



بررسی ریزساختار و سختی در تعمیر به روش OAW قالب های مسی DHP

حمیدرضا علینقیان^{1*}، سید علی صدوق ونینی¹، سید محمود منیر واقفی²

1- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

2- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: 1398/09/17؛ پذیرش مقاله: 1399/03/19)

چکیده

قالب های ریخته گری مداوم فولاد در تعداد ذوب های بالا ممکن است در سطح قالب تحت سایش و تخریب قرار گیرند، لذا ضرورت راهکاری جهت بهبود عمر چنین قالب هایی مطرح می باشد. در مقاله حاضر هدف ترمیم نمونه مسی DHP (جنس قالب فرایند ریخته گری مداوم) می باشد. در این مقاله تخریب نمونه های مسی توسط ایجاد شیار به کمک دستگاه CNC و عمل ترمیم آن با استفاده از جوشکاری اکسی استیلن و پرکننده جهت پرکردن ناحیه شیار انجام شد. در این مطالعه تاثیر دمای پیشگرم، نوع پرکننده، عملیات حرارتی ناحیه جوش بر سختی، ریزساختار، آنالیز شیمیایی ناحیه جوش و هدایت حرارتی منطقه جوش بررسی و ارزیابی شد. محدوده دمای پیشگرم بین 300 تا 450 درجه سانتی گراد انتخاب شد. از پرکننده های Cu-P و Cu-Ag-P برای پرکردن شکاف ناحیه جوش استفاده شد. در تحقیق حاضر جهت سنجش نتایج از میکروسکوپ الکترونی روبشی، طیف سنجی انرژی پرتوایکس، میکروسختی، میکروسکوپ نوری و هدایت سنج حرارتی استفاده شد. نتایج نشان داد افزایش دمای پیشگرم منجر به تشکیل لایه های اکسیدی و کاهش دمای پیشگرم با پرشوندگی ناقص ناحیه جوش همراه است که نهایتاً دمای پیشگرم 400 درجه سانتی گراد با توجه به دو ویژگی ذکر شده در بالا انتخاب مناسبی است. عملیات تنش زدایی با هدف کاهش تنش ها و حفظ خواص مکانیکی در محدوده دمایی 250 تا 400 درجه سانتی گراد و در زمان 2 ساعت اجرا شد. نتایج نشان داد محدوده دمایی انتخاب شده دمایی هیچ گونه کاهش نامطلوبی در سختی وجود نداشته است. همچنین، مشخص شد با افزایش مدت زمان آنیل، سختی جوش برای پرکننده مس - فسفر کاهش و برای پرکننده مس - نقره - فسفر ابتدا کاهش و سپس افزایش می یابد. ارزیابی به کارگیری پرکننده Cu-P در مقایسه با Cu-Ag-P نشان دهنده ایجاد سختی نسبتاً پایین تر (نزدیک به کمتر از ده درصد) در پرکننده حاوی نقره نسبت به پرکننده حاوی فسفر بود. در مقابل هدایت حرارتی پرکننده حاوی نقره نزدیک به حدود ده درصد بیش از پرکننده حاوی فسفر بوده است. بدیهی است که انتخاب نوع پرکننده بستگی به نوع پایه و هندسه آن دارد. بررسی ها نشان داد که در حضور 7/2 درصد فسفر در پرکننده مس - فسفر به دلیل نزدیک بودن ساختار جوش به نقطه یوتکتیک جدایش به صورت بسیار جزئی صورت گرفت. این در حالیست که انتخاب پرکننده مس - نقره - فسفر با داشتن 6 درصد نقره در آن باعث ایجاد جدایش شدید نقره تا مرز 90 درصد نقره در مرکز جوش در ناحیه غیردندریتی شد.

کلمات کلیدی: مس DHP، تعمیر و ترمیم، پرکننده جوش، ریزسختی، ریزساختار، آنیل.

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: alinaghian133@aut.ac.ir

Evaluation of microstructure and hardness in repair with OAW method in copper DHP moulds

H. R. Alinaghian^{1*}, S. A. Sadough Vanini¹, S. M. Monir Vaghefi²

1- Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

(Received 8 December 2019 ; Accepted 9 June 2020)

Abstract

The surface of continuous casting moulds with high number of castings may be worn or destructed. As result, an approach for increasing these moulds life is necessary. In this project, the goal is the restoration of the DHP copper sample. In this project, the destruction of the copper sample is done by creation of groove using a CNC machine. The restoration of the sample is done using OAW and filler to fill groove area. In this project, the effect of preheating temperature, filler type and heat treatment of welding area on hardness, microstructure, chemical analyses of welding area and thermal conductivity of the weld are investigated. The preheating temperature range of 300 to 450°C was selected. The Cu-P and Cu-Ag-P fillers were chosen to fill the groove of the weld area. The scanning electron microscope (SEM), energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS), micro hardness tester, optical microscope and thermal conductivity meter were employed for evaluation of the results in this project. The results showed that the increase of preheating temperature creates oxide layers and the decrease of preheating temperature causes the incomplete filling of the welding area. Finally, the preheating temperature of 400 °C was a proper choice considering the above mentioned factors. The stress relieving operation to decrease stress and preserve the mechanical properties in the temperature of 250 to 400 °C and duration two hours was carried out. The result demonstrated that the selected temperature causes no unwanted decrease on the hardness. It was also found that increasing the annealing duration, decreases the hardness of weld for Cu-P filler for Cu-Ag-P filler increasing the annealing duration, first decreases the weld hardness and then increases the weld hardness. The Cu-P filler was compared with Cu-Ag-P filler. The results showed that the Cu-Ag-P filler has less hardness (around 10 percent) than the filler without silver. On the other hand, the thermal conductivity of the Cu-Ag-P filler was around 10 percent more than the thermal conductivity of the Cu-P. It is obvious that the selection of the filler type depends on the type of base metal and its geometry. The results showed that the segregation in the Cu-P filler with 7.2 percent phosphorous, because of the proximity of the weld structure to the eutectic point, has slightly happened; while, the selection of the Cu-Ag-P filler with 6 percent silver caused severe segregation of silver to 90 percent silver at the center of weld at the non-dendrite area.

Keywords: DHP copper, Repair of failing, Welding filler, Micro-hardness, Microstructure, Annealing

1- مقدمه

متداول در حال حاضر Cu-P و Cu-Ag-P است که به نظر می‌رسد با ساختار و جنس قالب‌های مسی همچون DHP و CuAg_{0.8}P به لحاظ طبیعت هدایت حرارتی و نزدیک ترکیب شیمیایی رقابت‌پذیر می‌باشد. در حال حاضر گرچه جوشکاری بدنه‌های مسی به روش‌های مختلف امکان‌پذیر است ولی با توجه به بالابودن ضخامت و ابعاد قالب‌های مسی ریخته‌گری مداوم و انتقال حرارت شدید آن در طول عملیات جوشکاری و محدودیت تنوع روش‌های موجود و معرفی‌شده در جوشکاری، روش جوشکاری با گاز اکسی-استیلن و به کارگیری الکتروود از جمله Cu-P و Cu-Ag-P با دمای ذوب پایین و با طبیعت خوب جاری شدن آن‌ها در حین جوشکاری گزینه‌های نسبتاً احتمالی

قالب‌های ایستگاه‌های ریخته‌گری مداوم فولادریزی در کارخانه‌های فولادسازی از جنس مس با مارک DHP و CuAg_{0.8}P می‌باشد [1]. هنگام استفاده از این قالب‌ها، قالب ممکن است تحت سایش و آسیب قرار گیرد از جمله آسیب‌های متداول ایجاد ترک و شیار روی سطح قالب پس از تعداد ذوب‌های بالا است [2]. به منظور افزایش عمر قالب تمهیداتی بایستی به عمل آید تا پس از بازکردن قالب بعد از به کارگیری در تعداد ذوب نسبتاً بالا مجدداً سطح قالب ترمیم شود. یکی از روش‌های ترمیم بلاخص در مورد حذف شیار، جوشکاری با الکتروود مسی می‌باشد که جنس الکتروودهای

همچنین، در انتخاب دمای پیشگرم محدودیت‌هایی مانند ترک گرم و فوق داغی وجود دارد [14 و 15]. به دلیل وجود تنش‌های پسماند و اثرات مخرب آن بر جوش و ساختار بی‌نظم جوش نیاز به عملیات پسگرم بعد از جوشکاری می‌باشد [16]. در جوشکاری به روش گاز انتخاب نسبت گاز به اکسیژن به دلیل کنترل دمای فرایند حائز اهمیت هست و متناسب با فلز پایه و نوع عملیات مختلف است.

