فصلنامهٔ علمی- پژوهشی تحقیقات موتور

تارنمای فصلنامه: www.engineresearch.ir

ایجاد اتصال سرامیک- فلز موجود در موتورهای مقاوم به حرارت زیاد به وسیله لحیم‌کاری سخت

مقداد یوسف‌زاده[۱*]، محمود فاضل نجف‌آبادی[۲]

[۱] دانشکده مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد، نجف آباد، ایران، yousefzadeh_iaun@yahoo.com

[۲] دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، اصفهان، ایران، fazelnajafabadi@gmail.com

[*] نویسندهٔ مسئول، شمارهٔ تماس: ۰۹۳۰۵۳۵۴۱۴۱

چکیده

در این تحقیق به اتصال سرامیک- فلز پرداخته شد. نمونه های آلومینایی و مسی با نانو همبستهٔ لحیم Ag-Cu-Sn-Zr در دمای ۱۰۵۰ درجهٔ سانتیگراد و زمان نگهداری ۲۰ دقیقه درون کوره با اتمسفر هوا به هم متصل شدند. پس از بریدن عرضی نمونه و بررسی میکروسکوپی مشخص شد که نمونهٔ متصل شده به توسط همبستهٔ لحیم با عنصر فعال زیرکونیم کاملاً بی عیب بوده و ناحیهٔ اتصال پیوسته و بدون ترک است. عنصر فعال زیرکونیم با سطح سرامیک واکنش داد و روی سطح پوششی فلزی ایجاد کرد. در نتیجه اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین فلز و سرامیک کاهش یافت و تنش‌های حرارتی کم شد و ترکی ایجاد نگردید. استحکام برشی اتصال ۱۸,۳۷ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

دریافت: ۰۹ شهریور ۱۳۹۲

پذیرش: ۱۶ شهریور ۱۳۹۲

کلیدواژه‌ها:

لحیم‌کاری سخت

سرامیک

فلز

همبستهٔ پرکننده

زیرکونیم

۱) مقدمه

اتصال فلزات به سرامیک‌ها به طور وسیعی گسترش یافته است زیرا سرامیک‌های مهندسی خواصی مانند استحکام زیاد، سختی زیاد، مقاومت حرارتی زیاد و از این قبیل ویژگی‌ها را داراست و می‌توان از آنها در کنار فلزات استفاده کرد [۱]. از عمده کاربردهای اتصالات سرامیک- فلز می‌توان به صنایع الکترونیک، صنایع هسته‌ای ، صنایع هوافضا [۲]، صنایع خودروسازی [۳]، مبدل‌های حرارتی سرامیکی، پیل‌های سوختی [۴] و صنایع پزشکی [۵] اشاره کرد.

از مهمترین کاربردهای سرامیک‌ها می‌توان به نسل جدید موتور خودروها اشاره کرد. بدنه و اجزای موتور همچون سمبه‌ها و تاج سمبه که حرارت زیادی را متحمل می‌شوند، می‌توانند از سرامیک ساخته شوند. این کار امکان مقاومت بیشتر در برابر حرارت زیادتری را به اجزای موتور می‌بخشد. سرامیک‌ها در دمای زیاد هیچ تغییر شکل و تغییر ساختاری از خود نشان نمی‌دهند. اما رسانا نیستند و باید به همراه مکمل‌های فلزی بکار روند [۶].

یک روش مناسب برای اتصال سرامیک- فلز لحیم‌کاری است. دلیل این امر دمای ذوب بسیار زیاد سرامیک و در نتیجه عدم کارایی روش‌های ذوبی در جوشکاری است [۶].

