

The Effects of Temperature and Time on the Kinetic of the Intermetallic Layers Growth During Aluminizing Process of a Low Carbon Steel

Hadi Baradaran Mehrabadi¹, *Hasan Saghafian², Mehdi Divandari³

1- Ph.D. student, School of Material Engineering, Hakim sabzevari University, sabzevar, Iran.

2,3- Associate professor, School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Citation: Baradaran Mehrabadi H, Saghafian H, Divandari M. The Effects of Temperature and Time on the Kinetic of the Intermetallic Layers Growth During Aluminizing Process of a Low Carbon Steel. Metallurgical Engineering 2020; 23(1): 62-73 <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.107017.1242>

doi: <http://dx.doi.org/10.22076/me.2020.107017.1242>

ABSTRACT

In this study, the effects of molten Al temperature and immersion time of steel samples on the joining of Al and steel and the formation and growth of intermetallic compounds, at the interface, were examined. Following surface pretreatment, steel rods were immersed into the pure aluminum melt (in an Alumina crucible) at temperatures of 680, 720, 760 and 800 Celsius and kept for different times of 5, 10, 15 and 20 minutes, at each temperature followed by air cooling after being taken out of the melt. (Then were taken out and cooled in airwhere.) Afterwards, the microstructure of interface between steel substrate and aluminium was examined by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and Vickers hardness tests. The results showed that the main (two) intermetallic compounds formed at the Al/ steel interface are FeAl₃ and Fe₂Al₅ (were observed in reaction interface of steel substrate and aluminium. These intermetallic compounds were FeAl₃ and Fe₂Al₅.) with a larger part of the intermetallic layer being the Fe₂Al₅ layer with a tongue-like morphology. As the temperature and time of immersion increase, only the thickness of the intermetallics changed without changing their composition. (the composition of the compounds formed is not (un) changed and only the thickness of the intermetallic layer has changed). Thus, with increasing melt temperature and immersion time, the thickness of the intermetallic layer, especially Fe₂Al₅ layer, increased to a maximum value and then reduction of the thickness of the intermetallic layer was observed with further increase in temperature and time.

Keywords: Aluminizing, Hot-dip, Interface of Steel / Aluminum, Intermetallic.

Received: 28 April 2019 | Accepted: 6 September 2020

■ ■
* *Corresponding Author:*

Hasan Saghafian, PhD

Address: School of Metallurgy & Materials Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Tel: +98 (9122179297)

E-mail: saghafian@iust.ac.ir

تاثیر دما و زمان بر سینتیک رشد لایه‌ی ترکیبات بین فلزی در فرایند آلومپوشی یک فولاد ساده کربنی

هادی برادران مهرآبادی^۱، *حسن ثقفیان^۲، مهدی دیوانداری^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مواد، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران.
۲- دانشیار، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

چکیده

در این تحقیق تاثیر دمای مذاب آلومینیم و زمان غوطه‌وری نمونه فولادی در آن، بر اتصال بین فولاد و آلومینیم و نحوه تشکیل و رشد ترکیبات بین فلزی در فصل مشترک مورد بررسی قرار گرفت. میله‌های فولادی پس از آماده‌سازی سطحی، درون مذاب آلومینیم خالص و داخل بوتله‌ی آلومینایی در دماهای ۶۸۰، ۷۲۰، ۷۶۰ و ۸۰۰ درجه سانتیگراد فرو برده شده و به ترتیب برای زمان‌های مختلف ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه درون مذاب نگاه داشته شد. سپس از مذاب بیرون آورده و در هوا خنک شدند. پس از انجماد، ریزساختار فصل مشترک تشکیل شده بین زیرلایه‌ی فولادی و آلومینیم با میکروسکوپ نوری (OM)، میکروسکوپ الکترونی (SEM) و اسپکتروسکوپی اشعه ایکس (EDS) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که لایه‌ی بین فلزی از دو ترکیب بین فلزی Fe_2Al_3 و $FeAl_3$ تشکیل شده است، که بخش بیشتری از لایه‌ی بین فلزی را لایه‌ی Fe_2Al_3 با مورفولوژی زبانه‌ای تشکیل داده است. با افزایش دما و زمان غوطه‌وری نوع ترکیبات تشکیل شده بدون تغییر بوده و فقط ضخامت لایه‌ی بین فلزی تغییر کرده است. بدین صورت که با افزایش دمای مذاب و زمان غوطه‌وری ضخامت لایه‌ی بین فلزی و به ویژه لایه‌ی Fe_2Al_3 تا یک مقدار بیشینه افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر دما و زمان کاهش ضخامت لایه‌ی بین فلزی مشاهده شده است.

واژه‌های کلیدی: آلومپوشی، غوطه‌وری گرم، فصل مشترک فولاد / آلومینیم، ترکیبات بین فلزی.

دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۰۸ | پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۱۶

۱. مقدمه

شیمیایی فاز بخار وجود دارد، آلومپوشی به روش غوطه‌وری گرم به طور گسترده‌ای در دهه‌های اخیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۶). موضوع مهم در توسعه فولادهای پوشش داده شده با آلیاژ آلومینیم، چسبندگی قابل قبول لایه‌ی پوششی به زیرلایه‌ی فولادی است (۷، ۸). زمانی که فولاد در تماس با مذاب آلومینیم است، واکنش‌های انجام شده منجر به تشکیل یک لایه‌ی درونی ترد و شکننده از ترکیبات بین فلزی می‌شود. این لایه‌ی بین فلزی که اغلب با نام لایه‌ی آلیاژی شناخته می‌شود، بین زیرلایه‌ی فولادی و پوشش سطحی آلومینیم تشکیل می‌شود (۹، ۱۰). فاکتور کلیدی در چسبندگی لایه‌ی پوششی، همین لایه ترد بین فلزی Fe-Al است که در نمونه‌های فولادی آلومپوشی شده به روش غوطه‌وری گرم تشکیل می‌شود. بنابراین برای شناخت نحوه‌ی تشکیل و مورفولوژی ترکیب بین فلزی Fe-Al، کنترل ریزساختار فصل

فولاد از جمله موادی است که مطالعات زیادی بر روی آن انجام شده و به طور گسترده‌ای در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. فولاد خواص مکانیکی منحصر به فردی از قبیل، استحکام، چقرمگی، شکل‌پذیری و سختی بالا دارد (۱ و ۲). اما با توجه به اینکه فولاد به خوردگی در حضور رطوبت و اکسیداسیون در دماهای بالا حساس است، حفاظت آن در مقابل عوامل خورنده اهمیت دارد (۳). بدین منظور آلومینیم با توجه به خواص مطلوب، مقاومت خوردگی بالا، فراوانی و قیمت ارزانی که دارد، بعنوان یک لایه محافظ مناسب در پوشش‌دهی فولادها به ویژه در کاربردهای دما بالا، توجه زیادی را به خود جلب کرده است (۴، ۵).

از میان روش‌های متفاوتی که برای تولید پوشش‌های آلومینیمی از قبیل روش‌های اسپری حرارتی، رسوب‌نشانی

* نویسنده مسئول:
دکتر حسن ثقفیان

نشانی: تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی متالورژی و مواد.
تلفن: (۹۱۲۲۱۷۹۲۹۷) ۹۸+

پست الکترونیکی: saghafian@iust.ac.ir

فولادی قبل از غوطه‌وری به طور کامل از آلودگی‌های سطحی پاک شد. برای این کار ابتدا سطح نمونه‌ها توسط کاغذ پوساب کاربید سیلیسیم پوساب‌زنی شد و سپس نمونه‌ها به مدت ۳ دقیقه درون محلول اسید سولفوریک ۵٪ قرار گرفت و به مدت ۱ دقیقه با آب شسته شد. پس از خشک کردن نمونه‌ها با هوای گرم، با الکل شسته و دوباره خشک شدند.

جدول ۱. میانگین ترکیب شیمیایی میله‌های فولادی

ماده	فولاد ساده کربنی (درصد وزنی)
نیکل	۰/۱
مولیبدن	۰/۰۵
کروم	۰/۱۵
منگنز	۰/۶۵
سیلیسیم	۰/۲
کربن	۰/۴۶
آهن	مابقی

جدول ۲. میانگین ترکیب شیمیایی آلومینیم خالص تجاری.

