



## بررسی فصل مشترک کامپوزیت دوفلزی آلومینیم/چدن

مهدی اکبری فر<sup>۱</sup>، مهدی دیوانداری<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناس ارشد، مهندسی ریخته‌گری، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
۲- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران  
divandari@iust.ac.ir، ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶، صندوق پستی

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۱۰/۳۰  
پذیرش: ۹۵/۱/۱۲

### کلیدواژگان:

آلومینیم  
چدن خاکستری  
فصل مشترک  
ترکیب بین فلزی  
گرافیت

### چکیده

در این مقاله فصل مشترک کامپوزیت ریخته‌گری دوفلزی آلومینیم-چدن خاکستری بررسی شده است. برای دستیابی به یک محصول دو فلزی مناسب و قابل قبول از دو فلز، بررسی مشخصات فصل مشترک آن‌ها ضروری به نظر می‌رسد. ریخته‌گری به روش ثقلی انجام شده است. به این منظور مذاب آلومینیم در دماهای ۷۰۰ و ۷۵۰ درجه سلسیوس پیرامون مغزه‌های چدن خاکستری درون حفره‌های استوانه‌ای قالب با نسبت حجمی ۳، ۵ و ۸ ریخته‌گری شد. مطالعات بعدی توسط میکروسکوپی نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و طیف‌سنجی تفکیک انرژی (EDS) نشان از تشکیل لایه‌ی ترکیب بین فلزی در فصل مشترک دو فلز داشت. این لایه از ترکیب بین فلزی  $Fe_2Al_5$  تشکیل یافته است که بر ناهمواری‌های روی سطح مغزه جامد چدن جوانه می‌زند. بررسی‌های ریزساختاری نشان می‌دهند که افزایش دمای بارریزی و نسبت حجمی مذاب/جامد سبب تشکیل لایه‌های ضخیم‌تر و یکنواخت‌تر از ترکیب بین‌فلزی می‌شوند. ریز سختی فاز بین فلزی برابر ۸۲۴ سختی ویکرز به‌دست آمد. پهنای لایه‌ی واکنش از ۵ میکرومتر برای نمونه‌ی ریخته شده در دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد و نسبت حجمی ۳ تا ۲۰ میکرومتر برای نمونه ریخته شده در دمای ۷۵۰ درجه سلسیوس و نسبت حجمی ۸ متفاوت بود. در این تحقیق مکانیسمی برای رشد و جوانه‌زنی این فاز بین فلزی در فصل مشترک دوفلزی پیشنهاد شده است. همچنین نحوه حل شدن فاز زمینه چدن در آلومینیم مذاب و دربرگیری گرافیت موجود در چدن خاکستری در مذاب آلومینیم نشان داده شده است.

## Interface characterization of Al/cast iron composite

Mehdi Akbarifar, Mehdi Divandari\*

School of Material Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran  
\*P.O.B. 13114-16846, Tehran, Iran, diavandari@iust.ac.ir

### Keywords

Aluminum  
Cast Iron  
Interface  
Intermetallic compound  
Graphite

### Abstract

In this article, interface characteristics of aluminum and cast iron bimetal has been investigated. To reach an acceptable composite products, from two materials, interface characteristics needs to be investigated. Aluminum melt was poured, at 700 and 750°C, around cylindrical cast iron bars having melt/solid volume ratios of 3, 5 and 8, respectively. Optical and SEM microscopic observations showed that a reaction layer may form at the interface. This layer is composed of  $Fe_2Al_5$  intermetallic which forms initially at the rough surface of the insert after making contact with molten metal. Microstructural analysis showed the increasing of temperature and the Vm/Vs ratio leads to formation of a thicker and more uniform intermetallic layer. Microhardness of the  $Fe_2Al_5$  was 824 HV and the thickness of interaction layer varied from 5µm, for the sample produced at 700°C and 3 Vm/Vs, up to 20µm for the sample poured at 750°C and 8 Vm/Vs. A mechanism is suggested for nucleation and growth of this intermetallic layer and also graphite engulfment of gray cast iron, by aluminum melt, at the interface of two metals.

### ۱- مقدمه

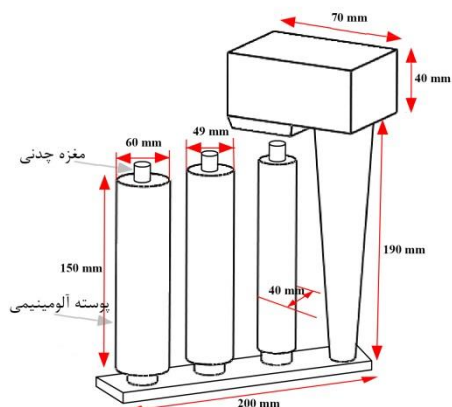
به‌عنوان ماده‌ای مناسب برای استفاده در پوسته داخلی بلوک سیلندره‌های آلومینیمی مطرح کرده‌است [۳]. برای تولید این کامپوزیت‌های فلزی، روش‌های گوناگونی چون اتصال نفوذی [۴-۱۲] جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی [۱۳-۲۰]، جوشکاری پرتو لیزری [۲۱،۲۲]، لحیم‌کاری [۲۳،۲۴] و روش‌های دیگر جوشکاری [۲۵-۲۸] گسترش یافته‌اند. عواملی همچون شکل

استفاده از کامپوزیت‌های آلومینیم/چدن به دلیل نسبت استحکام به وزن بالای آلومینیم مورد توجه صنایع خودروسازی قرار گرفته است. گزارش‌هایی متعددی مبنی بر استفاده از هسته‌ی چدنی برای مقاوم‌سازی پیستون‌های آلومینیمی ارائه شده است [۲۰،۱]. علاوه بر این، مقاومت سایشی خوب، چدن را

Please cite this article using:

Akbarifar, M. and Divandari, M., "Interface Characterization of Al/Cast Iron Composite", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 3, pp. 261-268, 2016.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:



شکل ۱ طرحواره‌ای از سیستم راهگاهی و مدل مورد استفاده جهت تولید کامپوزیت‌های دوفلزی

پس از پایان انجماد قطعه، دوفلزی‌های ریخته‌گری شده در امتداد اتصال دو فلز مقطع‌زنی شده و قطعه‌ی میانی هر نمونه برای بررسی‌های متعاقب انتخاب گردید. مقاطع به ترتیبی که در جدول ۲ آمده، شماره‌گذاری شدند. عملیات آماده‌سازی سطحی شامل سنباده‌زنی سطح مقطع تا شماره ۲۵۰۰، پولیش با پودر آلومینا ۰/۱ میکرومتر و حکاکی توسط محلول نایتال انجام گرفت.