اما اینگونه اتصالات به طور کلی مشکلاتی دارند. یکی از این مشکلات عدم ترشوندگی مناسب سطح سرامیک به توسط همبستهٔ لحیم است. مشکل دیگر، تفاوت در ضریب انبساط حرارتی و مدول یانگ فلزات و سرامیک‌ها است که باعث به وجود آمدن تنش‌های پسماند در ناحیه اتصال می‌گردد [۷]. همچنین یکی دیگر از مهمترین مشکلات این گونه اتصالات ایجاد ترک ناشی از تخلیهٔ برقی است، که از سمت فلز به سرامیک منتقل می‌شود و می‌تواند در ناحیهٔ اتصال تنش ایجاد کرده و منجر به تولید ترک در قسمت ترد اتصال، یعنی سرامیک شود [۸].

محققان زیادی برای رفع این مشکلات فعالیت کردند که به برخی از آنها اشاره می شود:

۱- استفاده از ترکیب همبستهٔ لحیم مناسب که در حین عملیات لحیم‌کاری قابلیت پوشش فلزی سرامیک را داشته باشد تا سرامیک مانند یک فلز عمل کند، به این منظور از تیتانیم در همبستهٔ لحیم استفاده می‌شود، حضور عنصر فعال تیتانیم اتصال سرامیک- فلز را ممکن می‌سازد، اما اتصالات استحکام زیادی ندارند [۹].

۲- استفاده از روش مولیبدن- منگنز[1] که در این روش از خمیری با ترکیب اصلی مولیبدن و منگنز جهت پوشش فلزی سطح سرامیک استفاده می‌شود [۱۰]. این روش، ترشوندگی سطح سرامیک را بهبود می‌بخشد، اما استحکام اتصال حاصل از این روش بسیار کم است.

۳- پوشش فلزی سطح سرامیک به وسیله فرایند پلاسمای پالسی با چگالی جریان زیاد [۱۱]. این روش زمانبر بوده و هزینه زیادی از نظر زمان و انرژی صرف این فرایند می‌شود.

۴- پوشش فلزی به روش غوطه‌وری در نمک فلزاتی مانند تیتانیم، در این روش سرامیک را در حمام نمک مذاب تیتانیم‌دار غرق می‌کنند. سپس سرامیک را در کوره قرار می‌دهند تا تیتانیم بر سطح سرامیک رسوب کرده و روی آن پوششی فلزی ایجاد کند [۱۲]. استحکام حاصل از این روش زیاد نیست.

۵- استفاده از روش کاشت یونی برای انجام عملیات لحیم‌کاری که در این روش نوع همبستهٔ لحیم تفاوت چندانی نخواهد داشت [۱۳]. این روش مهارت زیاد مجری را می‌طلبد، همچنین هزینهٔ این روش زیاد می‌باشد.

۶- لحیم‌کاری به توسط لیزر CO_2 که دارای سرعت زیادی بوده و استحکام و انعطاف‌پذیری اتصال مناسب است [۱۴]. عیب مهم در این روش، ایجاد حجم نسبی زیاد ترکیبات بین فلزی است که احتمال پیدایش ترک در این اتصال را افزایش می‌دهد.

در زمینهٔ اتصال سرامیک نوع آلومینایی به مس در ده سال اخیر تنها تعداد اندکی تحقیقات انجام گرفت. برای اولین بار در سال ۲۰۰۲ سگر و همکاران [۱۵]، با روش یوتکتیکی آلومینا را به مس متصل کردند. اما به دلیل ایجاد فاز آلومینات در ناحیه اتصال، ترک ایجاد شد.