ماده	آلومینیم (درصد وزنی)
روی	۰/۰۱
مس	۰/۰۴
آهن	۰/۱۲
سیلیسیم	۰/۱۲
آلومینیم	مابقی

مذاب آلومینیم درون یک بوتله‌ی آلومینایی با ظرفیت ۲ کیلوگرم به قطر ۵۰ و ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر توسط یک کوره‌ی الکتریکی مقاومتی از نوع مافل تهیه شد. برای اندازه‌گیری دما نیز از یک ترموکوپل نوع K با دقت ± 5 سانتی‌گراد استفاده گردید.

پس از رسیدن دمای کوره تا دمای مشخص و ذوب شدن آلومینیم و هم‌دما شدن دماهای آن دو، اکسید سطحی مذاب سرباره‌گیری شد و سپس میله‌های فولادی از مقطع دایره‌ای تا عمق ثابتی درون مذاب داخل کوره غوطه‌ور شدند. دماهای غوطه‌وری ۶۸۰، ۷۲۰، ۷۶۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و مدت زمان‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه برای این تحقیق انتخاب گردید. دمای حمام مذاب به‌طور مداوم توسط ترموکوپل که نوک آن در اطراف میله درون مذاب قرار دارد، کنترل شد.

در ادامه ریزساختار و مخصوصاً فصل مشترک واکنشی بین زیرلایه‌ی فولادی و مذاب آلومینیم توسط میکروسکوپ نوری (OM) مدل MEIJI Techno و مجهز به دوربین عکس‌برداری مدل Moticam 2000، میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل VEGAII XMU، Tescan و مجهز به

مشترک بین زیرلایه فولادی و لایه‌ی پوششی آلیاژ آلومینیم ضرورت دارد (۷).

بررسی مطالعات انجام شده (۷،۸) نشان می‌دهد که اتصال نفوذی و پوشش‌دهی اغلب در محدوده دمایی نفوذ حالت جامد آلومینیم و آهن از دمای ۸۷۵ تا ۹۲۳ کلوین اتفاق می‌افتد، که کمتر از دمای ذوب آلومینیم است. لایه‌ی ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در روش غوطه‌وری گرم، اغلب شامل $FeAl_3$ و Fe_2Al_5 است، که تشکیل و سینتیک رشد لایه‌های بین فلزی وابستگی زیادی به ضریب نفوذ اتم‌های آهن و آلومینیم دارد و با توجه به ضریب نفوذ بالاتر اتم‌های آهن درون آلومینیم ($922 - 793$ k) $10^{-6} m^2 s^{-1}$ * (۵۳) نسبت به ضریب نفوذ اتم‌های آلومینیم درون آهن ($1673 - 1003$ k) $10^{-6} m^2 s^{-1}$ * (۱/۸)، در ابتدا لایه‌ی $FeAl_3$ در فصل مشترک بین آلومینیم و زیرلایه‌ی فولادی از طریق نفوذ اتم‌های آهن به درون لایه‌ی آلومینیم تشکیل شده و سپس لایه‌ی Fe_2Al_5 در فصل مشترک بین $FeAl_3$ و زیرلایه‌ی فولادی تشکیل می‌شود (۷،۸).

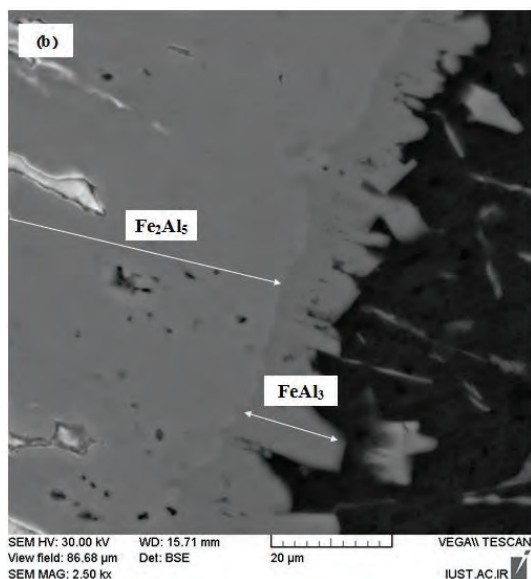
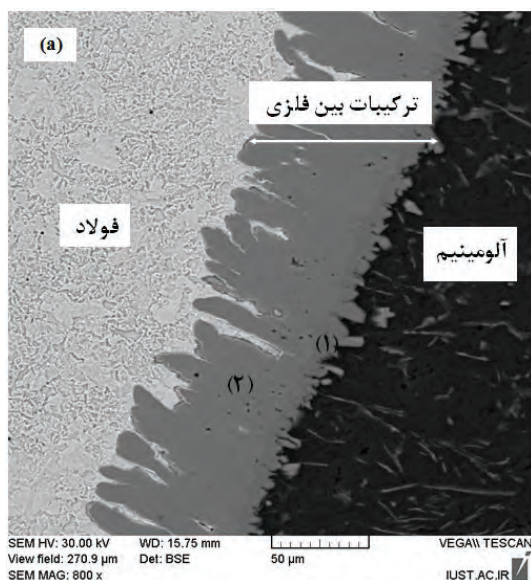
مشخصات تشکیل و رشد لایه‌ی نفوذی به چندین فاکتور از قبیل ساختار کریستالی، محدوده‌ی حلالیت جامد، شدت و مقدار پتانسیل فعل و انفعالات درون اتمی بین اتم‌های عناصر زیرلایه و پوشش و همچنین ضریب نفوذ اتم‌ها وابسته است (۱۰).

یکی از مهمترین متغیرهای تأثیرگذار در نحوه‌ی تشکیل و رشد لایه‌ی بین فلزی در فصل مشترک زیرلایه‌ی فولادی و مذاب آلومینیم، در روش غوطه‌وری گرم، دمای مذاب آلومینیم و زمان غوطه‌وری نمونه فولادی درون مذاب آلومینیم است. تغییرات دمای مذاب به طور هم‌زمان تأثیراتی در سرعت نفوذ اتم‌های آهن و آلومینیم و انحلال لایه‌ی بین فلزی درون مذاب می‌گذارد. علاوه بر این تغییرات دمایی منجر به تغییرات ویسکوزیته‌ی مذاب نیز می‌شود که در سرعت اشباع شدن مذاب آلومینیم از آهن در نزدیکی زیرلایه تأثیرگذار است. در ادامه تأثیرات دمای مذاب در مورفولوژی لایه‌ی بین فلزی، ضخامت لایه‌ی بین فلزی تشکیل شده، ضخامت لایه‌ی پوششی آلومینیم و همچنین میزان انحلال و کاهش ضخامت جامد مورد بررسی قرار گرفته است و همانطور که در بخش بحث و نتایج ارائه شده، برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین دیده می‌شود که افزایش دما و زمان غوطه‌وری از یک مقدار اپتیمم به بعد منجر به کاهش ضخامت لایه‌ی بین فلزی می‌شود.

۲. مواد و روش تحقیق

برای این تحقیق از فولاد ساده کربنی با درصد کربن ۰/۴۶٪ و از شمش آلومینیم خالص تجاری استفاده شد. که ترکیب شیمیایی دقیق فولاد و آلومینیم در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. نمونه‌های فولادی به صورت میله‌های استوانه‌ای شکل به قطر ۱۰ و ارتفاع ۱۲۰ میلی‌متر انتخاب گردید. میله‌های

می‌شود. در تصویر (الف) منطقه‌ی سیاه رنگ مربوط به لایه‌ی پوششی آلومینیم، منطقه‌ی سفید رنگ زیرلایه‌ی فولادی است و ناحیه‌ی خاکستری که مورفولوژی زبانه‌ای دارد نیز لایه‌ی ترکیب بین فلزی است. در تصویری که با بزرگنمایی بالاتر تهیه شده (تصویر- ب)، دیده می‌شود که لایه‌ی بین فلزی از دو لایه که دارای وضوح متفاوت هستند تشکیل شده است. به علت نزدیکی درصد آلومینیم این دو لایه، تفاوت رنگ در بزرگنمایی‌هایی پایین به خوبی مشخص نیست.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌ی غوطه‌ور شده به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد.

