



بهینه‌سازی استحکام برشی اتصالات لحیم‌کاری سخت فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ با استفاده از پرکننده پایه نیکل BNi-2 به روش رویه پاسخ

میثم نوری نیارکی^{۱*}، محمدرضا عیسنوند زیبائی^۲، جابر میرزایی^۱

^۱ دکتری، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد اندیمشک، دانشگاه آزاد اسلامی، اندیمشک، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

چکیده

در این تحقیق به بررسی شرایط بهینه در تأثیر پارامترهای دما، زمان و درز اتصال در اتصالات لحیم‌کاری سخت فولاد زنگ نزن ۴۲۰ با فلز پرکننده پایه نیکل BNi-2 روی استحکام برشی نمونه‌های لب روی لب به روش رویه پاسخ پرداخته شده است. پارامترهای دما، زمان و درز اتصال از طریق طراحی آزمایش به روش باکس بنکن تعیین شدند، بطوریکه ضخامت آلیاژ پایه نیکل BNi-2 در این تحقیق ۰/۰۴، ۰/۰۷ و ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، آن‌ها در دماهای ۱۰۰۰ °C، ۱۰۷۰ °C، ۱۱۴۰ °C در زمان ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دقیقه در کوره خلأ قرار گرفتند. آزمون مکانیکی کشش برای تعیین استحکام برشی اتصالات انجام شد. مشاهده شد که افزایش درز اتصال از ۰/۰۴ تا ۰/۱ میلی‌متر باعث کاهش ۱۴ درصدی استحکام برشی گردید؛ همچنین افزایش دمای کوره از ۱۰۰۰ °C تا ۱۱۴۰ °C باعث افزایش ۲۱ درصدی استحکام برشی و افزایش زمان کوره از ۱۰ تا ۵۰ دقیقه باعث افزایش ۲۷ درصدی استحکام برشی شده است. در انتها با بهینه‌سازی به روش رویه پاسخ مشاهده گردید که اتصالی با درز اتصال ۰/۰۴ میلی‌متر، دمای ۱۱۰۹/۸۴ °C و زمان ۴۶/۵۸ دقیقه دارای بیشترین استحکام برشی به مقدار ۱۶۴/۴۲۹ مگاپاسکال است.

کلمات کلیدی: بهینه‌سازی؛ لحیم‌کاری سخت؛ استحکام برشی؛ آلیاژ پایه نیکل BNi-2؛ روش رویه پاسخ.

Optimization of Shear Strength of 420 Stainless Steel Brazing Joints Using BNi-2 by Response Surface Methodology

Meysam Nouri Niyaraki^{1,*}, Mohammad Reza Isvandzibaei², Jaber Mirzaei¹

¹ Ph.D, Faculty of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University, Tehran, Iran

² Assist. Prof., Department of Mechanical Engineering, Andimeshk Branch, Islamic Azad University, Andimeshk, Iran

Abstract

In this research, the parameters of brazing temperature, time, and joint seam have been optimized in brazing joints of 420 stainless steel with BNi-2 filler metal on the shear strength of lap joint samples using response surface methodology. The parameters of brazing temperature, time, and joint seam were determined by the design of the experiment using the Benken box method. The thickness of BNi-2 filler metal was considered to be 0.04, 0.07, and 0.1 mm in this research. After preparing the samples, they were placed in a vacuum furnace at temperatures of 1000°C, 1070°C, and 1140°C for 10, 30, and 50 minutes. The mechanical tensile test was performed to determine the shear strength. It was observed that increasing the joint seam from 0.04 to 0.1 mm caused a 14% decrease in shear strength. Also, increasing the brazing temperature from 1000°C to 1140°C has increased the shear strength by 21%, and increasing the brazing time from 10 to 50 minutes has increased the shear strength by 27%. In the end, it was optimized that the maximum shear strength is 164.429 MPa in the joint seam of 0.04 mm, the temperature is 1109.84 °C and the time is 46.58 minutes.

Keywords: Optimization; Brazing; Shear Strength; BNi-2; Response Surface Methodology.

* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۰۹۱۲۹۷۵۲۴۷۷

آدرس پست الکترونیک: meysam_nouri05@yahoo.com

۱- مقدمه

لحیم‌کاری سخت از جمله روش‌های پیشرفته اتصال مواد است که توسط آن می‌توان طیف وسیعی از مواد هم‌جنس و غیرهم‌جنس فلزی یا سرامیکی را به هم متصل نمود. در این روش اتصالات متنوع با دسترسی نامناسب و غیر همگن را که توسط روش‌های معمول جوشکاری امکان تولید آن‌ها فراهم نمی‌باشد با کمترین صدمه به فلز زمینه می‌توان تولید نمود [۱].

در مقایسه این روش با روش‌های دیگر اتصالات از جمله اتصالات پیچی، چسبی و پرچی می‌توان به این موضوع اشاره کرد که در اتصالات لحیم‌کاری شده قطعات به صورت پیوسته و دائمی به یکدیگر متصل شده‌اند، در صورتیکه در اتصالات دیگر قطعات به صورت ناپیوسته و موقت می‌باشند؛ همچنین روش لحیم‌کاری، اتصالات دارای استحکام بالا در برابر بارگذاری دینامیکی بوده و همچنین مقرون به صرفه نیز می‌باشند [۲-۴].