2- مواد و روش انجام آزمایش

در پژوهش حاضر ابتدا روی نمونه‌های مسی (به عنوان نماینده قالب‌های مسی ریخته‌گری) شیار طبق ابعاد مورد نظر به وسیله دستگاه فرز CNC اجرا (به عنوان عیب شیار روی قالب) شد. ابعاد شیار $20 \times 2 \times 2$ mm انتخاب شد. سپس محل شیار با عملیات جوش با پرکننده $\text{Cu}_{92.8}\text{P}_{7.2}$ و $\text{Cu}_{88}\text{Ag}_6\text{P}_6$ تحت شرایط مختلف پر شد. در تحقیق حاضر چهار حالت مختلف نسبت گاز به اکسیژن شامل نسبت سه گاز به دو اکسیژن، نسبت دو گاز به یک اکسیژن، نسبت یک گاز به یک اکسیژن و نسبت دو گاز به سه اکسیژن در جوشکاری استفاده شد که مورد اول باتوجه به شکل جوش و نوع شعله حاصل شده، به عنوان حالت مبنا انتخاب شد. همچنین، به دلیل این که قالب‌ها مسی هستند و ترکیب پرکننده باید نزدیک به مس باشد، از دو پرکننده پایه مسی استفاده شد. جدول (1) خصوصیات پرکننده‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

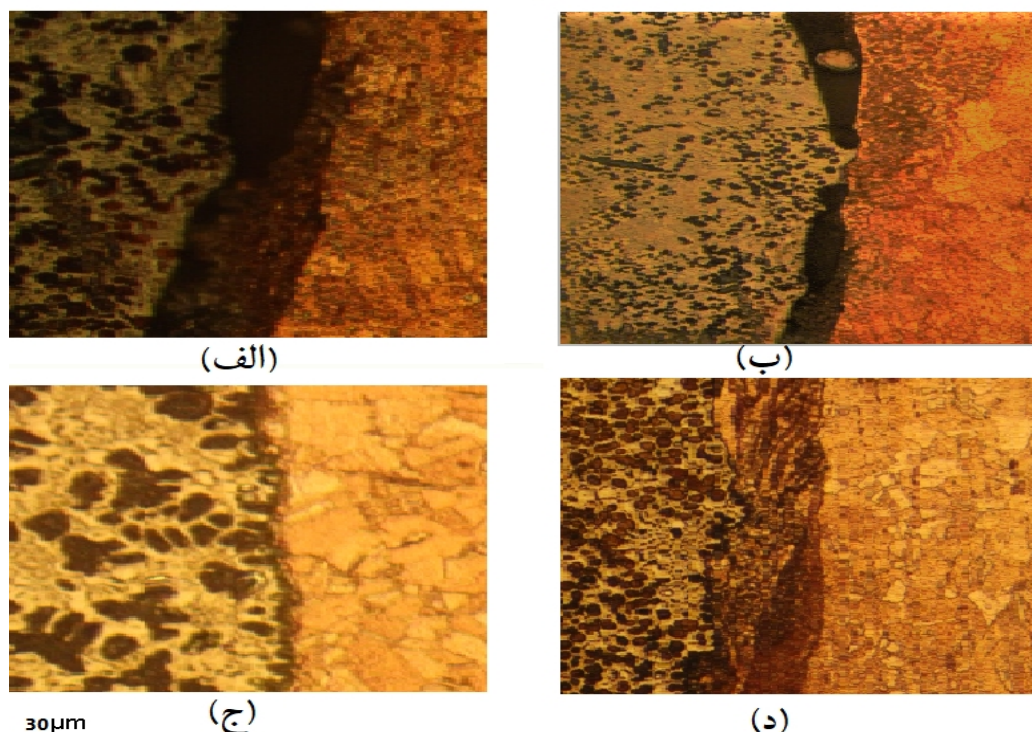
جدول 1- مشخصات پرکننده‌های مورد استفاده

نام	پایان نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)	شروع نقطه ذوب (درجه سانتی‌گراد)	ترکیبات
Silvaloy6	807/2	643	$\text{Cu}_{88}\text{Ag}_6\text{P}_6$
BCuP-2	793	710	$\text{Cu}_{92.8}\text{P}_{7.2}$

عملیات پس‌گرم کردن شامل تنش‌زدایی و آنیل نمونه‌های مسی است که هر کدام لازم است باتوجه به محدوده دمایی در نظر گرفته شده، در دمایی خاص برای مدت زمانی محدود نگهداری

برای ترمیم شیار و پرکردن آن در قالب‌های مسی ریخته‌گری مداوم فولاد است [3]. استفاده از فسفر در پرکننده سبب ایجاد خاصیت دی اکسیدی و سیالیت جوش در حالت مذاب می‌شود، ولی مقدار زیاد آن سبب تردی جوش می‌شود [4 و 5]. همچنین، عنصر نقره سبب افزایش خاصیت داکتیلیته جوش می‌شود و بهتر است به پرکننده‌های فسفردار نقره اضافه شود [6]. از اهداف پژوهش حاضر می‌توان به مطالعه و بررسی راهکارهای تعمیر قالب‌های مسی اشاره کرد که در راستای بررسی متالورژیکی و مکانیکی جوش است. روند کار بدین صورت است که با استفاده از دستگاه فرز اقدام به ایجاد شیار بر روی سطح قطعه مسی می‌شود و سپس راهکاری برای ترمیم و احیای ناحیه آسیب دیده معرفی می‌شود. درواقع به تخریب و سپس ترمیم نمونه مورد آزمایش، به عنوان نماینده‌ای از قالب مورد استفاده در فرایند ریخته‌گری مداوم، اقدام می‌شود. به نظر می‌رسد که به دلیل مشکلات جوشکاری مس با روش قوسی و امکان‌پذیری انتقال شعله به داخل قالب با توجه به هندسه قالب و تعمیرات بودن، روش اکسی‌استلین برتری شود [7]. در تحقیقات برای ترمیم پنل‌های مسی ماشین‌های ریخته‌گری مداوم از روش لحیم‌کاری تحت خلاء استفاده شده است [8]. در این روش دستیابی به یک فصل مشترک بدون عیب و تخلخل در عملیات تعمیر امکان‌پذیر بوده است [8]. جنس فصل مشترک آلیاژ مس حاوی بریلیم بوده است [8]. همچنین، با استفاده از این روش می‌توان یک لایه نازک از یک آلیاژ حاوی نیکل را روی صفحات مسی قالب‌های ریخته‌گری مداوم در مرحله تعمیر لحیم‌کاری کرد [9]. در تحقیق دیگر از روش جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی برای تعمیر قالب‌های مسی و با قراردادن یک لایه مسی روی ناحیه آسیب‌دیده عملیات ترمیم صورت می‌گیرد [10].

از اهداف مقاله حاضر می‌توان به بررسی اثر پارامترهای فرایند جوشکاری مس DHP ذکر کرد. امروزه مس را می‌توان بدون پیشگرم در روش‌های غیرقوسی جوش داد [11-13]. این در حالیست که در جوشکاری مس با گاز نیاز به پیشگرم هست.



شکل 1- ساختار ناحیه جوش مس DHP با پرکننده در دماهای مختلف پیشگرم: (الف) 300 درجه سانتی گراد، (ب) 350 درجه سانتی گراد، (ج) 400 درجه سانتی گراد، (د) 400 درجه سانتی گراد.

دمای پیشگرم از 300 به 400 درجه سانتی گراد بهبود چسبندگی پرکننده با فلز پایه ایجاد می شود (مقایسه شکل (1-ج) با شکل های (1-الف) و (1-ج)). ضمن این که افزایش دمای پیشگرم بیش از 400 درجه سانتی گراد خطر تشکیل لایه اکسیدی که منجر به عدم چسبندگی پرکننده با فلز پایه می شود، را به همراه دارد (مقایسه شکل (1-د) با (1-ج)).