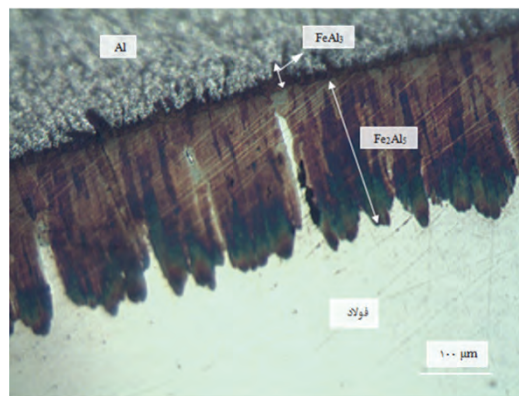
برای بررسی ترکیب شیمیایی فلزات پایه و شناسایی بهتر فازهای تشکیل شده در فصل مشترک از نتایج بدست آمده از آنالیز EDS استفاده شد. در شکل ۳ نتایج آنالیز EDS مربوط به مناطق ۱، ۲ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که لایه‌ی

اسپکتروسکوپی اشعه ایکس (EDS) مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این تحقیق ضخامت جامد از دست رفته در حین فرایند نیز با اندازه‌گیری ضخامت اولیه میله‌ی فولادی قبل از فرایند و ضخامت لایه‌ی فولادی به همراه لایه‌ی بین فلزی پس از فرایند با استفاده از میکرومتر با دقت ۰/۰۵ میلی‌متر و محاسبه‌ی اختلاف آنها مورد بررسی قرار گرفته است که طرح شماتیک و رابطه‌ی استفاده شده در بخش مربوط ارائه شده است.

۳. نتایج و بحث

شناسایی و بررسی مورفولوژی فازها

با مطالعه‌ی نمونه‌های آزمایش شده در این تحقیق مشاهده شد که لایه‌ی پوششی در همه‌ی نمونه‌ها بدون وابستگی به دما و زمان غوطه‌وری از دو قسمت، لایه‌ی بیرونی آلومینیم و لایه‌ی درونی ترکیب بین فلزی تشکیل شده‌اند. همانطور که در شکل ۱، که مربوط به نمونه‌ی غوطه‌ور شده به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد است، دیده می‌شود، لایه‌ی درونی ترکیب بین فلزی نیز خود از دو قسمت تشکیل شده است. لایه‌ی بین فلزی اولی که در نزدیکی زمینه‌ی فولادی تشکیل می‌شود، ضخیم‌تر است و مورفولوژی زبانه‌ای شکل دارد. لایه‌ی دوم در مجاورت با لایه‌ی پوششی آلومینیم که نازک‌تر است و به خاطر حکاکی بیشتر در حین متالوگرافی تیره‌تر دیده می‌شود، فصل مشترک نامنظمی با لایه‌ی پوششی آلومینیم و یک فصل مشترک نسبتاً صاف با لایه‌ی بین فلزی اول دارد.



شکل ۱. تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی غوطه‌ور شده به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد، نمونه توسط محلول NaOH با غلظت ۱۰٪ حکاکی شده است.

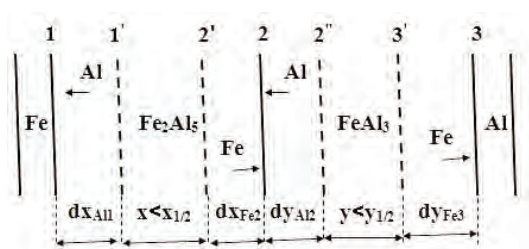
برای مطالعه‌ی بهتر فازهای تشکیل شده، تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌ها تهیه شده، که در شکل ۲ تصویر مربوط به نمونه‌ی غوطه‌ور شده به مدت ۲۰ دقیقه در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در دو بزرگنمایی مختلف دیده

بین فلزی از دو فاز Fe_2Al_5 و $FeAl_3$ تشکیل شده است. فاز بین فلزی Fe_2Al_5 که کسر بیشتری از ضخامت لایه‌ی بین فلزی را شامل می‌شود در نزدیکی زمینه‌ی فولادی تشکیل شده و مورفولوژی زبان‌های دارد. فاز بین فلزی $FeAl_3$ که نازکتر از Fe_2Al_5 است و به خاطر درصد بیشتر آلومینیم تیره‌تر دیده می‌شود در نزدیکی لایه‌ی پوششی آلومینیم تشکیل می‌شود. ترکیب بین فلزی $FeAl_3$ درون لایه‌ی پوششی آلومینیم نیز تشکیل شده است.

جدول ۳. واکنش‌های شیمیایی جاننشینی انجام شده در فصل مشترک زوج نفوذی.

واکنش شیمیایی	فصل مشترک	لایه‌ی بین فلزی
$5Al_{dif} + 2Fe_{surf} = Fe_2Al_5$	۱	Fe_2Al_5
$Fe_{dif} + 5 FeAl_3 = 3 Fe_2Al_5$	۲	
$Al_{dif} + Fe Fe_2Al_5 = 2 FeAl_3$	۲	$FeAl_3$
$Fe_{dif} + 3 Al_{surf} = FeAl_3$	۳	

این واکنش‌ها تغییراتی را در ضخامت لایه‌های تشکیل شده ایجاد می‌کنند، که در شکل ۴ دیده می‌شود.



شکل ۴. طرح‌واره‌ی نفوذ و تشکیل فاز و جابجایی فصل مشترک در یک سیستم نفوذی با دو لایه‌ی ترکیبی.

سینتیک رشد لایه‌ها با یک سیستم دو معادله‌ای که در روابط ۱ و ۲ ارائه شده، توصیف می‌شود.

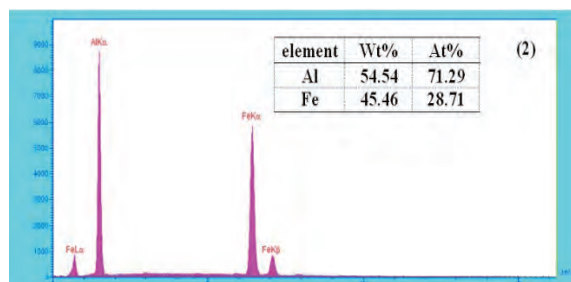
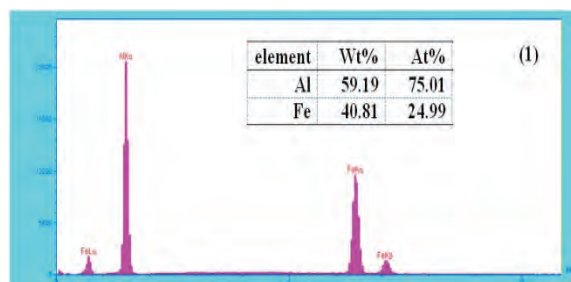
رابطه (۱)

$$\frac{dx}{dt} = \frac{K_{0Al1}}{1 + \frac{K_{0Al1}X}{K_{1Al1}}} + \frac{K_{0Fe2}}{1 + \frac{K_{0Fe2}X}{K_{1Fe2}}} - \frac{rg}{p} \frac{K'_{0Al2}}{1 + \frac{K'_{0Al2}Y}{K'_{1Al2}}}$$

رابطه (۲)

$$\frac{dy}{dt} = \frac{K'_{0Al2}}{1 + \frac{K'_{0Al2}Y}{K'_{1Al2}}} + \frac{K_{0Fe3}}{1 + \frac{K_{0Fe3}Y}{K_{1Fe3}}} - \frac{q}{sg} \frac{K'_{0Fe2}}{1 + \frac{K'_{0Fe2}X}{K'_{1Fe2}}}$$

که در اینجا همه‌ی K_0 ها ثوابت شیمیایی و همه‌ی K_1 ها ثوابت فیزیکی (نفوذی) هستند و g نسبت حجم مولی Fe_2Al_5 و $FeAl_3$ است. شکل ۴ و روابط ۱ و ۲ بر اساس مدل دیبکوف برای نفوذ بین دو فلز A و B طراحی شده است و در این مطالعه به جای A فلز آهن و بجای B فلز آلومینیم در نظر گرفته شده است (۱۳).



