


## Investigating the effect of Brazing Temperature and Time on Stainless Steel Sandwich Joints

Research Article

Masoumeh Khayyat<sup>1</sup>, Behrooz Beidokhti<sup>2</sup> 

DOI: 10.22067/jmme.2022.77394.1059

### 1- Introduction

Sandwich joints are one of the methods of combining materials to join different layers together, which is also used in the production of plate heat exchangers. Brazing is used to join the steel plates together, which is used in the production of heat exchangers. In brazing, two or more parts are joined by melting and flowing a filler material that has a lower melting point than the base metal. For this purpose, the copper filler metal is used due to its cost-effectiveness, low melting temperature, relatively good bond strength, and high heat transfer compared to other fillers such as silver or nickel. In brazing, the temperature, holding time, and atmosphere of the furnace are important parameters, and also melting of the filler metal and the absence of unwanted and harmful phases in the joint determined a good joint. To prevent the formation of unwanted and harmful phases, joining in a vacuum atmosphere is preferred.

So far, researchers haven't investigated the effect of different parameters of brazing in multiple-layered joints of different alloys. Therefore, in this study, 316L steel is used as the base metal and a copper alloy is used as filler to form a sandwich joint under high vacuum and low pressures by brazing. This work has tried to provide the best conditions for a good, integrated, and strong joint by changing the temperature and time of brazing.

### 2- Experimental Procedure

Polished sheets of 316L SS and pure copper foil (chemical composition in table 1) with dimensions of 20 x 35 mm and thicknesses of 0.6 mm and 50 microns, respectively were used to perform two and five-layered samples, and they were placed into a vacuum furnace under the brazing temperatures of 1070 and 1120 °C, time of 30, 90 and 90 minutes and a pressure of 5 MPa. After the metallography and electro-etch, optical images and scanning electron microscope (SEM) images with EDS were taken along the joint. X-ray diffraction (XRD) test and microhardness test were also performed.

### 3- Results and Discussion

Fig. 1 illustrates the microstructure of the joint brazed in 1070-60 and 1120-60 samples. By comparing figures 1-(a,b) and 1-(c,d), it was observed that the temperature of 1070 °C was not enough for the diffusion of the copper filler metal into the base metal and some cavities were observed. But at 1120 °C, the diffusion of copper filler metal into the base metal was increased, the average grain size was reduced from 200-214 to 99-95 microns due to secondary recrystallization, and also the width of the brazing seam was reduced from 49.3-49 to 35-33 microns.

Fig. 2 shows the SEM images and EDS analysis along the brazing seam of the 1070-60 and 1120-60 samples. At 1070°C, only a small amount of Fe and Chromium diffused on the Cu-rich side of the steel/filler metal interface due to the low solubility of Fe in Cu. Copper, by dissolving iron, has continuously diffused into the steel and produced a solid solution with limited solubility. But by comparing figures 2-b and 2-d, it was observed that the atomic vibrations, the solubility of copper in iron, and the amount of diffusion of elements in the filler metal/base metal interface were increased when the temperature increased to 1120 °C.

Fig. 3 illustrates the microstructure of the joint brazed in 1120-30, 1120-60, and 1120-90 samples. By comparing figures 3-(a,b) with 3-(c,d), it was observed that 30 minutes is not enough for diffusion, and by increasing of holding time to 90 min, the diffusion of the elements increases, the width of the brazing seam decreases from 48-47 to 18.7-24.5 microns and the average grain size decreases from 119-126 to 74-94 microns. In the initial stage of brazing, molten copper filler dissolves the base metal, and then Fe and Cr atoms of the base metal and Cu atoms of the copper filler react, and the interface of filler/base metal is enriched with Cu and Fe and turned into the Fe-Cr phase. The amount of this phase increases with increasing holding time.

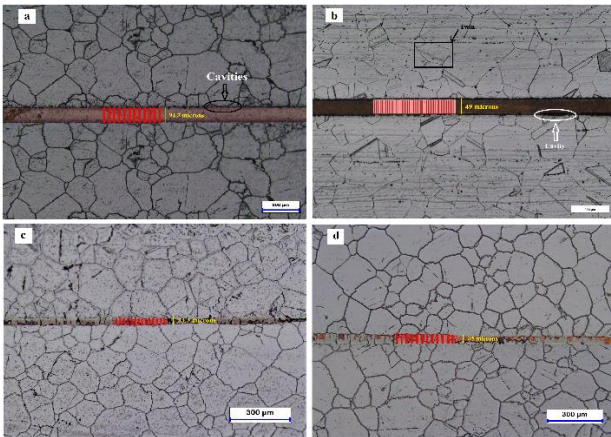
\*Manuscript received: 2022, Revised, 2022, Accepted, 2022.

<sup>1</sup>MSc student, Materials and Metallurgical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

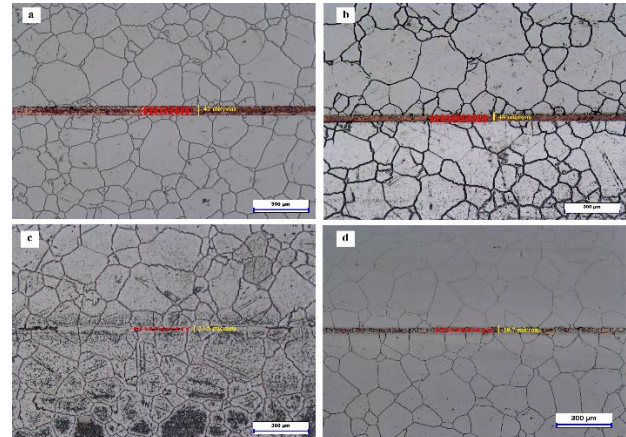
<sup>2</sup> Corresponding author: Associate professor, Materials and Metallurgical Engineering Department, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, **Email:** beidokhti@um.ac.ir

**Table 1: Chemical compositions of 316L SS and filler metal.**

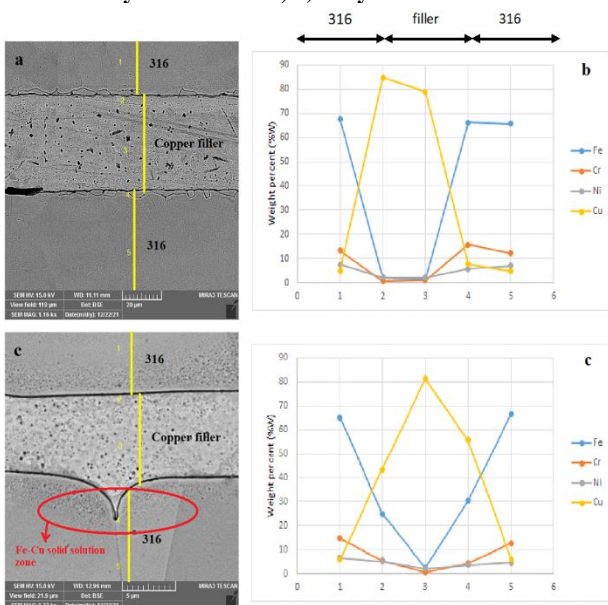
W%	Fe	Cu	Cr	Ni	Mn	S	P	Si	Mo	C	Zn
316L	base	-	16.7	13.3	2	0.02	0.03	1	2.5	0.03	-
Copper filler	0.003	base	-	0.0005	-	-	0.6	-	-	-	0.03



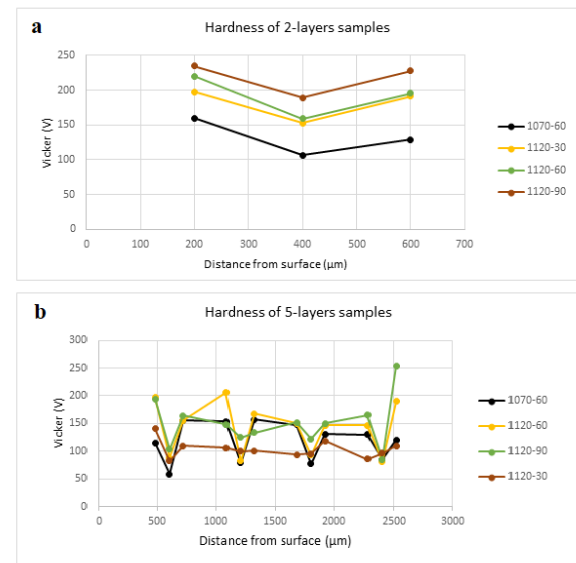
**Figure 1. OM photographs of joints (holding time of 60 min): a) 2 layers at 1070 °C; b) 5 layers at 1070 °C; c) 2 layers at 1120 °C; d) 5 layers at 1120 °C.**