3-2- تاثیر جنس پرکننده بر میکروسختی ناحیه جوش

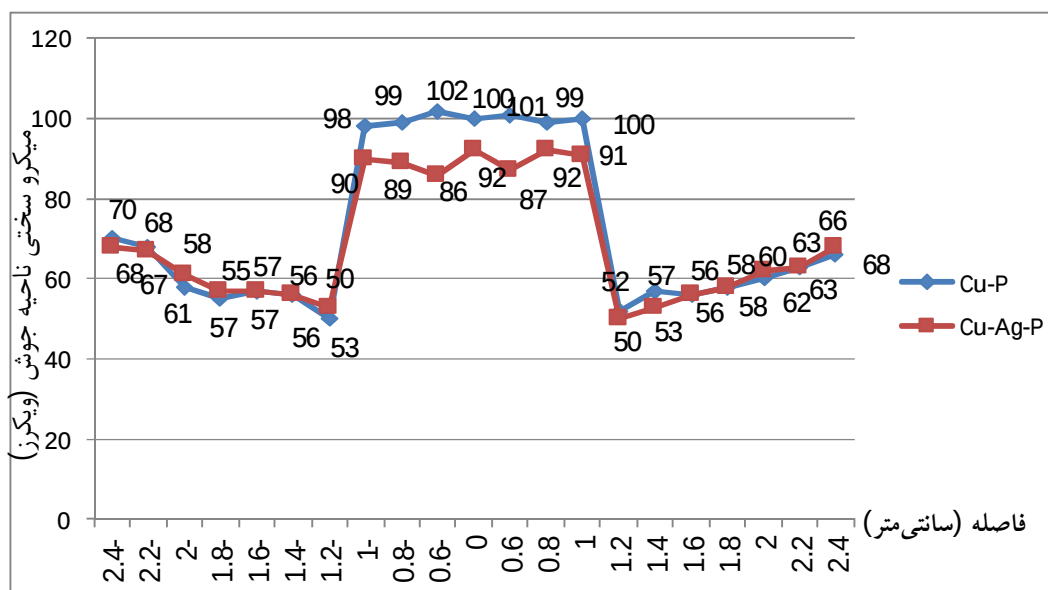
در پژوهش حاضر از دو جنس پرکننده مس - نقره - فسفر و مس - فسفر در جوشکاری اکسی استیلن جهت پرکردن ناحیه شیار استفاده شد. شکل (2) تغییرات سختی در مقطع جوش بر حسب نوع پرکننده مورد استفاده را نشان می دهد. در مورد پرکننده های Cu-P که دارای حدود 7 درصد P است، پس از اعمال جوش بخشی از فسفر پرکننده با اکسیژن شعله و محیط ترکیب و به صورت P_2O_5 خارج می شود، به طوری که P در ناحیه جوش کاهش می یابد. با این حال ترکیب ناحیه جوش شامل حداقل محلول جامد بین نشین P در ساختار مکعبی وجوه مرکزدار (FCC) مس است.

شوند. تنش زدایی نمونه مسی تحت دماهای 250، 300، 350 و 400 درجه سانتی گراد در مدت زمان نگهداری دو ساعت انجام شد. همچنین آنیل نمونه ها تحت مدت زمان های نگهداری 20، 30، 40 و 50 دقیقه در دمای 600 درجه سانتی گراد انجام شد. سختی بعد از اجرای هر فرایند به وسیله دستگاه تست ریزسختی سنج انجام گرفت. همچنین، هدایت حرارتی نمونه ها به روش استاندارد ASTM C177 صورت گرفت. از میکروسکوپ الکترونی روبشی برای تهیه تصاویر و از بررسی ترکیب شیمیایی نمونه ها استفاده شد. از میکروسکوپ نوری LEITZ برای برخی مطالعات بهره گرفته شد.

3- نتایج و بحث

3-1- تاثیر دمای پیشگرم بر روی منطقه جوش

همانطور که قبلاً ذکر شد یکی از فاکتورهای مهم جوشکاری قطعات مسی فاکتور پیشگرم است. از این رو چهار دمای پیشگرم 300، 350، 400 و 450 درجه سانتی گراد جهت مطالعه انتخاب شد. شکل (1) تاثیر دمای پیشگرم را بر فصل مشترک پرکننده با پایه نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش



شکل 2- پروفیل سختی برای ناحیه جوش برای دو پرکننده مس - فسفر و مس - نقره - فسفر

جوش مطلوب نخواهد بود. در اینجا هم اکسیژن اضافی و هم بالابودن ضخامت مس DHP قدرت سردکنندگی بالا دارد و در نتیجه جوش با عدم چسبندگی و انجماد زودرس قبل از پیوستگی کامل با پایه DHP همراه است. هنگامی که نسبت گاز به اکسیژن به $1/5$ برسد فرایند سوخت به طور کامل انجام می شود و دمای مذاب بالا می رود و در نتیجه پیوستگی موفقیت آمیز مذاب پرکننده جوش با فلز پایه DHP تأمین می شود. هنگامی که نسبت گاز به اکسیژن به 2 برسد حجم گاز از مقدار لازم برای سوخت کامل بیش از حد لازم است و گاز اضافی نقش سردکنندگی خواهد داشت و توأم با طبیعت سردکنندگی پایه DHP به علت بالابودن ضخامت (2 سانتی متر) اجرای جوش را با عدم موفقیت مواجه می کند. شکل (3) مقدار ریزسختی بر حسب نسبت های مختلف گاز به اکسیژن را برای جوش نشان می دهد. با توجه به شکل به دلیل دمای بالاتر مشعل در نسبت گاز به اکسیژن (2-3) و تبخیر شدن بیشتر فسفر و کاهش فاز ترد Cu_3P در جوش سختی کاهش می یابد.

3-4- اثر تنش زدایی بر میکروسختی ناحیه جوش

عملیات تنش زدایی با هدف کاهش تنش ها و حفظ خواص مکانیکی در محدوده دمایی 250 تا 400 درجه سانتیگراد و در زمان 2 ساعت اجرا شد. شکل (4) تاثیر ناچیز تنش زدایی بر

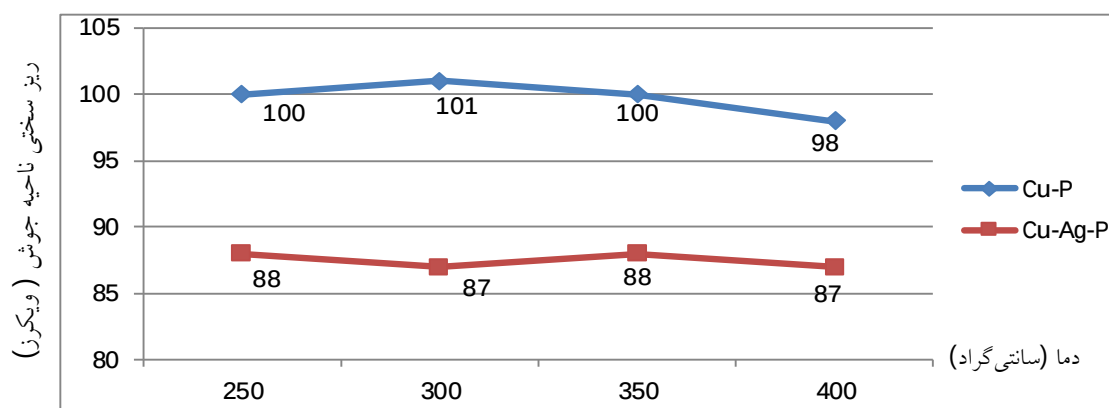
ناحیه جوش در این حالت ترکیب نزدیک یوتکتیک دارد که طبیعتاً سختی بالایی دارد. این در حالیکه ناحیه جوش با پرکننده Cu-Ag-P دارای مقدار نقره بالایی است که انحلال نقره در Cu به صورت جانشینی هست و سختی پایین تری نسبت به جوش با پرکننده مس - فسفر دارد. نقره طبیعت نرمی دارد و قابلیت شکل پذیری را نیز افزایش می دهد.