بررسی ریزساختار نمونه‌های توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی IITescan مجهز به EDS صورت پذیرفت. ریزسختی‌سنجی و یکرز نیز تحت بار ۵۰ گرم و مدت ۱۵ ثانیه انجام شد.

در شکل ۲ مقاطع نمونه‌های بارریزی شده در دمای ۷۰۰°C و با نسبت‌های حجمی گوناگون نشان داده شده است.

جدول ۲ شماره‌گذاری و شرایط تولید مقاطع مورد استفاده در بررسی‌های متالوگرافی

شماره نمونه	دمای بارریزی	نسبت حجمی مذاب/جامد
C۷۰۰-۳	۷۰۰°C	۳
C۷۰۰-۵	۷۰۰°C	۵
C۷۰۰-۸	۷۰۰°C	۸
C۷۵۰-۳	۷۵۰°C	۳
C۷۵۰-۵	۷۵۰°C	۵
C۷۵۰-۸	۷۵۰°C	۸



شکل ۲ مقاطع نمونه‌های بارریزی شده در دمای ۷۰۰°C و با نسبت‌های حجمی گوناگون

و هندسه قطعات، اندازه جفت فلزی، تفاوت در مشخصات فیزیکی و متالورژیکی فلزات انتخاب شده و همچنین نیاز به تجهیزات و ابزارهای ویژه، از محدودیت‌های عمده بهره‌گیری از روش‌های یاد شده محسوب می‌شوند [۳۰، ۲۹]. از این‌رو، نیاز به اتصال بین فلزات در اندازه‌های متنوع و اشکال پیچیده، توجه زیادی را به روش‌های ریخته‌گری جلب کرده است.

ریخته‌گری مرکب روشی برای تولید قطعات کامپوزیت‌های دوفلزی است که طی آن مذاب فلزی درون یا پیرامون جامد فلزی ریخته‌گری می‌شود تا پیوندی قابل قبول در فصل مشترک تو فلز به وجود آید [۳۱-۳۳]. بنابراین، مطالعه ساختار فصل مشترک و مشخصات دو آلیاژ مورد استفاده، در کنار بررسی متغیرهای موثر، ضروری می‌نماید. فلز مذاب در حال ورود به حفره قالب انرژی حرارتی بالایی دارد که توان فراهم ساختن انرژی فعال‌سازی برهم‌کنش‌های متعاقب را دارد. هر تغییری در دمای بارریزی و نسبت مذاب/جامد می‌تواند شرایط را در فصل مشترک تغییر دهد و بر ضخامت لایه‌های متالورژیکی تشکیل یافته در این منطقه تاثیر بگذارد [۳۴-۳۸]. با آغاز فرآیند انجماد، واکنش دو آلیاژ در حضور انرژی گرمایی می‌تواند زمینه را برای تشکیل ترکیبات بین‌فلزی فراهم سازد [۱۲]. این ترکیبات در بعضی موارد ترد و شکننده بوده و خواص مکانیکی فصل مشترک را تضعیف می‌نمایند.

کامپوزیت دوفلزی چدن و آلومینیم جاذبه زیادی برای مصرف در صنایع مختلف بویژه خودروسازی داشته و رفتار فصل مشترک، به عنوان تابعی از متغیرهای مختلف ریخته‌گری، جاذبه زیادی برای تحقیق دارد. به توجه به موارد فوق، هدف این تحقیق، ارزیابی و بررسی مشخصات فصل مشترک دوفلزی آلومینیم/چدن در دماهای بارریزی و نسبت‌های مذاب/جامد متفاوت انتخاب شد.

## ۲- مواد و روش آزمون

روش ریخته‌گری با استفاده از قالب ماسه‌ای سخت شده با دی اکسید کربن جهت تولید نمونه دوفلزی انتخاب گردید. شش میله چدن خاکستری با ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر و قطر ۲۰ میلی‌متر، برای دو گروه آزمایش مختلف، به‌عنوان مغزه مورد استفاده قرار گرفت. ترکیب شیمیایی مربوط به این چدن در جدول ۱ ارایه شده است. سطح میله‌ها تا شماره ۱۵۰۰ سنباده‌زنی و قبل از قرار گرفتن داخل قالب، چربی‌زدایی شدند. سیستم راهگاهی به گونه‌ای طراحی شد (شکل ۱) که همه حفره‌های قالب به‌صورت هم‌زمان پر شود و فرآیندگری ریخته‌گری قبل از انجام عملیات ریخته‌گری با نرم افزار پروکست ارزیابی شد.

آلومینیم خالص تجاری (۹۹.۹ درصد) داخل قالب ساخته شده از ماسه با چسب سیلیکات سدیم سخت شده با دمش دی‌اکسید کربن در دو دمای ۷۰۰ و ۷۵۰ درجه سلسیوس ریخته‌گری شد. مغزه‌ها در مرکز حفره‌های به قطرهای ۴۰، ۴۹ و ۶۰ میلی‌متر قرار داده شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی مغزه چدن خاکستری مورد استفاده (درصد وزنی)

C	Si	S	P	Mn
۳/۵۵	۲/۲۴	۰/۰۴	۰/۱۰	۰/۳۶
Ni	Cr	Mo	Fe	
۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۱	۹۳/۳۴	

### ۳- نتایج و بحث

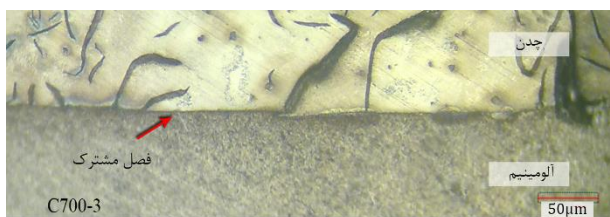
ریزساختار نمونه ۳-۷۰۰ CV در شکل ۳-الف نمایش داده شده است. به نظر می‌رسد که محتوای حرارتی مذاب برای حل کردن نقاط برجسته سطح این نمونه کافی نبوده‌است و از این رو محصولات اندرکنش بین سطح مغزه و مذاب به چشم نمی‌خورند. با این وجود، فصل مشترک عاری از عیب است و به نظر می‌رسد ایجاد یک اتصال مکانیکی بین دو فلز محتمل باشد. چنین وضعیتی نیاز به تر شدن سطح مغزه توسط مذاب دارد. برخلاف نمونه‌های دوفلزی آلومینیم/مس [۳۰]، آثار مشهودی از فیلم اکسید سطحی آلومینیم برای جلوگیری از ایجاد اتصال بین دو فلز به چشم نمی‌خورد.

