

بررسی اکسیداسیون پودر هیدراید تیتانیم (TiH_2) به روش وزن سنجی

علی رسولی^۱، مهدی دیواندری^۲، حمیدرضا شاهوردی^۳، محمد علی بوترابی^۴

تهران - نارمک - دانشگاه علم و صنعت ایران - دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

* ali_rasooli@iust.ac.ir

چکیده

در این تحقیق، پودر هیدراید تیتانیم با سرعت $10^\circ C/min$ در هوا از دمای محیط تا دمای $1000^\circ C$ حرارت داده شد و وزن پودر به طور لحظه‌ای اندازه‌گیری شد. معادلات سرعت اکسیداسیون پودر هیدراید تیتانیم تعیین شدند. نتایج نشان داد در دماهای کمتر از $650^\circ C$ ، وزن پودر اندکی کاهش پیدا می‌کند. در این محدوده دمایی، به دلیل خروج هیدروژن از هیدراید تیتانیم، وزن پودر حداکثر به مقدار $1/5\%$ کاهش می‌یابد. در دماهای بالاتر از $650^\circ C$ ، وزن پودر طی دو مرحله تا $51/1\%$ افزایش می‌یابد. مرحله اول در دماهای بین $650^\circ C$ تا $805^\circ C$ اتفاق می‌افتد و وزن پودر با سرعت بیشتری نسبت به مرحله اول افزایش پیدا می‌کند. در مرحله دوم (دماهای بالاتر از $805^\circ C$)، روند افزایش وزن پودر کاهش یافته و وزن پودر با شدت کمتری افزایش می‌یابد. در دمای $920^\circ C$ ، وزن پودر به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس تغییر نمی‌کند. اکسیداسیون پودر هیدراید تیتانیم در دماهای بالاتر از $650^\circ C$ رخ می‌دهد و لایه اکسید تیتانیم (Ti_2O_3) روی سطح ذرات پودر تشکیل می‌شود. به نظر می‌رسد اکسیداسیون هیدراید تیتانیم، در مرحله اول تحت کنترل واکنش شیمیایی و در مرحله دوم تحت کنترل نفوذ داخلی (نفوذ اتم‌های اکسیژن در لایه اکسید تیتانیم) قرار دارد.

واژه‌های کلیدی: هیدراید تیتانیم - اکسیداسیون - ترموگرومتری.

۱- مقدمه

پودر هیدراید تیتانیم به عنوان حامل هیدروژن کاربردهای مختلفی (مانند هسته‌ای، عملیات حرارتی، نسوزها، ماده گاززدا در الکترونیک، کاهش دهنده اتمسفر کوره‌ها، منبع هیدروژن خالص و ...) در صنعت دارد [۱]. علاوه بر کاربردهای فوق، پودر هیدراید تیتانیم به عنوان ماده حباب‌زا در تولید فوم‌های فلزی استفاده می‌شود [۲-۵]. فوم‌های فلزی، گروهی از مواد جدید با خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی منحصر بفرد هستند که کاربردهای فراوانی در مدیریت انرژی و حرارت مانند (عایق‌های حرارتی و الکتریکی، مبدل‌های حرارتی، سپرهای حرارتی، سیستم‌های ضد حریق، مشعل‌ها و ...) پیدا کرده‌اند. خواص حرارتی فوم‌های فلزی آنقدر متفاوت است که استفاده از آنها را برای ساخت انواع عایق‌ها و یا مبدل‌های حرارتی امکان‌پذیر ساخته است (شکل ۱).

تمام خواص فوم‌های فلزی به نوع و شکل سلول‌های تشکیل دهنده فوم، جنس و نوع فلز سازنده فوم و چگالی فوم بستگی دارد و نوع سلول‌های فوم نقش مهمی برای کاربردهای خاص آنها دارد [۶-۸]. یکی از روش‌های تولید فوم‌های فلزی روش ذوبی با استفاده از ماده حباب‌زای هیدراید تیتانیم است [۲-۵]. جریان حباب، یکی از پدیده‌های محدود کننده در روش فوم‌سازی

۱- دانشجوی دکتری مواد دانشگاه علم و صنعت ایران و مربی دانشکده فنی و مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز.

۲- دانشیار دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران.

۳- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس.

۴- استاد دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران

ذوبی است [۹]. بنابراین، کنترل دقیق فرآیند رشد حباب در مذاب منجر به تولید فوم با ساختارهای منظم و بدون عیب می‌شود [۲ و ۱۰].



