

## بررسی مکانیزم ترشوندگی در فصل مشترک سیستم آلومینیم- منیزیم/سرامیک

حسن شریفی<sup>۱\*</sup>، مهدی دیوانداری<sup>۲</sup>، علیرضا خاوندی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه شهرکرد، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی مواد، شهرکرد، ایران.

<sup>۲</sup>دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی مواد، تهران، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۰/۱۰/۲۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۳/۱/۲۵، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۲/۲۱

**چکیده** یکی از مهم‌ترین عوامل در مطالعه کامپوزیت‌های زمینه فلزی، پدیده ترشدن فلز - سرامیک در فصل مشترک آن‌ها است. در این پژوهش مکانیزم ترشوندگی آلومینیم براساس ترمودینامیک واکنش‌های موجود در فصل مشترک مورد بررسی قرار گرفت. اساساً واکنش‌های بوجود آمده در فصل مشترک فلز - سرامیک منجر به ایجاد محصولی جدید در سطح فاز سرامیکی شده که در اکثر موارد موجب کاهش زاویه ترشوندگی می‌شود. اثر عنصر آلیاژی منیزیم و دمای فرایند بر ترشوندگی، به صورت تئوری از دیدگاه ترمودینامیکی و فیزیکی بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که در فرایند ترشدن از نوع واکنش پذیری، نه تنها شدت واکنش فصل مشترک ( $\Delta G_f$ )، تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنش) حاکم می‌باشد بلکه خواص حاصل از تغییرات انرژی فصل مشترک ( $\Delta \sigma_f$ ) نیز موثر است. شدت زاویای ترشوندگی با استفاده از مدل فیزیکی و شیمیایی محاسبه و مشاهده شد که با مقادیر آزمایشگاهی همخوانی خوبی را دارا می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** مواد کامپوزیتی - ترشوندگی - زاویه ترشوندگی - آلومینیم(منیزیم)/سرامیک.

## Investigation Wetting Mechanism at Al-Mg/Ceramic Interfaces

Hassan Sharifi<sup>\*1</sup>, Mehdi Divandari<sup>2</sup>, Alireza Khavandi<sup>2</sup>

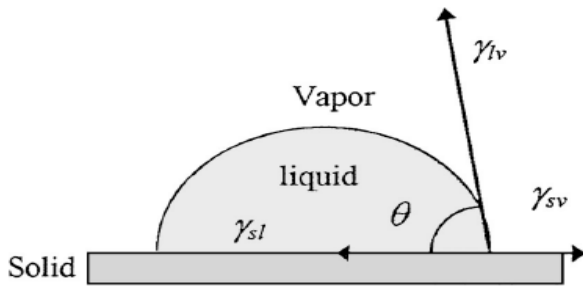
<sup>1</sup>University of shahrekord, Department of materials engineering, Sharekord, Iran

<sup>2</sup>Iran University of Science and Technology, Department of Materials Engineering, Tehran. Iran

**Abstract** The wettability at the metal - ceramic interfaces is important in many applications, such as metal matrix composites (MMCs). The objective of the present paper is to study wetting phenomenon of aluminium base on reactios at interfacial. The effects of alloy elements such as Mg and the processing temperature on wettability were investigated theoretically. The reactive wetting is governed not only by the interfacial reaction intensity,  $\Delta G_f$ , but also by the physical and chemical properties of the resulting interface,  $\Delta \sigma_f$ . The calculated wetting contact angles from physical and chemical model are approximately in agreement with experimental values.

**Keywords** Composites materials, Wettability, Contact angle, Al-Mg/Ceramics.

## ۱- مقدمه



شکل ۱. طرحواره‌ای از قطره مذاب بر روی سطح جامد، به همراه انرژی‌های فصل مشترک و زاویه ترشوندگی [۸].

با توجه به شکل (۱) معیارهایی جهت اندازه‌گیری ترشوندگی وجود دارد که مهم‌ترین آن استفاده از معادله یانگ است [۸].

$$\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos \theta \quad \text{معادله (۱)}$$

معادله (۱) به طور وسیع در پدیده‌های سطحی به‌عنوان یک اصل اساسی جهت اندازه‌گیری ترشوندگی استفاده می‌شود. روش‌های زیادی برای اندازه‌گیری ترشوندگی سرامیک توسط فلز مذاب در تهیه کامپوزیت‌های زمینه فلزی وجود دارد. برای این منظور اکثر محققان از روش قطره ساکن ۲ استفاده کرده‌اند [۹].