**Figure 3. OM photographs of joints (at 1120 °C): a) 2 layers with a holding time of 30 min; b) 5 layers with a holding time of 30 min; c) 2 layers with a holding time of 90 min; d) 5 layers with a holding time of 90 min.**



**Figure 2. SEM photographs and linear EDS analysis of: a, b) 60 min-1070 °C; c, d) 60 min-1120 °C.**



**Figure 4. Microhardness results of brazed joints: a) 2 layers; b) 5 layers.**

Fig. 4 illustrates the microhardness distribution across the joints brazed in 2 and 5 layers samples. As it is seen, the hardness of the two-layered samples was higher than the 5-layered samples due to their smaller grain size. Also, the highest amount of hardness was related to the 1120-90 sample due to having the highest temperature and holding time for the diffusion of elements and the lowest average grain size. Also, it was seen that the temperature of 1070 and time of 30 min are not enough due to the diffusion process, and the hardness of these samples is lower than the others.

**Conclusion**

This study investigated the effect of brazing temperature and time on the 316L SS/copper filler sandwich joint.

Based on experimental results the following conclusions can be drawn:

1. Increasing the temperature from 1070 to 1120 °C increased the diffusion of elements, the brazing seam's width, and the average grain size.
2. By increasing the holding time, the width of the brazing seam decreased due to the diffusion of copper into the base metal and the average grain size decreased. Therefore, it seems that the time of 90 min provides the best joint conditions.
3. The hardness of two-layered samples was higher than the five-layered samples due to the smaller average grain size.



## بررسی تأثیر دما و زمان لحیم کاری سخت بر اتصال ساندویچی فولاد زنگ‌نزن\*

بهرروز بیدختی<sup>(۱)</sup>

معصومه خیاط<sup>(۲)</sup>

DOI: 10.22067/jmme.2022.77394.1059

**چکیده** برای تولید مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، صفحات فولاد زنگ‌نزن به صورت ساندویچی به یکدیگر متصل می‌شوند. برای این نوع اتصال می‌توان از روش لحیم کاری سخت که در آن اتصال دهی تحت خلأ صورت می‌گیرد، استفاده نمود. به همین منظور در این طرح، صفحات فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶L به صورت چند لایه (۲ و ۵ لایه) توسط لایه واسطه مس که نسبت به سایر فلزات پرکننده مقرون به صرفه‌تر و دارای دمای ذوب پایین‌تر است و امکان ایجاد استحکام اتصال نسبتاً مناسب دارد، به یکدیگر متصل شدند. متغیرهای این پژوهش، دما (۱۰۷۰ و ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) و زمان (۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه) بود. تصاویر میکروسکوپی که برای بررسی ریزساختار درز اتصال گرفته شد، نشان داد که اتصال ایجاد شده در دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد مناسب و یکپارچه نبوده و اتصال در دمای ۱۱۲۰ درجه و زمان ۹۰ دقیقه به دلیل فرصت کافی برای ذوب لایه واسطه و نفوذ عناصر، خواص بهتری داشت. همچنین نمونه‌های دولایه با متوسط اندازه دانه کمتر، سختی بالاتری داشتند.

واژه‌های کلیدی اتصال ساندویچی، فولاد زنگ‌نزن، لحیم کاری سخت، مبدل حرارتی.

## Investigating the effect of Brazing Time and Temperature on Stainless Steel Sandwich Joints

M. Khayyat

B. Beidokhti

**Abstract** Brazing of low-carbon austenitic stainless steel sheets is applied to produce plate heat exchangers. In this study, the copper filler was used to join multiple layers of 316L steel plates due to its low cost, low melting temperature and relatively good bonding strength compared to other filler metals. For comparison, 2-layer and 5-layer specimens were brazed with the copper interlayer, fabricated. The sandwich joints have been fabricated under different process conditions of the brazing temperature (1070 and 1120°C) and the brazing time (30, 60, and 90 min). Detailed microstructural studies and hardness were carried out on the brazed joints. The microscopic studies showed that the joint formed at 1070 °C was not uniform compared to 1120 °C and the specimen brazed at 1120°C/90 min presented better properties due to enough time for melting of the interlayer and diffusion of elements. Also, 2-layer specimens with lower average grain size had higher hardness than 5-layer specimens.

**Key Words** Sandwich joint, Stainless steel, Brazing, Heat exchanger.

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۱/۴/۶ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۱/۹/۲۶ می‌باشد.

(۱) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

(۲) نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.

Email: beidokhti@ferdowsi.um.ac.ir

## مقدمه

به عقیده محققان و همچنین مهندسان، مواد مانند فلزات، سرامیک‌ها و یا پلیمرها جهت برآورده نمودن تمام نیازهای فن‌آوری برای انواع کاربردها، باید با یکدیگر ترکیب شوند [1]. یکی از روش‌های ترکیب مواد، اتصال آن‌ها به یکدیگر به روش ساندویچی را می‌توان نام برد. اتصال ساندویچی شامل قرار گرفتن لایه‌های مختلف بر روی یکدیگر و اتصال آن‌ها به هم‌دیگر توسط روش‌های مختلف مانند پیچ و مهره [2]، پرچ [3]، جوشکاری مقاومتی [1]، جوشکاری با گاز [2] یا جوشکاری لیزر [4] است. اتصالات ساندویچی در صنایع کشتی سازی [3]، تجهیزات پرتاب سفینه به فضا [4] و تولید مبدل‌های حرارتی [5] استفاده می‌گردد.

مبدل‌های صفحه‌ای نسل نسبتاً جدیدی از مبدل‌های حرارتی هستند که از تعداد زیادی صفحات شورون (Chevron) دار از جنس فولاد زنگ‌نزن تشکیل شده‌اند. بین این صفحات انتقال حرارت به این صورت که گرما از جسم با دمای بیشتر به جسم با دمای کمتر منتقل می‌شود، انجام می‌شود [5].

یکی از روش‌های اتصال‌دهی جهت تولید مبدل‌های حرارتی علاوه بر جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، جوشکاری نفوذی و یا واشر، لحیم‌کاری است. لحیم‌کاری یکی از متداول‌ترین روش‌های اتصال فلزات است که در آن دو یا چند قطعه با استفاده از ذوب جریان یافتن ماده مصرفی که نسبت به فلز پایه نقطه ذوب پایین‌تری دارد، به یکدیگر متصل می‌شوند. عدم ذوب قطعات در این فرایند موجب عدم تغییر خواص متالورژیکی آن‌ها می‌شود [6]. لایه واسطه مس به دلیل مقرون به صرفه بودن، پایین بودن دمای ذوب، ایجاد استحکام اتصال نسبتاً مناسب و نیز رسانایی حرارتی بالایی که دارد، در مقایسه با سایر پرکننده‌ها نظیر نقره یا نیکل انتخاب مناسبی برای این کاربرد می‌باشد [7].

درجه حرارت، زمان نگهداری و اتمسفر کوره از پارامترهای مهم لحیم‌کاری سخت در کوره تحت خلأ می‌باشد. همچنین از مشکلات شناسایی شده در اتصالات لحیم‌کاری سخت می‌توان عیوبی مانند تخلخل، حفره‌ها و تشکیل فازهای بین‌فلزی مضر را نام برد. جنبه‌های تعیین‌کننده یک اتصال مناسب به روش لحیم‌کاری سخت، ذوب فلز پرکننده و عدم تشکیل فازهای مضر

در درز اتصال است. فلز پرکننده که می‌تواند خالص و یا آلیاژی باشد، با قرارگیری بین سطوح مواد پایه اتصال را برقرار می‌سازد. همچنین برای جلوگیری از تشکیل فازهای ناخواسته و مضر، اتصال در اتمسفر خلأ ترجیح داده می‌شود [8].