شکل ۱- (الف) مبدل حرارتی برای سیستم کنترل هوای شاتلهای فضایی، (ب) پمپ حرارتی در سیستم تصفیه هوا و (ج) نازل راکت [۱]

اختلاف دمای تجزیه پودر هیدراید تیتانیوم (400°C) و نقطه ذوب آلومینیوم (630°C)، یکی از عوامل مهم در تشکیل فوم با ساختارهای نامنظم و معیوب است [۹]. یکی از راههای تاخیر در آزادسازی گاز هیدروژن از هیدراید تیتانیوم، تشکیل لایه اکسید روی سطح ذرات پودر یا اکسیداسیون آن است. با توجه به اینکه، در حین عملیات حرارتی پودر، گاز هیدروژن خارج شده و باعث کاهش حبابزایی پودر شده و همچنین افزایش لایه اکسید منجر به عدم خروج گاز از هیدراید تیتانیوم می‌گردد. بنابراین بررسی اکسیداسیون پودر هیدراید تیتانیوم برای دستیابی به شرایط بهینه ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، اکسیداسیون هیدراید تیتانیوم (TiH_2) با استفاده از اندازه‌گیری افزایش وزن پودر مورد بررسی قرار گرفت.

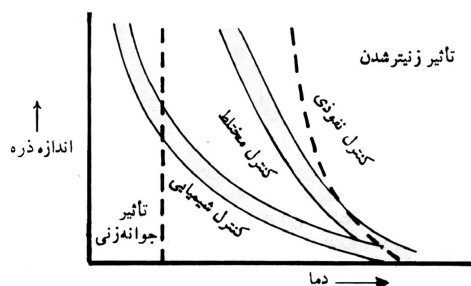
۲- اکسیداسیون هیدراید تیتانیوم

تولید گاز از هیدرایدهای فلزی تحت تاثیر فرآیندهای مختلفی مانند تجزیه فاز هیدراید، نفوذ هیدروژن در درون شبکه فلز و فازهای مختلف هیدرایدی، و ترکیب مجدد آن روی سطح فلز قرار دارد [۱۱]. لایه اکسید روی سطح ذرات پودر هیدراید تیتانیوم پیش‌گرم شده در هوا در محدوده دمایی 400°C الی 500°C تشکیل شده و باعث کاهش سرعت آزادسازی هیدروژن می‌شود [۱۲-۱۳]. تشکیل اکسید در چند مرحله گرمازا اتفاق می‌افتد. ابتدا اکسی‌هیدراید^۱ تشکیل شده و سپس در طی حرارت‌دهی اکسید تیتانیوم تشکیل می‌گردد [۱۲-۱۳]. عملیات حرارتی پودر TiH_2 ، استکیومتری هیدراید را کاهش داده و سرعت خروج هیدروژن می‌تواند به وسیله اکسیداسیون کاهش یابد [۱۲-۱۳]. لایه اکسید تشکیل شده روی سطح ذرات پودر هیدراید تیتانیوم در طی عملیات حرارتی، دمای آزادسازی گاز را افزایش می‌دهد زیرا لایه اکسید به عنوان مانع در برابر نفوذ هیدروژن عمل می‌کند [۱۴-۱۵]. فاز δ هیدراید تیتانیوم با یک لایه اکسید با ضخامت 10 nm پوشیده می‌شود و خروج هیدروژن طی چند مرحله پی در پی اتفاق می‌افتد [۱۶]. مقدار هیدروژن آزاد شده تحت تاثیر فرآیند اکسیداسیون قرار داشته و خروج هیدروژن از TiH_2 از قانون سرعت درجه یک تبعیت می‌کند [۱۶]. در طی حرارت دادن پودر هیدراید تیتانیوم در هوا، لایه سطحی روی ذرات پودر هیدراید تیتانیوم گسترش پیدا کرده و از نفوذ هیدروژن طی آنیل کردن جلوگیری می‌کند و در فرآیند فوم‌سازی به عنوان مانع در برابر خروج گاز هیدروژن عمل می‌کند [۱۷].

برای مطالعه و تعیین سرعت واکنش‌های گاز-جامد، چهار پدیده "انتقال خارجی جرم"، "نفوذ در درون لایه تشکیل شده"، "جذب و دفع سطحی" و "واکنش شیمیایی" از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و پدیده‌های دیگری از قبیل انتقال حرارت (چه در داخل جامد و بین جامد و گاز)، تغییر ساختار و ... تاثیر کمتری بر سرعت واکنش گاز-جامد دارند [۱۸].