## ۲- روش تحقیق

بر اساس اصول ترمودینامیک، تغییرات انرژی آزاد در یک سیستم واکنش‌پذیر نه تنها به تغییرات انرژی گیبس بلکه به تغییرات بوجود آمده در ترکیب شیمیایی در طی واکنش نیز بستگی دارد. در واقع در این حالت واکنش بین فازهای اولیه و محصولات واکنش مطرح می‌باشد. در این پدیده، ترشوندگی براساس دو عبارت  $\Delta G_r$  (تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنش) و  $\Delta \sigma_r$  (تغییرات انرژی فصل مشترک) بیان خواهد گردید که در ادامه به نحوه محاسبه آن‌ها پرداخته شده است.

یکی از مهم‌ترین عوامل در مطالعه کامپوزیت‌های زمینه‌ی فلزی، بررسی ویژگی‌های فصل مشترک بوجود آمده بین زمینه و تقویت‌کننده است. فصل مشترک تعیین‌کننده مقدار انتقال نیرو و نیز مقاومت در برابر ترک خوردن کامپوزیت‌های زمینه فلزی در هنگام تغییر شکل می‌باشد. مطالعات منظم پیرامون سطح تماس فلز - سرامیک از سال ۱۹۶۰ شروع شده و تاکنون نیز ادامه دارد [۱]. ترشوندگی معیاری است که توانایی یک مایع در پوشاندن سطح جامد را نشان می‌دهد. قابلیت ترشدن خوب بدین معناست که مایع روی تقویت‌کننده جاری شده و تمامی برجستگی‌ها و حفره‌های ناصاف تقویت‌کننده را بپوشاند، ضمن این‌که همه گاز موجود در سطح را جابجا کند [۱]. زاویه تماس ترشوندگی عامل مهمی برای ترشدن فصل مشترک فلز - سرامیک محسوب می‌شود و تا کنون مقالات زیادی در ارتباط با این پدیده ارائه شده است، که به‌صورت ناهماهنگ عمل کرده و نتیجه آزمایشات را به‌صورت جدول ارائه داده‌اند [۶-۲]. مطالعات نشان می‌دهد که با افزودن عنصر آلایژی، زاویه تماس به‌طور موثر کاهش می‌یابد. پدیده فوق ناشی از واکنش مذاب با زیرلایه سرامیکی است [۷]. این واکنش منجر به تولید محصولات جدید در سطح سرامیک شده و در جهت بهبود ترشوندگی عمل می‌کند. در این پژوهش، مطالعه پیرامون زاویه تماس در فصل مشترک سیستم‌های  $\text{SiC}_{\text{ox}} / \text{Al} + \text{xMg}$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Al} + \text{xMg}$  با استفاده از روش فیزیکی و شیمیایی انجام شده و اثر درجه حرارت و عنصر آلایژی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین لازم به اشاره می‌باشد که تمامی سطوح، انرژی مربوط به خود را دارند.

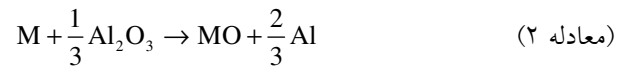
شکل (۱) طرحواره‌ای از یک قطره مذاب بر روی سطح جامد را نشان می‌دهد که در آن  $\gamma_{sl}$ ،  $\gamma_{lv}$ ،  $\gamma_{sv}$  به ترتیب نشان دهنده انرژی بر واحد سطح فصل مشترک‌های جامد - گاز، مذاب - مذاب - گاز و جامد - مذاب است [۸].