های (Hye) و همکارانش [9] لحیم‌کاری سخت آلیاژ مس-کروم و فولاد زنگ‌نزن دوپلکس توسط فلز پرکننده مسی در شرایط مختلف دمایی و زمانی تحت خلأ بالا را بررسی کردند که نتایج آن‌ها نشان داد در دماهای پایین نیز فازهای Mn-Fe، Mn-Cr و Cu-Mn تشکیل شده و با افزایش زمان نگه‌داری، فاز Mn-Fe به Cr-Fe تبدیل شده و فاز Mn-Cr و Cu-Mn افزایش یافت. همچنین فلز پرکننده به فصل مشترک فاز  $\alpha/\gamma$  فلز پایه نفوذ نموده و فاز  $\gamma$  را به  $\alpha$  تبدیل کرده است. مقاومت برشی اتصال نیز نصف استحکام کششی آلیاژ مس-کروم تخمین زده شد. در پژوهشی دیگر، سواتی (Swathi) و همکارانش [10] لحیم‌کاری سخت فولاد زنگ‌نزن و آلیاژ مس با استفاده از فلز پرکننده مس تحت خلأ بالا و شرایط دمایی و زمانی مختلف را مورد مطالعه قرار دادند. بررسی‌های ریزساختاری و مکانیکی نشان داد با افزایش دما تا حد بهینه به دلیل افزایش نفوذ عنا صر، اتصال یکنواخت‌تر و مقاومت برشی اتصال افزایش می‌یابد.

در مطالعه‌ای دیگر، ژو (Zhu) و همکارانش [11] اتصال لحیم‌کاری سخت فلزات پایه HNS و  $\text{Cu}$  را با فلز پرکننده Ag-Cu در کوره خلأ بالا برای مدت زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار دادند. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد اتصال  $\text{Cu}/\text{Cu}$  شامل  $\beta\text{-Cu}$  و یوتکتیک Ag-Cu صاف و اتصال HNS/HNS شامل  $\alpha\text{-Ag}$  و یوتکتیک Ag-Cu دندانه شکل بود. همچنین با افزایش زمان، میزان پهنای اتصال در اتصال HNS/HNS کاهش یافته اما در اتصال  $\text{Cu}/\text{Cu}$  تغییر چندانی نکرده بود. میزان مقاومت برشی اتصال HNS/HNS از اتصال  $\text{Cu}/\text{Cu}$  بیشتر بود. اتابکی (Atabaki) و همکارانش [12] نیز صفحات فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ را توسط پرکننده مس خالص به روش لحیم‌کاری سخت نفوذی تحت خلأ بالا در دماها و زمان‌های مختلف اتصال دادند. بررسی‌های ریزساختاری نشان داد یوتکتیک  $\gamma\text{Fe}$  و فازهای بین‌فلزی در اتصال تشکیل شده و با افزایش زمان، میزان نفوذ افزایش پیدا کرده و میزان نفوذ مس

### مواد و روش پژوهش

برای این پژوهش از ورق‌های فولاد زنگ نزن ۳۱۶L و مس خالص استفاده گردیده که در جدول (۱) ترکیب شیمیایی آن‌ها آورده شده است. همچنین نتایج آنالیز حرارتی افتراقی (DTA) (Differential Thermal Analysis) برای تعیین نقطه ذوب فلز پرکننده مسی نیز در شکل (۱) آورده شده است که نشان داد دمای ذوب آن ۱۰۱۴ درجه سانتی‌گراد بود. ابعاد ورق‌های فولاد زنگ نزن ۳۱۶ و مس برابر ۳۵\*۲۰ میلی‌متر و به ترتیب با ضخامت ۰,۶ میلی‌متر و ۵۰ میکرون بودند.

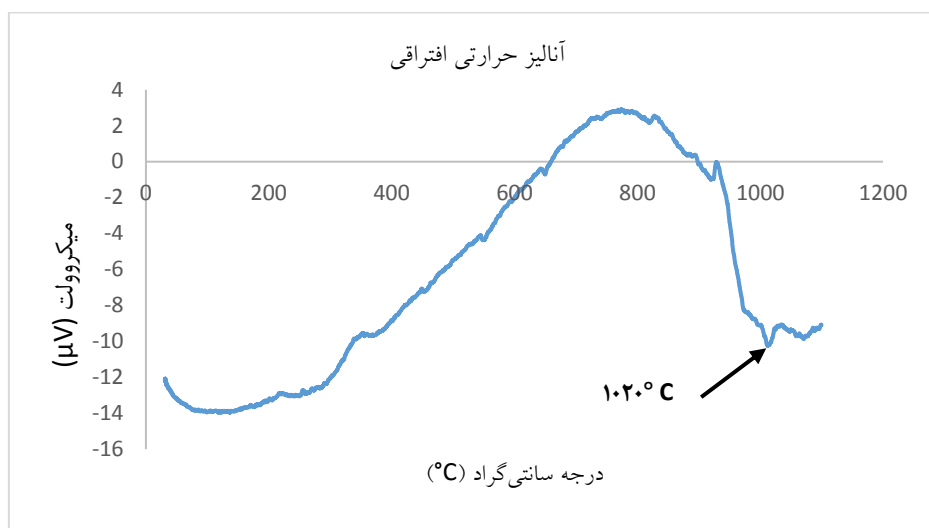
این ورق‌ها به صورت یکی در میان کنار هم به شکل دو نوع نمونه یکی به صورت دولایه فولاد ۳۱۶ و یک ورق مسی و دیگری به صورت پنج لایه فولاد ۳۱۶ و چهار لایه مسی داخل فیکسچر قرار گرفتند و در کوره خلأ با فشار ۱۰<sup>-۳</sup> میلی‌بار گذاشته شدند. آزمایش‌ها در دو دمای ۱۰۷۰ و ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، مدت زمان‌های ۶۰،۳۰ و ۹۰ دقیقه و فشار ۵ مگاپاسکال انجام شد. سپس نمونه‌ها بعد از برش و مانت، متالوگرافی و الکترواچ شدند و تصاویر نوری از ریزساختار درز اتصال گرفته شد. سپس جهت بررسی مقایسه میزان نفوذ عناصر در امتداد درز اتصال، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (Scanning Electron Microscope) (SEM) همراه با آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس و نیز برای تعیین نوع فازهای ایجاد شده از آزمون تفرق اشعه ایکس (X-Ray Diffraction Analysis) (XRD) استفاده شد. برای اندازه‌گیری ضخامت لایه نفوذ و میانگین اندازه دانه نیز از نرم افزار MIP استفاده شد. همچنین آزمون ریزسختی سنجی هم روی نمونه‌ها صورت گرفت.

از طریق مرز دانه بسیار بیشتر از نفوذ از طریق شبکه بود. ژانگ (Zheng) و همکارانش [13] ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال لحیم‌کاری سخت فولاد زنگ نزن و آلومینیوم-برنز توسط پرکننده مس آلیاژی را بررسی نمودند. در درز اتصال محلول جامدهای Cr-Ni و Ni-Mn تشکیل شده بود. همچنین با افزایش دما، ضخامت لایه واکنشی و مقاومت برشی اتصال افزایش یافته بود. در مطالعه‌ای دیگر، فوکیکوشی (Fukikoshi) و همکارانش [14] فولاد زنگ نزن ۳۰۴ را به مس توسط دو آلیاژ پرکننده متفاوت نقره-مس با لحیم‌کاری سخت تحت گاز آرگون متصل نمودند. آن‌ها نتیجه گرفتند تغییر درصد نقره از ۷۲ به ۵۰ درصد تأثیری بر میزان سیالیت آلیاژ نقره-مس ندارد و می‌توان از درصد‌های کمتر نقره استفاده کرد.