3-3- اثر نسبت های گاز به اکسیژن بر میکروسختی ناحیه جوش

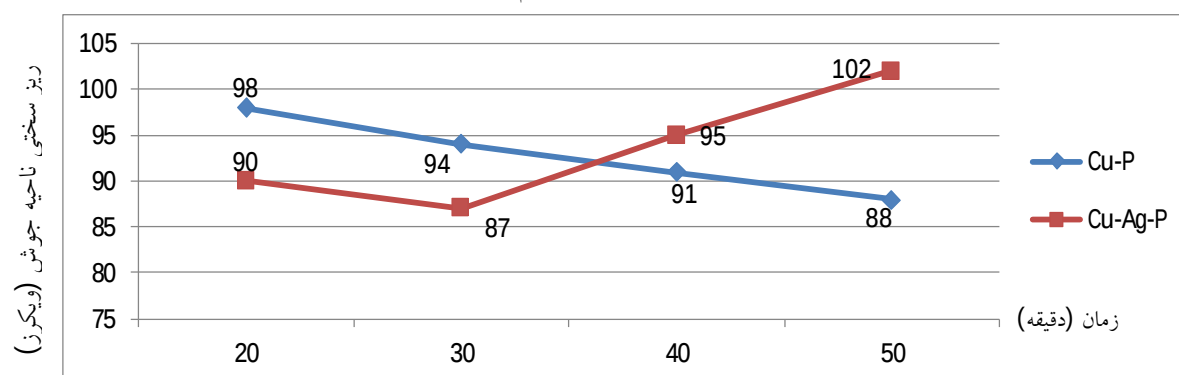
با توجه به آزمایش های انجام شده دمای انتخابی پیش گرم 400 درجه سانتیگراد برای جوش و هم چنین دو پرکننده Cu-P و Cu-Ag-P برای جوش انتخاب شد. آزمایش ها نشان داد در نسبت گاز به اکسیژن یک به یک و نسبت گاز به اکسیژن دو به یک عملیات جوشکاری اکسی استیلن موفقیت آمیز نبوده است، و جوش به صورت نقطه ای و یا نامنظم شیار مربوطه را پر می کند. پس می توان اشاره کرد در پژوهش حاضر جهت تحلیل و بررسی ناحیه جوش، از نسبت های گاز به اکسیژن یک به یک و نسبت گاز به اکسیژن دو به یک استفاده نخواهد شد. هنگامی که نسبت گاز به اکسیژن بین $0/6$ تا 1 باشد، حجم گاز برای ایجاد سوخت کامل کافی نیست و در نتیجه دما بالا نمی رود. ضمن اینکه اکسیژن اضافی نقش سرد کننده نیز دارد و نتایج



شکل 3- تاثیر نسبت گاز به اکسیژن بر میکرو سختی مرکز جوش با پرکننده‌های Cu-P و Cu-Ag-P



شکل 4- تاثیر دمای تنش‌زدایی در زمان دو ساعت بر روی ریزسختی مرکز جوش با دو پرکننده مس-فسفر و مس-نقره - فسفر با دمای 400 درجه سانتی‌گراد پیشگرم

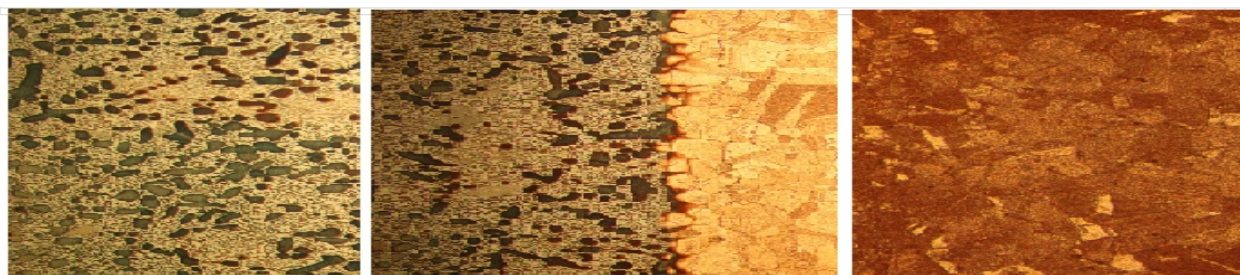
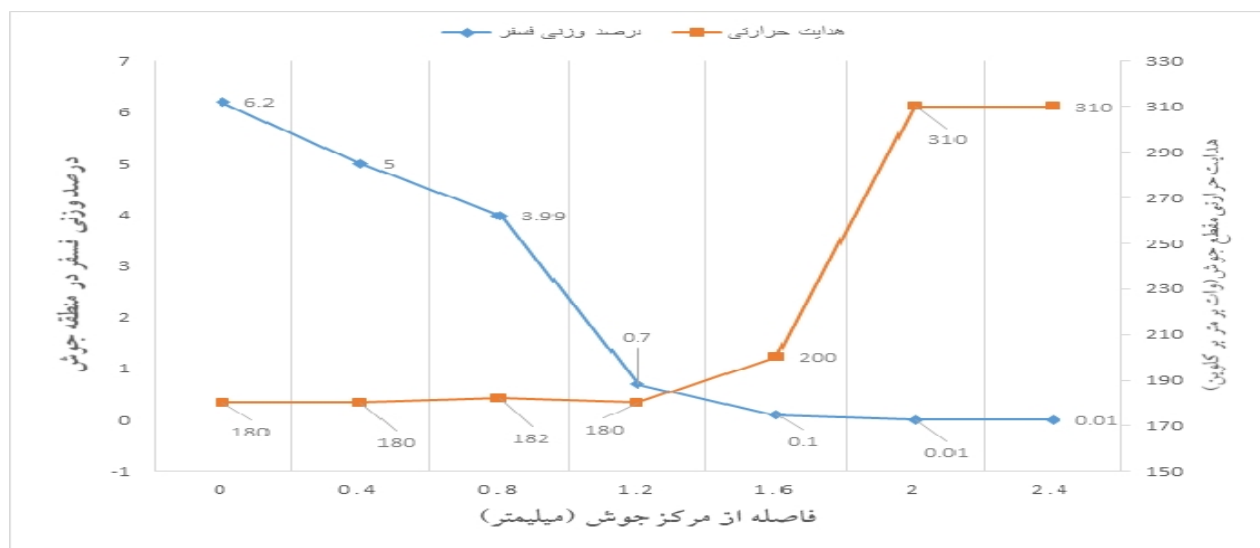


شکل 5- تاثیر زمان آنیل در دمای 600 درجه سانتی‌گراد بر میکرو سختی مرکز جوش با دو پرکننده مس-فسفر و مس-نقره-فسفر با دمای 400 درجه سانتی‌گراد پیشگرم

عملیات آنیل را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده این‌طور به نظر می‌رسد در پرکننده مس - فسفر در اثر آنیل ساختار نامنظم جوش، منظم شده است و در نتیجه سختی کاهش می‌یابد، ولی در پرکننده مس-نقره - فسفر در اثر آنیل عنصر نقره (فاز نرم) از مرکز جوش به اطراف آن پسرزده می‌شود و در نتیجه سختی در مرکز جوش افزایش می‌یابد.

سختی ناحیه جوش را نشان می‌دهد. از آنجایی‌که عملیات تنش‌زدایی منجر به کاهش سختی نشده است، این محدوده دمایی می‌تواند دامنه مطلوبی تلقی شود.

5-3- اثر عملیات حرارتی آنیل بر میکروسختی ناحیه جوش
شکل (5) میزان سختی بدست آمده در حالات مختلف برای

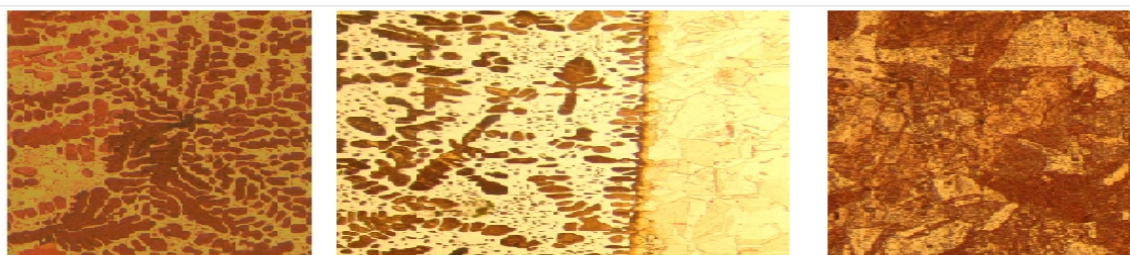
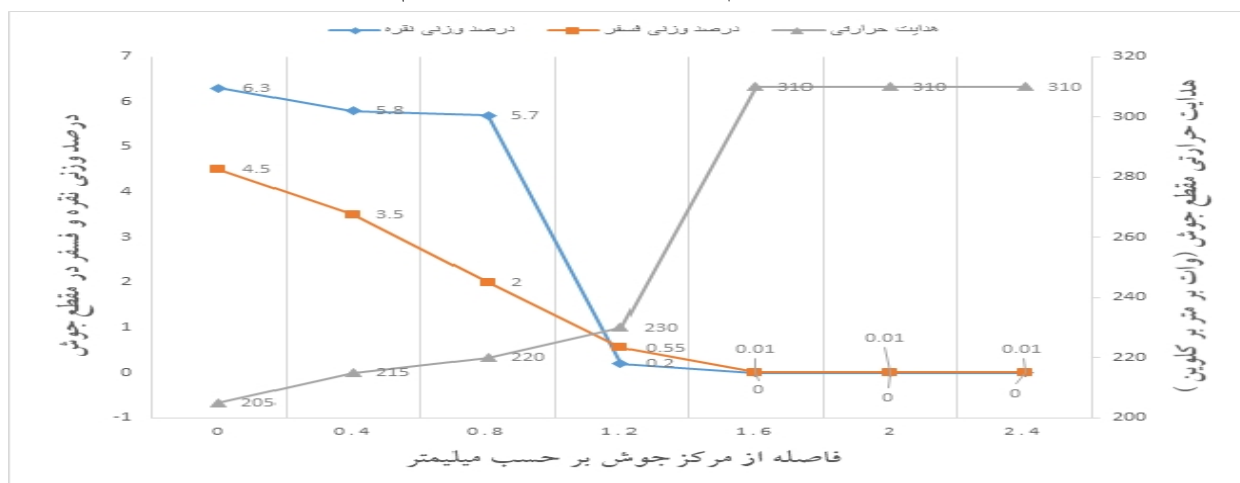


شکل 6- تاثیر فاصله از مرکز جوش بر میزان فسفر و هدایت حرارتی در مقطع جوش با پرکننده مس-فسفر و تصاویر مقطع جوش مرتبط با فاصله از مرکز جوش.