<sup>1</sup> Young Equation

<sup>2</sup> -Sessile Drop

## ۲-۱- محاسبه تغییرات انرژی آزاد واکنش

مطالعات پیرامون زاویه تماس در فصل مشترک سیستم های فلز - سرامیک نشان می دهد که تماس جزء سرامیکی آلومینا با فلز مذاب M می تواند منجر به واکنش (۲) گردد:

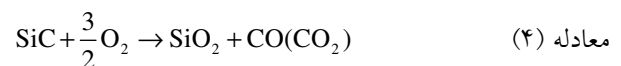


تغییرات انرژی آزاد گیبس برای این واکنش از رابطه (۳) به دست می آید:

$$\Delta G = G_{MO}^0 + \frac{2}{3}G_{Al}^0 - \frac{1}{3}G_{Al_2O_3}^0 - G_M^0 + \frac{2}{3}RT \ln a_{Al} - RT \ln a_M \quad (\text{معادله } 3)$$

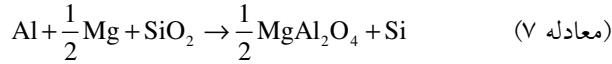
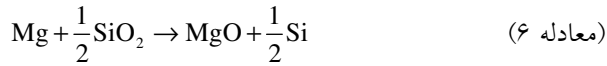
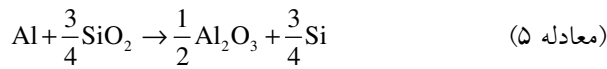
$T, R, G_i^0$  و  $a_i$  به ترتیب انرژی آزاد گیبس جزء  $i$  در حالت استاندارد، ثابت گازها، دمای مطلق و اکتیویته جزء  $i$  می باشد. تغییرات انرژی آزاد گیبس،  $\Delta G$ ، نشان دهنده انرژی آزاد شده و یا انرژی مورد نیاز برای احیای اکسید آلومینیم توسط فلز M است. در دمای مشخص، تغییرات انرژی گیبس واکنش،  $\Delta G_i$  تنها به اکتیویته جزء  $i$  وابسته بوده و تغییرات انرژی آزاد گیبس در حالت استاندارد تنها به صورت تابعی از درجه حرارت است.

هنگامی که SiC در دمای بالاتر از  $800^\circ C$  قرار گیرد، این ماده با اکسیژن موجود در هوا واکنش کرده و لایه  $SiO_2$  در سطح SiC مطابق با واکنش (۴) بوجود می آید:



چنانچه کامپوزیت آلیاژی آلومینیم - منیزیم تقویت شده با ذرات  $SiC_{ox}$  به اندازه کافی در دمای بالا نگهداری شود، لایه های نازک  $SiO_2$  ایجاد شده بر روی ذرات SiC با انجام واکنش با آلومینیم و منیزیم در زمینه آلیاژی آلومینیم حل می شود. واکنش بین  $SiO_2$  و Al-Mg مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته که در زیر سه مورد از واکنش های فصل

مشترک به شکل اکسیدی که به صورت محصول احیاء شده در آمده، نشان داده شده است [۷].



تمامی اجزاء  $MgAl_2O_4, MgO, Al_2O_3$  و Si آزاد به صورت جامد بوده و Al و Mg شامل زمینه مذاب می باشد. برای معادلات (۷ - ۵) نیز همانند واکنش (۲) می توان  $\Delta G$  مشابه با معادله (۳) تعریف کرد.

لازم به ذکر است که  $\Delta G$  در معادله (۳)، در واقع  $\Delta G^{Bulk}$  بوده که نشان دهنده انرژی آزاد گیبس واکنش بین توده سرامیکی و زمینه مذاب است. بایستی خاطر نشان کرد که در فصل مشترک سطوح فازی، واکنش هایی در فصل مشترک به وجود می آید. سطح یک ماده قادر است به عنوان یک فاز جدا در تعادل با توده آن مورد بحث قرار گیرد [۵]. جهت ترشدن شیمیایی، واکنش بین فلز مذاب و سطح جزء سرامیکی لازم و ضروری است. در واقع واکنش فصل مشترک سیستم فلز - سرامیک نشان دهنده واکنش بین فاز سطحی زمینه و زیرلایه سرامیکی است. نسبت تغییرات انرژی آزاد گیبس بوجود آمده توسط انحلال جزء حل شونده در لایه سطحی به آن در توده محلول معادل ۰.۲۴ است [۱۰]. بنابراین تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنش فصل مشترک  $\Delta G^{inter}$  را می توان به صورت معادله (۸) نوشت:

$$\Delta G^{inter} = 0.24\Delta G^{Bulk} \quad (\text{معادله } 8)$$

که  $\Delta G^{Bulk}$  را می توان از معادله (۳) به دست آورد. در صورتی که واکنش فصل مشترک فلز - سرامیک به صورت یک لایه پیوسته از محصول واکنش بوجود آید، کاهش در انرژی آزاد فصل مشترک  $\Delta G_r$  معادل با تغییرات انرژی آزاد گیبس در واحد سطح آزاد شده بوده که توسط واکنش (۹) بیان می شود:

که در آن  $\Delta\sigma_{sl}$  نشان دهنده انرژی فصل مشترک نهایی<sup>۱</sup> در یک سیستم پس از انجام واکنش می‌باشد. مطابق با معادله (۱۲) می‌توان گفت (معادله ۱۳):

$$\sigma_{sl} = \Delta G_r + \sigma_{sl}^R \quad (13)$$

زاویه تماس  $\theta_0$  در غیاب هر نوع واکنش به صورت معادله (۱۴) بیان می‌شود:

$$\cos \theta_0 = \frac{\sigma_{sv}^0 - \sigma_{sl}^0}{\sigma_{lv}} \quad (14)$$

که  $\sigma_{sv}^0$  و  $\sigma_{lv}$  به ترتیب انرژی‌های سطحی زیرلایه و زمینه فلزی هستند. در اینجا فرض بر آن است واکنش فصل مشترک فلز - سرامیک موجب تغییر در ترکیب شیمیایی زیرلایه در نقطه سه‌گانه بین جامد و مذاب نشود. در واقع  $\sigma_{sv}^0$  عبارت در معادله (۱۳) در هنگام ترشدن حاصل از واکنش تغییر نکرده باشد در این صورت زاویه تماس نهایی  $\theta$  پس از واکنش فصل مشترک از رابطه (۱۵) به دست می‌آید [۵]:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \frac{\sigma_{sv}^0 - \sigma_{sl}}{\sigma_{lv}} = \frac{\sigma_{sv}^0 - (\sigma_{sl}^R + \Delta G_r)}{\sigma_{lv}} \\ &= \cos \theta_0 - \frac{\Delta G_r + \Delta G_r}{\sigma_{lv}} \end{aligned} \quad (15)$$

مطابق با معادله (۱۵)، در ترشدن حاصل از واکنش پذیری نه تنها شدت واکنش فصل مشترک  $\Delta G_r$  حاکم است بلکه خواص فیزیکی و شیمیایی حاصل از فصل مشترک  $\Delta\sigma_r$  نیز موثر می‌باشد.

مطالعات نشان داده که زاویه ترشوندگی بین فلز مذاب - سرامیک یک پدیده ترمودینامیکی و سینتیکی بوده که وابسته به زمان می‌باشد. در واقع جهت ترشدن سرامیک توسط مذاب نیاز به یک دوره زمانی بوده که اصطلاحاً به آن زمان نهفتگی<sup>۲</sup> گفته می‌شود. این موضوع در شکل (۲) نشان داده

$$\Delta G_r = \frac{\Delta G^{inter}}{Q_{sl}} = \frac{0.24 \Delta G^{Bulk}}{Q_{sl}} \quad (9)$$

$Q_{sl}$  نشان دهنده مساحت اشغال شده به وسیله یک مول از عنصر واکنش‌پذیر در فصل مشترک است.  $Q_{sl}$  را می‌توان از طریق رابطه (۱۰) به دست آورد [۱۰]:

$$Q_{sl} = 1.091 N_0 \frac{1}{3} V_A^{\frac{2}{3}} \quad (10)$$

$V_A$  مولار حجمی عنصر واکنش‌پذیر و  $N_0$  عدد آووگادرو است. از معادله (۹) می‌توان نتیجه گرفت که اساساً  $\Delta G_r$  به واکنش‌پذیری سیستم بستگی دارد، که مفهوم واکنش‌پذیری سیستم در واقع منفی بودن  $\Delta G_r$  است.