بیشتر تحقیقات انجام شده تاکنون روی اتصالات دولایه آلیاژهای مختلف بوده است و تحقیقات کمتری شرایط لحیم‌کاری در حالت اتصال ساندویچی را بررسی کرده‌اند. در این پژوهش، صفحات فولاد زنگ نزن ۳۱۶L به کمک فلز پرکننده مسی به روش لحیم‌کاری سخت به یکدیگر متصل شدند. در این فرآیند، لایه‌های فولاد زنگ نزن توسط فلز پرکننده مسی به صورت ساندویچی تحت خلأ بالا و فشارهای نسبتاً پایین متصل گردیدند. تأثیر دما و زمان فرآیند بر روی کیفیت درز اتصال توسط میکروسکوپ نوری از نظر پیوستگی بررسی شد. همچنین برای بررسی نفوذ عناصر از طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) (Dispersive X-ray Spectroscopy Energy) استفاده گردید. در این کار با تغییر متغیرهای دما و زمان سعی شده است بهترین شرایط برای یک اتصال مناسب، یکپارچه و مستحکم را فراهم آورد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد ۳۱۶L و مس

Zn	C	Mo	Si	P	S	Mn	Ni	Cr	Cu	Fe	درصد عناصر
-	0.03	2.5	1	0.03	0.02	2	13.3	16.7	-	پایه	فولاد ۳۱۶L
۰,۰۳	-	-	-	0.6	-	-	۰,۰۰۰۵	-	پایه	۰,۰۰۳	مس



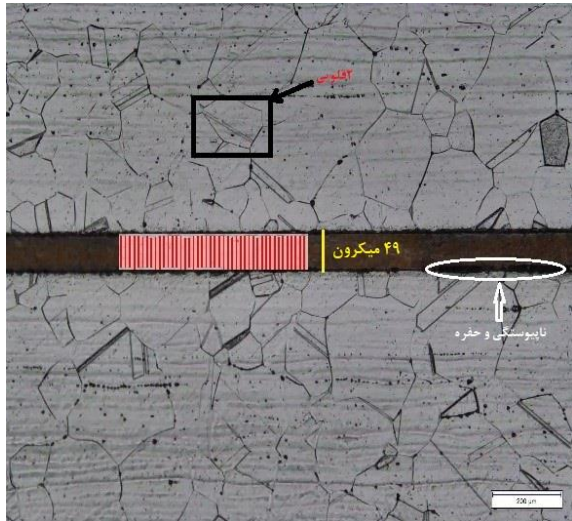
شکل ۱ آنالیز حرارتی افتراقی پرکننده مسی

نمایش می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۳) مشاهده می‌گردد، فلز پایه تو سطر فلز پرکننده انحلال یافته و فصل مشترکی دندان‌های شکل ایجاد نموده است. در واقع با برهمکنش مایع و جامد، هنگامی که مرزدانه، فصل مشترک مایع و جامد را قطع می‌کند، به‌منظور دستیابی به تعادل انرژی بین دو فصل مشترک، نفوذ مایع در امتداد مرزدانه رخ می‌دهد و منجر به ایجاد یک شیار می‌گردد. شیاردار شدن مرزدانه‌ها، میزان نفوذ عناصر حل شونده را به علت منحنی شکل بودن فصل مشترک مایع/جامد و افزایش نفوذ مرزدانه‌ای، افزایش می‌دهد. لذا، از آنجایی که انحنا فصل مشترک باعث افزایش حل شونده می‌شود، انحلال‌پذیری با کاهش اندازه دانه فولاد زنگ‌نزن افزایش می‌یابد. بر این اساس، با مقایسه اندازه دانه نمونه‌ها در دو دمای ۱۰۷۰ و ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، می‌توان نتیجه گرفت که با کاهش اندازه دانه، انحلال‌پذیری افزایش یافته و فصل مشترک زمینه/پرکننده غیریکنواخت است. همچنین با افزایش انحنا فصل مشترک ناشی از افزایش دما از ۱۰۷۰ به ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، میزان جریان یافتن مذاب به داخل زمینه افزایش پیدا می‌کند. پس از شیاردار شدن مرزدانه‌ها، فلز زمینه داخل مذاب مس تا زمانی که در دمای لحیم‌کاری سخت به یک ترکیب تعادلی برسد، انحلال می‌یابد. در این هنگام یک فاز آهن با درصد کربن بالا تشکیل می‌شود که این فاز در مذاب مس از میزان تعادلی انحلال خود بیشتر می‌گردد. بنابراین این فاز به صورت ترکیبی از Fe-Cu-C در فصل مشترک فلز زمینه-پرکننده رسوب می‌نماید که عامل آن نفوذ مس در فولاد زنگ‌نزن است [12].

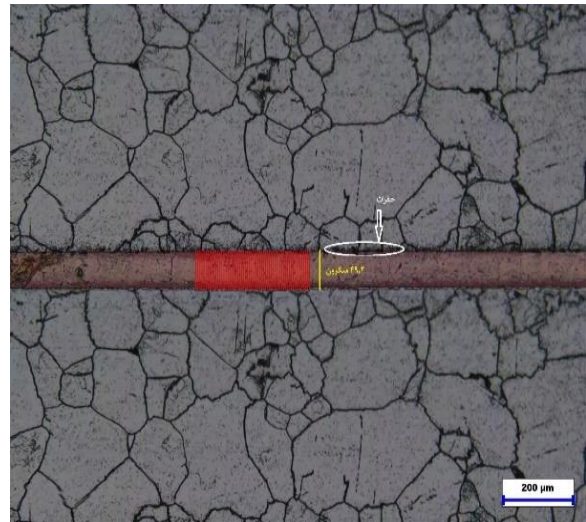
### نتایج و بحث

با توجه به شکل‌های (۲-الف) و (۲-ب) مشاهده می‌گردد که دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی‌گراد برای این اتصال کافی نبوده و فلز پرکننده مسی به داخل زمینه فولادی به اندازه کافی نفوذ نکرده است و حفرات و ناپیوستگی‌ها به وضوح قابل مشاهده‌اند؛ اما در شکل‌های (۲-ج) و (۲-د) برای اتصال‌دهی در دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، پرکننده مسی در زمینه نفوذ کرده است. همچنین با در نظر گرفتن نفوذی بودن فرآیند و ضخامت اولیه ۵۰ میکرونی لایه واسطه مسی، با مقایسه تصاویر می‌توان دریافت که پهنای ناحیه اتصال پس از نفوذ مس به زمینه فولادی از محدوده ۴۹،۳-۴۹ میکرون به ۳۳-۳۵ میکرون کاهش پیدا کرده است. طبق نمودار زمان-دما-استحاله عملیات حرارتی فولاد زنگ‌نزن آستنیتی، گرم کردن زمینه فولادی حین فرآیند اتصال‌دهی در دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی‌گراد، موجب انحلال کاربیدهای کروم می‌گردند. این موضوع توسط دیگر محققان هم گزارش شده است [15]. با افزایش دما تا ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد علاوه بر افزایش سرعت انحلال کاربیدها، با مقایسه میانگین اندازه دانه شکل (۲-الف) با (۲-ج) که از ۲۰۰ به ۹۹ میکرومتر و شکل (۲-ب) با (۲-د) که از ۲۱۴ به ۹۵ میکرومتر کاهش یافته، می‌توان دریافت که اندازه دانه‌ها کوچک و تبلور مجدد ثانویه [15] نیز اتفاق افتاده است.

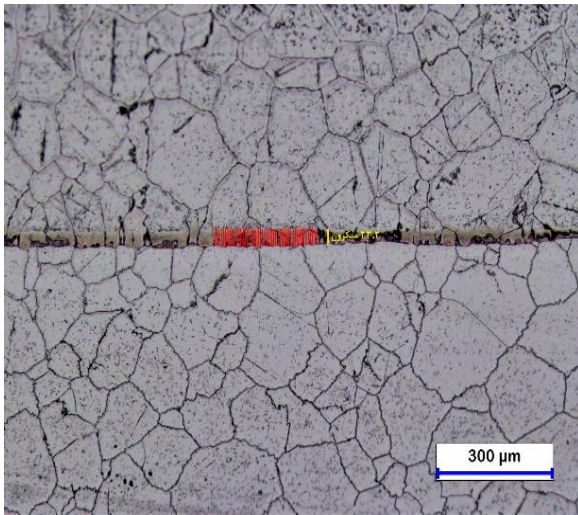
شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی درز اتصال برای نمونه‌های ۱۰۷۰-۶۰ دقیقه و ۱۱۲۰-۶۰ دقیقه را



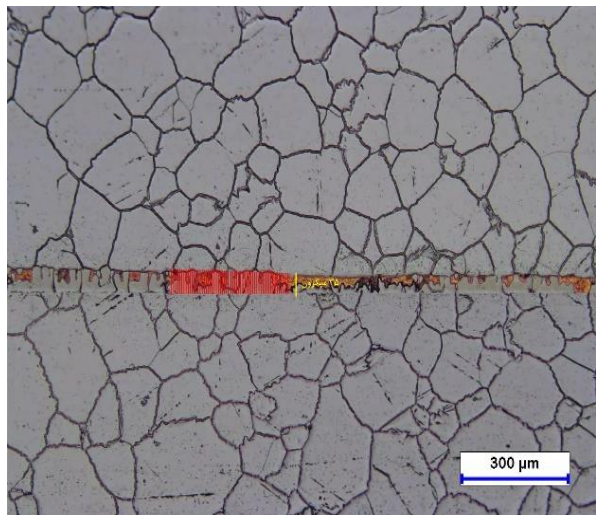
(ب)