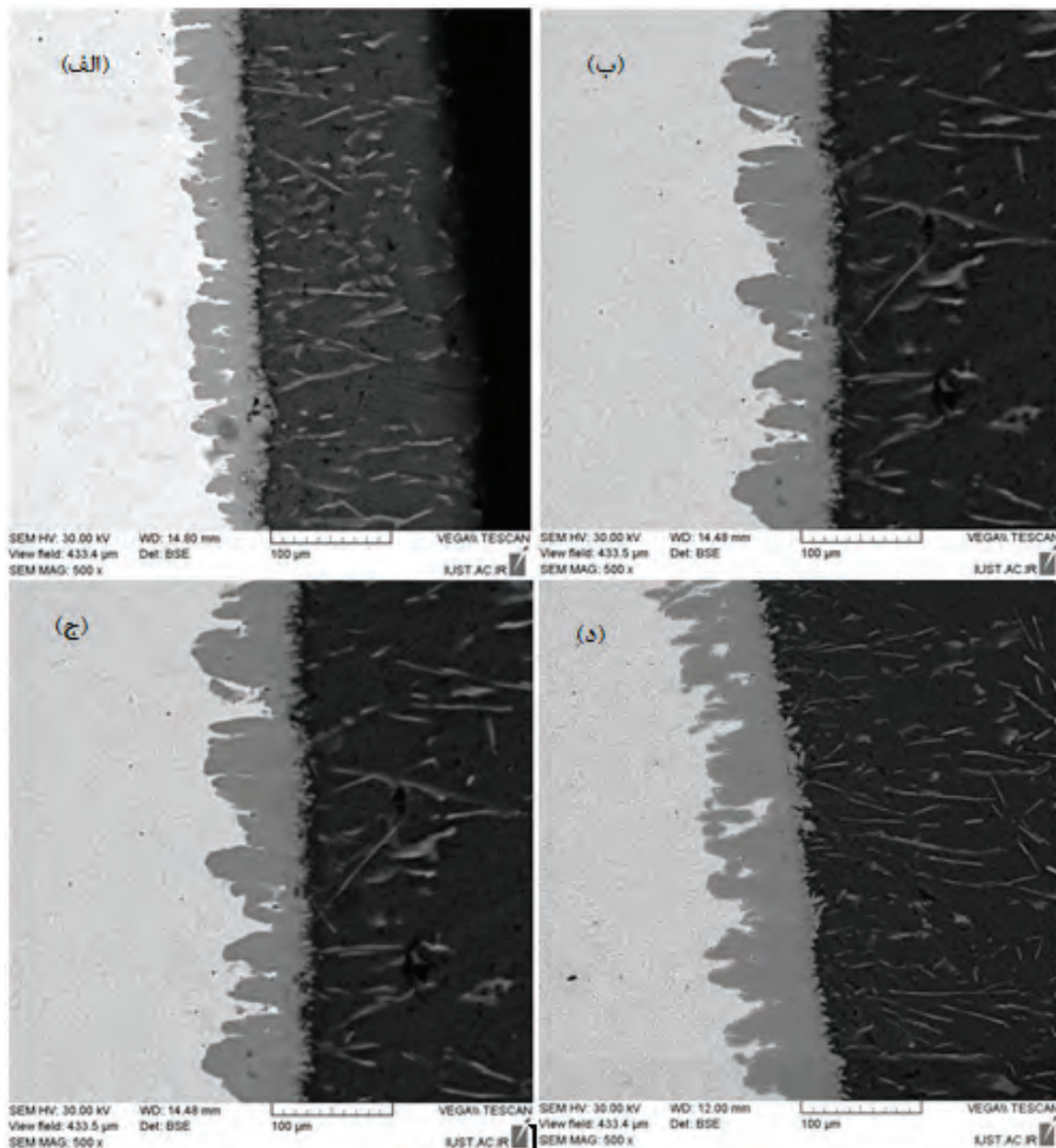
شکل ۳. نتایج آنالیز EDS برای مناطق (۱) و (۲) در شکل (۲).

سینتیک رشد لایه‌ی بین فلزی

لایه‌ی بین فلزی یا از طریق نفوذ حالت جامد و یا انجام واکنش شیمیایی و نفوذ به درون مذاب تشکیل می‌شود. نفوذ حالت جامد زمانی اتفاق می‌افتد که آلومینیم فوق اشباع در زیرلایه‌ی فولادی رسوب کند و نیروی محرکه‌ی آن دما و گرادیان غلظت است، که فرایند کند و زمان‌بر است و با توجه به اینکه لایه‌ی بین فلزی در صدم ثانیه تشکیل می‌شود، زیاد محتمل به نظر نمی‌رسد. از طرف دیگر انجام واکنش شیمیایی و نفوذ به درون مذاب در زمان بسیار کمتری انجام می‌شود و برای تشکیل ترکیب بین فلزی و اتصال بسیار محتمل‌تر به نظر می‌رسد (۱۱).

مدل‌های ریاضی زیادی برای رشد لایه‌ی بین فلزی که در اثر تماس فلز مذاب با زیرلایه‌ی جامد تشکیل می‌شود، ارائه شده است. مدل دیبکوف (۱۹۸۵) مناسبترین نظریه برای این شرایط کاربردی است. این مدل بر اساس رشد دو لایه‌ی ترکیب شیمیایی در فصل مشترک بین دو ماده‌ی فلزی ارائه شده است (۱۲).

بر اساس این مدل ابتدا واکنش شیمیایی مستقیماً بین دو ماده Al و Fe انجام شده و پس از تشکیل لایه‌های ترکیبی



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های غوطه‌ور شده به مدت ۵ دقیقه در دماهای الف) ۶۸۰، ب) ۷۲۰، ج) ۷۶۰ و د) ۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد.

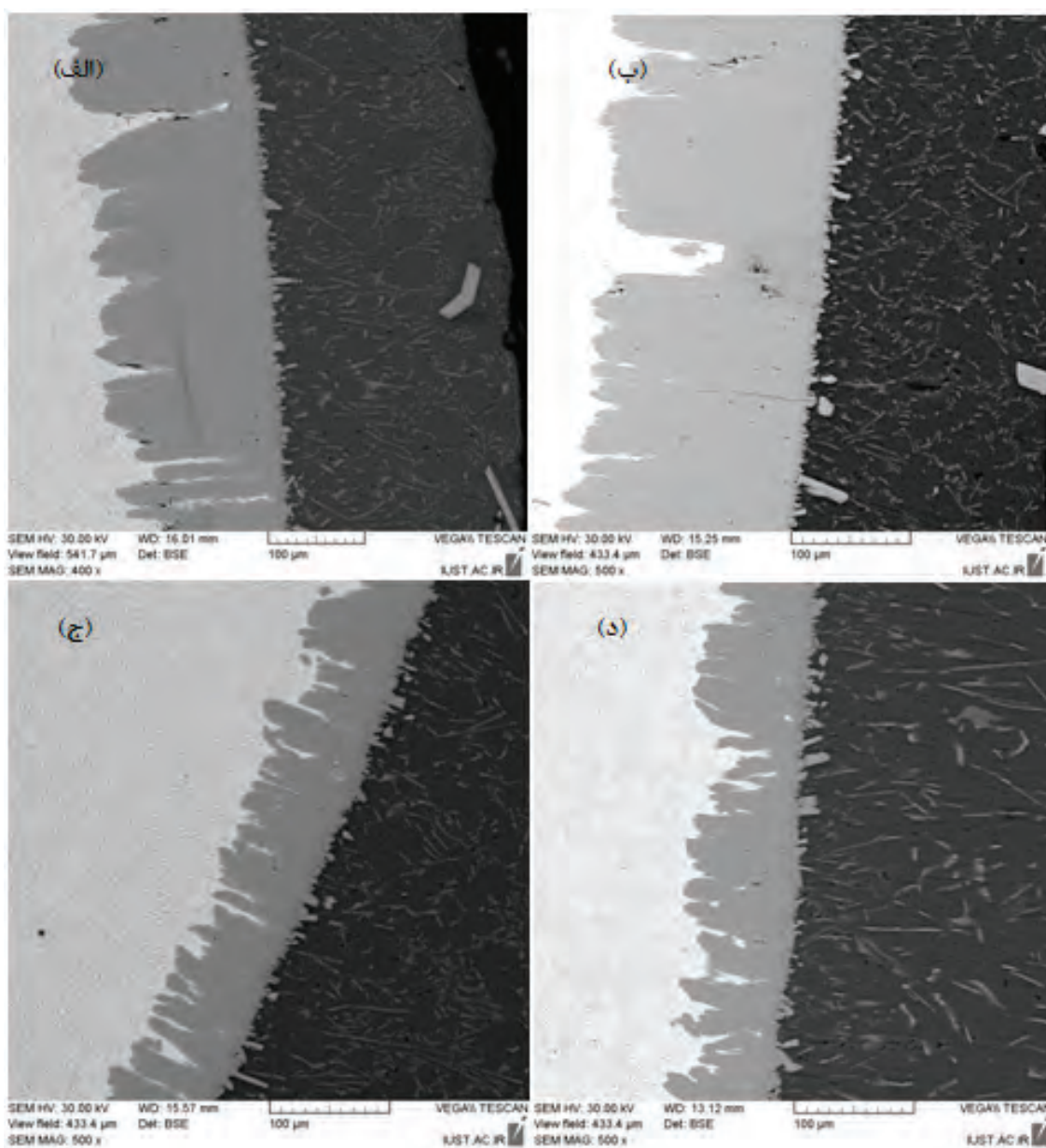
محققین زیادی تشکیل ترکیب بین فلزی را تحت تاثیر هم‌زمان دو مکانیزم رشد لایه‌ی بین فلزی و انحلال آن گزارش کرده‌اند و ضخامت جامد کاهش یافته در حین فرایند غوطه‌وری نیز متأثر از انحلال دانسته‌اند (۱۳، ۱۵، ۱۶) سرعت انحلال لایه‌ی بین فلزی (انحلال آهن به درون مذاب آلومینیم) درون مذاب را از طریق رابطه‌ی ۳ توصیف کرده و سرعت رشد کلی لایه‌ی بین فلزی $FeAl_3$ را حاصل تفاضل روابط ۱ و ۳ گزارش کرده است.