^۱. Oxyhydride

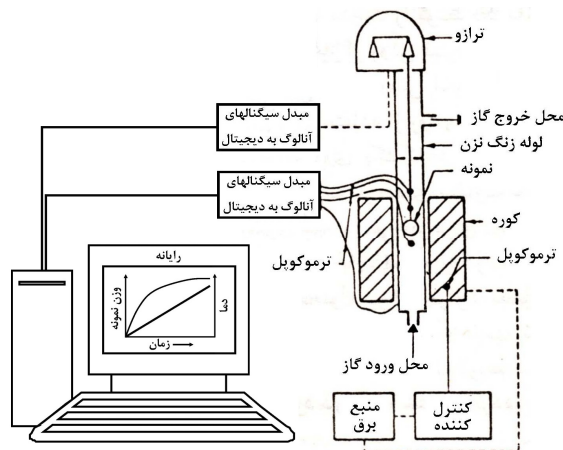
تأثیر دو عامل دما و اندازه قطعه بر مکانیزم کنترل کننده سرعت واکنش بطور شماتیکی در شکل (۱) نشان داده شده است. در مورد قطعات کوچک بدلیل سهولت انتقال گاز به محل واکنش، مکانیزم کنترل کننده سرعت واکنش شیمیایی است. اما در دماهای بالا بعلاوه سرعت واکنش شیمیایی مکانیزم کنترل کننده سرعت واکنش نفوذ می‌باشد. در دماهای پایین، "فرآیند جوانه‌زنی یک فاز جامد" و در دماهای بالا "پدیده تفجوشی" ممکن است، بر سرعت کلی تحول تأثیر بگذارد و لیکن با توجه به محدودیت اطلاعات موجود از اثرات آنها در اکثر موارد صرفنظر می‌شود [۱۹].



شکل ۱ - نمایش تأثیر دما و اندازه قطعه بر مکانیزم واکنش [۱۹]

۳- روش انجام تحقیق

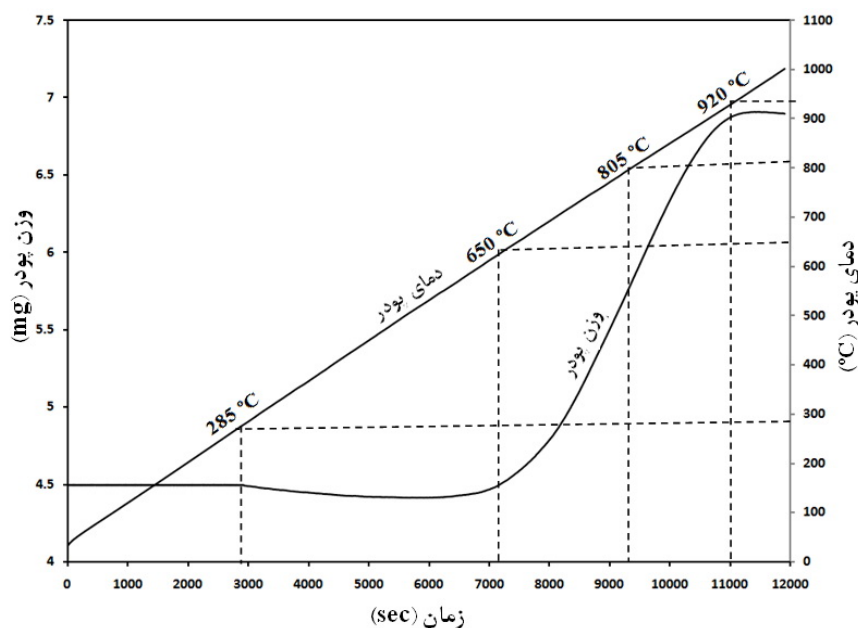
در این تحقیق، از پودر هیدراید تیتانیم مرکب آلمان دانه ریز (اندازه ذرات بین ۲-۱۲ میکرون) با خلوص ۹۸٪+ استفاده شد. سپس با استفاده از دستگاه ترموگرومتری شیمادزو مدل DTG60H ساخت ژاپن (شکل ۲)، مقدار ۴/۵mg پودر نمونه هیدراید تیتانیم در هوا با سرعت حرارت‌دهی $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ از دمای محیط تا دمای 1000°C حرارت داده شد و تغییرات وزن نمونه اندازه‌گیری شد. برای تعیین اکسید تشکیل شده روی سطح ذرات پودر با استفاده از دستگاه تفرق اشعه ایکس -Jeoljdx-8030 ساخت ژاپن، در ابتدا و انتهای آزمایش الگوی XRD پودر هیدراید تیتانیم تهیه شد.