## ۲-۲- محاسبه تغییرات انرژی فصل مشترک

در کنار واکنش فلز با زیرلایه در فصل مشترک، برهم‌کنش بین محصولات واکنش و فلز مذاب در فصل مشترک نیز باعث کاهش انرژی فصل مشترک خواهد شد. در صورتی که واکنش به صورت مداوم باعث ایجاد یک لایه محصول در فصل مشترک شود، مقدار انرژی فصل مشترک  $\Delta\sigma_r$  برابر است با (معادله ۱۱):

$$\Delta\sigma_r = \sigma_{sl}^R - \sigma_{sl}^0 \quad (11)$$

که در آن  $\sigma_{sl}^R$  انرژی فصل مشترک بین فلز مذاب و محصولات واکنش و  $\sigma_{sl}^0$  انرژی فصل مشترک بین فلز مذاب و زیرلایه در غیاب هرگونه واکنشی را نشان می‌دهد.

## ۳-۲- محاسبه زاویه ترشدن نهایی

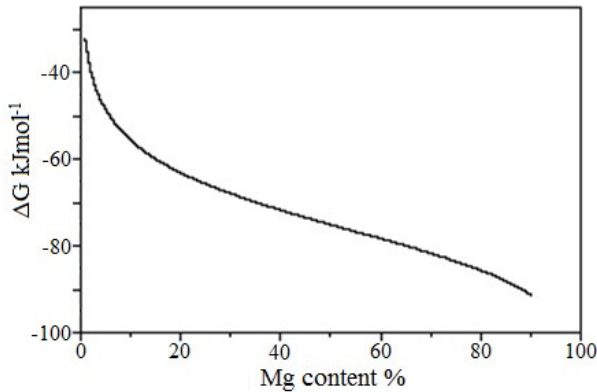
بر اساس معادلات (۹) و (۱۱) می‌توان اذعان داشت که تغییرات انرژی فصل مشترک پس از انجام واکنش از رابطه (۱۲) به دست خواهد آمد.

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{sl} &= \sigma_{sl} - \sigma_{sl}^0 = \Delta G_r + \Delta\sigma_r \\ &= \Delta G_r + (\sigma_{sl}^R - \sigma_{sl}^0) \end{aligned} \quad (12)$$

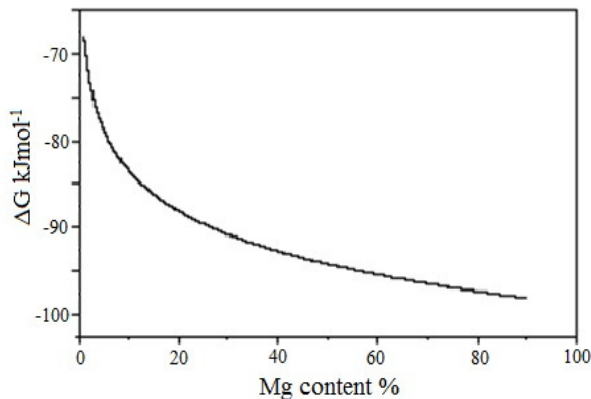
<sup>1</sup> Final Interaction energy

<sup>2</sup> Incubation Time

اطلاعات ترمودینامیکی مورد نیاز از مرجع [۱۲] به دست آمده است.



$Al_2O_3 / Al + xMg$



$SiC_{ox} / Al + xMg$

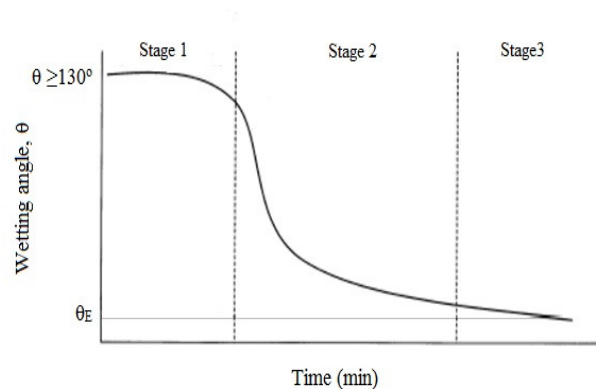
شکل ۳. ارتباط تغییرات انرژی آزاد گیبس، با درصد منیزیم در دمای ۱۱۷۳K.