با افزایش نسبت حجمی مذاب/جامد، بعضی ترکیبات در فصل مشترک دو فلز شکل می‌گیرند (شکل ۳-ب و ۳-ج). پیوستگی این لایه با افزایش نسبت  $V_m/V_s$  افزایش پیدا می‌کند. ضخامت میانگین این لایه از  $8/5$  میکرومتر در ۵-۷۰۰ CV به  $13/5$  میکرومتر در ۸-۷۰۰ CV تغییر یافته است. نکته قابل توجه در اینجا انحلال نقاط برجسته، یعنی ناهمواری‌های سطحی، توسط مذاب آلومینیم است در حالی که فاز گرافیت موقعیت خود را حفظ کرده و توسط فاز بین فلزی جدید محاصره شده است. این نکته نشان دهنده دیر ذوب بودن گرافیت و عدم حلالیت آن در مذاب در دماهای ریخته‌گری آلومینیم است. این در حالی است که آلومینیم قادر است آهن موجود در چدن که نقطه ذوبی بالاتر از آلومینیم دارد را در خود حل کرده و ترکیب بین فلزی تشکیل دهد.

شکل ۴ نمایانگر فصل مشترک نمونه‌های ریخته‌شده در دمای  $750^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس و با نسبت‌های حجمی مذاب/جامد متفاوت است. ضخامت لایه بین فلزی تشکیل شده در فصل مشترک به صورت مشخصی نسبت به نمونه‌های ریخته شده در دمای  $700^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس بیشتر است. ضخامت میانگین این لایه از  $14$  میکرومتر در نمونه ۳-۷۵۰ CV تا  $15/5$  و  $19/5$  میکرومتر در نمونه‌های ۵-۷۵۰ CV و ۸-۷۵۰ CV متفاوت است. ضخامت متوسط لایه فصل مشترک دو نمونه‌های مورد بررسی به صورت نموداری در شکل ۵ نمایش داده شده است.

ظاهر موجدار فصل مشترک (شکل ۴-ج) را می‌توان با تکیه به انحلال سطحی، مادون انجماد ترکیبی حاصل از ورود ترکیبات مغزه به مذاب و مکانیزم تشکیل لایه بین فلزی توضیح داد. با در نظر گرفتن موقعیت گرافیت در شکل ۳ و ۴، مشاهده می‌گردد که فصل مشترک مذاب/جامد به سمت مغزه چدنی حرکت کرده‌است. بنابراین، روشن است که تشکیل این لایه با حل شدن آهن موجود در مغزه در مذاب آلومینیم کنترل می‌شود.

لایه بین فلزی که در فصل مشترک دو فلز شکل گرفته است، در شکل ۶ قابل مشاهده است. نتایج EDS این لایه نزدیک به ترکیب حدود  $70\%$  درصد آلومینیم و  $30\%$  درصد آهن (شکل ۷) است که حدوداً با ترکیب  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  مطابقت دارد. در سیستم دوتایی آهن-آلومینیم، ترکیبات  $\text{FeAl}$ ،  $\text{FeAl}_2$ ،  $\text{FeAl}_3$  در کنار  $\text{Fe}_2\text{Al}_5$  ترکیبات پایدار بین فلزی در دماهای پایین‌تر از  $750^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس محسوب می‌شوند [۳۹]. ترکیبات  $\text{FeAl}$ ،  $\text{FeAl}_2$  و  $\text{FeAl}_3$  در هیچ یک از دماها و نسبت‌های حجمی مذاب/جامد یاد شده در این پژوهش مشاهده نشدند. الگوی توزیع عناصر در فصل مشترک نمونه ۸-۷۵۰ CV در شکل ۸ آمده است. در نزدیکی مغزه چدنی شدت پیک آلومینیم به شدت کاهش می‌یابد و در عین حال شدت پیک آهن در آلومینیم، انجماد یافته در همین ناحیه، در حال افزایش است. ضخامت لایه واکنش، شامل مناطقی که در آن عناصر آلومینیم و آهن حضور توأمان دارند، در حدود  $27$  میکرومتر است.



(الف)



(ب)



(ج)

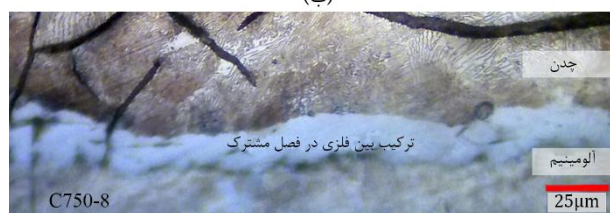
شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ نوری از فصل مشترک آلومینیم/چدن در نمونه‌های با دمای بارریزی  $700^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس و در نسبت‌های حجمی مذاب/جامد گوناگون (۳، ۵، ۸)



(الف)



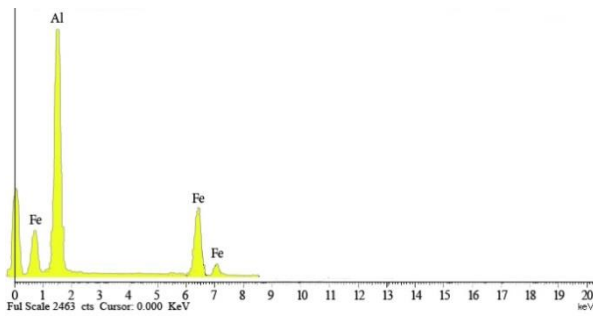
(ب)