در سال ۲۰۰۷، دو تحقیق در این زمینه انجام گرفت. چانگ و همکاران [۱۶]، با همبستهٔ Sn-Ag-Ti-Ce آلومینا را به مس متصل کردند و استحکام برشی معادل ۱۰,۲ مگاپاسکال به دست آوردند. همچنین قاسمی و همکاران [۱۰]، با روش مولیبدن- منگنز آلومینا را به مس متصل کردند و استحکام ۹,۵ مگاپاسکال، از طریق این اتصال به‌دست آمد. در نهایت در سال ۲۰۰۸ قاسمی و همکاران [۱۷]، اتصال آلومینا- مس را به روش یوتکتیکی بدون لایه انجام دادند. آنها ابتدا به وسیله اکسید مس یوتکتیکی، اتصال را ایجاد کردند. سپس در اتمسفر هیدروژن نمونه را سرد کردند. اکسید مس احیا شد و اتصالی بدون لایهٔ میانی رخ داد. اما ناحیهٔ اتصال به دلیل حضور اکسیژن حاصل از احیای اکسید مس، بسیار متخلخل بود و این یکی از عیوب مهم ناحیه اتصال است.

در این تحقیق برای اولین بار در دنیا از نانو همبستهٔ پایه نقره به همراه قلع و زیرکونیم و مس استفاده شد که در حالت مذاب روانشوندگی مناسبی دارد. به دلیل اینکه نقره بسیار گران بوده و استفاده از مقدار زیاد نقره به صرفه نیست، از نانومس در کنار نقره استفاده شد. همچنین مقدار کمی از گردهای نانو قلع و نانو زیرکونیم به همبسته[2] افزوده شد.

[1] Moly-Mn Method

[2] Alloy

زیرکونیم بسیار فعال است و قلع محرک فعالیت آن می‌باشد. وجود این عناصر قادر به ایجاد اتصال سرامیک- فلز بدون عیب و با استحکام مناسب است. با این روش و این همبسته در یک مرحله بدون نیاز به پوشش فلزی سطح سرامیک می‌توان اتصالی مطلوب ایجاد نمود.

برتری اتصال ایجاد شده در این تحقیق نسبت به روش‌های ذکر شده در قبل، همبستهٔ لحیم مصرفی می‌باشد. همبستهٔ لحیم مصرفی در این تحقیق دارای پایه سه‌تایی Ag-Cu-Sn است که زیرکونیم به این همبسته سه تایی افزوده شد. وجود مقدار زیاد نقره در همبستهٔ لحیم، باعث می‌شود که ترکیب همبسته در ناحیه تک‌فازی از نمودار سه تایی نقره- مس- قلع قرار گیرد. این ویژگی عالی، باعث می‌شود که عناصر همبستهٔ لحیم با یکدیگر تحت هیچ شرایطی ترکیبات بین فلزی تشکیل ندهند، به همین دلیل در ناحیه اتصال ترکیبات ترد تشکیل نمی‌شود [۱۸]. این ویژگی مهمترین برتری همبستهٔ مصرفی در این تحقیق نسبت به روش‌های مذکور است.

۲) مواد و روش تحقیق

مواد مورد استفاده در این تحقیق سرامیک آلومینایی با خلوص بیشتر از ۹۵٪، مس خالص و نانو فلز پرکنندهٔ پایه نقره با ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۱ است.

نمونه‌های سرامیکی و مسی با ابعاد یکسان (mm) ۵×۲۰×۲۰ تهیه شدند. نمونه سرامیکی جهت آماده سازی به مدت ۲۰ دقیقه در آب مقطر جوشانده شد، سپس با متیل الکل شستشو داده شد و در نهایت به مدت یک ساعت درون کوره معمولی با اتمسفر هوا و دمای ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده شدند. این کار به دلیل باز شدن منافذ سرامیک انجام گرفت، زیرا زبری سطح سرامیک باعث بهبود در ترشوندگی آن می‌شود. نمونه مسی با سمباده‌های SiC به ترتیب از سمبادهٔ شماره ۶۰ تا ۱۲۰۰ سمباده‌زنی و سپس پرداخت شد تا صاف و صیقلی گردد، زیرا صافی سطح فلز بر عکس مورد ذکر شده برای سرامیک، در این نوع اتصالات بسیار مفید است. قبل از آغاز عملیات لحیم‌کاری، مشخص نمودن دمایی که همبستهٔ لحیم در آن روان و سیال باشد، بسیار اهمیت دارد. به همین منظور آزمون ترشوندگی بر سطح سرامیک انجام گرفت. مقدار ۰٫۵ گرم از همبستهٔ لحیم گردی به وسیله روغن لحیم به شکل کره درآمد و در مرکز سطح سرامیک قرار گرفت.