لحیم‌کاری سخت فولادهای زنگ‌نزن به دلیل خواص مقاوم به خوردگی و حرارتی آن‌ها در صنایع مختلف و بخصوص در صنایع هوافضا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و با توجه به گسترش روز افزون این صنایع در کشور، لازم است که با شناخت و آگاهی کامل از عوامل مؤثر بر ارتقاء کیفیت و استحکام اتصالات تهیه شده توسط این روش موجبات رشد و توسعه روز افزون و استقلال صنعتی جهان فراهم شود [۵].

لحیم‌کاری سخت به فرآیندی گفته می‌شود که در آن اتصال از طریق حرارت‌دهی قطعه کار تا دمای مناسبی (بالای 427°C) توسط فلز پرکننده آهنی یا غیر آهنی با نقطه ذوب بیش از 427°C و کمتر از نقطه ذوب فلز زمینه انجام می‌پذیرد که از طریق خاصیت موئینگی درز اتصال را پر می‌نماید [۶].

متغیرهایی که می‌توانند در لحیم‌کاری سخت اتصالات مختلف مؤثر باشند را می‌توان به مواردی همچون، ویژگی‌های فلز زمینه، ویژگی‌های فلز پرکننده، آماده‌سازی سطح، صافی سطح، طراحی اتصال، نرخ حرارت‌دهی، زمان لحیم‌کاری، دمای لحیم‌کاری، درز اتصال (ضخامت آلیاژ پرکننده) و نسبت ناحیه همپوشانی (مساحت سطح مقطع لحیم‌کاری شده) دسته‌بندی کرد [۷ و ۸]. در صنعت هوافضا، مجموعه‌های مواد سبک مقاوم در درجه حرارت بالا از اهمیت فراوانی برای طراحی و تولیدات

مافوق صوت دارند که این مجموعه‌ها توسط لحیم‌کاری سخت به یکدیگر اتصال پیدا می‌کنند. برای مثال در ساندویچ پنل‌های بدنه هواپیما برای اتصال لایه‌های ساندویچ پنل‌ها از لحیم‌کاری سخت استفاده می‌شود [۵]؛ همچنین در صنعت هوافضا برای اتصال قطعات موتور هواپیما از جمله اتصال پره‌های توربین‌ها و کمپرسورها از لحیم‌کاری سخت استفاده می‌شود [۹].

در صنایع خودروسازی نیز از لحیم‌کاری سخت استفاده می‌شود. برای مثال در تولید انواع مبدل‌های حرارتی جهت خنک‌کردن موتور، خنک‌کردن روغن، کولر ماشین و غیره استفاده می‌شود که برای کاهش وزن، در تولید این مبدل‌ها به جای مس از آلومینیوم استفاده می‌شود [۹].

با توجه به کاربرد وسیع لحیم‌کاری سخت، تحقیقات گسترده‌ای در مورد آن‌ها انجام شده است. شنگ^۱ و همکارانش [۱۰] به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی فولادهای فریلتی CB2 پرداختند که توسط آلیاژ پایه نیکل BNi-2 لحیم‌کاری سخت شده‌اند. آن‌ها ضخامت فلز پرکننده پایه نیکل را ۳۰ میکرومتر و ثابت در نظر گرفتند که دارای دمای ذوب بین ۹۷۰ تا 1020°C درجه سانتی‌گراد است. آن‌ها پارامتر دمای لحیم‌کاری سخت را روی نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با ثابت در نظر گرفتن زمان، افزایش دما از 1050°C تا 1150°C درجه سانتی‌گراد باعث افزایش ۳۲ درصدی استحکام کششی نمونه‌ها شده است؛ همچنین آن‌ها پارامتر زمان لحیم‌کاری سخت را بر روی نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با ثابت در نظر گرفتن دما، افزایش زمان از 1800 تا 7200 ثانیه باعث کاهش ۱۲ درصدی استحکام کششی نمونه‌ها شده است؛ همچنین آن‌ها بیشترین استحکام کششی را 934 MPa به دست آوردند که در دمای 1150°C درجه سانتی‌گراد و زمان 1800 ثانیه بوده است که ازدیاد طول تا شکست آن را $5/3\%$ است.

داودی و همکارانش [۱۱] به بررسی رفتار مکانیکی سوپر آلیاژهای فولادهای زنگ‌نزن IN718/IN600 به عنوان فلز زمینه و آلیاژ پایه نیکل BNi-2 به عنوان فاز پرکننده پرداختند که توسط لحیم‌کاری سخت به یکدیگر متصل شده‌اند. آن‌ها دما را بین 1050°C تا 1100°C درجه سانتی‌گراد و زمان را بین ۵ تا ۴۵ دقیقه در نظر گرفتند. آن‌ها بیشترین استحکام برشی را در دمای 1050°C درجه سانتی‌گراد و زمان ۴۵ دقیقه گزارش

