرات پودر در مذاب، گاز ایجاد شده در حین تجزیه حرارتی پودر به صورت حفره های کوچک در اطراف ذرات $TiAl_3$ (مناطق B پراکنده شده در مذاب) در تصاویر میکروسکوپی ظاهر می شود (تصویر ج شکل ۳). در بازه دمایی $1023K - 1073K$ ، به دلیل عدم وجود محل مناسب برای ایجاد جوانه های اولیه برای حفره ها، کانالهایی مشابه دماهای نزدیک $973K$ و حفره هایی مشابه دماهای بالاتر از $1073K$ ، در تصاویر میکروسکوپ الکترونی (تصویر ب شکل ۳) ظاهر نشده است. بر اساس نتایج و تحلیل های انجام شده، می توان واکنش های فصل مشترک تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم با مذاب آلومینیم خالص در بازه های دمایی مختلف را به سه حالت تقسیم نمود و مدلی مطابق شکل ۷ برای آن در نظر گرفت.

حالت اول: بازه دمایی $973K$ تا $1023K$.

در این شرایط، هنگام تماس پودر هیدراید تیتانیوم با مذاب، ابتدا بدلیل واکنش پودر هیدراید تیتانیوم با مذاب و تشکیل لایه نازک $TiAl_3$ در اطراف پودر هیدراید تیتانیوم (تصویر الف- ۱ شکل ۷)، سرعت تحت کنترل واکنش شیمیایی است. با ادامه واکنش در نتیجه افزایش ضخامت لایه $TiAl_3$ (تصویر الف- ۲ شکل ۷)، سرعت تحت کنترل نفوذ داخلی است. در انتها با اتمام پودر برای ذرات پودر کوچک و یا افزایش ضخامت لایه $TiAl_3$ برای ذرات بزرگتر پودر، نفوذ اتمها در لایه $TiAl_3$ بسیار کاهش یافته و سیستم به حالت تعادل سینتیکی می رسد و سرعت صفر می شود (تصویر الف- شکل ۳).

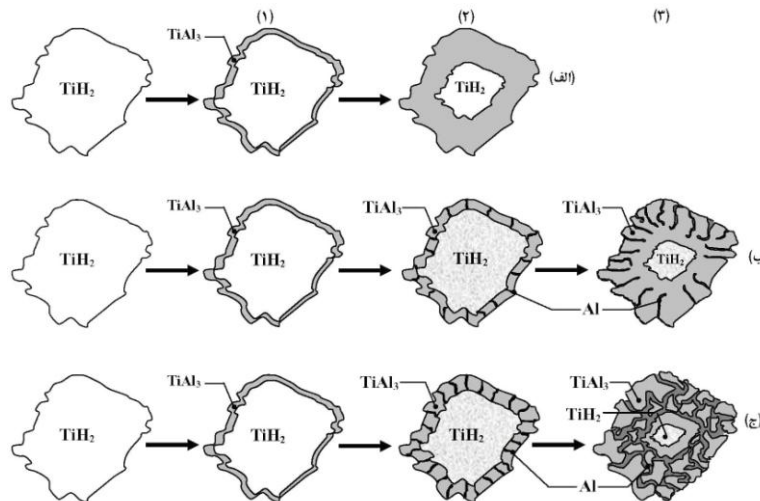
حالت دوم: در بازه دمایی $1023K - 1073K$.

در این شرایط، هنگام تماس پودر هیدراید تیتانیوم با مذاب با دمای بین $973K - 1023K$ ، ابتدا لایه نازک از $TiAl_3$ مشابه حالت اول، در اطراف پودر هیدراید تیتانیوم تشکیل می شود (تصویر ب- ۱ شکل ۷). در این حالت، سرعت تحت کنترل واکنش شیمیایی است. به دلیل افزایش سرعت واکنش $TiAl_3$ با مذاب، پودر هیدراید تیتانیوم حالت نیمه متلاشی پیدا می کند و به نظر می رسد که ذرات پودر هیدراید تیتانیوم حالت متخلخل پیدا می کند (تصویر ب- ۲ شکل ۷).