در شکل (۳) مشاهده می‌شود با افزایش میزان منیزیم،  $\Delta G_r$  به شدت کاهش می‌یابد که مطابق با معادله (۱۵)،  $\Delta G_r$  منفی‌تر، موجب کاهش زاویه تماس بیشتر می‌شود. برای دو سیستم مورد مطالعه، از اختلاف بین ترم‌های  $\Delta \sigma_r$  نمی‌توان غفلت کرد. به دلیل عدم اطلاعات، تنها می‌توان خواص فصل مشترک آلومینیم خالص - سرامیک را به دست آورد که در این حالت زاویه تماس مطابق با معادله (۱۵) محاسبه شده است [۱۴-۱۰، ۷، ۶]. در ادامه ارتباط انرژی فصل مشترک با درجه حرارت برای آلومینیم - سرامیک مورد ارزیابی قرار گرفت.

نتایج حاصل از محاسبه در شکل‌های (۴) تا (۶) نشان داده شده است. شکل‌های (۴) و (۵) زاویه تماس سیستم‌های  $SiC_{ox} / Al + xMg$  و شکل‌های (۶) و (۷) زاویه تماس را برای سیستم‌های  $Al_2O_3 / Al + xMg$  نشان می‌دهد. نتایج

شده است. در این نمودار ارتباط زاویه ترشوندگی با زمان در درجه حرارت مشخص را می‌توان به سه ناحیه تقسیم کرد:

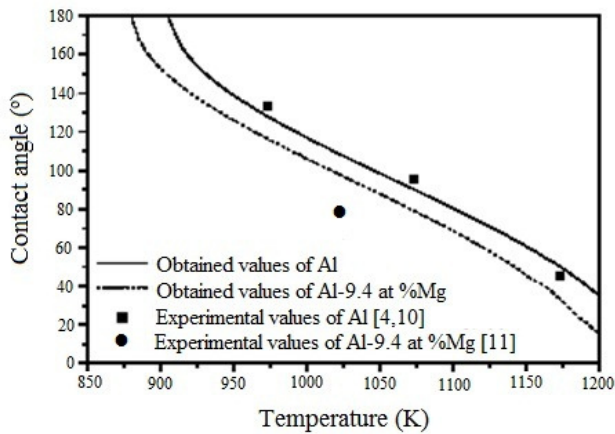
ناحیه اول که در آن  $\theta > 90^\circ$  است و به خاطر لایه اکسیدی در روی سطح فلز مذاب بوده و از تماس مستقیم مذاب با زیرلایه سرامیکی ممانعت می‌کند. در ناحیه دوم پس از گذشت پریود زمانی مشخص کاهش شدیدی در زاویه تماس به وجود می‌آید. در این مرحله لایه اکسید ناپایدار شده و فلز مذاب به صورت مستقیم در تماس با سرامیک قرار گرفته و سطح آن را می‌پوشاند. بالاخره در ناحیه سوم زاویه تماس به مقدار تعادلی،  $\theta_E$ ، می‌رسد. مقدار  $\theta_E$  به درجه حرارت، ترکیب شیمیایی فلز مذاب، زیرلایه سرامیکی و اتمسفر گازی بستگی دارد. با توجه به شکل (۲) ترشدن به درون فاز سرامیکی توسط مذاب فلزی هنگامی صورت می‌گیرد که زاویه تماس به مقدار بحرانی ( $\theta_c = 90^\circ$ ) برسد. بنابراین زمان رسیدن به  $\theta_c$  اصطلاحاً زمان نهفتگی نامیده می‌شود [۱۱].



شکل ۲. مراحل ترشدن زیرلایه سرامیکی توسط آلیاژ آلومینیم [۱۱].