^۱ Sheng

آن‌ها به این نتیجه رسیدند که نقره موجود در فلز پرکننده از انتشار ترک جلوگیری می‌کند و مانع از شکست می‌شود. یونینگ^۲ و همکارانش [۱۴] به بررسی اتصال بین لوله‌های فولادی زنگ‌نزن با استفاده از کوره خلأ پرداختند. آن‌ها دو نوع فولاد زنگ نزن 316L و PSS را که به شکل لوله بودند را به عنوان فلز زمینه و آلیاژ پایه نیکل BNi-7 را به عنوان فلز پرکننده استفاده کردند. آن‌ها برای اتصال نمونه‌ها، دما را در بازه ۹۳۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان را در بازه ۵ تا ۳۰ دقیقه در نظر گرفتند. آن‌ها درز اتصال در تمامی نمونه‌ها را ثابت و به اندازه ۶۰ میکرون در نظر گرفتند. آن‌ها نمونه‌ها را تحت بارگذاری کششی قرار دادند و گزارش کردند که بیشترین استحکام کششی در نمونه‌ای بوده است که در دمای ۹۸۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۵ دقیقه لحیم‌کاری شده و مقدار استحکام کششی را ۲۴۵ MPa گزارش کردند. سادمیر^۳ و همکارانش [۱۵] به بررسی تأثیر پارامترهای لحیم‌کاری سخت روی استحکام برشی اتصالات فولاد/سرامیک پرداختند. آن‌ها اتصالات لحیم‌کاری شده SiC به وسیله فلز پرکننده AgCuTi و آلیاژ SnAgTi را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نمونه‌ها را بعد از اتصال تحت بارگذاری برشی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نمونه‌هایی که با فلز پرکننده SnAgTi لحیم‌کاری شده‌اند، دارای استحکام برشی بالاتری می‌باشند. صارمی و همکارانش [۱۶] به بررسی شرایط بهینه لحیم‌کاری سخت غیرهمجنس تیتانیوم خالص تجاری به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ با استفاده از فلز پرکننده Bag-8 پرداختند. آن‌ها با توجه به اینکه این دو عنصر در یکدیگر حلالیت کامل ندارند و اتصال آن‌ها با روش‌های جوشکاری ذوبی مشکل است، لحیم‌کاری سخت را برای اتصال نمونه‌ها انتخاب و اتصال لب روی لب را در محدوده دمایی و زمانی مختلف انجام دادند. آن‌ها بعد از انجام آزمون‌های مکانیکی و بررسی ریزساختار نمونه‌ها به این نتیجه رسیدند که کاهش ضخامت فلز پرکننده باعث افزایش استحکام برشی در اتصالات شده است؛ همچنین آن‌ها گزارش کردند که با افزایش دما و زمان لحیم‌کاری سخت، استحکام برشی کاهش یافته که در نهایت بالاترین استحکام برشی را در دمای ۸۱۵ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۵ دقیقه گزارش کردند.

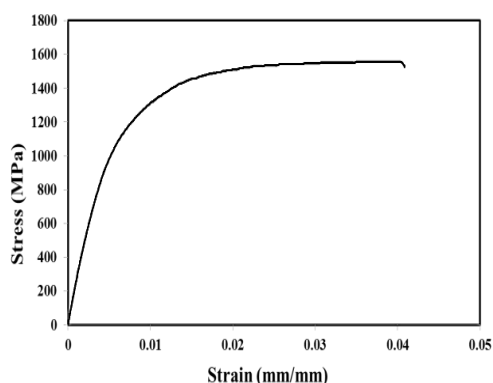
کردند که حدود ۴۱۰ MPa بوده است. سپس آن‌ها نمونه‌ها را جهت همگن‌سازی و از بین بردن فازهای میانی در دمای ۱۱۸۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۱۸۰ دقیقه در کوره قرار دادند و شاهد افزایش مجدد استحکام برشی تا ۵۶۰ MPa شدند. سلطانی طاشی و همکارانش [۱۲] به بررسی شکست نگاری اتصال غیرمشابه لحیم‌کاری سخت تحت خلأ تیتانیوم به فولاد زنگ نزن 316L با استفاده از فلز پرکننده AgCuZn پرداختند. آن‌ها با توجه به اینکه آلیاژهای تیتانیوم و فولاد زنگ‌نزن 316L از آلیاژهای پرکاربرد مهندسی هستند که به دلیل عدم حلالیت کامل در یکدیگر نمی‌توان آن‌ها را با فرآیندهای جوشکاری ذوبی به یکدیگر متصل کرد، از لحیم‌کاری سخت که به عنوان یکی از منحصر به فردترین و مناسب‌ترین روش‌ها برای آلیاژهای غیرمشابه است، در تحقیق خود استفاده کردند. آن‌ها لحیم‌کاری سخت را در دماهای ۸۰۰، ۸۳۰ و ۸۶۰ درجه سانتی‌گراد و به مدت ۵، ۱۵ و ۳۰ ثانیه انجام دادند و به منظور بررسی خواص مکانیکی آزمایش برشی استفاده کردند. قبل از انجام آزمایش برش، سطح نمونه‌ها را با استفاده از میکروسکوپ نوری و بعد از انجام آزمایش برش، سطح شکست نمونه‌ها را با میکروسکوپ الکترونی مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که با افزایش دما و زمان استحکام برشی اتصال کاهش می‌یابد و شکست تردتر می‌گردد که وجود ترکیب بین فازی Fe-Ti باعث ترد شدن سطح شکست می‌گردد. آن‌ها مناسب‌ترین دما و زمان را دمای ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۵ دقیقه به دست آوردند که بالاترین استحکام و کمترین مقدار ترکیبات بین فازی و نرم‌ترین سطح شکست را دارا است. لی^۱ و همکارانش [۱۳] به بررسی رفتار مکانیکی اتصالات لحیم‌کاری سخت شده فولاد/تیتانیوم تحت بارگذاری ضربه‌ای پرداختند و برای اتصال نمونه‌های شیاردار از فلز پرکننده مس-نقره با درصدی مختلف نقره استفاده کردند. آن‌ها آزمون ضربه را توسط یک دستگاه دراپ هم با سرعت اولیه ۵ متر بر ثانیه که معادل ۶۰ ژول انرژی وارد می‌کند، انجام دادند. آن‌ها آزمون‌های ضربه را در دو دمای ۲۹۳ درجه کلوین و ۶۲۳ درجه کلوین انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش دمای محیط آزمایش میزان استحکام ضربه و انرژی شکست کاهش می‌یابد؛ همچنین