در ادامه واکنش، لایه $TiAl_3$ تشکیل شده در اطراف پودر پیوسته نبوده و کانال هایی در آن تشکیل می شود (تصویر ب- ۲ شکل ۷). در این حالت، سرعت تحت کنترل واکنش شیمیایی با دو ثابت سرعت مختلف است که با گذشت زمان ثابت سرعت کاهش پیدا می کند [۲۶]. این موضوع می تواند به دلیل کاهش سطح تماس پودر و مذاب به واسطه تشکیل لایه $TiAl_3$ حاوی کانال های کوچک باشد.



در ادامه واکنش، با تشکیل لایه پیوسته $TiAl_3$ در فصل مشترک پودر هیدراید تیتانیوم و لایه $TiAl_3$ (فصل مشترک $TiH_2/TiAl_3$) و نفوذ اتم‌ها از لایه $TiAl_3$ ، سرعت تحت کنترل نفوذ داخلی است (تصویر ب- شکل ۳). با افزایش ضخامت لایه پیوسته $TiAl_3$ ، در فصل مشترک $TiH_2/TiAl_3$ ، نفوذ اتمها در لایه $TiAl_3$ بسیار کاهش یافته و سیستم به حالت تعادل سینتیکی می‌رسد و سرعت صفر می‌شود (تصویر ب- شکل ۳).



شکل ۷- مدل پیشنهادی برای تجزیه پودر TiH_2 در مذاب آلومینیوم (الف) بازه دمایی $973K-1023K$ ، (ب) بازه دمایی $1023K-1073K$ و (ج) بازه دمایی $1073K-1273K$.

حالت سوم: بازه دمایی $1073K-1273K$.

در این شرایط، هنگام تماس پودر هیدراید تیتانیوم با مذاب در دمای بالاتر از $1073K$ ، مشابه با حالت اول و دوم، ابتدا لایه نازک از $TiAl_3$ در اطراف پودر هیدراید تیتانیوم تشکیل می‌شود (تصویر ج- ۱ شکل ۷). در این حالت، سرعت تحت کنترل واکنش شیمیایی است. در ادامه به دلیل سرعت بالای واکنش پودر با مذاب و تولید مقدار زیادی گاز هیدروژن [۲۶]، ابتدا در لایه $TiAl_3$ کانال‌های زیادی ایجاد می‌شود (تصویر ج- ۲ شکل ۷) که منجر به متلاشی شدن لایه $TiAl_3$ شده و ذرات آن به درون مذاب پراکنده می‌شوند (تصویر ج- ۳ شکل ۷). در این حالت، مشابه بازه دمایی $1023K-1073K$ سرعت تحت کنترل واکنش شیمیایی با دو ثابت مختلف قرار دارد [۲۶]. به دلیل متلاشی شدن ذرات پودر در مذاب، سطح تماس پودر با مذاب افزایش یافته و ثابت سرعت اول در این بازه دمایی نسبت به بازه دمایی حالت دوم افزایش می‌یابد. با ادامه واکنش، با تشکیل لایه پیوسته $TiAl_3$ در فصل مشترک $TiH_2/TiAl_3$ ، سرعت تحت کنترل نفوذ داخلی است. (تصویر ج- ۳ شکل ۷). در انتها با افزایش ضخامت لایه پیوسته $TiAl_3$ در اطراف پودر هیدراید تیتانیوم، سیستم به حالت تعادل سینتیکی می‌رسد و سرعت صفر می‌شود (تصویر ج شکل ۳).

۴- نتیجه گیری

- ۱- واکنش‌های فصل مشترک پودر هیدراید تیتانیوم و مذاب آلومینیوم خالص یک واکنش پیچیده است و در طی آن لایه $TiAl_3$ در اطراف پودر تشکیل می‌شود.
- ۲- به نظر می‌رسد که در بازه دمایی $973K-1023K$ ، به دلیل تشکیل لایه تقریباً پیوسته $TiAl_3$ در اطراف ذرات پودر، عامل اصلی کنترل کننده تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم نفوذ اتم‌های آلومینیوم و هیدروژن از درون لایه $TiAl_3$ است.