مطابق جدول ۲، آزمون ترشوندگی در دماهای مختلف انجام شد. در این آزمون شاخص ترشوندگی بیانگر میزان ترشوندگی سطح سرامیک را مشخص می‌کند، که شاخص ترشوندگی عبارتند از نسبت سطح تر شده به توسط همبستهٔ لحیم به سطح کل نمونه [۱۹]. اگر این مقدار به ۶۰٪ برسد ترشوندگی مطلوب بوده و اتصال مناسب رخ می‌دهد.

بعد از به دست آوردن دمای مطلوب، نمونه با همبستهٔ لحیم جدول ۱ و در شرایط ذکر شده در جدول ۳ مورد لحیم‌کاری قرار گرفت و بعد از اتصال بصورت عرضی برش زده شد، سپس برای بررسی ریزساختار[1]، سمباده زنی و پرداخت با خمیر الماسه روی آن انجام گرفت. در نهایت برای بررسی ناحیه اتصال به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی، مطابق شکل ۱ مقطع برش یافته با طلا پوشش داده شد، تا قسمت سرامیکی رسانا شود و الکترون بتواند بر سطح سرامیک برخورد کند.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فلزات پر کننده (درصد وزنی)

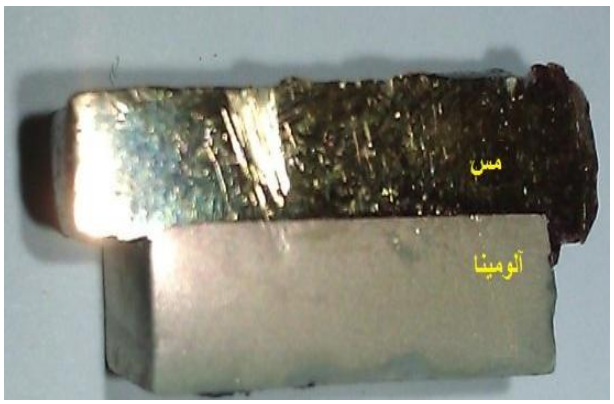
عناصر	Ag	Cu	Sn	Zr
همبستهٔ لحیم	٪۷۰	٪۲۰	٪۵	٪۵

جدول ۲: نتایج آزمون ترشوندگی

شمارهٔ نمونه آلومینایی	دما (°C)	ترشوندگی (٪)	وضعیت ترشوندگی
۱	۸۵۰	۰	عدم تر شدن
۲	۹۰۰	۰	عدم تر شدن
۳	۹۵۰	۲۰	کم
۴	۱۰۰۰	۴۰	متوسط
۵	۱۰۵۰	۷۰	عالی

جدول ۳: دستورالعمل لحیم‌کاری آلومینا به مس

طرح اتصال	تخت روی هم
مواد پایه	آلومینا و مس
دمای لحیم‌کاری	۱۰۵۰ درجه سانتیگراد
زمان لحیم‌کاری	۲۰ دقیقه
اتمسفر لحیم‌کاری	هوا
نرخ گرم شدن	۱۰ درجه سانتیگراد بر دقیقه