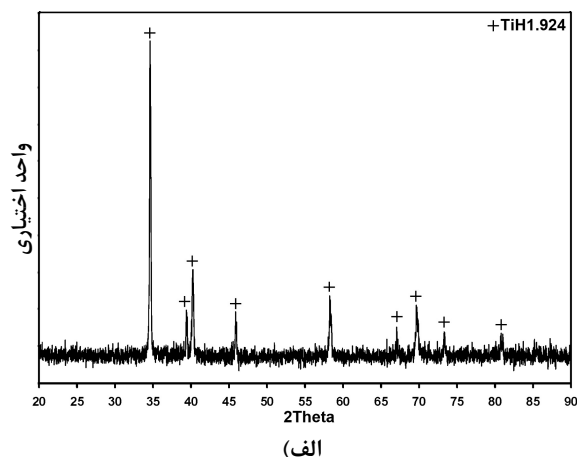
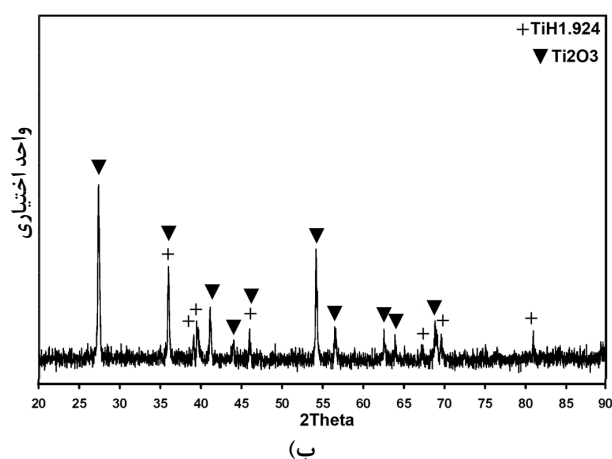
شکل ۲- تصویر شماتیک دستگاه ترموگرومتری

۴- نتایج

در شکل ۳، نمودار تغییر وزن پودر هیدراید تیتانیم و شیب دمای پودر با سرعت $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ آورده شده است. در شکل ۴، الگوهای XRD پودر هیدراید تیتانیم قبل و بعد از آزمایش ترموگرومتری و سرد شدن نمونه تا دمای 25°C نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار تغییر وزن پودر هیدراید تیتانیوم و شیب دمای پودر با سرعت $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ در هوا



شکل ۴- الگوی های XRD پودر هیدراید تیتانیوم (الف) قبل از آزمایش و (ب) بعد از آزمایش.

۵- تجزیه و تحلیل نتایج

همانطوری که در شکل ۲ مشاهده می شود تغییر وزن پودر هیدراید تیتانیوم در دماهای کمتر و بیشتر از 650°C متفاوت است که مشابه گزارش توسط محققان مختلف است [۱۲-۱۳].

در دماهای کمتر از 650°C ، وزن پودر تغییر چندانی نمی کند و تقریباً ثابت است. بررسی دقیق نشان می دهد که مقداری اندکی وزن پودر کاهش می یابد. در این محدوده دمایی، بعد از گذشت ۴۸ دقیقه، در دمای 280°C کاهش وزن پودر آغاز می شود. کاهش وزن پودر تقریباً تا دمای 650°C ادامه پیدا می کند و وزن پودر حداکثر به مقدار $1/5\%$ کاهش می یابد. به نظر می رسد کاهش وزن پودر حاکی از خروج هیدروژن از هیدراید تیتانیوم است [۱۲-۱۳ و ۱۶]. زیرا با خروج اتم های هیدروژن از شبکه تیتانیوم و تشکیل فاز TiH_x روی سطح ذرات پودر، وزن پودر کاهش پیدا می کند. در این محدوده دمایی، اکسیداسیون هیدراید تیتانیوم رخ نمی دهد زیرا در اثر اکسیداسیون، اتم های اکسیژن به درون شبکه تیتانیوم وارد می شوند و با تشکیل لایه اکسید روی سطح ذرات پودر، وزن پودر افزایش پیدا می کند [۲۰].