۳- در بازه دمایی ۱۰۲۳K-۱۰۷۳K، به دلیل تشکیل لایه پیوسته $TiAl_3$ در فصل مشترک $TiH_2/TiAl_3$ و لایه $TiAl_3$ حاوی کانال در اطراف ذرات پودر، به نظر می رسد تجزیه تحت کنترل مخلوط واکنش شیمیایی و نفوذ اتم‌های هیدروژن و آلومینیم از درون لایه $TiAl_3$ است.

۴- در بازه دمایی ۱۰۷۳K-۱۲۷۳K، بدلیل متلاشی شدن لایه $TiAl_3$ در اطراف ذرات پودر هیدراید تیتانیم، به نظر می رسد عامل اصلی کنترل کننده تجزیه پودر هیدراید تیتانیم واکنش شیمیایی است.

۵- با افزایش دمای مذاب، به دلیل تلاشی ذرات پودر و کاهش اندازه ذرات عامل اصلی کنترل کننده سرعت واکنش شیمیایی است.

مراجع:

- 1- Divandari M., Vahid gholpayghni A.R. and Shahverdi, H.R., "Metallic Foams", Iran university and science technology, No. 453, Tehran, 2006.
- 2- Banhart J., "Foam Metal: The Recipe", EuroPhysics News, Jaunary/February, 1999.
- 3- Banhart J., "Metallic Foams: Challenges and Opportunities", Eurofoam 2000, Editors: P. Zitha; Banhart J.; G. Verbist (MIT-Verlag Bremen, p.p. 13-20, 2000.
- 4- Baumgärtner F., Isabel Duarte I. and Banhart J., "Industrialization of Powder Compact Foaming Process", Advanced Engineering Materials, Vol. 2, No.4, 2000.
- 5- Miyoshi T., Itoh M., Akiyama S. and Kitahara A., "ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications", Advanced Engineering Materials, 2, No.4, 2000.
- 6- Duarte I. and Banhart J., "A Study of Aluminium Foam Formation Kinetics and Microstructure", Acta Materialia. Vol. 48, pp: 2349-2362, 2000.
- 7- Banhart J., "Manufacture, Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal foams", Progress in Materials Science, Vol. 46. pp: 559-632, 2001.
- 8- Gergely V., Curran D.C. and Clyne T.W., "Advance in The Melt Route Production of Closed Cell Aluminium Foams Using Gas-Genreating Agents", Global Symposium on Materials Processing & Manufacturing, Processing & Manufacturing, Processing & Properties of Lightweight Cellular Metals & Structures, TMS ANNUAL MEETING, Seattle, Washington, 17-21 February, 2002.
- 9- Banhart J. and Weaire D., "On the Road again: Metal Foams Find Favor", Physics Today, Vol. 55, pp: 37-42, 2002.
- 10- Banhart J., "Aluminum Foams: On the Road to Real Applications", MRS/Bulletin/April, 2003.
- 11- Zeppelin F. von, Hirscher M., Stanzick H. and Banhart J., "Desorption of hydrogen from blowing agents used for foaming metals", Composites Science and Technology, Vol. 63, pp: 2293-2300, 2003.
- 12- Babcsan N., Leitmeier D., Degischer H.P. and Banhart J., "The Role of Oxidation in Blowing Particle-Stabilised Aluminum Foams", Advanced Engineering Materials, Vol. 6, No.6, 2004.
- 13- Behrendt F., Banhart J. and H. Schubert, "Characterisation and Optimisation of Blowing Agent for Making Improved Metal Foams", 2006.
- 14- Rasooli A., Divandari M., Shahverdi H.R. and Boutorabi M.A., " Study of the metallic foams production liquid process with blowing agents", Tehran University, Submitted.
- 15- Sadrnezhaad Kh., "Kinetic Processes in Materials Engineering and Metallurgy", Amir Kabir Publication Organization, Tehran, pp: 290, 1372.
- 16- Padurets L.N., Dobrokhotova Zh. V. and Shilov A.L., "Transformations in titanium dihydride phase", International Journal of Hydrogen Energy 13, Vol 24, pp: 153-156, 1999.
- 17- Tsuchiya B., Teshigawara M., Nagata S., Konashi K., Yasuda R., Nishino Y., Nakagawa T. and Yamawaki M., "Hydrogen analyses of titanium hydride by ERD and NRG Methods", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 190, pp: 699-703, 2002.
- 18- Bobet J.L., Even C. and Quenisset J.M., "On the production of ultra-fine titanium hydride powder at room temperature", Journal of Alloys and Compounds, Vol. 348, pp: 247-251, 2003.
- 19- Setoyama D., Matsunaga J., Ito M., Muta H., Kurosaki K., Uno M. and Yamanaka S., "Thermal properties of titanium hydrides", Journal of Nuclear Materials Vol. 344, pp: 298-300, 2005.
- 20- Gabis J.E., Voit A.P., Evard E.A., Zaika Yu.V., Chernov I.A. and Yartys V.A., "Kineics of Hydrogen Desorption from the Powders of Metals Hydrides", Jouranal of Alloys and Compounds, 404-406, pp: 312-316, 2005.
- 21- Matijasevic-Lux B., Banhart J., Fiechter S., Gorke O. and Wanderka N., "Modification of Titanium Hydride for Improved Aluminium Foam Manufacture", Acta Materialia, Vol. 54, pp: 1887-1900, 2006.
- 22- Bhosle V., Baburaj E.G., Miranova M. and Salama K., "Dehydrogenation of TiH_2 ", Materials and Engineering A356, pp: 190-199, 2003.
- 23- Yang D. and Hur B., "The Relation Between Thermal Decomposition Properties of Titanium Hydride and The Al Alloy Melt Foaming Process", Materials Letters, Vol.60, pp: 3635-3641, 2006.