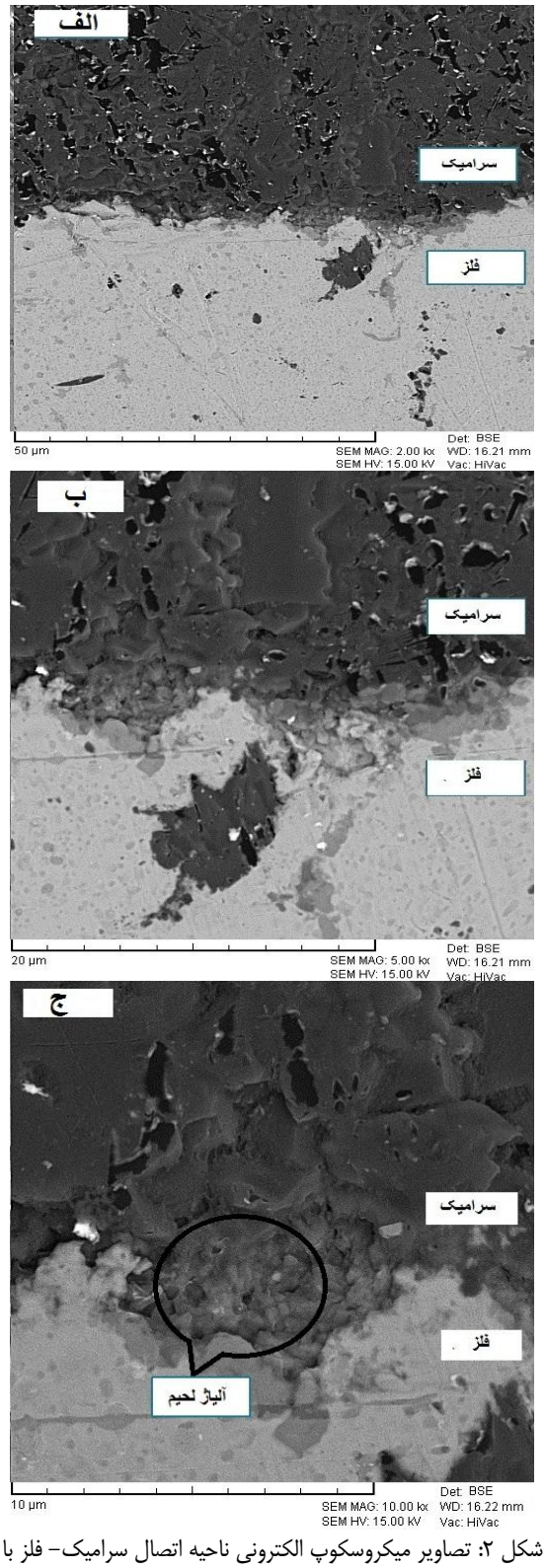
شکل ۱: اتصال آلومینا- مس

[1] Metallography

۳) بحث بر روی نتایج

۳-۱) بررسی تصاویر میکروسکوپی

مقطع اتصال نمونه به توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی بررسی شد. تصاویر در شکل ۲ آمده است.



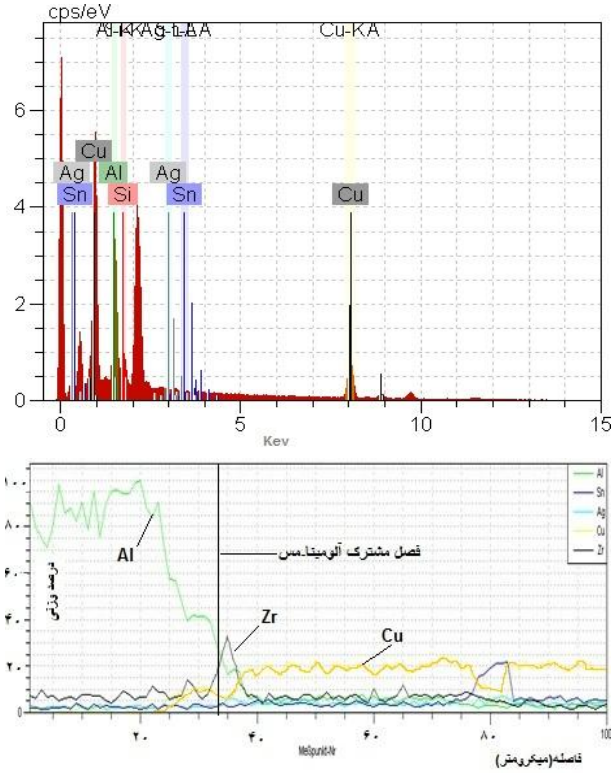
شکل ۲: تصاویر میکروسکوپ الکترونی ناحیه اتصال سرامیک- فلز با بزرگنمایی‌های الف: ۵۰ میکرومتر، ب:۲۰ میکرومتر، ج: ۱۰ میکرومتر