¹ Yulong² Li Yaning³ Sudmeyer

قرار گرفتند. آزمون مکانیکی کشش برای تعیین استحکام برشی اتصالات انجام شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از فولاد زنگ نزن مارتنزیتی نوع AISI420 تولید شده در شرکت باوو استیل^۴ و تهیه شده از شرکت تکنو استیل به‌عنوان فلز زمینه استفاده شد. نمودار تنش کرنش فلز استفاده شده در شکل ۱ نشان داده شده است. از آلیاژ پایه نیکل BNi-2 تولید شده در شرکت هگر^۵ و تهیه شده از شرکت مانا به‌عنوان مواد پرکننده درز اتصالات لحیم‌کاری شده استفاده شده است. خواص فیزیکی و مکانیکی مواد استفاده شده و همچنین ترکیب شیمیایی آنها به ترتیب در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است [۱۰].



شکل ۱- نمودار تنش کرنش فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ به عنوان فلز زمینه

جدول ۱- خواص فیزیکی و مکانیکی مواد استفاده شده

خواص	فولاد زنگ نزن ۴۲۰	آلیاژ BNi-2
چگالی (g/cm ³)	۷/۶	۸
ضریب پواسون	۰/۳	۰/۲۹
دمای ذوب (°C)	۱۴۵۴	۹۹۸
استحکام نهایی (MPa)	۱۵۰۰	۳۰۰
مدول یانگ (GPa)	۲۰۰	۲۰۵

کوی^۱ و همکارانش [۱۷] به بررسی استحکام اتصالات لحیم‌کاری شده^۲ TiAl/ Ni توسط فلز پرکننده Zr-Al-Ni-Co در دو دمای اتاق و بالاتر پرداختند. آن‌ها لحیم‌کاری سخت نمونه‌ها در دماهای ۹۸۰، ۱۰۰۰ و ۱۰۲۰ درجه سانتی‌گراد و در زمان‌های ۵، ۱۵ و ۳۰ دقیقه انجام داده و آزمون برش نمونه‌ها را در دو دمای ۳۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که بالاترین استحکام برشی در نمونه‌های لحیم‌کاری شده در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و در زمان ۱۵ دقیقه بوده است؛ همچنین آن‌ها با افزایش دمای محیط آزمایش شاهد کاهش استحکام برشی در اتصالات بودند. هیو^۲ و همکارانش [۱۸] به بررسی رفتار مکانیکی و ریزساختار نمونه‌های لحیم‌کاری سخت شده Ti₂AlNb/ Ti60 با فلز پرکننده Cu75Pt پرداختند. آن‌ها ضخامت فلز پرکننده را برای همه نمونه‌ها ثابت و برابر با ۴۰ میکرون در نظر گرفتند. آن‌ها با توجه به اینکه دمای ذوب فلز پرکننده انتخاب شده ۱۱۲۷ درجه سانتی‌گراد است، بازه دمایی را بین ۱۱۷۰ تا ۱۲۱۰ درجه سانتی‌گراد و در زمان ۱۰ دقیقه در نظر گرفتند. آن‌ها بعد از انجام فرآیند لحیم‌کاری سخت و خنک شدن نمونه‌ها در دمای اتاق، نمونه‌ها را توسط یک دستگاه یونیورسال تحت فشار با نرخ ۰/۵ میلی‌متر بر دقیقه قراردادند. آن‌ها بعد از بررسی نتایج آزمون فشار و ریزساختار نمونه‌ها به این نتیجه رسیدند که بیشترین استحکام در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد و زمان ۱۰ دقیقه بوده است.