در دماهای بیشتر از 650°C ، وزن پودر افزایش محسوسی پیدا می‌کند. وزن پودر حداکثر $51/1\%$ وزنی افزایش می‌یابد. افزایش وزن پودر تقریباً از دمای 650°C شروع شده و تا دمای 920°C ادامه پیدا می‌کند. بعد از دمای 920°C ، وزن پودر تقریباً ثابت می‌ماند و تغییر نمی‌کند. بررسی دقیق داده‌ها نشان می‌دهد که در دمای 805°C ، روند افزایش وزن پودر کاهش یافته و وزن پودر با شدت کمتری افزایش می‌یابد. در دمای 920°C ، به حداکثر مقدار وزن پودر می‌رسد. به نظر می‌رسد با خروج اتم‌های هیدروژن از شبکه تیتانیم، فضای خالی برای اتم‌های اکسیژن در شبکه تیتانیم ایجاد می‌شود و با ورود اتم‌های اکسیژن به درون شبکه تیتانیم، به تدریج لایه اکسید روی سطح ذرات پودر تشکیل می‌شود و در نتیجه وزن پودر افزایش می‌یابد [۱۲-۱۶]. در ابتدا به دلیل نازک بودن لایه اکسید، این لایه نمی‌تواند به عنوان مانع جدی در برابر نفوذ اتم‌های اکسیژن عمل کند و وزن پودر به طور محسوسی افزایش می‌یابد [۱۷]. سپس با افزایش ضخامت لایه اکسید، نفوذ اتم‌های اکسیژن درون لایه اکسید سطحی کاهش می‌یابد و در نتیجه روند افزایش وزن پودر کاهش می‌یابد. در انتها ضخامت لایه اکسید بعدی می‌رسد که به عنوان سد در برابر نفوذ اتم‌های اکسیژن عمل می‌کند و در نتیجه روند افزایش وزن پودر متوقف شده و اکسیداسیون هیدراید تیتانیم خاتمه می‌یابد [۱۲-۱۷].

بنابراین می‌توان بیان کرد که اکسیداسیون هیدراید تیتانیم در حین گرمایش در هوا طی سه مرحله رخ می‌دهد. مرحله اول، در دماهای بین 650°C تا 805°C صورت می‌گیرد و وزن پودر افزایش پیدا می‌کند. مرحله دوم در دماهای بین 805°C تا 920°C رخ می‌دهد و وزن پودر با سرعت کمتری نسبت به بازه قبلی افزایش پیدا می‌کند و در در حله سوم، وزن پودر ثابت شده و اکسیداسیون متوقف می‌گردد.

همانطوری که در شکل ۳ مشاهده می‌شود به کمک نرم افزار PCPDFWIN بر طبق شماره کارت ۲۵-۹۸۳ فرمول شیمیایی پودر هیدراید تیتانیم $\text{TiH}_{1.924}$ تعیین شد. بر طبق شماره کارت ۱۰-۰۶۳ ترکیب شیمیایی اکسید تیتانیم Ti_2O_3 تشخیص داده شد. بنابراین، در اثر اکسیداسیون پودر TiH_2 ، به دلیل تشکیل اکسید تیتانیم (Ti_2O_3) روی سطح ذرات پودر، وزن پودر افزایش می‌یابد [۱۲-۱۷].

با توجه به اینکه اکسیداسیون پودر هیدراید تیتانیم به مقدار اکسید تشکیل شده روی سطح ذرات پودر بستگی دارد و از طرفی با ورود اتم‌های اکسیژن به درون شبکه تیتانیم، اکسیداسیون انجام می‌شود و وزن پودر افزایش می‌یابد [۲۰]. بنابراین افزایش وزن پودر در طی آزمایش وزن سنجی معرف اکسیداسیون پودر هیدراید تیتانیم است و می‌توان معادله سرعت اکسیداسیون را بر اساس وزن اکسید تشکیل شده بیان کرد [۱۹]. در نتیجه برای معادله سرعت اکسیداسیون می‌توان نوشت.

$$\frac{dm_{\text{Oxide}}}{dt} = k \cdot m_{\text{Oxide}}^n \quad (1)$$

که در آن؛ m_{Oxide} : وزن اکسید تشکیل شده روی سطح ذرات پودر، k : ثابت سرعت واکنش، n : درجه واکنش و t : زمان واکنش است.