3-6- تاثیر نوع پرکننده بر ریزساختار ناحیه جوش

به دلیل این که قالب های مسی DHP در صنعت فولادسازی استفاده می شوند و از آن ها برای عمل کریستالیزه کردن مذاب فولاد استفاده می شود، باید هدایت حرارتی منطقه جوش آن ها بالا باشند. از این رو در مقاله حاضر هدایت حرارتی جوش با دو پرکننده مختلف اندازه گیری شده است و نتایج در شکل (6) و (7) ملاحظه می شود. شکل (6) تاثیر درصد فسفر در ناحیه جوش با پرکننده Cu-P بر ریزساختار و هدایت حرارتی ناحیه جوش را نشان می دهد. کاهش درصد فسفر از مرکز جوش از 6/2 تا 0/7 در نزدیکی فصل مشترک پرکننده با مس DHP (در نقطه ای با فاصله 1/2 میلیمتر از مرکز) با هیچ گونه افزایشی در هدایت حرارتی همراه نبوده است. معالوصف کاهش فسفر از 0/7 به 0/01 با افزایش حدود 42 درصدی همراه بوده است که به خودی خود به نظر می رسد تاثیر فزاینده ای در انتقال حرارتی فلز پایه داشته است که مورد توجه در حفظ ویژگی های هدایت

حرارتی قالب های مسی DHP هست. همچنین شکل (7) تاثیر درصد توأم نقره و فسفر در ناحیه جوش با پرکننده Cu-Ag-P بر ریزساختار و هدایت حرارتی ناحیه جوش را نشان می دهد. کاهش درصد نقره از 6/3 تا 0/2 و کاهش درصد فسفر از 4/5 تا 0/55 به صورت توأم با افزایش قابل ملاحظه ای همراه بوده است به طوری که این افزایش حدود 12 درصدی هست. به نظر می رسد این افزایش را بتوان به حضور 6 درصدی نقره با طبیعت هدایت حرارتی بالا آن نسبت داد. لازم به یادآوریست در قالب های مسی نسل جدید که نقره در آن ها استفاده شده است، در جاهایی کاربرد دارند که تنش حرارتی زیاد است [17]. مطالعه ریز ساختار در شکل (6) و مقایسه آن با شکل (7) نشان می دهد که پایین بودن هدایت حرارتی در پرکننده Cu-P باعث کاهش نفوذ حرارتی از منطقه پرکننده به منطقه پایه DHP شده است و افزایش زمان انجماد و دانه های مس در فصل مشترک در آرایش جدیدی قرار گرفته اند، در حالی که بالا بودن



شکل 7- تاثیر فاصله از مرکز جوش بر میزان نقره و فسفر و هدایت حرارتی در مقطع جوش با پرکننده مس - نقره - فسفر و تصاویر مقطع جوش مرتبط با فاصله از مرکز جوش .

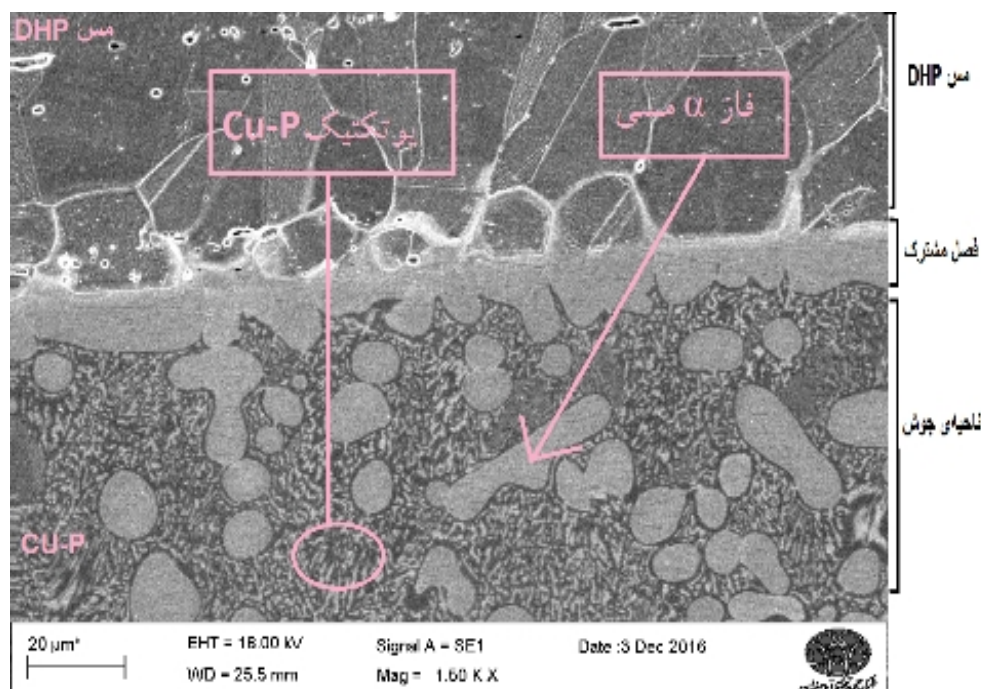
فاز α اکثراً در ناحیه جوش در داخل یونکتیک Cu-P محصور شده است که طبعاً بالابودن مقدار یونکتیک سخت تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر سختی ناحیه جوش می‌گذارد. با توجه به شکل (10) این‌طور به نظر می‌رسد که در جوش مس با پرکننده Cu-Ag-P به دلیل انتقال حرارت بالای مس و ایجاد گرادیان دمایی شدید ابتدا دانه‌های تبریدی تشکیل شده است و در ادامه دانه‌ها به طرف گرادیان دمایی رشد پیدا می‌کنند که به دلیل انتقال حرارت بالای نقره و پایه مسی این رشد دانه‌ها بیشتر به صورت دندریتی در پرکننده مس - نقره - فسفر بیشتر مشهود است. شکل‌های (9) و (10) منطقه فصل مشترک جوش با مس و منطقه تحت تأثیر جوش را به ترتیب برای پرکننده مس - فسفر و مس - نقره - فسفر به خوبی نشان می‌دهد.

8-3- آنالیز ترکیبی ناحیه جوش با استفاده از آزمایش EDS
با توجه به شکل‌های (11) تا (13) و جدول (2) این‌طور به نظر می‌رسد که فصل مشترک در جوش با پرکننده مس - نقره -

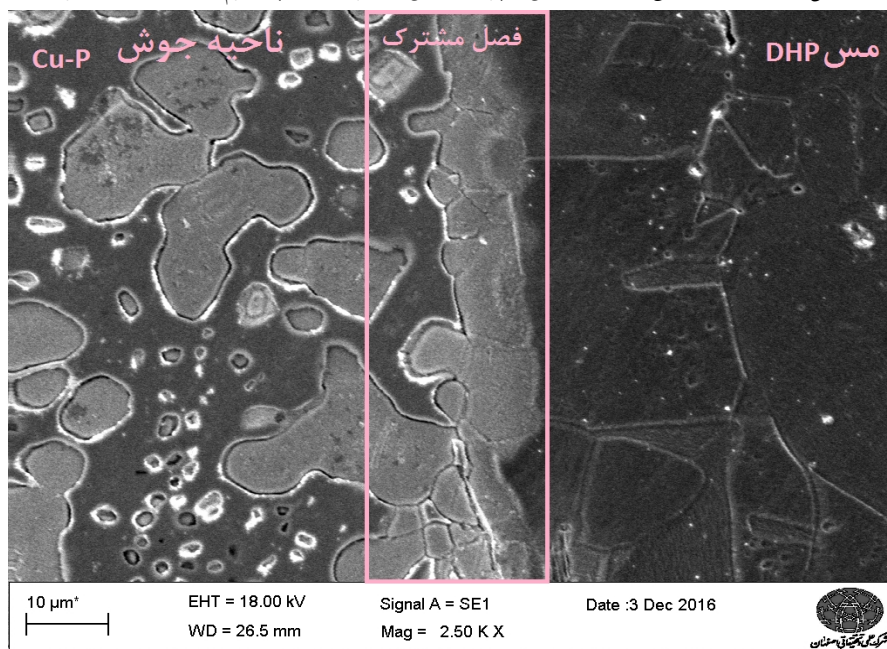
هدایت حرارتی در پرکننده Cu-Ag-P باعث افزایش نفوذ حرارتی از منطقه پرکننده به منطقه پایه DHP و در نتیجه کاهش زمان انجماد و دانه‌های مس در فصل مشترک بدون آرایش جدید دست نخورده باقی مانده است (شکل 6).