(الف)

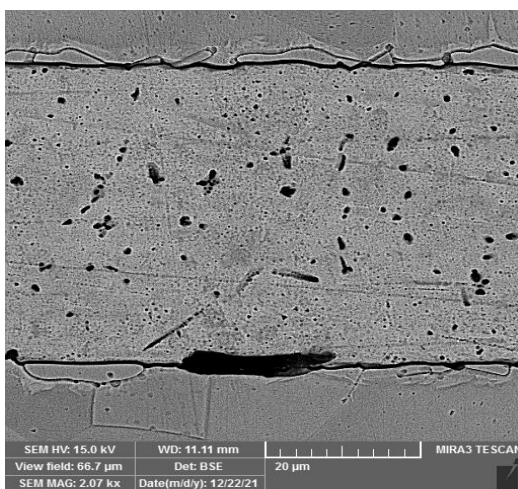


(د)

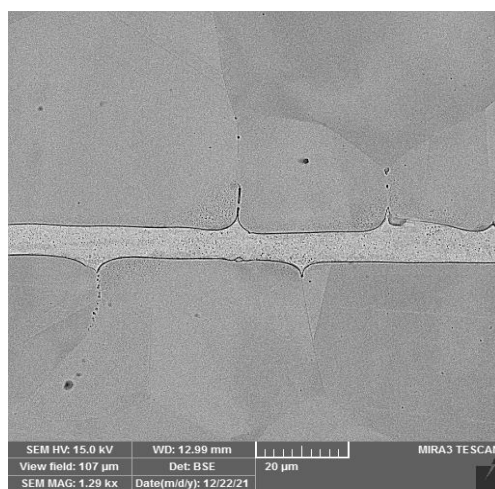


(ج)

شکل ۲ تصاویر نوری از درز اتصال نمونه‌های: (الف) ۲ لایه، (ب) ۵ لایه در دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی‌گراد و نمونه‌های: (ج) ۲ لایه، (د) ۵ لایه در دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به مدت زمان ۶۰ دقیقه



(ب)



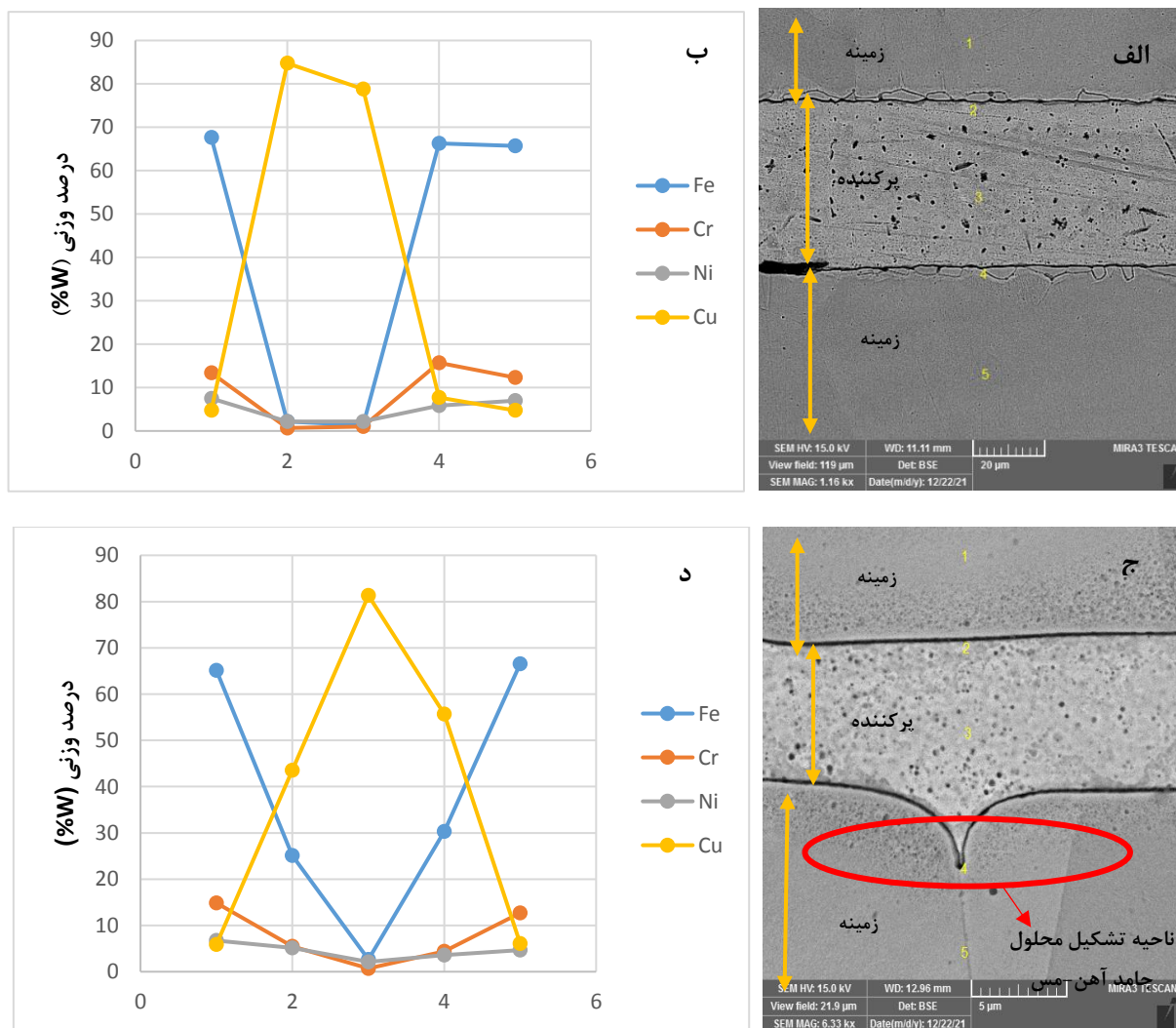
(الف)

شکل ۳ افزایش انحنای مرزدانه با افزایش دما در نمونه‌های: (الف) ۶۰-۱۰۷۰ دقیقه و (ب) ۶۰-۱۱۲۰ دقیقه

عناصر افزایش یافته و مس از فلز پرکننده به فلز پایه نفوذ می‌کند. همچنین عناصر آهن، کروم و نیکل نیز از فلز پایه به فلز پرکننده مسی نفوذ کرده که این خود باعث بهبود پیوند می‌گردد. همچنین شیاردار شدن مرزخانه‌ها با افزایش دما از ۱۰۷۰ به ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، میزان نفوذ عناصر آلیاژی اصلی را به علت منحنی شکل بودن فصل مشترک مایع/جامد و افزایش نفوذ مرزخانه‌ای، افزایش داده است. لذا با توجه به ریزدانه‌تر بودن نمونه ۱۱۲۰-۶۰ دقیقه نسبت به نمونه ۱۰۷۰-۶۰ دقیقه، میزان نفوذ در این نمونه بیشتر است. پس می‌توان استنباط کرد که دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد برای نفوذ عناصر کافی است تا بتواند پیوند خوبی را بدون تشکیل هیچ‌گونه ترکیب بین فلزی ایجاد کند [16].