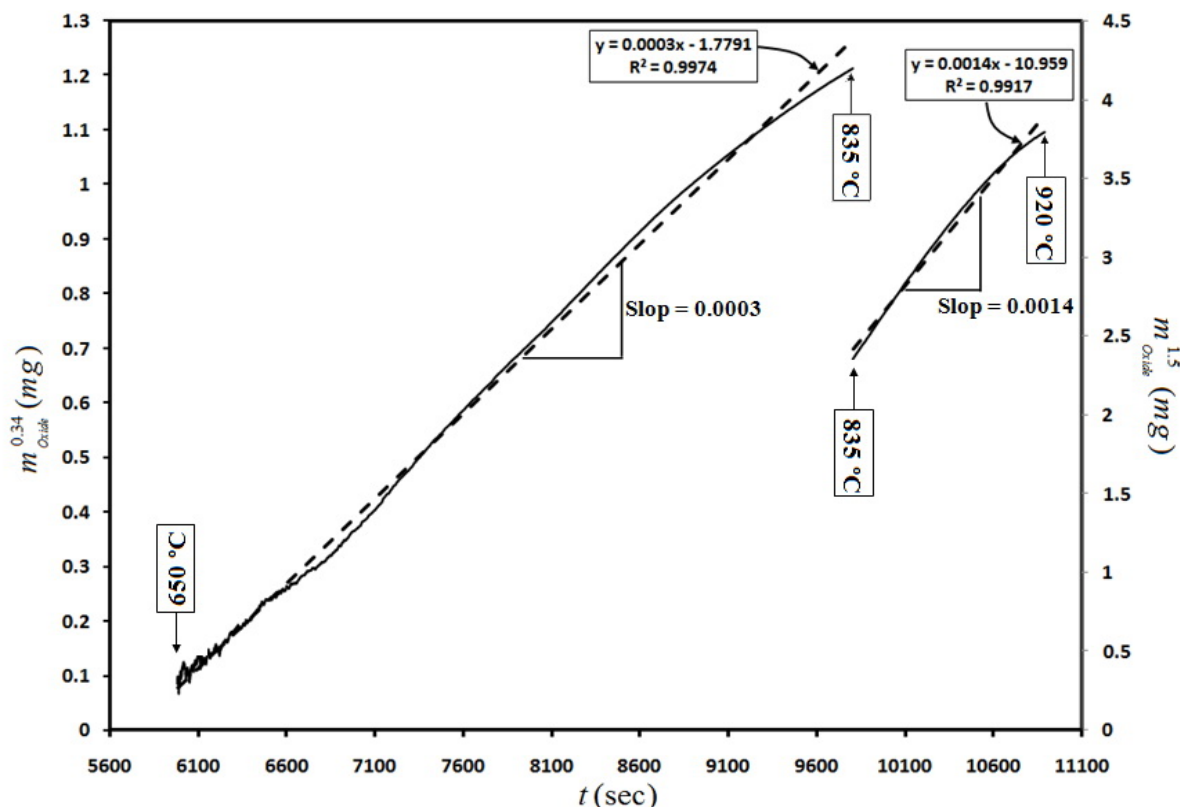
با انتگرال گیری از معادله و اعمال شرایط مرزی می‌توان نوشت.

$$-\frac{1}{1-n} m_{\text{Oxide}}^{1-n} \Big|_{m_{\text{Oxide}}^0}^{m_{\text{Oxide}}} = kt \Big|_{t=0}^{t=t} \quad (2)$$

بعد از مرتب کردن معادله (۲) داریم:

$$m_{\text{Oxide}}^{1-n} = (1-n)kt + C \quad (3)$$

برای تعیین درجه معادله سرعت واکنش اکسیداسیون، برنامه‌ی به روش مشتق نوشته شد و درجه معادله سرعت اکسیداسیون پودر هیدراید تیتانیم برای مراحل اول و دوم به ترتیب ۰/۶۶ و ۰/۵- تعیین شد. برای تعیین ثوابت سرعت اکسیداسیون، ابتدا مقادیر n تعیین شده در معادله (۳) جایگذاری شدند و سپس طبق معادله (۳)، نمودارهای m_{Oxide}^{1-n} بر حسب t بر حسب مقایر مختلف n برای مراحل اول و دوم رسم شدند (شکل ۵).