7-3- بررسی ریزساختار و فصل مشترک مقطع جوش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)
شکل‌های (8) و (9) ساختار ناحیه جوش با پرکننده مس - فسفر با میکروسکوپ الکترونی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در تصویر ملاحظه می‌گردد در فصل مشترک ناحیه جوش عمدتاً فاز α مس FCC تشکیل می‌شود. که ضخامت فصل مشترک کمتر از 10 میکرون است.

سازوکار تشکیل این لایه بر اساس انجماد سریع مذاب پرکننده به علت قدرت سردکنندگی پایه مسی است که دارای ضخامت نزدیک 2 سانتیمتر می‌باشد و امکان نفوذ نسبتاً بالا پایه و مذاب را در یکدیگر با گذشت زمان نمی‌دهد.



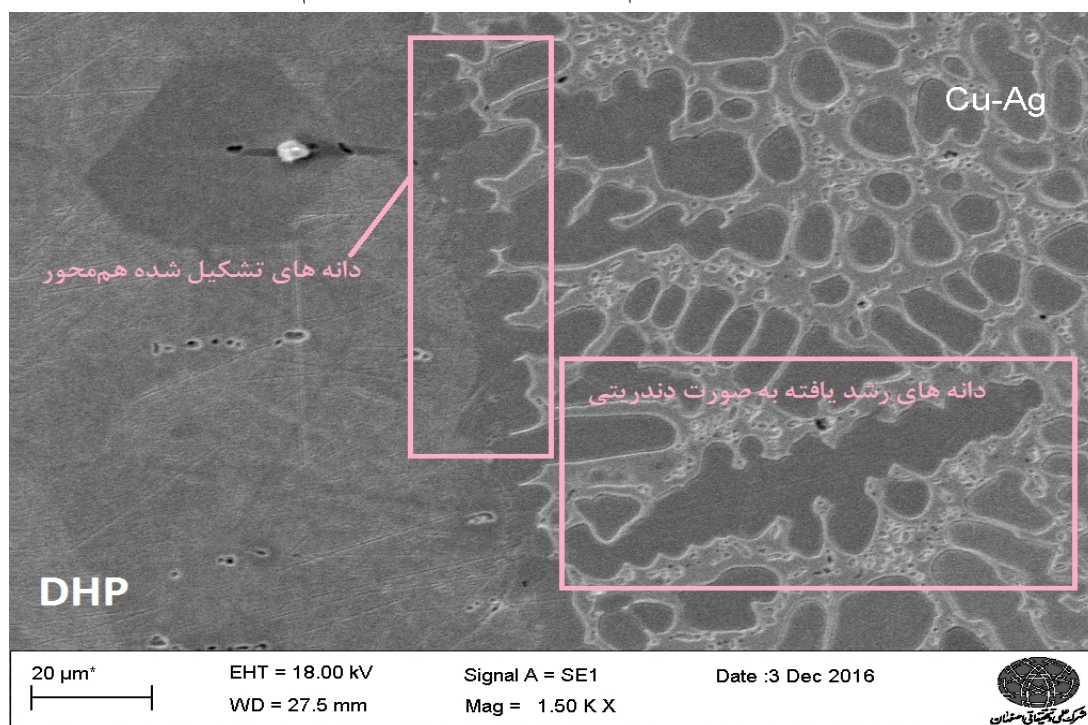
شکل 8- فازبندی نواحی مختلف جوش با پرکننده مس-فسفر با دمای پیشگرم 400 درجه سانتیگراد



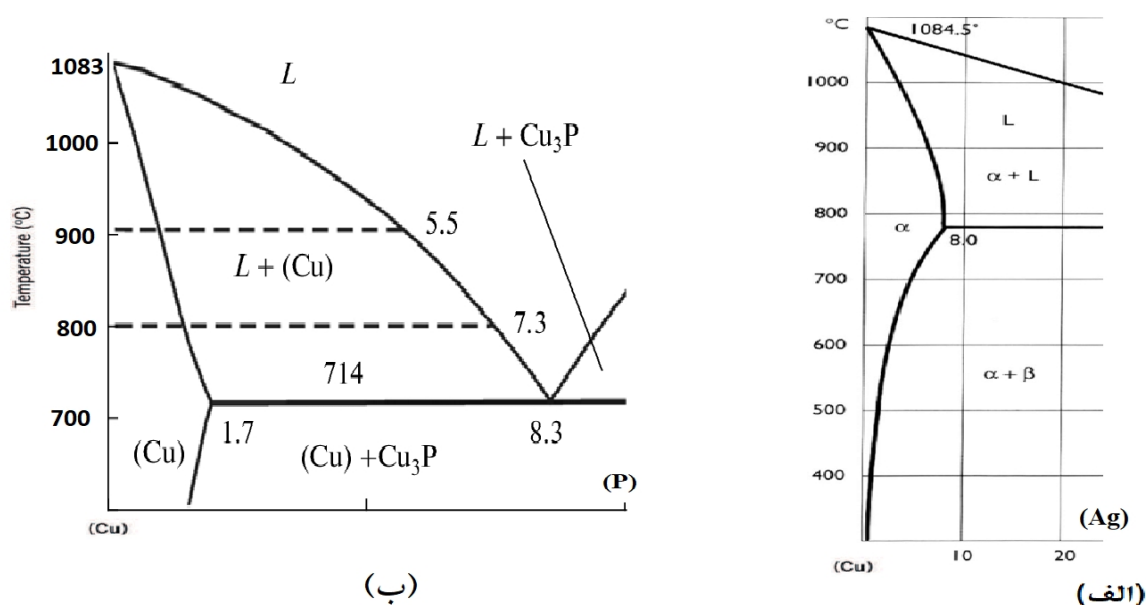
شکل 9- فصل مشترک و منطقه ی تحت تاثیر جوش برای پرکننده مس-فسفر با دمای 400 درجه سانتیگراد پیشگرم

مس-نقره که آن‌هم دارای هدایت حرارتی بالاست باعث انجماد سریع مذاب مس-نقره شده و نقره موجود در طول انجماد در لایه فصل مشترک بداخل مذاب پس زده می‌شود و جبهه جلو انجماد به تدریج درصد نقره آن از 6 درصد بالا می‌رود، در حالی که رشد ستونی و دندریتی داریم که در فاصله بین دندریت‌ها

فسفر مشتمل بر دانه های مس می‌باشد که خلوص آن‌ها تقریباً بالا است بدین معنی که مذاب پرکننده با ترکیب مس-نقره به علت سرعت سرد شدن سریع ناشی از پایه مس DHP با ضخامت 2 سانتی‌متر با طبیعت سردکنندگی بسیار بالا از یک طرف و طبیعت خود سرد شوئندگی (Self-coolant) پرکننده