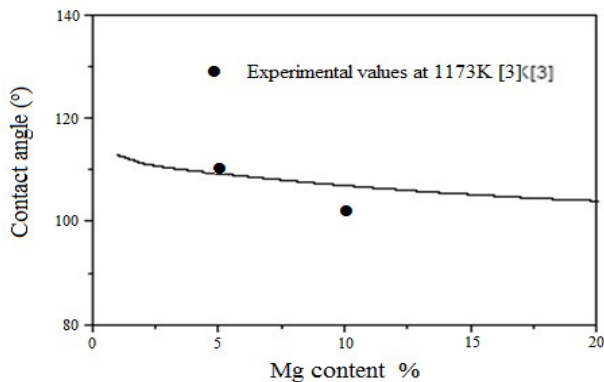
### ۳- نتایج و بحث

با استفاده از مدل‌های ایجاد شده، به نظر می‌رسد که زاویه تماس فصل مشترک فلز - سرامیک را می‌توان از طریق تغییر درجه حرارت و عنصر آلیاژی محاسبه کرد. در این مورد اطلاعات ترمودینامیکی و انرژی فصل مشترک به راحتی در دسترس نیست. در اینجا دو سیستم  $Al_2O_3 / Al + xMg$  و  $SiC_{ox} / Al + xMg$  جهت محاسبه زاویه ترشوندگی،  $\theta_{cal}$ ، مطابق با معادله (۱۵) در نظر گرفته شد. ابتدا ارتباط انرژی آزاد گیبس  $\Delta G$  با مقدار منیزیم در سیستم‌های مذکور محاسبه گردید که نتیجه آن در شکل (۳) نشان داده شده است.

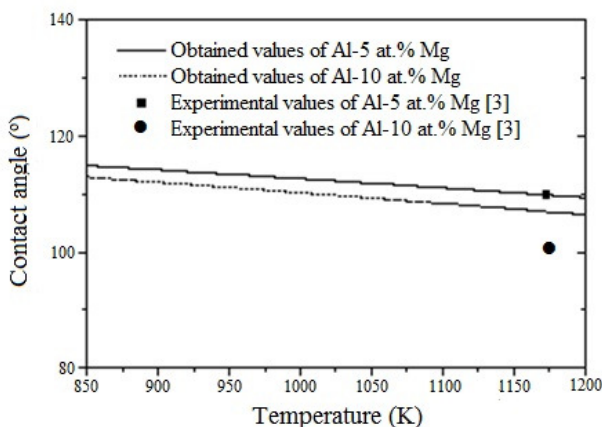


شکل ۵. زاویه تماس ترشوندگی بر حسب درجه حرارت در سیستم  $\text{SiC}_{\text{ox}} / \text{Al} + \text{xMg}$ .

دیدگاه تئوری مورد بحث فوق براساس اصول فیزیکی و شیمیایی بوده که این دیدگاه برای جایی که واکنش در فصل مشترک رخ داده، متعبر است. اگرچه در بحث فوق آلومینیم و منیزیم مورد ارزیابی قرار گرفت، ولی اصول تئوریک را می‌توان برای فصل مشترک فلزات و آلیاژهای آنها با هر زیرلایه سرامیکی به کار برد.



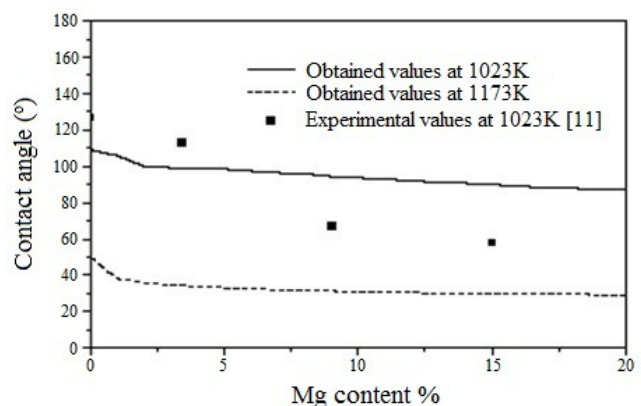
شکل ۶. زاویه تماس ترشوندگی بر حسب میزان منیزیم در دمای ۱۱۷۳K در سیستم  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Al} + \text{xMg}$ .



شکل ۷. زاویه تماس ترشوندگی بر حسب درجه حرارت در سیستم  $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Al} + \text{xMg}$ .