با توجه به شکل ۲، ناحیه اتصالی بدون عیب و ترک قابل رؤیت است. تفاوت نانو همبستهٔ ساخته شده با همبسته‌های لحیم معمول وجود عنصر فعال زیرکونیم است. زیرکونیم بسیار فعال است و در دمای اتصال بسرعت به سمت سرامیک حرکت می‌کند و با سطح آن واکنش می‌دهد. با این واکنش سطح سرامیک مانند یک فلز می‌شود. به این ترتیب تفاوت زیاد ضریب انبساط حرارتی اجزای اتصال کاهش می‌یابد. درنتیجه تمرکز تنش به حداقل رسیده و ترکی در ناحیه اتصال رویت نمی‌شود. این اثر عنصر فعال زیرکونیم در لحیم‌کاری، با تحقیقات محققین در گذشته، در مورد عناصر فعال مطابقت دارد [۱۶]. برای اطمینان از اتفاق افتادن این فرایند، آزمون تحلیل عنصری از عمق سرامیک تا فلز انجام شد که در ادامه آمده است.

۳-۲) بررسی تحلیل عنصری

نتایج حاصل از تحلیل عنصری در شکل ۳ آمده است. مطابق شکل ۳، قلهٔ عناصر بیان کننده همبستهٔ لحیم است. درصد وزنی عناصر نشان می‌دهد که زیرکونیم عنصری است که در فصل مشترک آلومینا- مس به میزان بیشتری حضور دارد.

در واقع فعالیت زیاد زیرکونیم باعث شده است که این عنصر به سرعت به سمت آلومینا حرکت کرده است. قسمتی از زیرکونیم حتی تا عمقی از آلومینا نفوذ کرده است. همین امر باعث تبدیل کردن سطح سرامیک به سطحی فلزی شده است. این امر از اثرات عنصر فعال است و با تحقیق محققان در مورد تیتانیم مطابقت دارد [۹].