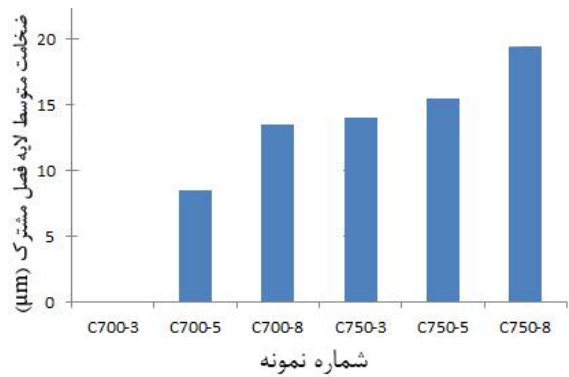
(ج)

شکل ۴ میکروسکوپ نوری از فصل مشترک آلومینیم/چدن در نمونه‌های با دمای بارریزی  $750^\circ\text{C}$  درجه سلسیوس و در نسبت‌های حجمی مذاب/جامد گوناگون (۳، ۵، ۸)

شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک ۳-۷۰۰ CV را نمایش می‌دهد. با وجود این که هیچ نشانی از تشکیل لایه بین فلزی در تصاویر میکروسکوپ نوری مربوط به این نمونه (شکل ۳) دیده نمی‌شد، فازهایی با قطر میانگین  $5$  میکرومتر در مکان‌های با ناهمواری بیشتر در فصل مشترک به وجود آمده‌اند.

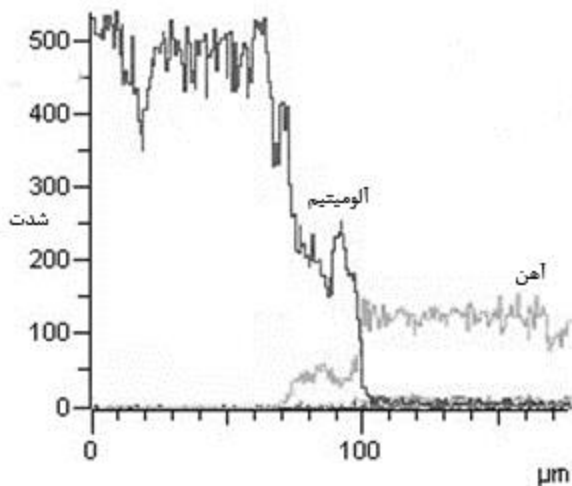


شکل ۷ آنالیز EDS از ترکیب بین فلزی نشان داده شده در شکل ۶



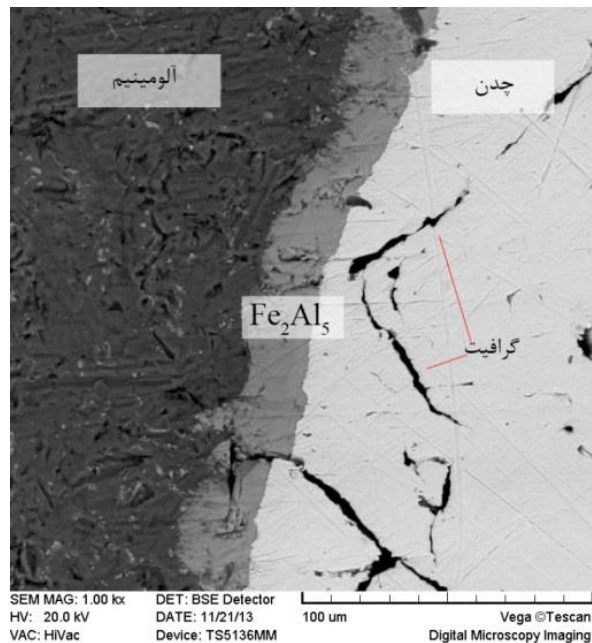
شکل ۵ نمودار ضخامت متوسط لایه فصل مشترک در شش نمونه مورد بررسی

به نظر می‌رسد که لایه بین فلزی مشاهده شده در نمونه‌های تولید شده در دماها و نسبت‌های حجمی مذاب/جامد بالاتر، حاصل رشد، به هم پیوستن و هم پوشانی این فازها باشند. مشاهداتی مشابه در تحقیقات دیگری نیز گزارش شده است [۴۱،۴۰].



شکل ۸ آنالیز خطی توزیع عناصر آهن و آلومینیم در فصل مشترک آلومینیم / چدن نمونه ۸-۷۵۰ CY

با برقراری تماس بین چدن جامد و آلومینیم مذاب، مغزه شروع به حل شدن در مذاب کرده، لایه بین فلزی آهن-آلومینیم تشکیل می‌شود. در ابتدا، مذاب باید سطح مغزه را خیس کند تا بتواند اتصالی سالم و یکپوخت تشکیل دهد. علی‌رغم آماده‌سازی‌های سطحی که پیش از قرار دادن مغزه‌های در قالب انجام گرفته است، هنوز شیارها و زبری‌های زیادی بر سطح مغزه‌ها باقی است. این ناهمواری‌ها مذاب را از رسیدن به انتهای مقعرشان باز می‌دارند (شکل ۱۱-ب). این فضای خالی بین مذاب و انتهای شیارها به‌احتمالی زیاد از گازهایی پر شده است که باید به هر نحوی حذف گردند تا اتصال در این نقاط صورت گیرد (شکل ۱۱-ج). با پر شدن قالب و افزایش دمای فصل مشترک، نقاط برجسته سطح شروع به حل شدن در فلز مذاب می‌کنند و اندازه شیارها تغییر می‌کند (شکل ۱۱-د و ۱۱-ه). در نهایت، مذاب موفق به تماس با انتهای شیارها گشته و گازهای یاد شده به شکل حباب درآمده، از ناحیه تماس به سمت بالا فرار کرده و حذف می‌شوند (شکل ۱۱-و). می‌توان نتیجه گرفت که ترشوندگی سطح توسط مذاب به خوبی انجام پذیرفته است. به علاوه، این امر موجب پدیدار شدن مناطق غنی از آهن درست در نزدیکی فصل مشترک می‌گردد که نواحی مناسبی برای جوانه زنی فازهای بین فلزی هستند. گازها ممکن است در بجه‌های ورود مذاب به خارج فرار کرده باشند، یا در داخل مذاب به دام بیافتند و یا در حل شدن و تشکیل احتمالی ترکیبات در فصل مشترک عهده‌دار نقش شده باشند. بدیهی است که اگر گازهای سطحی امکان فرار نداشته باشند و وارد مذاب شوند در مرحله بعد به صورت حفره گازی در فصل مشترک مشاهده می‌شوند.