$$\left(\frac{dy}{dt}\right)_{\text{انحلال}} = b_0 \exp(-at) \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$b_0 = C_3 k / \rho \phi, \quad a = ks / v$$

در روابط ۱ و ۲ دو عبارت اول سرعت رشد لایه‌ی تشکیل شده را توصیف می‌کنند در حالی که ترم سوم کاهش سرعت رشد هر لایه ناشی از افزایش سرعت رشد لایه‌ی مجاور را نشان می‌دهد (۱۳).

تشکیل و رشد لایه‌های بین فلزی به سه مرحله تقسیم می‌شوند. دوره‌ی اول که برخی از محققین آن را دوره‌ی گذار نامیده‌اند (۱۴) و بسیار سریع است و اطلاعاتی در مورد نحوه‌ی رشد لایه در این دوره در دست نیست. دوره‌ی دوم، زمانی است که در طی آن ضخامت لایه‌ی بین فلزی زیاد شده و سرعت رشد مثبت است. و دوره‌ی سوم از زمان منفی شدن سرعت رشد لایه‌ی بین فلزی است.



شکل ۶. تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های غوطه‌ور شده در دمای ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های الف) ۱۰ دقیقه، ب) ۱۵ دقیقه و دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان‌های ج) ۱۰ دقیقه و د) ۱۵ دقیقه.

کاهش ویسکوزیته‌ی مذاب سبب می‌شود که غنی شدن مذاب آلومینیم از آهن در نزدیکی زیرلایه به تاخیر افتاده و در نهایت سرعت انحلال بیشتر شود (۱۹، ۲۰).

رابطه (۴)

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

رابطه (۵)

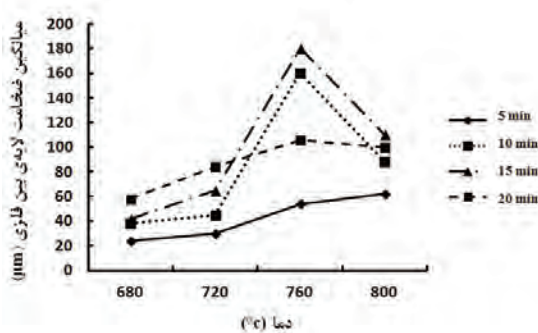
$$K = K_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

با مطالعه‌ی نتایج بدست آمده از این تحقیق دیده شده که افزایش دمای مذاب در زمان‌های غوطه‌وری کم منجر

که در اینجا C_p غلظت فوق اشباع آهن در مذاب آلومینیم در دمای داده شده، k سرعت ثابت انحلال، p دانسیته‌ی ترکیب $FeAl_3$ ، ϕ درصد آهن در کسر جرمی $FeAl_3$ ، s مساحت سطح جامد در تماس با مذاب و v حجم مذاب است.

تأثیر دمای مذاب در ضخامت لایه‌ی بین فلزی

تغییرات ضریب نفوذ (۱۷) و ثابت سرعت انحلال (۱۸) با دما در روابط ۴ و ۵ ارائه شده است. همانطور که دیده می‌شود در هر دو رابطه افزایش دما منجر به افزایش ضریب نفوذ و ثابت سرعت انحلال می‌شود. از طرفی دیگر افزایش دمای مذاب با



شکل ۷. منحنی تغییرات میانگین ضخامت لایه‌ی بین فلزی بر حسب دمای مذاب برای زمان‌های مختلف غوطه‌وری.

رابطه‌ی ۶ استفاده کرد.

رابطه (۶)

$$\frac{K_{OAl1}}{1 + \frac{K_{OAl1}X}{K_{1Al1}}} + \frac{K'_{OFe2}}{1 + \frac{K'_{OFe2}X}{K_{1Fe2}}} = \frac{rg}{p} \frac{K'_{OAl2}}{1 + \frac{K'_{OAl2}Y}{K_{1Al2}}}$$

برقراری رابطه‌ی ۶ مستلزم بیشتر شدن سرعت نفوذ اتم‌های آلومینیم به سمت فصل مشترک $FeAl_3 / Fe_2Al_5$ نسبت به اتم‌های آهن است. ضریب درون نفوذی اتم‌های آهن به مراتب بیشتر از اتم‌های آلومینیم و همچنین ضریب درون نفوذی لایه‌ی بین فلزی Fe_2Al_5 نیز نسبت به لایه‌ی $FeAl_3$ بیشتر است (به طوری که در برخی از مقالات ضرایب درون نفوذی برای اتم‌های آلومینیم، آهن و ترکیبات بین فلزی $FeAl_3$ و Fe_2Al_5 در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد بدین صورت گزارش شده است:

$$D(Al) = 1.35 * 10^{-8} m^2s^{-1}$$

$$D(Al) / D(Fe) = 10^{-6}$$

$$D(FeAl_3) / D(Fe_2Al_5) = 5 * 10^{-2}$$

$$D(Al) / D(FeAl_3) = 1.25 * 10^3$$

(۱۴، ۲۴)) که با افزایش ضخامت لایه‌ی بین فلزی

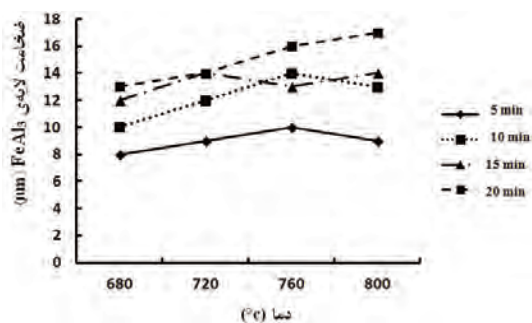
Fe_2Al_5 و بیشتر شدن مسافت پیموده شده توسط اتم‌های آهن به تدریج میزان نفوذ اتم‌های آلومینیم به سمت فصل مشترک $Fe_2Al_5/FeAl_3$ بیشتر شده که همین امر باعث کاهش سرعت رشد لایه‌ی Fe_2Al_5 می‌شود (۲۴). با افزایش دما به‌طور هم‌زمان ضریب نفوذ اتم‌های آهن و آلومینیم افزایش می‌یابد ولی دلیل اصلی که باعث می‌شود در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در ضخامت کمتری سرعت نفوذ اتم‌های آلومینیم نسبت به اتم‌های آهن بیشتر شود، سرعت انحلال بالاتر در این دما است (۲۲). انحلال بیشتر، ضخامت و سرعت رشد لایه‌ی بین فلزی $FeAl_3$ را کاهش می‌دهد که در نهایت منجر به بیشتر شدن سرعت نفوذ اتم‌های آلومینیم به سمت فصل مشترک $FeAl_3 / Fe_2Al_5$ می‌شود.