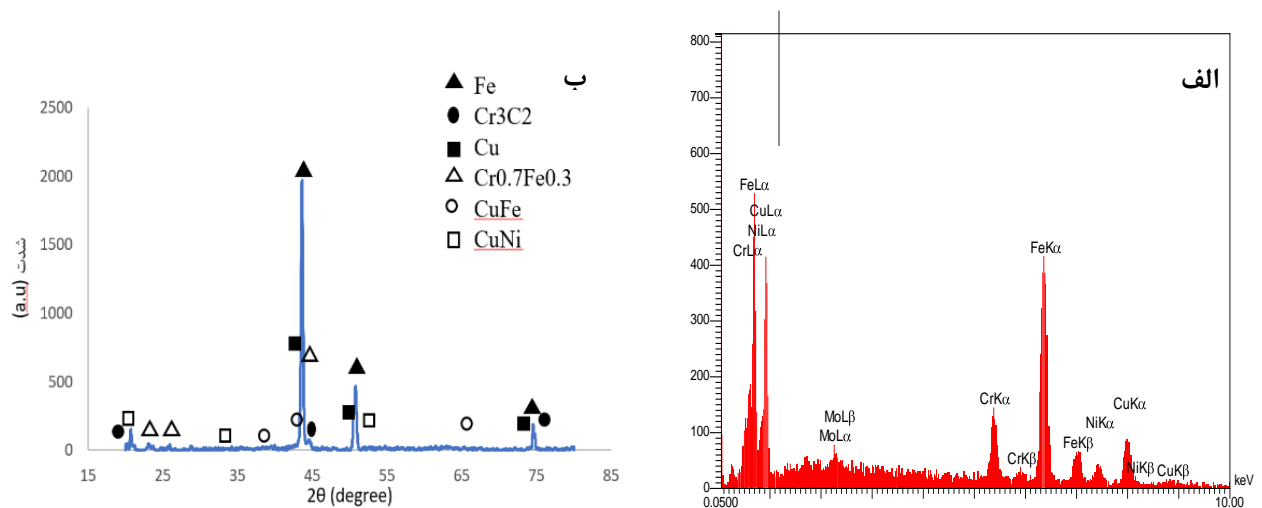
شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس در امتداد درز اتصال نمونه‌های ۱۰۷۰ و ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد و ۶۰ دقیقه را نمایش می‌دهد. به دلیل حلالیت کم آهن در مس در دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی‌گراد در لایه واسطه، تنها مقدار کمی آهن و کروم مشاهده می‌شود. اما حلالیت آهن در مس با افزایش دمای لحیم کاری به ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد. در واقع مس در فصل مشترک فولاد/فلز پرکننده مسی شروع به انحلال آهن کرده و به طور پیوسته به زمینه نفوذ می‌کند. می‌توان فرض کرد که در لایه نفوذی، ترکیبی از Cu و  $\gamma$ Fe موجود است [16].

همچنین مقایسه شکل‌های (۴-ب) با (۴-د) نشان داد که افزایش دما، باعث افزایش ارتعاشات اتمی شده و در پی آن نفوذ



شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نمودار آنالیز طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس به صورت خطی نمونه‌های: (الف و ب) ۱۰۷۰-۶۰°C، (ج و د) ۱۱۲۰-۶۰°C دقیقه





شکل ۵ (الف) تحلیل طیف سنجی پراکندگی انرژی پرتو ایکس و (ب) تفرق پرتو ایکس

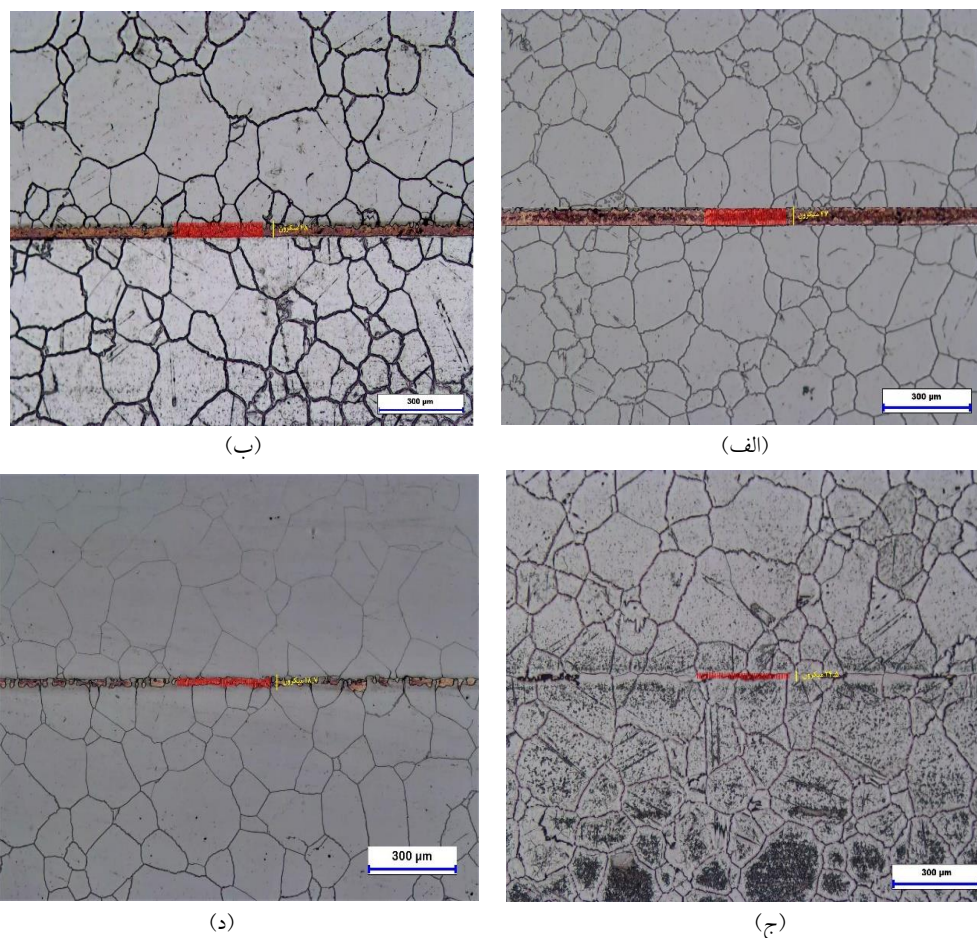
انحلال فلز پایه ناشی از افزایش زمان، فصل مشترک لایه واسطه/زمینه با Cu و Fe غنی شده است. به عبارتی دیگر، اتم‌های Fe و Cr که از فلز پایه می‌آیند، به فاز Fe-Cr تبدیل شده که با افزایش زمان نگهداری مقدار این فاز افزایش می‌یابد [13].

شکل (۷) توزیع عناصر در اتصال لحیم‌کاری سخت ۳۱۶/مس ۳۱۶ به دست آمده توسط آنالیز طیف سنجی پراش پرتو ایکس به صورت نقشه‌ای را ارائه می‌دهد. همان‌طور که در نتایج مشخص است در زمان ۳۰ دقیقه میزان نفوذ عناصر تقریباً صفر است و با گذشت زمان تا ۹۰ دقیقه نفوذ عناصر بیشتر شده و توزیع یکنواخت‌تری را به دست داده است.

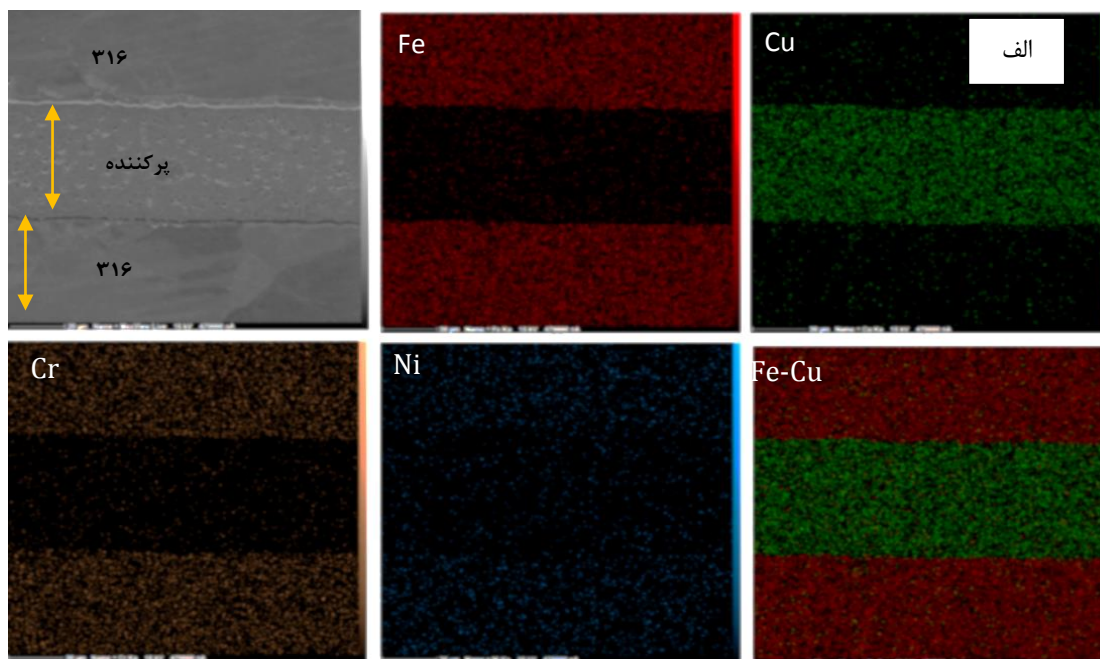
شکل (۸) نمودار سختی و مرکز نمونه‌های ۲ و ۵ لایه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، سختی نمونه‌های دولایه به علت کوچک‌تر بودن اندازه دانه آن‌ها، بالاتر از نمونه‌های ۵ لایه بود. همچنین بیشترین میزان سختی مربوط به نمونه ۹۰-۱۱۲۰ بود، که علت را می‌توان این‌طور بیان نمود این نمونه در مقایسه با سایر نمونه‌ها بیشترین دما و زمان اتصال برای نفوذ بیشتر عناصر و کمترین متوسط اندازه دانه را داشت. با مشاهده نتایج سختی سنجی نمونه‌های ۲ و ۵ لایه می‌توان دریافت که دمای  $1070^{\circ}\text{C}$  در نمونه ۶۰-۱۰۷۰ و زمان ۳۰ دقیقه در دمای  $1120^{\circ}\text{C}$  کافی نبوده و سختی قطعات نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر است.