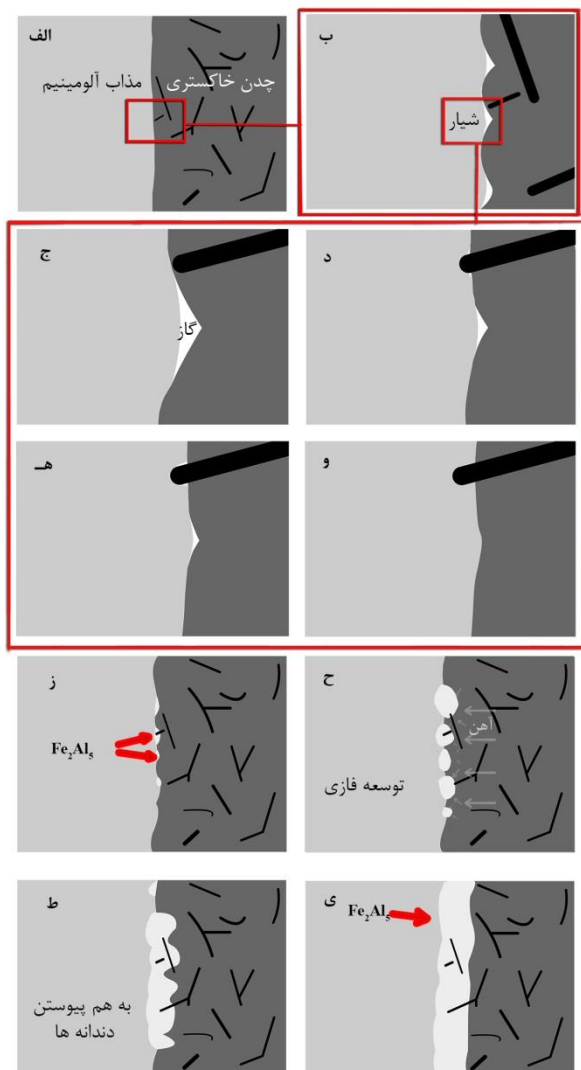


شکل ۶ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از فصل مشترک

آلومینیم/چدن در نمونه دوفلزی ۸-۷۵۰ CY

هنگامی که مذاب در تماس با سطح جامد قرار می‌گیرد ناهمواری‌های سطح جامد توسط انرژی حرارتی مذاب حل می‌شود. تاثیر دما و کسر حجمی مذاب/جامد بر ذوب سطحی مغزه در نمودار شکل ۱۰ داده شده است. همان طوری که انتظار می‌رفت، ذوب سطحی بیشتر در مناطق پایین تر مغزه، که به محل ورود مذاب از سیستم راهگامی نزدیکتر است، اتفاق می‌افتد. این امر به دلیل دمای بالاتر مذاب و مدت زمان تماس بیشتر این مناطق در لحظات اولیه پر شدن قالب است. هیچ نشانی از کاهش قطر مغزه در میانه و قسمت بالایی نمونه ۳-۷۰۰ CY و ۵-۷۰۰ CY مشاهده نمی‌گردد. با این وجود، به نظر می‌آید که در اکثر نمونه‌ها انرژی حرارتی مذاب برای کاهش بیش از یک میلی‌متر از قطر مغزه جامد کافی نبوده است. مشاهده‌های مشابهی در مورد دوفلزی آلومینیم/برنج نیز گزارش شده است [۴۲].

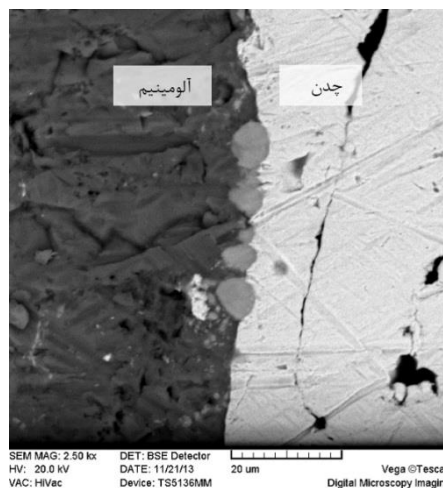
در مرحله بعدی، جوانه‌ها با رسوب گذاری متعاقب مذاب و نفوذ اتمهای آهن به سمت این فاز رشد کرده و به هم می‌پیوندند (شکل ۱۱- ح). با ترکیب این فازهای تازه شکل یافته و همچنین رشد و همپوشانی متعاقب دندانهای منفرد، لایه بین فلزی موجداری شکل می‌گیرد (شکل ۱۱- ط، ۱۱- ی). لازم به ذکر است که حضور Si از رشد ترجیحی این فاز با اشغال جاهای خالی در امتداد محور C ترکیب Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> جلوگیری می‌نماید [۴۶]. با افزایش زمان انجماد، لایه فصل مشترک می‌تواند یکنواخت‌تر و ضخیم‌تر گردد. همچنین، اندرکنش‌هایی مثل انتقال آهن میان مذاب و مغز جامد، بر فرآیند انجماد و طبیعت موجدار لایه فصل مشترک تاثیر می‌گذارد [۴۳].