به افزایش ضخامت لایه‌ی بین فلزی شده است. در شکل ۵ تصاویر میکروسکوپی از مقاطع برشی نمونه‌های غوطه‌ور شده در دماهای مختلف برای مدت زمان غوطه‌وری ۵ دقیقه ارائه شده است. در شکل دیده می‌شود که افزایش دما منجر به افزایش ضخامت لایه‌ی بین فلزی شده است. علت این افزایش ضخامت را می‌توان در تاثیر دما در افزایش ضریب نفوذ اتم‌های آهن و آلومینیم دانست، که با توجه به روابط ۱ و ۲ منجر به افزایش سرعت رشد لایه‌های بین فلزی و به ویژه لایه‌ی Fe_2Al_5 شده است.

با افزایش زمان غوطه‌وری و ضخامت لایه‌ی بین فلزی به تدریج تاثیر انحلال بیشتر دیده می‌شود. افزایش ضخامت لایه‌ی بین فلزی که کسر بیشتری از آن مربوط به لایه‌ی Fe_2Al_5 است، سبب شده تا سرعت نفوذ اتم‌های آهن به سمت فصل مشترک $FeAl_3 / Fe_2Al_5$ کم شود. از طرف دیگر بیشتر شدن حلالیت لایه‌ی بین فلزی $FeAl_3$ با افزایش دما باعث شده تا سرعت نفوذ اتم‌های آلومینیم به سمت فصل مشترک $FeAl_3 / Fe_2Al_5$ بیشتر شود و طبق رابطه‌ی ۲ سرعت رشد نفوذی این لایه بیشتر شود. ولی با توجه به اینکه سرعت رشد کلی این لایه حاصل تفاضل سرعت انحلال و سرعت نفوذی است، در نهایت باز هم رشد قابل توجهی از این فاز مشاهده نمی‌شود. افزایش سرعت رشد نفوذی لایه‌ی بین فلزی $FeAl_3$ تنها منجر به کاهش سرعت رشد لایه‌ی مجاورش می‌شود. در شکل ۶ این مطلب به خوبی مشاهده می‌شود. همانطور که دیده می‌شود افزایش دمای مذاب از ۷۶۰ به ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد در زمان‌های غوطه‌وری ۱۰ و ۱۵ دقیقه منجر به کاهش ضخامت لایه‌ی بین فلزی شده است. بسیاری از محققین نیز تشکیل و رشد لایه‌ی بین فلزی را متاثر از نفوذ و انحلال هم‌زمان به درون مذاب گزارش کرده‌اند (۲۱، ۲۲، ۲۳).

در شکل ۷ منحنی تغییرات ضخامت لایه‌ی بین فلزی بر حسب دمای مذاب در زمان‌های مختلف غوطه‌وری ارائه شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود افزایش دما منجر به افزایش ضخامت لایه‌ی بین فلزی می‌شود ولی در زمان‌های طولانی غوطه‌وری یک نقطه‌ی اکسترم دیده می‌شود که پس از آن ضخامت لایه‌ی بین فلزی کاهش می‌یابد. نقطه‌ی اکسترم در این منحنی همان بیشینه‌ی ضخامت لایه‌ی بین فلزی Fe_2Al_5 است که پس از آن سرعت رشد این لایه منفی می‌شود. طبق رابطه‌ی ۲، این نقطه زمانی است که در آن $\frac{dx}{dt}$ برابر صفر است.

نکته‌ی دیگری که در این شکل دیده می‌شود کمتر بودن ضخامت بیشینه در دمای ۸۰۰ نسبت به دمای ۷۶۰ درجه سانتی‌گراد است. سرعت انحلال بیشتر در دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد دلیل اصلی این اتفاق است. همانطور که گفته شد بیشینه‌ی ضخامت لایه‌ی بین فلزی مربوط به زمانی است که در آن سرعت رشد لایه‌ی بین فلزی Fe_2Al_5 صفر می‌شود. با توجه به رابطه‌ی ۱ می‌توان برای مشخص کردن این نقطه از

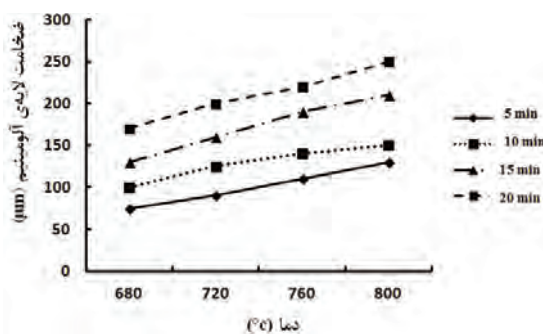


شکل ۹. منحنی تغییرات میانگین ضخامت لایه‌ی بین فلزی FeAl₃ بر حسب دمای مذاب برای زمان‌های مختلف غوطه‌وری.

نمودار در شکل ۹ دیده می‌شود. با این مقایسه مشخص شد که افزایش دما تأثیر قابل توجهی در ضخامت این لایه ندارد. فقط افزایش دما منجر به بزرگتر شدن دانه‌های پلی‌هدرال این فاز درون لایه‌ی آلومینیم شده و همچنین دانه‌های سوزنی شکل این فاز که به طور پراکنده درون لایه‌ی پوششی پخش شده‌اند، بیشتر شود. علت آن نیز افزایش انحلال است.

تأثیر دمای مذاب در ضخامت لایه‌ی آلومینیم

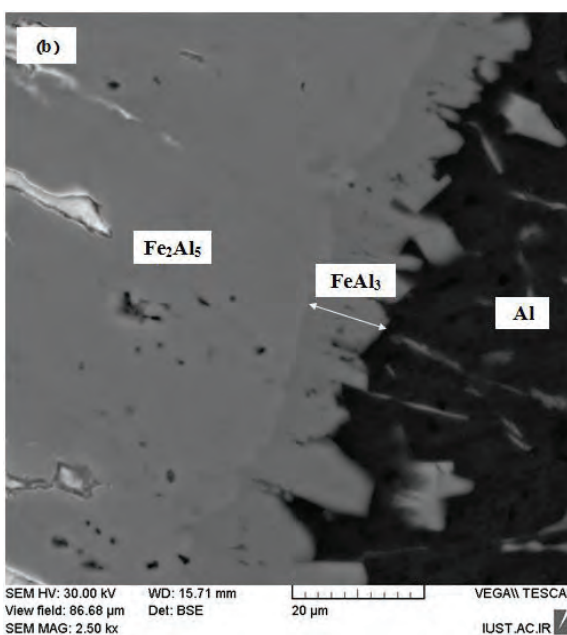
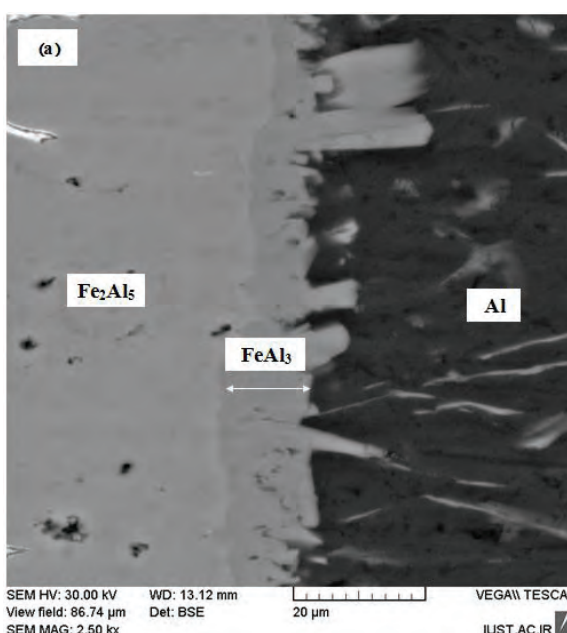
منحنی تغییرات ضخامت لایه‌ی پوششی آلومینیم بر حسب دمای مذاب برای زمان‌های مختلف غوطه‌وری در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود، افزایش دمای مذاب منجر به افزایش ضخامت لایه‌ی آلومینیم شده است. در تحقیقی که توسط دکنگ و همکارانش انجام شده است، گزارش شده که افزایش دما با کاهش ویسکوزیته‌ی مذاب باعث کاهش ضخامت لایه‌ی پوششی آلومینیم می‌شود (۱۹). اما در دیگر تحقیقات انجام شده افزایش ضخامت لایه‌ی آلومینیم با افزایش دمای مذاب گزارش شده است (۲۱، ۲۵). اگرچه افزایش دمای مذاب همانطور که دکنگ و همکارانش اشاره کرده‌اند (۱۹)، منجر به کاهش ویسکوزیته‌ی مذاب می‌شود ولی از طرف دیگر میزان انحلال آهن (که حضور ذرات سوزنی و ستونی شکل از ترکیبات بین فلزی درون لایه‌ی پوششی آلومینیم نشان دهنده انحلال و حضور



شکل ۱۰. منحنی تغییرات میانگین ضخامت لایه‌ی آلومینیم بر حسب دمای مذاب برای زمان‌های مختلف غوطه‌وری.