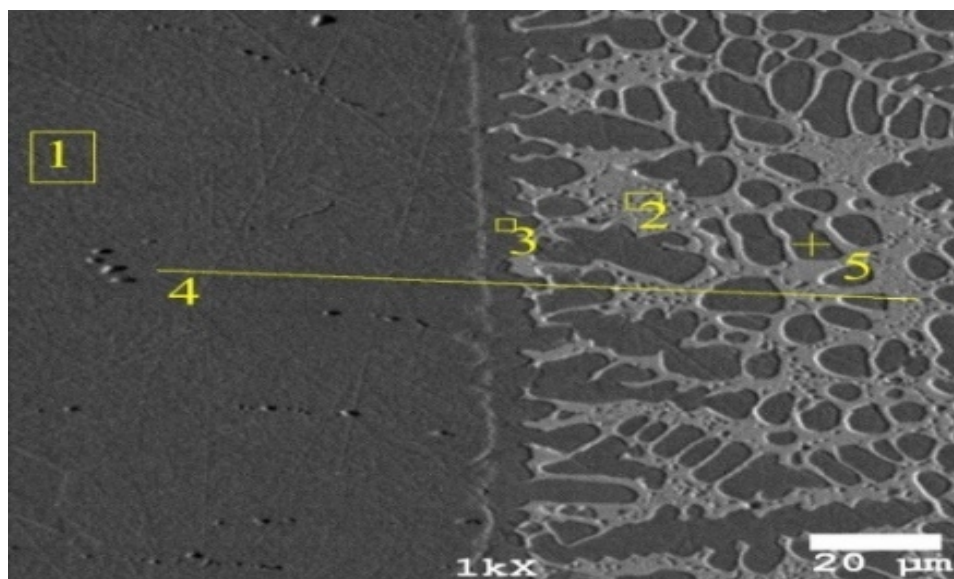
شکل 10- فازبندی نواحی جوش با پرکننده مس - نقره - فسفر با دمای 400 درجه پیشگرم



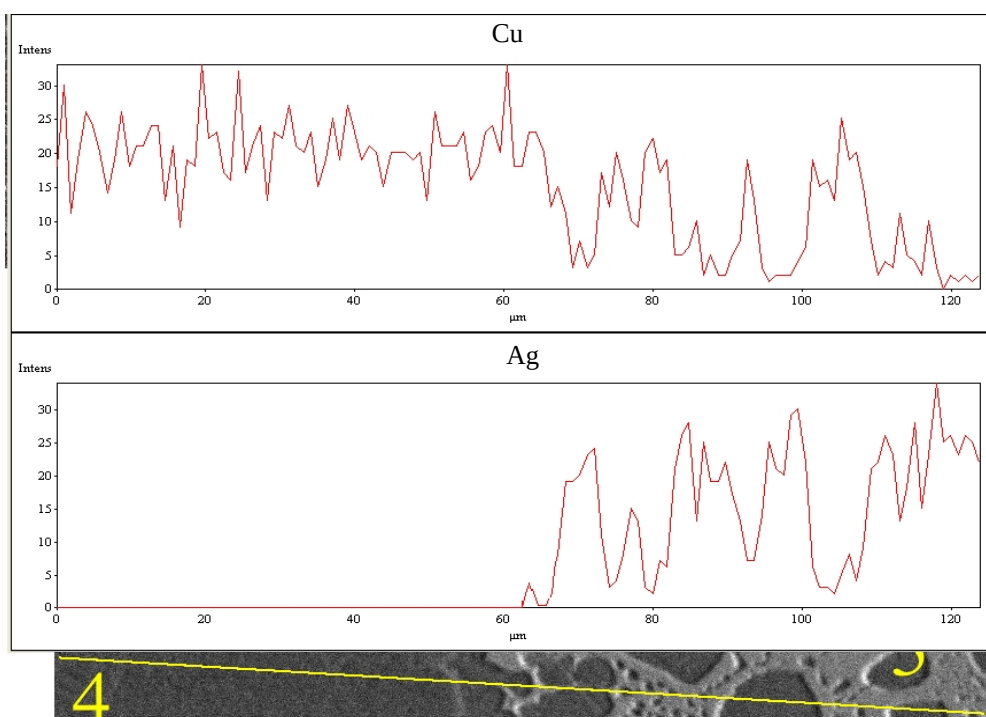
شکل 11- دیاگرام های فاز مس - نقره و مس - فسفر: الف) دیاگرام فاز مس - نقره و ب) دیاگرام فاز مس - فسفر

25 حدود درصد می‌رسد. در ذیل با استفاده از شکل (14) و جدول (3) عناصر تشکیل‌دهنده در نواحی مختلف جوش با پرکننده مس - فسفر تحت دمای پیشگرم 400 درجه سانتی‌گراد نشان داده شده است. پرکننده مس - فسفر قبل از جوشکاری دارای حدود 7 درصد فسفر است و در طول عملیات جوش

به تدریج درصد نقره آن بالا می‌رود ضمن آنکه با ادامه رشد انجماد سرعت سرد شدن کاهش می‌یابد (فاصله از پایه سرد و در نتیجه خطر پس زدن نقره در انجماد دندریته‌ها کاهش یافته است، به طوری که در نقطه 5 مربوط به ناحیه دندریت و با فاصله زیاد از فصل مشترک مقدار نقره در آن بالا و به



شکل 12- قسمت‌های انتخابی مختلف از ناحیه جوش با پرکننده Cu-Ag-P



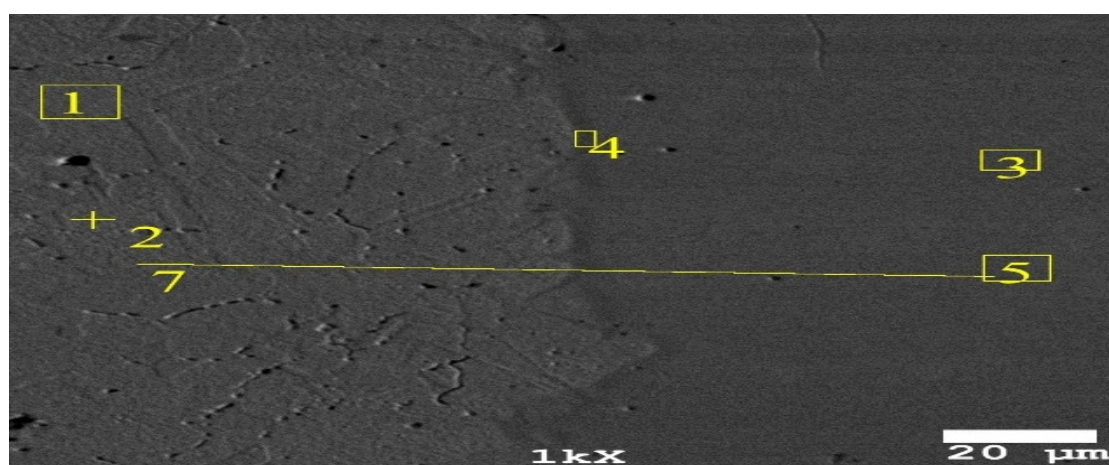
شکل 13- نسبت حضور مس و نقره در مقطع جوش با پرکننده Cu-Ag-P

است (شکل 11) دیاگرام فازی مس - فسفر) و در نتیجه ساختار کلی به ترکیب یوتکتیک نزدیک و عمدتاً کمتر دارای ساختار دندریتی است. با توجه به شکل (15) می‌توان دید که در پرکننده مس - فسفر جدایش به صورت ناچیز اتفاق افتاده است که دلیل آن می‌تواند نزدیک بودن ساختار جوش به نقطه یوتکتیک (ترکیب مس - فسفر با حدود 6 درصد فسفر) و

مقداری از فسفر از پرکننده خارج و با اکسیداسون ناحیه جوش مقابله می‌کند و بخش دیگر پس از تشکیل کریستال‌های مس در فصل مشترک با ترکیب 4 درصد فسفر، اتم‌های فسفر به داخل مذاب در جلو جبهه انجماد پس‌زده می‌شود. به طوری‌که در فاصله دورتر از فصل مشترک میزان فسفر به حدود 6/5 تا 8/5 درصد می‌رسد که نزدیک ترکیب یوتکتیک

جدول 2- درصد عناصر در نواحی مختلف مقطع جوش با پرکننده Cu-Ag-P (مطابق با شکل (12))

	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه‌ی مورد نظر
	wt. %	100.00	100.00	1,176.31	Ka	Cu	1
Total	wt. %	100.00	100.00				1
	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه‌ی مورد نظر
	wt. %	9.96	15.81	275.06	Ka	Cu	2
	wt. %	90.04	84.19	2,682.18	La	Ag	2
Total	wt. %	100.00	100.00				2
	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه‌ی مورد نظر
	wt. %	100.00	100.00	1,478.84	Ka	Cu	3
Total	wt. %	100.00	100.00				3
	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه‌ی مورد نظر
	wt. %	75.01	83.59	1,052.56	Ka	Cu	5
	wt. %	24.99	16.41	373.70	La	Ag	5
Total	wt. %	100.00	100.00				5



شکل 14- قسمت‌های انتخابی مختلف از ناحیه جوش با پرکننده Cu-P

عدم تشکیل لایه اکسیدی و چسبندگی بهتر پرکننده به فلز پایه توصیه می‌شود.