شکل ۵- نمودارهای m_{Oxide}^{1-n} بر حسب t بر حسب مقایر مختلف n برای مراحل اول و دوم اکسیداسیون هیدراید تیتانیم در طی گرمایش در هوا

بعد از تعیین شیب بهترین خط عبور داده شده از نمودارها رسم شده در شکل ۵، مقادیر ثوابت سرعت برای مراحل اول و دوم به ترتیب $8.82 \times 10^{-4} \text{ mg}^{0.34} \cdot \text{sec}^{-1}$ و $9.33 \times 10^{-4} \text{ mg}^{1.5} \cdot \text{sec}^{-1}$ تعیین شد. بنابراین، سرعت اکسیداسیون هیدراید تیتانیم برای مراحل اول و دوم به ترتیب طبق معادلات (۴) و (۵) بدست می‌آیند.

$$\frac{dm}{dt} = 8.82 \times 10^{-4} \cdot m^{0.66} (\text{mg} / \text{sec}) \quad (4)$$

$$\frac{dm}{dt} = 9.33 \times 10^{-4} \cdot m^{-0.5} (\text{mg} / \text{sec}) \quad (5)$$

با توجه اینکه شکل معادله سرعت، مبین نوع مکانیزم فرآیند است [۱۸-۱۹]، به نظر می‌رسد که در مرحله اول (یعنی دماهای بین ۶۵۰°C تا ۸۰۵°C) اکسیداسیون هیدراید تیتانیم تحت کنترل واکنش شیمیایی قرار دارد [۱۸]. زیرا در این مرحله، مقدار تشکیل اکسید روی سطح ذرات پودر افزایش می‌یابد. در مرحله دوم (یعنی دماهای بین ۸۰۵°C تا ۹۲۰°C) اکسیداسیون

هیدراید تیتانیم تحت کنترل نفوذ داخلی قرار دارد. زیرا در این مرحله، مقدار تشکیل اکسید روی سطح ذرات پودر به تدریج کاهش می‌یابد. به نظر می‌رسد در این مرحله با افزایش ضخامت لایه اکسید، این لایه به عنوان مانع در برابر نفوذ اتم‌های اکسیژن عمل کرده و از تماس اکسیژن با تیتانیم جلوگیری می‌کند [۱۲-۱۷]. در نتیجه اکسیداسیون به نفوذ اتم‌های اکسیژن درون لایه اکسید سطحی بستگی پیدا می‌کند [۱۸].

۵- نتیجه‌گیری

- ۱- در حین گرمایش پودر هیدراید تیتانیم در هوا، ابتدا تا دمای 650°C ، وزن پودر حداکثر به مقدار $1/5\%$ وزنی کاهش می‌یابد، بنابراین قبل از اکسیداسیون هیدراید تیتانیم، مقداری از اتم‌های هیدروژن از شبکه تیتانیم خارج می‌شوند.
- ۲- افزایش وزن پودر از دمای 650°C شروع می‌شود و به مقدار $51/1\%$ وزنی افزایش پیدا می‌کند. بنابراین اکسیداسیون هیدراید تیتانیم در دماهای بالاتر از 650°C رخ می‌دهد.
- ۳- برای اکسیداسیون هیدراید تیتانیم، ابتدا بایستی اتم‌های هیدروژن از شبکه تیتانیم خارج شده و بعد با ورود اتم‌های اکسیژن به درون شبکه تیتانیم، اکسیدسیون صورت می‌گیرد و اکسید تیتانیم (Ti_2O_3) روی سطح ذرات پودر تشکیل می‌شود.
- ۴- اکسیداسیون هیدراید تیتانیم طی دو مرحله انجام می‌شود این مراحل به ترتیب در بازه‌های دمایی الف) 650°C تا 805°C و ب) 805°C تا 920°C رخ می‌دهد.
- ۵- در مرحله اول، اکسیداسیون از معادله سرعت $\frac{dm}{dt} = 8.82 \times 10^{-4} \cdot m^{0.66} \text{ (mg / sec)}$ پیروی می‌کند و اکسیداسیون تحت کنترل واکنش شیمیایی قرار دارد.
- ۶- در مرحله دوم اکسیداسیون از معادله سرعت $\frac{dm}{dt} = 9.33 \times 10^{-4} \cdot m^{-0.5} \text{ (mg / sec)}$ پیروی می‌کند و اکسیداسیون تحت کنترل نفوذ داخلی قرار دارد.