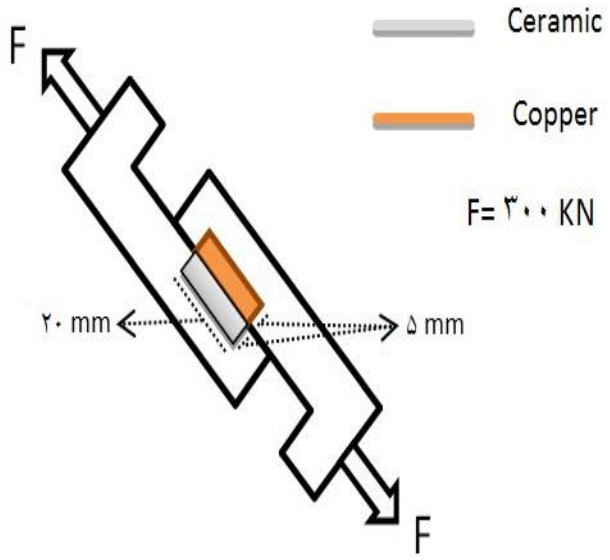


شکل ۳: تحلیل عنصری اتصال آلومینا- مس

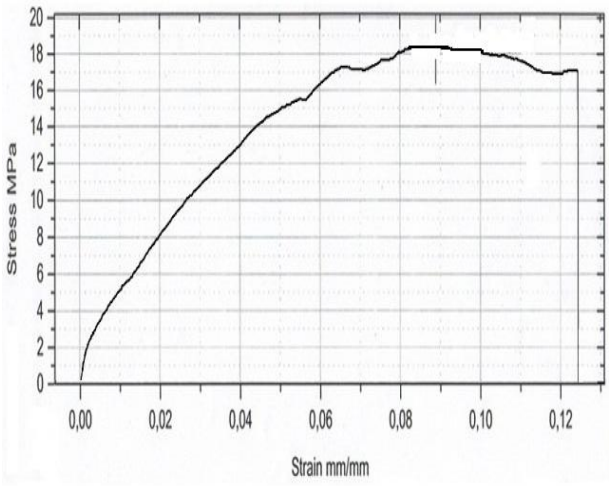
۳-۳) بررسی آزمون استحکام برشی اتصال آلومینا- مس

نمونه در آزمون کششی- برشی، آزمایش شد. چون نمونه از نظر هندسی مربعی و کوچک بود، برای آزمایش کششی مطابق استاندارد ASTM-D2295-72 نگهدارنده‌ای با فولاد CK45 ساخته شد که در شکل ۴ به صورت نمادین آمده است و به وسیله آن آزمون کششی- برشی انجام شد. نمودار کششی در شکل ۵ آورده شده است.

با توجه به نمودار، استحکام برشی ۱۸,۳۷ مگاپاسکال اندازه‌گیری شد که در مقایسه با بهترین نتیجه به دست آمده در تحقیقات پیشین [۱۰]، استحکامی دو برابر به دست آمده است. نتایج نشان داد که استفاده از همبستهٔ لحیم با ترکیب شیمیایی مناسب در لحیم‌کاری، اتصالی بی‌عیب و با استحکام مناسب پدید آورده است.



شکل ۴: تصویر نمادین از نگهدارنده ساخته شده و چگونگی قرارگیری نمونه در آن برای آزمون کششی- برشی



شکل ۵: نمودار کششی- برشی اتصال آلومینا- مس

٤) نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تحقیق عبارتند از:

۱- با استفاده از همبستهٔ لحیمی که حاوی عنصری بسیار فعال است می‌توان لحیم‌کاری را در یک مرحله انجام داد و نیازی به عمل لایه گذاری فلزی سرامیک قبل از لحیم‌کاری نیست.

۲- با اعمال همبستهٔ لحیمی مناسب، با ترکیب فعال و بهینه می‌توان در وقت و مصرف انرژی که صرف عملیات دو مرحله‌ای می‌شود صرفه‌جویی کرد.

۳- با طراحی و ساخت قطعات موتور از جنس اتصالات ذکر شده در تحقیق می‌توان بازده بهتری را از موتور به دست آورد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از مسئول آزمایشگاه‌های دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد اعلام می‌دارند.

References

[1] K. Suganuma, Y. Miyamoto, M. Koizumi, Joining of ceramics and metals, Materials Science, pp. 47-73, 1988

[2] M.M. Schwartz, Ceramic joining, ASM International, pp. 20-98, 1990

[3] R.M. Do Nascimento, A.E. Martinelli, A.J.A. Buschineli, Review article: Recent advances in metal-ceramic brazing, Ceramica, pp. 178-198, 2003

[4] I.E. Rejmanis, Ceramic joining, The American Society, pp. 10-17, 1988

[5] C.A. Lewinsohn, M. Singh, R. Loehman, Advances in joining of ceramics, American Ceramic Society, pp. 77-90, 2003

[6] K. Saganuma, Joining non-oxide ceramics, American Ceramic Society, pp. 523-531, 1998

[7] R.W. Messler, Joining of materials and structures, USA, pp. 349-440, 2004

[8] M.L. Hattalia, N. Mesratib, D. Treheux, Electric charge trapping, residual stresses and properties of ceramics after metal/ceramic bonding, Journal of the European Ceramic Society, pp. 717-725, 2012