- 24- Yang D.H., Hur B.Y., He D.P. and Yang S.R., "Effect of Decomposition Properties of Titanium Hydride on the Foaming Process and Pore Structures of Al Alloy Melt Foam", Materials Science and Engineering A, Vol. 445-446, pp: 415-426, 2007.
- 25- Rasooli A., Shahverdi H.R., Divandari M. and Boutorabi M.A., " Study of Thermal Decomposition Kinetics of Hydride Titanium Powder (TiH₂) at High Temeperatures" Mashad Azad university, Submitted
- 26- Rasooli A., Bagheri A.R., Shahverdi H.R. and Divandari M., " Study of Al Melt and TiH₂ Powder Interaction Based on Hydrogen Gas Pressure Variation ", Amir Kabir University, Submitted.
- 27- Banhart J. , "Metal Foams: Production and Stability", Advanced Engineering Materials, Vol. 8, No.9, 2006.
- 28- Metals Handbook, Alloy Phase Diagrams , 10th Edition, Vol. 3 , index2, pp: 54, 1992.
- 29- Haibel A., Rack A. and Banhart J., "Why are Metal Foams Stable?", Applied Physics Letters, Vol. 89, 154102, (2006).
- 30- Frei J., Gergely V., Mortensen A. and Clyne B., "The Effect of Prior Deformation on the Foaming Behavior of "FORMGRIP" Precursor Material", Advanced Engineering Materials, Vol 4, No. 10, (2002).
- 31- Mazet N., "Modeling of Gas-Solid Reaction, 1. NonPorous-Solid", International Chemical Engineering, Vol. 32, No. 2, April 1992.
- 32- Mazet N., "Modeling of Gas-Solid Reaction, 2. Porous Solid", International Chemical Engineering, Vol. 32, No. 3, 1992.
- 33- Rasooli A. and Sadernezhaad K.H., "Simulation of The Rate Reactions of Gas-Solid (Non-Porous) by use of Mazet Model", Tabriz university, 2003.