مراجع

- 1- Keller, H., and Frb, U., *Dictionary of Engineering Materials*, John Willy and Sons, New Jersey, 2004, pp. 1170.
- ۲- دیواندری، م.، شاهوردی، ح.ر. و وحیدگلپایگانی، ع.ر.، "فومهای فلزی"، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۵.
- ۳- رسولی، ع.، دیواندری، م.، شاهوردی، ح.ر. و بوتراپی، م.ع.، "تولید فومهای فلزی به روش ذوبی با استفاده از مواد حباب‌زا"، دومین همایش فن آوریهای بومی ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۲۹-۳۰ اردیبهشت ماه ۱۳۸۸.
- 4- Banhart, J., "Manufacture, "Characterisation and Application of Cellular Metals and Metal foams", *Progress in Materials Science*, Vol. 46, pp. 559-632, 2001.
- 5- Miyoshi, T., Itoh, M., Akiyama, S., and Kitahara, A., "ALPORAS Aluminum Foam: Production Process, Properties, and Applications", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 2, No.4, pp. 179-183, 2000.
- 6- Zhao, C.Y., Lu, W., and Tassou, S.A., "Thermal analysis on metal-foam filled heat exchangers. Part II: Tube heat exchangers", *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 49, pp. 2762-2770, 2006.
- 7- Bonaccorsi, L., Freni, A., Proverbio, E., Restuccia, G., and Russo, F., "Zeolite coated copper foams for heat pumping applications", *Microporous and Mesoporous Materials* Vol. 91, pp. 7-14, 2006.
- 8- Boomsma, K., Poulikakos, D., and Zwick, F., "Metal foams as compact high performance heat exchangers", *Mechanics of Materials* Vol. 35, pp. 1161-1176, 2003.
- 9- Banhart, J., "Metal Foams: Production and Stability", *Advanced Engineering Materials*, Vol. 8, No. 9, pp. 781-794, 2006.
- 10- Gergely, V., Curran D.C., and Clyne, T.W., "Advance in The Melt Route Production of Closed Cell Aluminum Foams Using Gas-Generating 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.
- 11- Gabis, J.E., Voit, A.P., Evard, E.A., Zaika, Yu.V., Chernov, I.A., and Yartys, V.A., "*Kinetics of Hydrogen Desorption from the Powders of Metals Hydrides*", Journal of Alloys and Compounds, 404-406, pp. 312-316, 2005.
 - 12- Kennedy, A.R., and Lopez, V.H., "*The decomposition behavior of as-received and oxidized TiH₂ foaming-agent powder*", Materials Science and Materials, 357, pp. 258-263, 2003.
 - 13- Kennedy, A.R., "*The effect of TiH₂ heat treatment on the gas release and foaming in Al-TiH₂ preforms*", Scripta Materiala, Vol. 47, pp. 763-767, 2002.
 - 14- Matijasevic-Lux, B., Banhart, J., Fiechter, S., Gorke, O., and Wanderka, N., "*Modification of Titanium Hydride for Improved Aluminum Foam Manufacture*", Acta Materialia, Vol. 54, pp. 1887-1900, 2006.
 - 15- Matijasevic, B., Fiechter, S., Zizak, I., Gorke, O., Wanderka, N., Schubert-Bischoff, P., and Banhart, J., "*Decomposition behaviour of as-received and oxidized TiH₂ powder*", Powder Metallurgy World Congress, Vienna: European Powder Metallurgy Association, 2004.
 - 16- Tsuchiya, B., Nagata, S., Ohtsu, n., Toh, N., and Shikama, T., "*Thermal desorption of hydrogen at the titanium hydride- oxide interface*", The Japan Institute of Metals, Vol. 46, No. 2, pp. 196-198, 2005.
 - 17- Lehmhus, D., and Rausch, G., "*Tailoring titanium hydride decomposition kinetics by annealing in various atmospheres*", Advanced Engineering Materials, Vol. 6, No.5, pp. 313-330, 2004.
- ۱۸- رسولی، علی و صدرنژاد، خ، "شبیه‌سازی سرعت واکنشهای گاز- جامد (غیر متخلخل) با استفاده از مدل مزت"، مجله دانشکده فنی- دانشگاه تبریز، جلد ۲۹، شماره ۲، صفحه ۳۷-۴۹، پاییز ۱۳۸۱.
- ۱۹- صدرنژاد، خ، "فرآیندهای سینتیکی در مهندسی مواد و متالورژی"، انتشارات امیر کبیر، تهران، صفحه ۲۹۰، ۱۳۷۲.
- ۲۰- رسولی، ع، دیواندری، م، شاهوردی، ح.ر. و بوتراپی، م.ع، "بررسی اثر اتمسفر و سرعت حرارت دهی بر رفتار تجزیه حرارتی پودر هیدراید تیتانیوم در هوا"، دومین کنفرانس ملی ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، اصفهان، ۶-۷ آبان ماه ۱۳۸۸.