آزمایشگاهی زاویه تماس،  $\theta_{\text{exp}}$  حاصل از مقالات نیز جهت مقایسه آورده شده است. براساس شکل‌های (۴) و (۶) مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار منیزیم زاویه تماس  $\theta$  نیز کاهش می‌یابد. در واقع قابلیت ترشدن آلومینیم با اضافه کردن منیزیم بهبود می‌یابد. این موضوع به نتایج حاصل از آزمایش‌های عملی نزدیک می‌باشد [۱۵،۴]. مطابق با معادله (۹) کاهش در انرژی فصل مشترک به وجود آمده، اساساً وابسته به تغییر انرژی فصل مشترک بین توده فازها،  $\Delta G^{\text{Bulk}}$ ، بوده و نشان‌دهنده شدت واکنش در فصل مشترک است، بنابراین  $\Delta G_{\text{f}}$  اساساً به واکنش‌پذیری در یک سیستم بستگی دارد. در واقع  $\Delta G_{\text{f}}$  منفی‌تر نشان‌دهنده واکنش‌پذیری بیشتر در سیستم بوده و منجر به زاویه تماس کوچک‌تر خواهد گردید. علاوه بر آن واکنش‌پذیری عنصر منیزیم باعث بهبود واکنش‌پذیری سیستم و کاهش تغییرات انرژی آزاد گیبس واکنش ( $\Delta G^{\text{Bulk}}$ ) شده و منجر به کاهش زاویه تماس خواهد شد.

در شکل‌های (۵) و (۷) مشاهده شده که افزایش درجه حرارت باعث بهبود خاصیت ترشدن، به‌ویژه در سیستم آلیاژی  $\text{SiC}_{\text{ox}} / \text{Al} + \text{xMg}$  می‌شود. این پدیده به طبیعت واکنش فصل مشترک بین  $\text{Al} + \text{xMg}$  و  $\text{SiC}_{\text{ox}}$  بستگی دارد و نشان می‌دهد که سرعت واکنش فصل مشترک به شدت تابع درجه حرارت است. همچنین می‌توان مشاهده کرد که  $\theta_{\text{cal}}$  تقریباً مطابقت خوبی با  $\theta_{\text{exp}}$  دارد.



شکل ۸. زاویه تماس ترشوندگی بر حسب میزان منیزیم در سیستم  $\text{SiC}_{\text{ox}} / \text{Al} + \text{xMg}$ .

## ۴- نتیجه‌گیری

ترشدن حاصل از واکنش شیمیایی نه تنها به شدت واکنش در فصل مشترک،  $\Delta G_f$ ، وابسته است بلکه به خواص فیزیکی و شیمیایی فصل مشترک حاصله،  $\Delta \sigma_f$ ، نیز وابسته می‌باشد. باتوجه به مدل ارائه شده می‌توان زاویه‌ی تماس فصل مشترک فلز - سرامیک را با تغییر میزان عنصر آلیاژی و درجه حرارت محاسبه کرد. نتایج حاصل از مدل ارائه شده با نتایج حاصل از آزمایشات تجربی تقریباً تطابق خوبی را نشان می‌دهد.

## مراجع

3. A.C. Ferro, B. Derby: *Acta Metall. Mater.*, 1995, 43, 3061.
  4. S.W.I.P, M. Kucharski, J.M. Toguri: *J.Mater.Sci.Letter*, 1993,129, 1699.
  5. V. Laurent, D. Chatain, N. Eustathopoulos: *Mater. Sci. Eng. A*, 1991, 135, 89.
  6. J.Lee, J.Ahn, Z.Shi, J.Shim, H.Lee: *Metall.Mater.Trans.*, 2001, 32A, 1541.
  7. M. I. Pech, R. N. Katz and M. M. Makhlof: *Journal of Materials Science*, 2000, 35, 2167.
  8. M.Ueki, M. Naka and I. Okamoto: *Journal of Materials Science*, 1988, 23, 2983.
  9. J. Chen, M. Gu, F. Pan: *J.Mater.Res.* 2002, 17, 911.
  10. S. F. Corbin, X. Zhao-Jie, H. Henein and P. S. Apte: *Materials Science and Engineering, A*, 1999, 262, 192.
  11. D.Y.e: *Hand book of practical thermochemical properties of inorganic substances* (Metallurgical Industry Publication).
  12. W.D.Kinger, H.K.Bowen, D.R.Uhlmann: *Introduction to Ceramics* (Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1976).
  13. V.Laurent, D.C.hatain, N.Eustathopoulos: *J.Mater.Sci.*, 1987, 22, 244.
  14. E.Candan, H.V.Atkison, H.Jones: *Scripta Materialia*, 1998, 38, 999.
1. Kainer, K.U., "Metal Matrix Composites", *Wiley-Vch Publishing*, 2003.
  2. Aksay, I.A., Hoge, C.E., and Pask J.M., *J.Mater.Sci.*, 1974, 78, 1178.