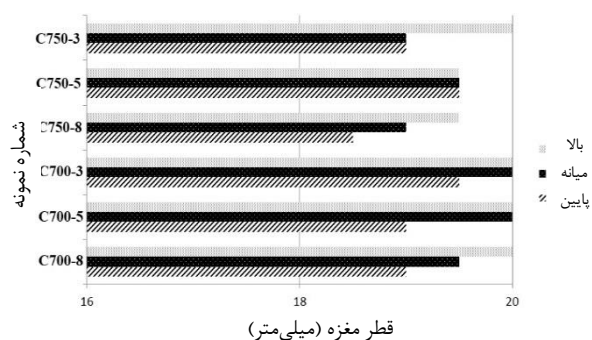
شکل ۱۱ طرحواره‌ای از تشکیل ترکیب بین فلزی در فصل مشترک آلومینیم / چدن. الف) سطح مغزه در تماس با آلومینیم مذاب، ب) شیارهای متعدد بر سطح بزرگ شده از شکل الف، ج-و) ذوب نواحی برجسته مغزه توسط مذاب و ترشوندگی کامل در نتیجه حذف گاز، ز) جوانه زنی ترکیب بین فلزی در دندانهای سطح مغزه، ح) رشد جوانه‌ها و نفوذ آهن از بستر چدنی د) به هم پیوستن دندانها و تشکیل لایه بین فلزی، ی) همپوشانی و تشکیل لایه‌ای یکنواخت از ترکیب بین فلزی در فصل مشترک

شکل ۱۲ نشان دهنده شماتیکی از احاطه شدن گرافیت توسط آلومینیم در فصل مشترک دو فلز است. طی فرآیند حل شدن سطح جامد، عناصری از چدن وارد مذاب می‌گردند (شکل ۱۲- الف). با پیشروی متعاقب جبهه مذاب،

بر اساس گزارش‌های پیشین، تشکیل Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> و FeAl<sub>3</sub> به‌عنوان محصولات اندرکنش دو فلز مورد انتظار بود [۴۴، ۴۳]. اما تنها ترکیب بین فلزی Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> شکل گرفته است. از نقطه نظر ترمودینامیکی، شکل گیری FeAl<sub>3</sub> محتمل‌تر است چرا که انرژی آزاد گیبس برای تشکیل کمتری دارد. بر خلاف اصول ترمودینامیک، نتایج حاکی از عدم حضور این فاز است. آن گونه که شهودی و همکاران تصریح کرده‌اند، عیوب بلور شناختی در ساختار آلومینیم که موجب نرخ رشد سریع‌تر Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> می‌گردند، یکی از دلایل اصلی پدیدار شدن این فاز به جای FeAl<sub>3</sub> است [۴۳]. بر این اساس تعداد زیاد جاهای خالی در امتداد محور این فاز اورتورومبیک، مسیر نفوذ سریعی را در راستای [۰۰۱] در اختیار قرار می‌دهد [۴۵]. به بیان دیگر، سینتیک واکنش بر ترمودینامیک آن غلبه می‌نماید. جدای از آن، با عنایت به حضور Si در ساختار چدن خاکستری، این و همکاران نشان داده‌اند که این عنصر نقش مهمی در کاهش انرژی جوانه زانی Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub>، و کاهش نرخ رشد FeAl<sub>3</sub> دارد [۴۶].



شکل ۹ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از فصل مشترک دوفلزی آلومینیم / چدن در نمونه دوفلزی ۳-۷۰۰-۰۳



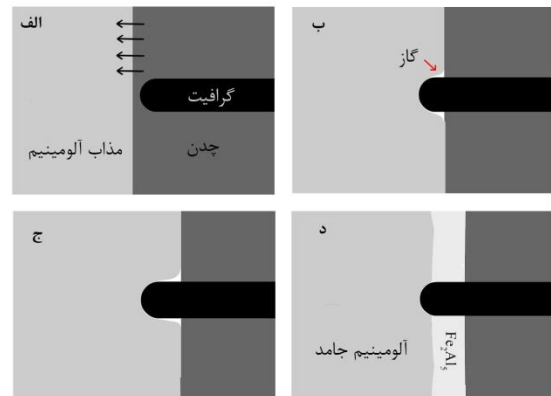
شکل ۱۰ نمودار قطر مغزه پس از پایان عملیات ریخته‌گری

تحقیقات دیگری نیز تشکیل این ترکیب بین فلزی در فصل مشترک آهن/آلومینیم را در دماهای پایین تر نشان داده‌اند [۴۸، ۴۷]. ذرات اولیه‌ی Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> بر دندانهای روی سطح جوانه می‌زنند (شکل ۱۱- ز). این فاز از طریق متداول جوانه‌زنی و رشد، و طریق واکنش رابطه (۱) انجام می‌شود.