در این تحقیق به بررسی استحکام برشی اتصالات لحیم‌کاری شده فولاد زنگ نزن ۴۲۰ با ماده پرکننده پایه نیکل BNi-2 پرداخته شده است. هدف از این تحقیق دستیابی به بیشینه استحکام برشی در این اتصالات است. طراحی آزمایش به روش روبه پاسخ^۳ انجام شد. هندسه اتصالات در این تحقیق به صورت لب روی لب بوده پارامترهای درز اتصال (ضخامت آلیاژ پرکننده)، دما و زمان فرآیند لحیم‌کاری مورد بررسی قرار گرفتند، بطوریکه ضخامت آلیاژ پایه نیکل BNi-2 در این تحقیق ۰/۰۴، ۰/۰۷ و ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها، آن‌ها در دماهای ۱۰۰۰°C، ۱۰۷۰°C، ۱۱۴۰°C در زمان ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دقیقه در کوره^۳ خلأ

^۴ China Baowu Group

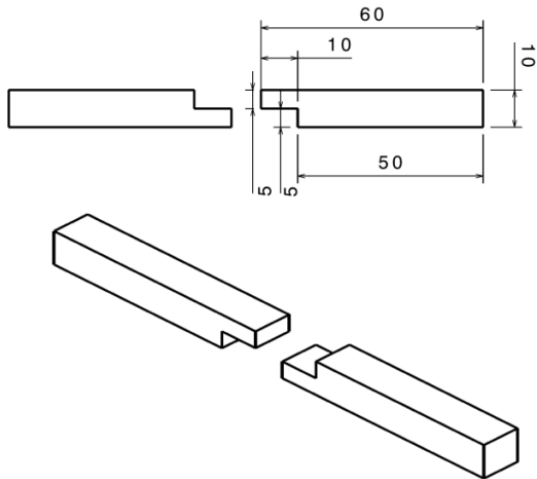
^۵ Heeger Materials

^۱ Kewei

^۲ Hu

^۳ Response Surface Methodology

قرار گرفته و فرآیند لحیم‌کاری سخت بر روی آن‌ها انجام پذیرفت [۱۷ و ۱۸]. بعد از انجام فرآیند لحیم‌کاری و خنک‌سازی نمونه‌ها در دمای اتاق انجام گرفت. کنترل کیفیت روی نمونه‌ها به صورت ظاهری انجام و در صورت نیاز نمونه‌ها دوباره تکرار و جهت انجام آزمون کشش آماده شدند.



شکل ۲- شماتیک نمونه‌ها

جدول ۳- متغیرها و سطوح آنها

متغیر	حد پایین (-1)	حد وسط (0)	حد بالا (+1)
درز اتصال (mm)	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۱
دمای لحیم‌کاری (°C)	۱۰۰۰	۱۰۷۰	۱۱۴۰
زمان لحیم‌کاری (min)	۱۰	۳۰	۵۰

۴- طراحی آزمایش و آزمون‌ها

در این تحقیق به منظور دستیابی به یک رابطه کمی بین خواص مکانیکی و متغیرها و ایجاد قابلیت مدل‌سازی برای خواص مورد بررسی و کاهش تعداد آزمایش‌ها، از طراحی آزمایش به روش رویه پاسخ استفاده شده است. از این روش برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که پاسخ موردنظر تحت تأثیر چندین متغیر بوده استفاده می‌شود و پاسخ به صورت یک رویه یکپارچه ارائه می‌گردد. در این روش اغلب از یک چندجمله‌ای درجه اول یا

جدول ۲- محدوده ترکیب شیمیایی فلز زمینه و آلیاژ

عنصر	پرکننده	آلیاژ BNi-2
%P	۰/۰۴	-
%Mn	۱	-
%Si	۱	۵
%B	-	۳/۵
%S	۰/۰۳	-
%Ti	۰/۷	-
%C	۰/۱۵	-
%Cr	۱۲-۱۴	۸
%Ni	۰/۷۵	باقیمانده
%Fe	باقیمانده	۳/۵

۳- آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت آماده‌سازی نمونه‌ها، ابتدا فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ طبق استاندارد AWS C3.2 در ابعاد مورد نظر برش زده شدند [۱۹]. شماتیک نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

در مرحله بعد به منظور برداشت آلودگی‌ها و اکسیدهای موجود در سطح فلز زمینه عملیات تمیزکاری روی آن‌ها انجام شد. در این مرحله از روش‌های مکانیکی نظیر سنباده‌زنی و ماسه پاشی^۱ استفاده شده و باعث ایجاد سطحی تمیز و عاری از هرگونه آلودگی گردید.

پس از آماده‌سازی و شستشوی نمونه‌ها، سطوح ایجاد شده توسط محلول نایتال ۲٪ (۲ میلی‌لیتر اسید نیتریک و ۹۸ میلی‌لیتر اتیل الکل) شستشو شدند. پس از آماده‌سازی، شستشوی نمونه‌های اولیه، مونتاژ آن‌ها به صورت لب به لب انجام شد و آلیاژ پرکننده پایه نیکل BNi-2 به صورت فویل در ضخامت و اندازه مورد نظر تهیه و در درز اتصال هر نمونه قرار گرفتند که به آن فیلرگذاری می‌گویند.

طبق جدول ۳ مواد پرکننده در ضخامت‌های ۰/۰۴، ۰/۰۷ و ۰/۱ میلی‌متر تهیه شده و در درز اتصال بین دو فلز زمینه قرار گرفتند. فلز زمینه در نمونه‌ها به صورت لب روی لب بر روی یکدیگر قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها در دماهای ۱۰۰۰°C، ۱۰۷۰°C، ۱۱۴۰°C در زمان ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دقیقه در کوره^۱ خلأ

^۱ Sand blast

زمان قرارگیری نمونه‌ها در کوره ۱۰، ۳۰ و ۵۰ دقیقه در نظر گرفته شد. سپس بر اساس طراحی آزمایش انجام شده توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت^۱، تعداد ۱۵ حالت برای نمونه‌های مورد آزمایش تعیین شدند.