3- تغییر در نسبت گاز به اکسیژن در جوشکاری اکسی استیلن با پرکننده Cu-P روی مس DHP بر سختی جوش اثر داشت. در حالت نسبت گاز به اکسیژن سه به دو (شعله احیائی) سختی نسبت به حالت نسبت گاز به اکسیژن دو به سه (شعله اکسیدی) کم‌تر است. این درحالی است که نسبت گاز به اکسیژن تاثیری بر ریزسختی جوش با پرکننده مس - نقره - فسفر نداشت.

4- عملیات تنش‌زدایی با هدف کاهش تنش‌ها و حفظ خواص مکانیکی در محدوده دمایی 250 تا 400 درجه سانتی‌گراد و در زمان 2 ساعت اجرا شد. نتایج نشان داد محدوده دمایی مذکور هیچگونه تاثیر محسوسی بر سختی نداشت و انتخاب مناسبی

کاهش زمان توأم‌بودن فاز مایع همراه با جامد در کنار هم در مقطع جوش بیان کرد.

4- نتیجه گیری

1- روش انتخابی جوشکاری با اکسی استیلن با به کارگیری پرکننده‌های Cu-P و Cu-Ag-P همراه با عملیات پیشگرم و تنش‌زدایی و تنظیم نسبت گاز به اکسیژن امکان موفقیت‌آمیز ترمیم شیارهای قالب های مسی DHP آسیب دیده مربوط به ریخته‌گری مداوم فولاد را فراهم آورد .

2- با توجه به آزمایش‌های انجام شده دمای پیشگرم 400 درجه سانتی‌گراد برای جوش مس DHP با ضخامت بالا با جوش اکسی استیلن با پرکننده‌های Cu-P و Cu-Ag-P با هدف

جدول 2- درصد عناصر در نواحی مختلف مقطع جوش با پرکننده Cu-Ag-P (مطابق با شکل (12))

	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه‌ی مورد نظر
	wt. %	100.00	100.00	1,176.31	Ka	Cu	1
Total	wt. %	100.00	100.00				1
	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه‌ی مورد نظر
	wt. %	9.96	15.81	275.06	Ka	Cu	2
	wt. %	90.04	84.19	2,682.18	La	Ag	2
Total	wt. %	100.00	100.00				2
	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه‌ی مورد نظر
	wt. %	100.00	100.00	1,478.84	Ka	Cu	3
Total	wt. %	100.00	100.00				3
	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه‌ی مورد نظر
	wt. %	75.01	83.59	1,052.56	Ka	Cu	5
	wt. %	24.99	16.41	373.70	La	Ag	5
Total	wt. %	100.00	100.00				5

جدول 3- درصد عناصر در نواحی مختلف مقطع جوش با پرکننده (مطابق با شکل (14))

	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه مورد نظر
	wt. %	100.00	100.00	1,226.95	Ka	Cu	1
Total	wt. %	100.00	100.00				1
	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه مورد نظر
	wt. %	8.52	16.04	453.72	Ka	P	3
	wt. %	91.48	83.96	1,739.54	Ka	Cu	3
Total	wt. %	100.00	100.00				3
	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه مورد نظر
	wt. %	3.98	7.12	99.14	Ka	P	4
	wt. %	96.02	92.88	1,392.54	Ka	Cu	4
Total	wt. %	100.00	100.00				4
	Units	Conc	Atomic %	Intensity (c/s)	Line	Elt.	نقطه مورد نظر
	wt. %	6.60	12.66	272.67	Ka	P	5
	wt. %	93.40	87.34	1,393.72	Ka	Cu	5
Total	wt. %	100.00	100.00				5

بود.

زمینه مس DHP تنها با کاهش 15 درصدی همراه بود. 7- جدایش در ناحیه جوش هنگامی که از پرکننده Cu-P در جوشکاری مس DHP در روش اکسی استیلن استفاده شد، نسبت به حالتی که پرکننده Cu-Ag-P به شد، بسیار اندک بود و می‌توان کاهش میزان جدایش را به قرارگیری ترکیب Cu-P نزدیک ترکیب یوتکتیک نسبت داد.

منابع

- [1] Advanced Mould Technology, KME brochure, 2017
 [2] Wang, L., Zhao L., Huang, G., Yuan, X., Zhang, B. and Zhang, J., "Composition, Structure and Corrosion Characteristics of Ni-Fe-P and Ni-Fe-P-B Alloy Deposits Prepared by Electroless Plating", Surface and Coatings Technology, Vol. 126, No. 2-3, pp. 272-278, 2000.

5- آنیل ناحیه جوش بر سختی آن اثر می‌گذارد. این تاثیر در حالتی که از پرکننده مس - فسفر استفاده شد، برای زمان 50 دقیقه در دمای 600 درجه سانتی‌گراد حدود 10 درصد کاهش در سختی و برای حالتی که از پرکننده مس - نقره - فسفر استفاده می‌شود، به ترتیب برای زمان 30 دقیقه و 50 دقیقه، کاهش 3/3 درصدی و افزایش 13 درصدی در سختی به همراه داشت.

6- هدایت حرارتی در ناحیه جوش هنگامی که از پرکننده مس - فسفر استفاده شد نسبت، به حالتی که از پرکننده مس - نقره - فسفر استفاده شد، حدودا 30 تا 40 درصد کاهش نشان داد که طبعاً برای رفتار انتقال حرارت قالب‌های مسی مناسب نیست. ضمن این که به کارگیری پرکننده مس - فسفر - نقره نسبت به

autovacuum brazing", The Paton Welding Journal, No 10,37-40, 2016.

[10] Nikityuk, Yu. N., Grigorenko, G.M., Zelenin, V.I. et al. (2013) Technology of reconditioning repair of slab molds of MCCB with friction stir welding method. Sovr. Elektrometallurgiya, 3, 51—55.

[11] Laflamme, G. R.; Powers, D. E., 1994, "Electron beam welding of copper containers to encapsulate nuclear waste". Welding Journal v. 73 (December 1994) p. 37-40

[12] Biro.E, Weckman.D.C and Zhou.Y "pulsed Nd:YAG laser welding of copper using oxygenated asit gases" metallurgical and materials transactions A , v 33A ,2002, pp.2019-2030

[13] Lee .W.B and Jung.S.B "the joint properties of copper by friction stir welding" Materials Letters, 2004, 58, 1041-1046

[14] Li.Y.N, Peng.Z.L, and Yan.J.C "The Dissolution Mechanism of Copper Weld Brazing with Cu-Based Brazing Alloys" Materials Science Forum Vols 697-698 (2012) pp 394-398

[15] Li Yanan , Peng Zilong , "The effect of element Ag and P in dissolving action and mechanical performance of the welds during weld brazing of copper" ,Advanced Materials Research , Vols 472-475, p.p 1151-1154, 2012

[16] analysis of welded structures ,residual stress , distortion, and their consequences ,koichi masubuchi , international series on materials science and technology , volume 33, pergamon press

[17] Advanced mould technology, KME brochure,2019.

[3] Tadashi TAKEMOTO, Ikuo OKAMOTO and Juaj Imatsumura "Spreading of Copper Phosphorus Brazing Filler Metals with Low Melting Temperature containing silver and/or Tin " Osaka university

[4] Divinski.S , Lohmannn,M, chr, Herzing "Ag grain boundary diffusion and segregation in Cu: Measurements in the types B and C diffusion regimes" acta materialia , volume 49 , issue 2,22january 2001,pages 249-261

[5] Isaac Tuah-Poku , Dollar.M , Massalski.T.B "A study of the transient liquid phase bonding process applied to a Ag/Cu/Ag sandwich joint" Metallurgical Transactions A , March 1988, Volume 19, Issue 3, pp 675-686

[6] Gomez de Salazar . J.M, Mendez.F.G, Urena A. , guilemany.J.M, Mellor.B.J "Transient liquid phase (TLP) diffusion bonding of a copper based shape memory alloy using silver as interlayer" scripta materialia, volume 37 , issue 6, 15 september 1997, pages 861-867

[7] welding copper and copper alloys published by American welding society 550 N.W Lejeune road , Miami,FL 33126 CDA

[8] Grigorenko.G M, Puzrin.A.L ,.Atroshenko.M.G, Poleshchuk.M.A, Shevtsov.A.V and Mossokovskaya. I.A, Autovacuum brazing in repair of copper panels of MCCB moulds, The Paton Welding Journal., 45-49,9.2015

[9] Poleshchuk.M.A, Atroshenko.M.G, VShevtosva.A and Puzrin.A.L , "Deposition of protective coatings on copper plates of CCM molds by the method of