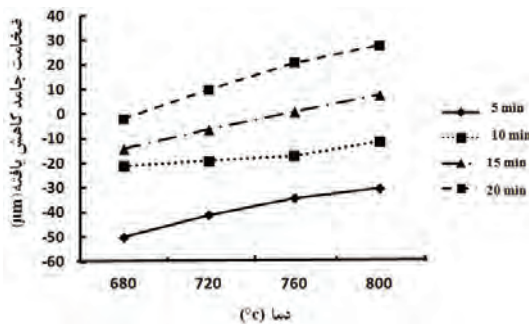
در شکل ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از دو مقطع برشی برای نمونه‌های غوطه‌ور شده به مدت ۲۰ دقیقه در دماهای ۷۶۰ و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد ارائه شده است. در شکل دیده می‌شود که با توجه به بیشتر بودن انحلال در دمای بالاتر، اما ضخامت لایه‌ی بین فلزی FeAl₃ کاهش نیافته است. این مطلب نشان می‌دهد که کاهش ضخامت این لایه در اثر انحلال با بیشتر شدن سرعت رشد نفوذی آن در طول فرایند غوطه‌وری جبران می‌شود.

به طور کلی مقایسه‌ای در مورد ضخامت لایه‌ی بین فلزی FeAl₃ در نمونه‌های مختلف انجام شده، که نتایج آن به صورت



شکل ۸. تصویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های غوطه‌ور شده به مدت ۲۰ دقیقه در دماهای الف) ۷۶۰ و ب) ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد.

مرحله بسیار سریع انجام می‌شود و باعث حرکت فصل مشترک جامد - مایع به سمت مذاب می‌گردد. در ادامه با نفوذ اتم‌های آهن و آلومینیم به سمت فصل مشترک $FeAl_3 / Fe_2Al_5$ فازهای بین فلزی به سمت زیرلایه‌ی فولادی رشد کرده و از طرف دیگر با انحلال آهسته‌ی لایه‌ی بین فلزی درون مذاب، فصل مشترک مذاب-جامد به سمت زیرلایه‌ی فولادی حرکت می‌کند و ضخامت لایه‌ی جامد کم می‌شود. افزایش ضخامت لایه‌ی بین فلزی و کاهش سرعت نفوذ باعث شده تا سرعت انحلال نسبت به سرعت رشد بیشتر شده و مقدار X_{loss} بیشتر شود. افزایش دمای مذاب طبق رابطه‌ی ۵ باعث بیشتر شدن سرعت انحلال شده و در نهایت منجر شده تا مقدار X_{loss} افزایش یابد. در تحقیقی که توسط بوچی و همکارانش برای بررسی تاثیر دمای مذاب در X_{loss} انجام شده نیز نتایج مشابه گزارش شده است. وانگ و همکارانش، نیز برای بررسی نقش انحلال در این فرایند، میزان وزن کاهش یافته را مورد بررسی قرار داده‌اند. این محققین نیز به تاثیر دما در افزایش میزان انحلال اشاره کردند (۱۴، ۲۷).



شکل ۱۲. منحنی تغییرات ضخامت جامد از دست رفته بر حسب دمای مذاب برای زمان‌های مختلف غوطه‌وری.

در شکل ۱۳ تصویر میکروسکوپی از نمونه‌ی غوطه‌ور شده به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می‌شود در برخی از مناطق به علت انحلال کمتر، ضخامت لایه‌ی بین فلزی نسبت به مناطق مجاورش بیشتر بوده و همچنین لایه‌ی پوششی آلومینیم تشکیل شده بر روی سطح نمونه در این مناطق نازکتر است. انحلال کمتر باعث شده تا جابجایی فصل مشترک مذاب - جامد به سمت زیرلایه‌ی فولادی کمتر صورت گرفته و مقدار X_{loss} نسبت به مناطق مجاور کمتر باشد.

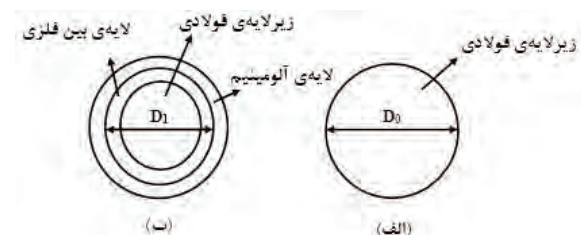
آهن درون مذاب آلومینیم در حین آلومپوشی است. به درون مذاب با افزایش دما بیشتر شده و غلظت بالاتر آهن ویسکوزیته‌ی مذاب را افزایش می‌دهد و همچنین تشکیل ترکیبات بین فلزی در لایه‌ی پوششی چسبندگی این لایه به زیرلایه را بهبود می‌بخشد، و در نهایت منجر شده تا تاثیر کاهش ویسکوزیته با افزایش دما در مقابل پارامترهای دیگر بی اثر شده و ضخامت لایه‌ی آلومینیم روند افزایشی داشته باشد.

تاثیر دمای مذاب در ضخامت جامد از دست رفته

یکی از متغیرهای مهم در تعیین نحوه‌ی تشکیل لایه‌ی بین فلزی در فرایند غوطه‌وری گرم ضخامت جامد از دست رفته (X_{loss}) است. اندازه‌گیری X_{loss} توصیف کننده‌ی میزان جابجایی فصل مشترک جامد-مایع در حین فرایند است. X_{loss} از رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود، که در این رابطه D_0 ضخامت جامد اولیه (ضخامت زیرلایه‌ی فولادی) و D_1 ضخامت نهایی (ضخامت زیرلایه باضافه‌ی لایه‌ی بین فلزی بعد از فرایند) است. در شکل ۱۱، D_0 و D_1 به صورت طرحواره نمایش داده شده است.

رابطه (۷)

$$X_{loss} = D_0 - D_1$$



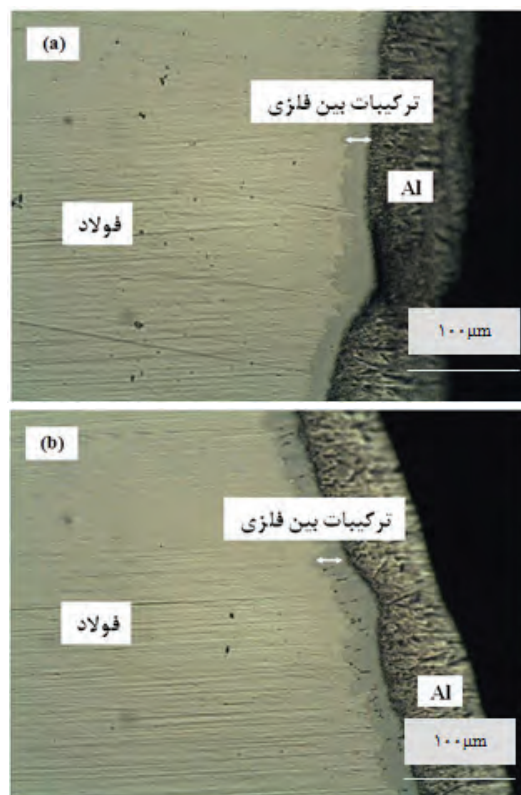
شکل ۱۱. طرح شماتیک از سطح مقطع میله‌ی فولادی (الف) قبل و (ب) بعد از فرایند غوطه‌وری.