جهت تعیین استحکام برشی نمونه‌های لحیم‌کاری شده، آزمون کشش با استفاده از دستگاه آزمون کشش یونیورسال ۱۰۰ تنی مدل Z100 ساخت شرکت آلمانی زوبیک رول^۲ با سرعت فک‌های ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه انجام شد. کشش نمونه‌ها طبق استاندارد C3.2 AWS تا زمان گسیختگی آن‌ها ادامه پیدا کرد.

۵- نتایج و بحث

در این قسمت به بررسی اثر درز اتصال، دما و زمان فرآیند لحیم‌کاری سخت روی استحکام برشی اتصالات پرداخته شده است. پس از آنکه نمونه‌های تهیه شده مورد آزمون مکانیکی کشش قرار گرفتند، نتایج میانگین استحکام برشی برای ۱۵ نمونه آزمایش‌شده در جدول ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که این تعداد نمونه‌ها با تکرارپذیری سه عدد از هر نمونه برای هر آزمون جداگانه در نظر گرفته شده است و جدول مذکور برای هر آزمون سه بار تکرار می‌شود. شکل ۳ نمونه‌های قبل و بعد از آزمون کشش را نشان می‌دهد.

نتایج بدست آمده برای ارزیابی تأثیر سه پارامتر درز اتصال، دما و زمان لحیم‌کاری سخت به کمک روش روبه پاسخ تحلیل و مقایسه شدند. نتایج آزمون‌ها ابتدا به کمک طرح نرم‌افزاری روبه پاسخ مورد تحلیل اولیه قرار گرفتند. نتایج مربوط به تحلیل واریانس استحکام کششی در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۴- میانگین استحکام برشی نمونه‌ها

ردیف	درز اتصال (mm)	دمای فرآیند (°C)	زمان فرآیند (min)	استحکام برشی (MPa)
۱	۰/۰۴	۱۰۰۰	۳۰	۱۳۲±۱/۱۷
۲	۰/۱۰	۱۰۰۰	۳۰	۱۱۴±۰/۹۴
۳	۰/۰۴	۱۱۴۰	۳۰	۱۵۸±۱/۳۴
۴	۰/۱۰	۱۱۴۰	۳۰	۱۳۷±۰/۸۶
۵	۰/۰۴	۱۰۷۰	۱۰	۱۲۵±۱/۴۲

دوم برای مدل کردن پاسخ استفاده می‌شود که مدل‌های مرتبه اول و دوم به صورت معادلات ۱ و ۲ است [۲۰].

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (1)$$

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

که در آن y پاسخ، k تعداد پارامترها، X_i و X_j متغیرهای مستقل و $\beta_0, \beta_i, \beta_{ii}, \beta_{ij}$ ضرایب رگرسیونی برای به ترتیب عرض از مبدأ، ضرایب خطی، ضرایب درجه دوم و اثر متقابل می‌باشند [۲۰].

یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این طرح این است که به دلیل محدودیت‌های فیزیکی فرآیند، تولید چنان نمونه‌هایی غیرممکن است یا به لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نیست. طرح Box-Behnken به دلیل داشتن تعداد نقاط کمتر نسبت به طرح مرکب مرکزی با تعداد عامل برابر، معمولاً از لحاظ اقتصادی مقرون‌به‌صرفه و زمان اجرای کمتری دارد و از دیگر مزیت‌های این طرح این است که دوران پذیر می‌باشد، به این معنی که همه نقاط موجود در طراحی آزمایش دارای فاصله یکسانی از نقطه مرکزی است و این موضوع باعث یکسان بودن واریانس خطا در همه نقاط است. تعداد نقاط لازم برای آزمایش در طرح Box-Behnken روش RSM توسط رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$N = 2k + 2k + m \quad (3)$$

در این رابطه N تعداد آزمایش‌های لازم، k تعداد متغیرها و m تعداد تکرار نقطه مرکزی است [۲۱]. در این تحقیق متغیرهای درز اتصال (ضخامت فلز پرکننده)، دمای کوره و زمان کوره پارامترهای مورد نظر آزمایش می‌باشند. در این تحقیق، درز اتصال در سه اندازه ۰/۰۴، ۰/۰۷ و ۰/۱ میلی‌متر، دمای کوره خلاء ۱۰۰۰، ۱۰۷۰ و ۱۱۴۰ درجه سانتی‌گراد و

² Zwick Roell

¹ Design Expert

۱۰/۸۳	۰/۰۲۲	۱	A ²	۱۰۸±۰/۶۳	۱۰	۱۰۷۰	۰/۱۰	۶	
۷/۷۶	۰/۰۳۹	۱	B ²	۱۵۹±۰/۸۳	۵۰	۱۰۷۰	۰/۰۴	۷	
۹۷/۵۰	۰	۱	C ²	۱۳۵±۱/۰۷	۵۰	۱۰۷۰	۰/۱۰	۸	
۲/۵۰	۰/۱۷۵	۱	AB	۱۰۰±۰/۵۵	۱۰	۱۰۰۰	۰/۰۷	۹	
۱۳/۶۱	۰/۰۱۴	۱	AC	۱۲۵±۰/۵۷	۱۰	۱۱۴۰	۰/۰۷	۱۰	
۰/۲۸	۰/۶۲۱	۱	BC	۱۳۳±۱/۱۲	۵۰	۱۰۰۰	۰/۰۷	۱۱	
R ² = 99.89%				R ² _{Adj} = 99.69%				R ² _{Pred} = 98.92%	
				۱۵۷±۱/۵۱	۵۰	۱۱۴۰	۰/۰۷	۱۲	
				۱۳۶±۱/۳۹	۳۰	۱۰۷۰	۰/۰۷	۱۳	
				۱۳۵±۱/۸۱	۳۰	۱۰۷۰	۰/۰۷	۱۴	
				۱۳۴±۱/۷۶	۳۰	۱۰۷۰	۰/۰۷	۱۵	