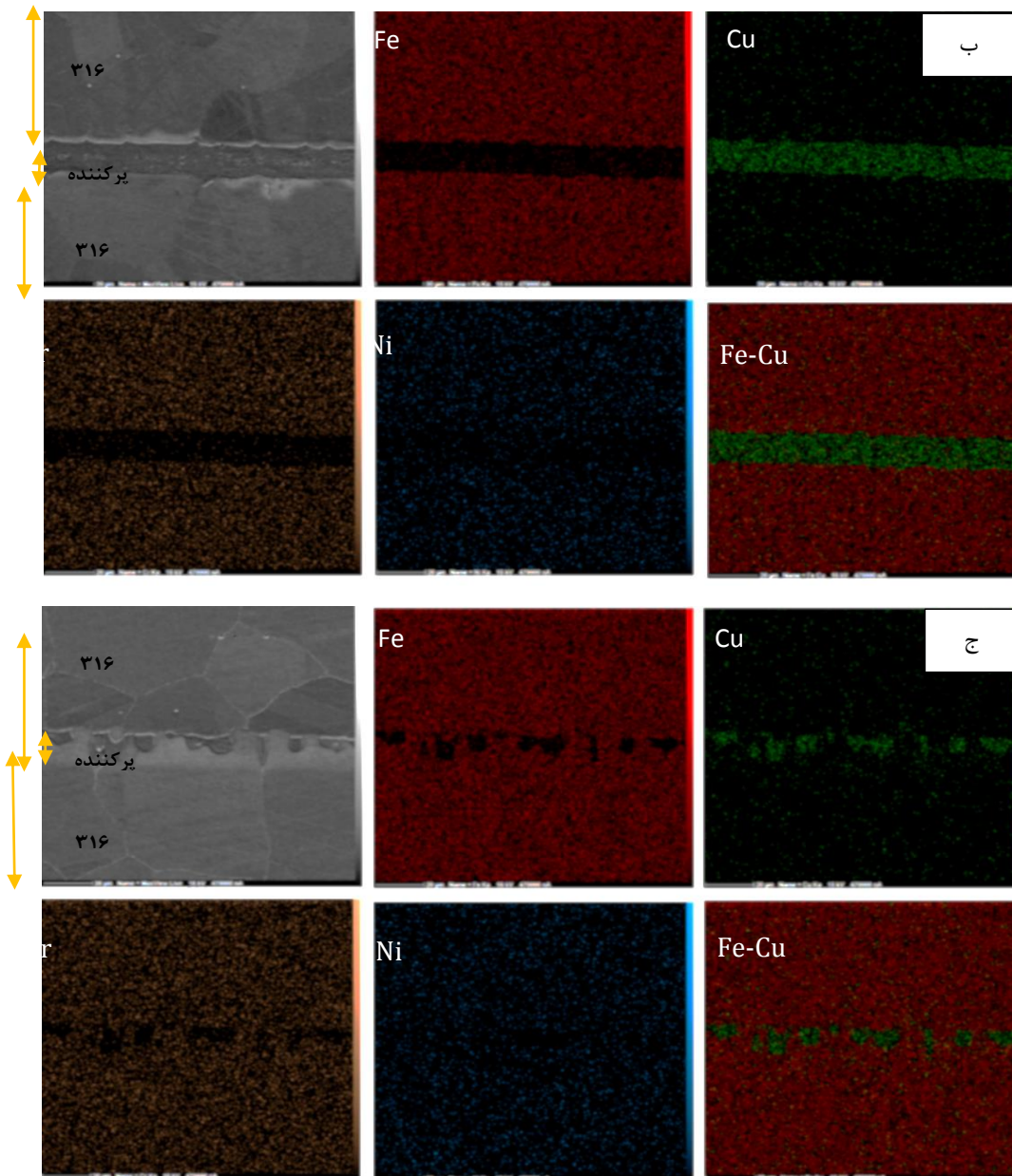
شکل (۶) تصاویر میکروسکوپ نوری از نمونه‌های دو و پنج لایه در زمان‌های نگهداری ۳۰ و ۹۰ دقیقه و دمای ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد را نمایش می‌دهد. در شکل‌های (۶-الف) و (۶-ب) واضح است که مدت زمان ۳۰ دقیقه برای نفوذ کافی نبوده و اتصال به خوبی انجام نشده است و پهنای ناحیه اتصال به ترتیب ۴۷ و ۴۸ میکرون تقریباً برابر ضخامت اولیه لایه پرکننده مسی می‌باشد. در مدت زمان ۹۰ دقیقه (شکل‌های ۶-ج و ۶-د) نفوذ کاملاً صورت گرفته، پهنای باند اتصال به ترتیب به ۱۸٫۷ و ۲۴٫۵ میکرون کاهش پیدا کرده که نشانگر نفوذ مس به زیرلایه فولادی بوده و اتصالی مناسب را به دست داده است. مشاهده می‌شود که زمان ۳۰ دقیقه برای اتصال کافی نبوده و در مقایسه با زمان ۹۰ دقیقه، ضخامت لایه واسطه مسی به میزان حدود ۵۵ درصد کاهش یافته است. میانگین اندازه دانه در نمونه‌های دولایه و پنج لایه نیز با افزایش زمان به ترتیب از ۱۱۹ و ۱۲۶ میکرون به ۷۴ و ۹۴ میکرون کاهش یافته است. با توجه به میزان نفوذ و تغییر پهنای ناحیه اتصال و اندازه دانه به نظر می‌رسد اتصال انجام شده در زمان ۹۰ دقیقه شرایط بهتری داشته است.