مقدار مثبت برای X_{loss} بیانگر حرکت فصل مشترک جامد - مایع به سمت زیرلایه‌ی جامد است، که اشاره به حلالیت بالا در حین فرایند دارد. از طرف دیگر، مقدار منفی برای X_{loss} نشان دهنده‌ی حرکت فصل مشترک به سمت مذاب بوده که اشاره به انبساط جامد و برتری رشد فازها نسبت به انحلال دارد (۱۴).

X_{loss} برای نمونه‌های مختلف اندازه‌گیری شده و منحنی مربوط به تغییرات آن بر حسب دمای مذاب در شکل ۱۲ رسم شده است. مقدار X_{loss} برای تمامی زمان‌های غوطه‌وری در ابتدا منفی است ولی با افزایش دمای مذاب بیشتر می‌شود. تشکیل و رشد لایه‌ی بین فلزی در سه مرحله انجام می‌شود، در مرحله‌ی اول، فازهای بین فلزی درون مذاب غنی از آهن در نزدیکی زیرلایه‌ی فولادی تشکیل می‌شوند. این

References

- 1- Metals handbook, "Surface Engineering", ASM, 10th , 1992; v5.
- 2- Wenming Jiang, Zitian Fan, Guangyu Li, Chi Li. Effects of zinc coating on interfacial microstructures and mechanical properties of aluminum/steel bimetallic composites. Journal of Alloys and Compounds. 2016; 678: 249-257.
- 3- Kyo Y, Yadav A.P, Nishikata A, Tsuru T. Hydrogen entry behaviour of newly developed AlMgSi coating produced by physical vapor deposition. Corrosion Science Journal. 53 (2011) 3043-3047.
- ۴- پیمان عمرانیان محمدی، رامین رئیس زاده، حمیدرضا شاهوردی. «خواص خوردگی دمای بالای پوشش‌های آلومیناید آهن تولید شده به روش دو مرحله‌ای روی فولاد ساده کربنی» مجله مهندسی متالورژی، دوره ۲۰ شماره ۲ تابستان ۱۳۹۶: ۱۰۹-۱۲۰.
- ۵- عبدالسلام کریم زاده، علیرضا صبور روح اقدم. «تشکیل پوشش NiAl با استفاده از فرایند آلومینایزینگ اکتیویته بالا به صورت تک مرحله‌ای، بررسی ریزساختار و مکانیسم تشکیل آن» مجله علوم مهندسی سطح، دوره ۱۸ ۱۳۹۲: ۳۳-۴۴.
- 6- Pratim Dey P, Modak P, Banerjee P.S, Chakrabarti D, Seikh A, Abdo H, Luqman M, Ghosh M. Studies on the characterization and morphological features of the coating on interstitial free steel dipped in molten Al-Si-Mg alloy at 800 °C. J Mater Res Technol . 2020;9(3):4788-4805.
- 7- Naoki Takata, Manamu Nishimoto, Satoru Kobayashi, Masao Takeyama. Crystallography of Fe₂Al₅ phase at the interface between solid Fe and liquid Al. Intermetallics. 2015; 67: 1-11.
- 8- Muhammad A, Dong Bok L. High Temperature Corrosion of Hot-Dip Aluminized Steel in Ar/1%SO₂ Gas. International Materials Reviews. 2017; 23 (1): 92-97.
- 9- Hwang SH, Song JH, Kim YS. Effects of carbon content of carbon steel on its dissolution into a molten aluminum alloy. Materials Science and Engineering A. 2005; 390: 437-443.
- 10- Akdeniz MV, Mekhrabov AO, Yilmaz T. The role of Si addition on the interfacial interaction in Fe-Al diffusion layer. Scripta Metallurgica et Materialia. 1994; 3: 1723-1728.
- 11- Joshi V, Srivastava A, Shivpuri R. Intermetallic formation and its relation to interface mass loss and tribology in die casting dies. Wear journal. 2004; 256: 1232-1235.
- 12- Dybkov VI. Reaction diffusion in heterogeneous binary systems - Part 3 Multiphase growth of the chemical compound layers at the interface between two mutually insoluble substances. Journal of material science. 1987; 22: 4233-4239.
- 13- Dybkov VI. Phase formation and diffusion in binary systems: Real facts and misleading views. Materials Science and Technology Conference and Exhibition. 2007; 3: 1797-1808.
- 14- Bouche K, Barbier F, Coulet A. Intermetallic compound layer growth between solid iron and molten aluminium. Materials Science and Engineering A. 1998; 249: 167-175.
- 15- Tanaka Y, Kajihara M. Morphology of Compounds Formed by Isothermal Reactive Diffusion between Solid Fe and Liquid Al. Materials Transactions. 2009; 50: 2212-2220.
- 16- Dybkov VI. The growth kinetics of intermetallic layers at the interface of a solid metal and a liquid solder. JOM Journal. 2009; 61: 76-79.
- 17- Porter DA, Esterling KE. Phase transformations in metals and alloys. 2008; Chapman & Hall, 4th edition.



شکل ۱۳. تصویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌ی غوطه‌ور شده به مدت ۱۵ دقیقه در دمای ۶۸۰ درجه سانتی‌گراد، انحلال کمتر در برخی از مناطق نمونه دیده می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

جمع‌بندی نتایجی که از پژوهش حاضر به دست آمده است به شرح زیر ارائه می‌گردد:

- ۱- لایه‌ی بین فلزی در فصل مشترک فولادی و مذاب آلومینیم از دو ترکیب بین فلزی $FeAl_3$ و Fe_2Al_5 تشکیل شده است.
- ۲- افزایش دمای مذاب و زمان غوطه‌وری تغییری در نوع ترکیبات بین فلزی تشکیل شده در لایه‌ی بین فلزی ایجاد نمی‌کند.
- ۳- با افزایش دمای مذاب و زمان غوطه‌وری، ضخامت لایه‌ی بین فلزی تا یک مقدار قله که وابسته به دمای مذاب و زمان غوطه‌وری است، افزایش و بعد از آن کاهش یافته است.
- ۴- تشکیل و رشد لایه‌ی بین فلزی تحت تاثیر نفوذ اتم‌ها و انجام واکنش شیمیایی در فصل مشترک و انحلال هم‌زمان آهن به درون مذاب صورت گرفته است.

- 18- Marra J C. Dissolution of stainless steel by molten aluminum alloys final report. WSRC-TR-92-543. 1992: 6-57.
- 19- Deqing W, Ziyuan S, Longjiang Z. A liquid aluminum corrosion resistance surface on steel substrate. *Applied Surface Science*. 2003; 214: 304-311.
- 20- Wenming Jiang, Zitian Fan, Guangyu Li, Xinwang Liu, Fuchu Liu. Effects of hot-dip galvanizing and aluminizing on interfacial microstructures and mechanical properties of aluminum/iron bimetallic composites. *Journal of Alloys and Compounds*. 2016; 688: 742-751.
- 21- Tanaka Y, Kajihara M. Kinetics of isothermal reactive diffusion between solid Fe and liquid Al. *Journal of Material Science*. 2010; 45: 5676-5684.
- 22- Sasaki T, Yakou T, Mochiduki K, Ichinose K. Effect of carbon contents in steel on alloy layer growth during hot-dip aluminum coating. *ISIJ international*. 2005; 45: 1887-1892.
- 23- Checchetto R, Tosello C, Miotello A, Principi G. Structural evolution of Fe-Al multilayer thin films for different annealing temperatures. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2001; 13: 811-821.
- 24- Bouayad A, Gerometta Ch, Belkebir A, Ambari A. Kinetic interactions between solid iron and molten aluminium. *Materials Science and Engineering A*. 2003; 363: 53-61.
- 25- Kobayashi S, Yakou T. Control of intermetallic compound layers at interface between steel and aluminum by diffusion-treatment. *Material Science Eng*. 2002; 338: 44-53.
- 26- Prashanth Huilgol, Suma Bhat K, Udaya Bhat. Hot-Dip Aluminizing of Low Carbon Steel Using Al-7Si-2Cu Alloy Baths. *Journal of Coatings*. 2013; 2013, Article ID 180740: 6 pages.
- 27- Wang Ch-J, Chen Sh-M. The high-temperature oxidation behavior of hot-dipping Al-Si coating on low carbon steel. *Surface & Coatings Technology*. 2006; 200: 6601-6605.