از آنجا که R₂ نزدیک به ۱۰۰ درصد به معنای اعتبار بیشتر مدل است، دامنه بدست آمده برای R₂ در این مطالعه نشانگر تناسب مناسب با داده‌های تجربی است. معادله‌ی رگرسیون برای استحکام برشی در نرخ کرنش‌های مختلف به صورت معادله ۴ است.

$$\text{Shear Strength (MPa)} = -415 - 116A + 0.806B + 1.914C + 1806A^2 - 0.0002B^2 - 0.01219C^2 - 2.917AC \quad (4)$$

نتایج تأثیر درز اتصال، دما و زمان لحیم‌کاری سخت بر روی استحکام برشی اتصالات در نمودارهای شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش درز اتصال باعث کاهش استحکام برشی شده است. افزایش درز اتصال از ۰/۰۴ تا ۰/۱ میلی‌متر، استحکام برشی را ۱۴٪ کاهش داده است. در لحیم‌کاری سخت توسط آلیاژهای پایه نیکل، مقدار درز اتصال، علاوه بر تأثیر در جذب موئینگی و جریان آلیاژ مذاب لحیم‌کاری در جهت پر شدن درز اتصال، در کنترل میزان فازهای ترد تشکیل شده در طی فرآیند لحیم‌کاری نیز نقش بسیار مهمی دارد. با توجه به نتایج بدست آمده با افزایش مقدار درز اتصال، به دلیل افزایش نسبت فازهای ترد در آلیاژ پرکننده واقع در درز اتصال، استحکام برشی بدست آمده از نمونه‌ها کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است [۲۲].

همچنین مشاهده می‌شود، افزایش دمای لحیم‌کاری سخت باعث افزایش استحکام برشی شده است. افزایش دما از ۱۰۰۰°C تا ۱۱۴۰°C، استحکام برشی را به اندازه ۲۱٪ افزایش داده است. چون در کارهای دیگران [۲۳ و ۲۴] چنین دلیلی بیان شده در اینجا نیز به دلیل مشابهت آزمون و جنس مواد می‌توان همین نتیجه را گرفت. افزایش دما می‌تواند باعث اصلاح فازهای موردنظر شود. در دماهای مورد آزمایش در این

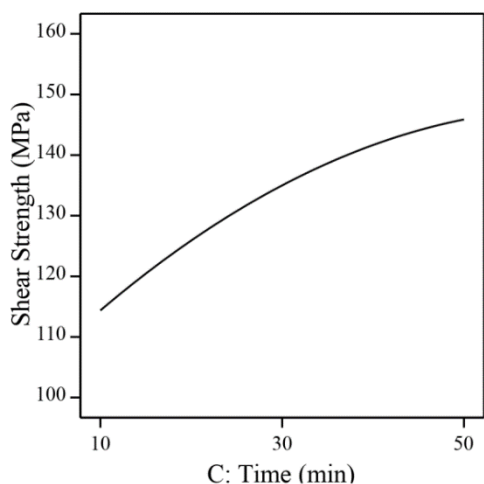
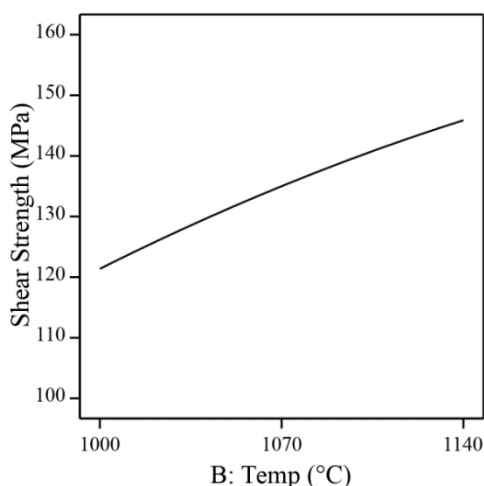
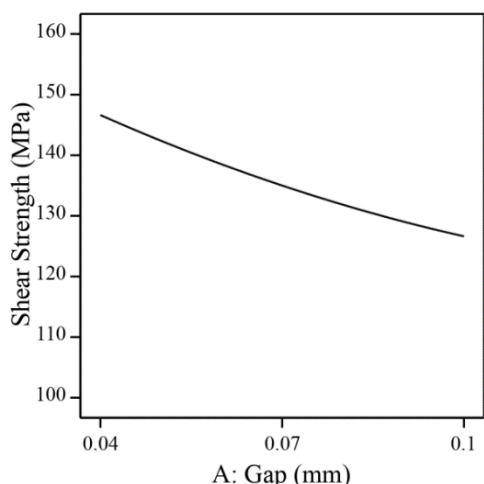


شکل ۳- نمونه‌های آزمون کشش: (الف) قبل از آزمون (ب) بعد از آزمون

مقدار F برای بررسی فاصله متغیرها تا میانگین استفاده می‌شود و مقدار P برای مؤثر بودن حضور یک عامل در مدل به کار برده می‌شود. در جاهایی که مقادیر مربوط به ستون P برای عوامل مستقل، مربعات و اثرات متقابل بین عوامل کمتر از ۰/۰۵ است، تأثیر این عوامل با اطمینان ۹۵٪ روی استحکام برشی معنی‌دار است.