- AA6061 Aluminum And AZ31B Magnesium Alloy Joints", Materials and Design, Vol. 33, pp.31-34, 2012.
- [6] Özdemir, N. Aksoy, M. and Orhan, N., "Effect Of Graphite Shape In Vacuum-Free Diffusion Bonding Of Nodular Cast Iron With Grey Cast Iron", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 141, pp.228-233, 2003.
- [7] Wang, J. Li, Y. and Liu, P., "XRD And TEM Analysis On The Fe3Al/18-8 Stainless Steel Diffusion Bonded Interface", Materials Letters, Vol. 57, pp. 4323-4327, 2003.
- [8] Xie, G. Osashi, O. Wada, K. Ogawa, T. Song, M. and Furuya, K., "Interface Microstructure Of Aluminum Die-Casting Alloy Joints Bonded By Pulse Electric-Current Bonding Process". Material Science and Design, Vol. 428, pp. 12-17, 2006.
- [9] Çalik, A., "Interface Microstructure Of Diffusion Bonded Ni3Al Intermetallic Alloy And Austenitic Stainless Steel", Material Letters, Vol. 63, pp. 2462-2465, 2009.
- [10] Shang, J. Wang, K. Zhou, Q. Zhang, D. Huang, J. and Ge, J., "Effect Of Joining Temperature On Microstructure And Properties Of Diffusion Bonded Mg/Al Joints", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 22, pp. 1961-1966, 2012.
- [11] Kundu S. and Chatterjee S., "Interface Microstructure And Strength Properties Of Diffusion Bonded Joints Of Titanium-Al Interlayer-18Cr-8Ni Stainless Steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 527, pp. 2714-2719, 2010.
- [12] Timsit, R. S., "Intermetallics Growth At Al/A-Brass Interfaces", Acta Metallurgica, Vol. 33, pp. 97-104, 1985.
- [13] Liu, P. Shi, Q. Wang, W. Wang, X. and Zhang, Z., "Microstructure And XRD Analysis Of FSW Joints For Copper T2/Aluminum 5A06 Dissimilar Materials", Materials Letters, Vol. 62, pp. 4106-4108, 2008.
- [14] Lee, R. Liu, C. Chiou, Y. and Chen, H., "Effect Of Nickel Coating On The Shear Strength Of FSW Lap Joint Between Ni-Cu Alloy And Steel", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 213, pp. 69-74, 2013.
- [15] Esmaili, A. Zareie, H.R. Sharbati, M. Besharati, M.K. and Shamanian, M., "The Role Of Rotation Speed On Intermetallic Compounds Formation And Mechanical Behavior Of Friction Stir Welded Brass/Aluminum 1050 Couple", Intermetallics, Vol.19, pp. 1711-1719, 2011.
- [16] Xue, P. Ni, D.R. Wang, D. Xiao, B.L. and Ma. Z.Y., "Effect Of Friction Stir Welding Parameters On The Microstructure And Mechanical Properties Of The Dissimilar Al-Cu Joints", Materials Science and Engineering A, Vol. 528, pp.4683-4689, 2011.
- [17] Esmaili, A. Besharati Givi, M. K. and Zareie Ranjani, H. R., "A Metallurgical And Mechanical Study On Dissimilar Friction Stir Welding Of Aluminum 1050 To Brass (CuZn30)", Materials Science and Engineering A, Vol.528, pp. 7093-7102, 2011.
- [18] Venkateswaran, P. and Reynolds, A.P., "Factors Affecting The Properties Of Friction Stir Welds Between Aluminium And Magnesium Alloys," Materials Science and Engineering A, Vol. 545, pp. 26-37, 2012.
- [19] Zhang, Z. and Zhang, H. W., "Numerical Studies On The Effect Of Transverse Speed In Friction Stir Welding", Materials and Design Vol. 30, pp. 900-907, 2009.
- [20] Chen, H. Pinkerton, A. J. Li, L. Liu, Z. and Misty, A. T., "Gap-Free Fibre Laser Welding Of Zn-Coated Steel On Al Alloy For Light-Weight Automotive Applications", Materials and Design 32, pp. 495-504, 2011.
- [21] Padmanaban, G. and Balasubramanian, V., "Optimization Of Laser Beam Welding Process Parameters To Attain Maximum Tensile Strength In AZ31B Magnesium Alloy", Optics and Laser Technology, Vol. 42, pp. 1253-1260, 2010.
- [22] Qi X. and Song G., "Interfacial Structure Of The Joints Between Magnesium Alloy And Mild Steel With Nickel As Interlayer By Hybrid Laser-TIG Welding", Material and Design, Vol.509, pp. 605-609, 2010.
- [23] Wei, D. Song-bai, X. Ji-yuan, L. Yin-bin-L, and Shui-qing, W., "Torch Brazing 3003 Aluminium Alloy With Zn-Al Filler Metal", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, Vol. 22, pp. 30-35, 2012.
- [24] Peng, L. Yajiang, L. Juan, W. and Jishi, G., "Vacuum Brazing Technology And Microstructure Near The Interface Of Al/18-8 Stainless Steel", Materials research bulletin, Vol. 38, pp. 1393-1499, 2003.
- [25] Liming, L. Shengxi, W. and Limin, Z., "Study On The Dissimilar Magnesium Alloy And Copper Lap Joint By TIG Welding", Materials Science and Engineering A, Vol. 476, pp. 206-209, 2008.
- [26] Xu Z. Yan J. Zhang B. Kong X. and Yang S., "Behaviors Of Oxide Film At The Ultrasonic Aided Interaction Interface Of Zn-Al Alloy And Al2O3p/6061Al Composites In Air", Material Science and Engineering A, Vol. 415, pp. 80-86, 2006.
- [27] Durgutlu, A. Gülenç, B. and Findik, F., "Examination Of Copper/Stainless Steel Joints Formed By Explosive Welding", Materials and Design, Vol. 26, pp. 26-32, 2005.
- [28] Song, J.L. Liu, H. Lin, S.B. Yang, C.L. and Ma, C.G., "Spreading Behavior And Microstructure Characteristics Of Dissimilar Metals TIG Welding-Brazing Of Aluminum Alloy To Stainless Steel", Materials Science and Engineering A, Vol. 509, pp. 31-40, 2009.
- [29] Hajjari, E. Divandari, M. Razavi, S. H. Homma, T. and Kamado, S., "Intermetallic Compounds And Anti-Phase Domains In Al/Mg Compound Casting", Journal of Intermetallic, Vol. 23, pp.182-186, 2012.

در برخی نقاط آلومینیم با گرافیت تماس پیدا کرده و آن را در بر می‌گیرد (شکل ۱۲- ب و ۱۲- ج). با به دام افتادن در داخل مذاب و پس از پایان یافتن عملیات انجماد، این گرافیت‌ها در لایه فصل مشترک پدیدار می‌شوند (شکل ۱۲- د). گرافیت‌های قرار گرفته در فصل مشترک دو فلز، در تصویر میکروسکوپ نوری شکل ۴ قابل مشاهده هستند.



شکل ۱۲ طرحواره‌ای از به دام افتادن گرافیت در لایه بین فلزی. الف) ذوب سطحی مغزی در تماس با آلومینیم مذاب (ب) تماس مذاب و گرافیت و تلاش برای دربرگرفتن آن، ج) ادامه ذوب سطحی مغزه موجب افزایش سطح تماس بین مذاب و گرافیت می‌شود، د) انجماد آلومینیم و به دام افتادن گرافیت در لایه بین فلزی

آزمون ریزسختی‌سنجی بر لایه فصل مشترک اعمال گردید. نتایج حاکی از سختی ۸۳۴ ویکرز برای فاز  $Fe_2Al_5$  است که با توجه به مشخصات ترکیبات بین فلزی آهن و آلومینیم، این سختی مورد انتظار است [۴۳].

#### ۴- نتیجه‌گیری

کامپوزیت دوفلزی آلومینیم/چدن در دو دمای ۷۰۰ و ۷۵۰ درجه سلسیوس و نسبت‌های حجمی مذاب/جامد ۳، ۵ و ۸ به روش ریخته‌گری مرکب تولید و مورد بررسی قرار گرفت. اهم نتایج حاصل از این پژوهش به‌صورت زیر خلاصه می‌شود.