[9] D. Palit, A.M. Meier, Reaction kinetics and mechanical properties in the reactive brazing of copper to alumina nitride, Journal of Materials Science, pp. 7197-7209, 2006

[10] H. Ghasemi, M.A. Faghihi Sani, Z. Riazi, An influence of phase development on mechanical strength of alumina-copper joint prepared by moly-Mn method, Iranian Journal of Materials Science and Engineering, Vol. 4, pp. 14-21, 2007

[11] C. Rong, J. Zhang, C. Liu, S. Yang, Surface metallization of alumina ceramics by pulsed high energy density plasma process, Applied Surface Science, pp. 104-110, 2002

[12] P. Wei, J. Li, J. Chen, Titanium metallization of Si_3N_4 ceramics by molten salt reaction: Coating microstructure and brazing property, Thin Solid Films, pp. 126-129, 2002
[13] H. Xia, A. Wu, Y. Fan, G. Zou, J. Ren, Effect of ion implantation on the brazing properties of high purity alumina, Surface and Coating Technology, pp. 2098-2104, 2012
[14] M. Rohde, I. Sudmeyer, A. Urbanek, M. Torge, Joining of alumina and steel by laser supported brazing process, Ceramics International, pp. 333-337, 2009
[15] C.W. Seager, K. Kokini, K. Trumble, M.J.M. Krane, The influence of $CuAlO_2$ on the strength of eutectically bonded Cu/Al_2O_3 interfaces, Scripta Materialia, pp. 395-400, 2002
[16] S.Y. Chang, T.H. Chuang, C.L. Yang, Low temperature bonding of alumina/alumina and alumina/copper in air using 3Sn-5Ag-4Ti (Ce, Ga) filler, Journal of Electronic Materials, Vol. 36, pp. 1193-1198, 2007
[17] H. Ghasemi, A.H. Kokabi, M.A. Faghihi Sani, Z. Riazi, Alumina-copper eutectic bond strength: Contribution of peroxidation, cuprous oxides particles and pores, Materials Forum, Vol. 32, pp. 90-97, 2008
[18] S. Marjanovic, D. Mansijevic, D. Zivkovic, D. Guskovic, D. Minic, Calculation of thermodynamic properties for ternary Ag-Cu-Sn system, RMZ-Materials and Geoenvironment, Vol. 56, No. 1, pp. 30-37, 2009
[19] H.R. Maddah Hosseini, M. Mazar Atabaki, A. Tahaei, Brazing and soldering, Jahan Jam-e-Jam Publications, Tehran, Iran, 2004

The Journal of Engine Research

Journal Homepage: www.engineresearch.ir

Creation of ceramic-metal joint in new generation of high heat resistant engines by brazing

M. Yousefzadeh[1*], M. Fazel Najafabadi[2]

[1]*Materials Department, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad, Iran, yousefzadeh_iaun@yahoo.com*
[2]*Technical and Engineering Department, Payam Nour University, Isfahan, Iran, fazelnajafabadi@gmail.com*
[*]*Corresponding Author, Phone Number: +98-930-5354141*

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 31 August 2013
Accepted: 07 September 2013

Keywords:
Brazing
Ceramic
Metal
Filler alloy
Zirconium

ABSTRACT

This study discusses about the ceramic-metal joint. Alumina and copper samples with the Ag-Cu-Sn-Zr nano filler at 1050°C of the temperature and 20 minutes of the holding time had been jointed in the furnace. The cross-cutting and the microscopic examination of the sample showed that the sample was joined by the filler with the active zirconium. It was absolutely spotless and the joint region was continuous. The active zirconium reacted with the surface of the ceramic and helped it being metalized. Thus, the difference of the coefficient expansion between the metal and the ceramic and also thermal stresses reduced, and there was no crack. The shear strength of the joint was measured as 18.37 (MPa).

© Iranian Society of Engine (ISE), all rights reserved.