در مرحله اولیه لحیم‌کاری سخت، لایه واسطه مس تقریباً ذوب شده و سپس فولاد زنگ‌نزن از طریق مهاجرت مس مایع به فلز پایه حل می‌شود. در نتیجه، برخی از مرزهای دانه فولاد مجاور لایه مس شیاردار شده و Cr و Fe از سمت فلز پایه به ناحیه اتصال و اتم‌های مس از لایه ذوب شده به منطقه انحلال نفوذ می‌کنند و با Fe و Cr در طول فصل مشترک واکنش می‌دهد. با افزایش

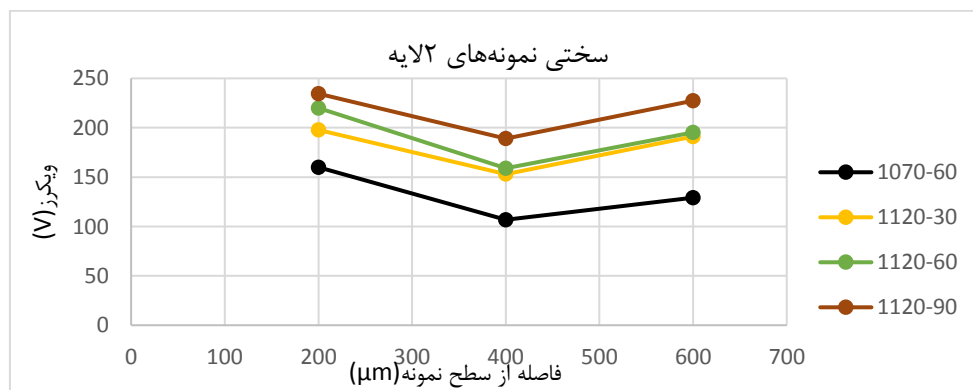


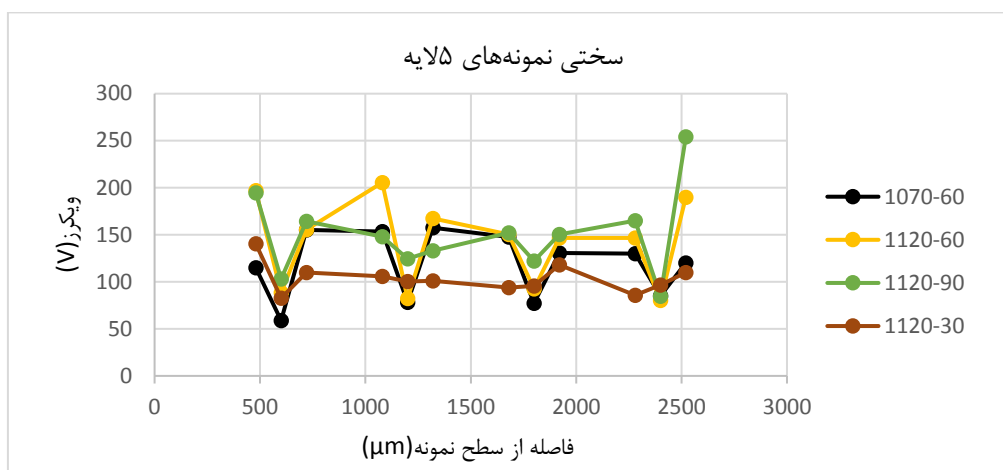
شکل ۶ تصاویر نوری از درز اتصال نمونه‌های: (الف) ۲ لایه، (ب) ۵ لایه با زمان نگهداری ۳۰ دقیقه، و نمونه‌های: (ج) ۲ لایه، (د) ۵ لایه با زمان نگهداری ۹۰ دقیقه در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد





شکل ۷ تصویر آنالیز طیف سنجی نقشه‌ای نمونه‌های: (الف)  $30^{\circ}\text{C}$ - $1120$  دقیقه، (ب)  $60^{\circ}\text{C}$ - $1120$  دقیقه و (ج)  $90^{\circ}\text{C}$ - $1120$  دقیقه





شکل ۸. سختی سنجی درز اتصال نمونه‌های: (الف) ۲ لایه، (ب) ۵ لایه

مس به زیرلایه فولادی کاهش یافت. همچنین با افزایش زمان از ۶۰ به ۹۰ دقیقه ضخامت لایه مس و میانگین اندازه دانه کاهش پیدا کرد. لذا به نظر می‌رسد که زمان ۹۰ دقیقه بهترین شرایط اتصال‌دهی را مهیا می‌کند.

۳. سختی اتصالات دو لایه با پنج لایه نمونه‌ها به دلیل تفاوت اندازه دانه آن‌ها با یکدیگر متفاوت بود. در واقع نمونه‌های دولایه با متوسط اندازه دانه کمتر، سختی بالاتری داشتند.

### تقدیر و تشکر

در اینجا نویسندگان از شرکت طاهای قالب توس جهت حمایت از این پژوهش تشکر می‌کنند.

### نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه تأثیر دما و زمان نگه‌داری در کوره بر اتصال ساندویچی فولاد زنگ نزن 316 L به روش لحیم‌کاری سخت با استفاده از فلز پرکننده مسی خالص بررسی گردید. نتایجی که از این مطالعه می‌توان گرفت عبارتند از:

۱. دمای ۱۰۷۰ درجه سانتی‌گراد نسبت به ۱۱۲۰ درجه سانتی‌گراد جهت اتصال فولاد به لایه واسطه مس کافی نبوده و نتوانست اتصال مناسبی برقرار کند. با افزایش دما نفوذ عناصر افزایش پیدا کرد و پهنای ناحیه اتصال کاهش یافت.

۲. زمان ۳۰ دقیقه برای اتصال کافی نبوده و در مقایسه با آن، در زمان ۹۰ دقیقه ضخامت ناحیه اتصال حدود ۵۵٪ بر اثر نفوذ

### مراجع

- [1] H. Palkowski, O. A. Sokolova, A. Carrado, Eds., *Encyclopedia of Automotive Engineering*, Wiley Online Library, 2013.
- [2] R. Iwaikowicz, R. Rutkowski, T. Graczyk, "Review of joining methods of sandwich panels in ship construction", *Transactions on the Built Environment*, vol. 68, pp. 10-19, 2003.
- [3] J. Cao, J. L. Gerenstedt, "Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, pp. 1091-1105, 2004.
- [4] M. Hietala, A. S. Hamada, M. Keskitalo, M. Jaskari, "Mechanical characterization of laser-welded double-lap joints in ultra-high and low strength steels for sandwich panel applications", *Materials Today: Proceedings*, vol. 28, pp. 2-7, 2019.
- [5] J. E. Hesselgreaves, *Compact Heat Exchangers: Selection, Design and Operation*, Oxford: Pergamon Press, 2001.
- [6] D. M. Jacobson, G. Humpston, *Principles of Brazing*, Ohio: ASM International, 2005.

- [7] ASME, *BPVC Section II-Materials-Part C-Specifications for Welding Rods, Electrodes, and Filler Metals*, New York: ASME, 2021.
- [8] Y. Yao, Y. Han, K. Zhang, H. Zhu, W. Zhang, H. Qian, C. Zhou, L. Zhang, "The dependence of fracture mode on interfacial microstructure in TA1 pure titanium/AgCuNi/304 stainless steel vacuum brazed joints", *Vacuum*, vol. 203, 111318, 2022.
- [9] H.S. Na, J.K. Kim, B.Y. Jeong, C.Y. Kang, "Effect of Brazing Conditions on the Microstructure and Mechanical Properties of Duplex Stainless Steels to Cr-Cu Alloy with Cu-Base Insert Metal", *Metals and Materials International*, vol. 13, pp. 511-515, 2007.
- [10] M. S. Kiranmayee, A. K. Jha, S. K. Manwatkar, D. P. Sudhakar, P. R. Narayanan, K. Sreekumar, P. P. Sinha, "Microstructural Characterisation of Copper- Stainless Steel brazed joint with Copper based filler metal", *Materials Science*, vol. 710, pp. 650-655, 2012.
- [11] W. Zhu, H. Zhang, C. Guo, Y. Liu, X. Ran, "Wetting and brazing characteristic of high nitrogen austenitic stainless steel and 316L austenitic stainless steel by Ag-Cu filler", *Vacuum*, vol. 166, pp. 97-106, 2019.
- [12] M. M. Atabaki, J. N. Wati, J. Idris, "Transient Liquid Phase Diffusion Brazing of Stainless Steel 304", *Welding Journal*, vol. 92, pp. 57-63, 2013.
- [13] Y. Zheng, N. Li, J. Yan, Y. Cao, "The microstructure and mechanical properties of 1Cr17Ni2/QA17 brazed joints using Cu-Mn-Ni-Ag brazing alloy", *Materials Science and Engineering A*, vol. 661, pp. 25-31, 2016.
- [14] T. Fukikoshi, Y. Watanabe, Y. Miyazawa, F. Kanasaki, "Brazing of copper to stainless steel with a low-silver-content brazing filler me", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 61, article id. 012016, 2014.
- [15] S. A. Sajjadi, *Fundamentals and applications of steels heat treatment*, Mashhad: Vazhgan Kherad, 2014 (In Persian).
- [16] W. Jiang, J. Gong, S. T. Tu, "A study of the effect of filler metal thickness on tensile strength for a stainless steel plate-fin structure by experiment and finite element method", *Materials and Design*, vol. 31, pp. 2387-2396, 2010.