- ۱- افزایش نسبت حجمی مذاب/جامد از ۳ تا ۸ و دمای بارریزی از ۷۰۰ تا ۷۵۰°C، سبب انحلال سطحی مغزی از ۵ تا ۲۰ میکرومتر می‌گردد. همچنین پهنای منطقه تحت تاثیر مغزه از پایین به بالای نمونه تغییر می‌کند.
- ۲- فصل مشترک بدون عیوب قابل اعتنا بدست آمد و یک لایه بین فلزی  $Fe_2Al_5$  در فصل مشترک دو فلز با سختی ۸۳۰ ویکرز شناسایی شد.
- ۳- با افزایش دمای بارریزی و نسبت حجمی مذاب/جامد، ضخامت و یکنواختی لایه فصل مشترک افزایش می‌یابد.

#### ۵- مراجع

- [1] Uthayakumar, M. Prabhakaran, G. Aravindan, S. and Sivaprasad, J. V., "Precision Machining Of An Aluminum Alloy Piston Reinforced With A Cast Iron Insert", IJPEM, Vol. 10, pp. 7-12, 2009.
- [2] Manikanadan, G. Uthayakumar, M. and Aravindan, S., "Machining And Simulation Studies Of Bimetallic Pistons", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 66, pp. 711-720, 2013.
- [3] Lenny, J., "Replacing The Cast Iron Liners For Aluminum Engine Cylinder Blocks: A Comparative Assessment Of Potential Candidates", Msc Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, USA, 2013.
- [4] Mahendran, G. Balasubramanian, V. and Senthilvelan, T., "Influences Of Diffusion Bonding Process Parameters On Bond Characteristics Of Mg-Cu Dissimilar Joints", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 20, pp. 997-1005, 2010.
- [5] Fernandus, M. J. Senthilkumar, T. Balasubramanian, V. and Rajakumar, S., "Optimizing Diffusion Bonding Parameters To Maximize The Strength Of

- [30] Zare, G. r. Divandari, M. and Arabi, H., "Investigation On Interface Of Al/Cu Couples In Compound Casting", *Materials Science and Technology*, Vol. 29, pp. 190-196, 2013.
- [31] Papis, K. J. Loeffler, J. F. and Uggowitzer, P. J., "Light Metal Compound Casting", *Science in China Series E: Technological Sciences*, Vol. 59, pp. 46-51, 2009.
- [32] Papis, K. M. Halstedr, B. Loffler, J. F. and Uggowitzer, P. J., "Interface Formation In Aluminium-Aluminium Compound Casting", *Acta Materiala*, Vol. 56, pp. 3036-3043, 2008.
- [33] Papis, K.J.M. Löffler, J. F. and Uggowitzer, P.J., "Interface Formation Between Liquid And Solid Mg Alloys—An Approach To Continuously Metallurgic Joining Of Magnesium Parts", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, pp. 2274–2279, 2010.
- [34] Socerote-peronnet M. Guiot E. Bosselt F. Dezellus O. Roubly D. and Viala J. C., "Local Reinforcement Of Magnesium Base Castings With Mild Steel Inserts", *Material Science and Engineering A*, Vol. 445, pp.296–301, 2007.
- [35] Pstrus, J. Fima, P. and Gancarz, T., "Wetting of Cu and Al by Sn-Zn and Zn-Al Eutectic Alloys", *JMEPEG*, Vol. 21, pp. 606-613, 2012.
- [36] Akdemir A. Kuş R. and Şimşir M., "Investigation Of The Tensile Properties Of Continuous Steel Wire-Reinforced Gray Cast Iron", *Material Science and Engineering A*, Vol. 528, pp. 3897–3904, 2011.
- [37] Hajjari E. and Divandari M., "An Investigation On Microstructure And Tensile Properties Of Direct Squeeze Cast And Gravity Die Cast 2024 Wrought Al", *Material and Design*, Vol. 29, pp. 1685-1689, 2012.
- [38] Keşlioğlu, K. and Maraşlı, N., "Solid-Liquid Interfacial Energy Of The Eutectoid B Phase In The Al.Zn Eutectic System", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 369, pp. 294-301, 2004.
- [39] Baker, H., *ASM Handbook*, "Alloy Phase Diagram", 10th ed., Vol. 3, pp. 294-295, 1993.
- [40] Kuruveri U B, Huilgol P, and Joseph J., "Aluminising Of Mild Steel Plates", *ISRN Metallurgy*, pp. 1-6, 2013.
- [41] Shih, T. and Tu, sh., "Interaction Of Steel With Pure Al, Al-7Si And A356 Alloys", *Material science and engineering A*, Vol. 454, pp.349-356, 2007.
- [42] Akbarifar, M. and Divandari, M., "Effect Of Pouring Temperature And Melt/Solid Ratio On The Interface Of Al/Brass Bimetal Produced By Compound Casting", *In Persian, Foundrymen*, No. 102, 2013
- [43] Shahverdi, H.R, Ghomashchi, M.R, Shabestari, .S, and Hejazi, J., "Microstructural Analysis Of Interfacial Reaction Between Molten Aluminum And Solid Iron", *Journal of material processing technology*, Vol. 124, pp. 345-352, 2002.
- [44] Deqing W, Ziyuan Sh, Longjing Z., "A Liquid Aluminum Corrosion Resistance Surface In Steel Substrate", *Applied surface sciences*, Vol. 214, pp. 304-311, 2003.
- [45] Cheng, W. and Wang, Ch., "Growth Of Intermetallic Layer In The Aluminide Mild Steel During Hot-Dipping", *Surface and coatings technology*, Vol. 204, pp. 824-828, 2009.
- [46] Yin, F. Zhao, M. Liu, Y. Han, w. and Li, Z., "Effect Of Si On Growth Kinetics Of Intermetallic Compounds During Reaction Between Solid Iron And Molten Aluminum". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 23, pp. 556-561, 2013.
- [47] Yousaf, M. Iqbal, J. and Ajmal, M., "Variables Affecting Growth And Morphology Of The Intermetallic Layer (Fe2Al5)", *Materials Characterization*, Vol. 62, pp. 517-525, 2011.
- [48] Dutta, M. and Singh, S. B., "Effect Of Strip Temperature On The Formation Of A Fe2Al5 Inhibition Layer During Hot-Dip Galvanizing", *Scripta Materialia*, Vol. 60, pp. 643-646, 2009.