جدول ۵- تحلیل واریانس استحکام برشی اتصالات

عوامل	درجه آزادی	مقدار P	مقدار F
مدل رگرسیون	۹	۰	۵۰۷/۰۷
عوامل خطی	۱	۰	۱۴۷۵/۹۳
درز اتصال (A)	۱	۰	۸۸۸/۸۹
دما (B)	۱	۰	۱۳۳۳/۸۹
زمان (C)	۱	۰	۲۲۰۵/۰۰

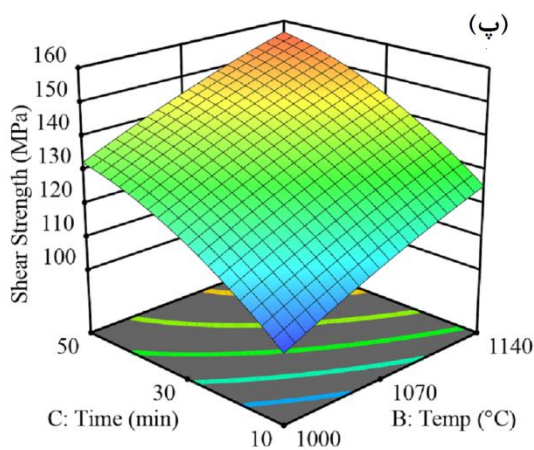
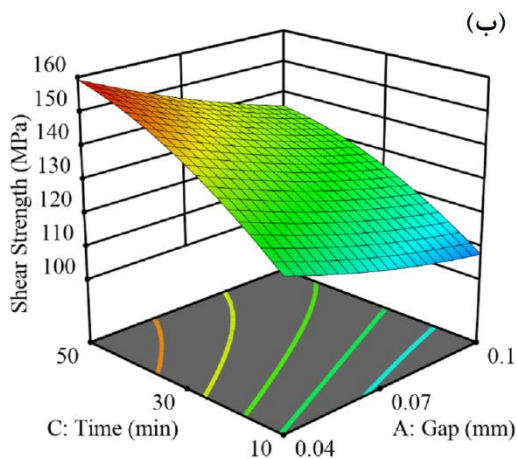
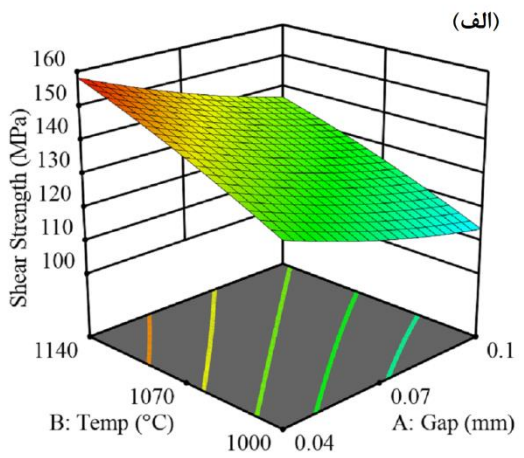


شکل ۴- نمودارهای تأثیر درز اتصال دما و زمان فرآیند لحیم‌کاری سخت روی استحکام برشی اتصالات

تحقیق (حداکثر ۱۱۴۰ درجه سانتی‌گراد)، مقداری از فازهای ترد در درز اتصال باقی می‌ماند. به همین دلیل افزایش استحکام مشاهده شده در نمونه‌های بریز شده در این بخش از تحقیق، کمتر از نتایج مربوط به افزایش مدت زمان است [۲۵].

از نمودار تأثیر زمان لحیم‌کاری سخت روی استحکام برشی مشاهده می‌شود که افزایش زمان باعث افزایش استحکام برشی شده است. افزایش زمان از ۱۰ تا ۵۰ دقیقه، استحکام برشی را ۲۷٪ افزایش داده است. افزایش زمان موجب نفوذ بیشتر عناصر تشکیل‌دهنده فازهای ترد (سیلیسیم و بکسوم بور) به طرف فلز زمینه شده است. این افزایش استحکام برشی به این علت است که با افزایش زمان لحیم‌کاری به خوبی می‌توان مقدار فازهای مذکور را در درزهای کوچک کنترل نموده و کاهش داد. البته استفاده از زمان طولانی (به جای استفاده از دمای بالاتر) در کنترل فازهای ترد و افزایش استحکام، مسائل جانبی دیگر نظیر رشد دانه‌ها و افت خواص مکانیکی فلز زمینه را به همراه نخواهد داشت که البته حسن بزرگی به حساب می‌آید و توسط سایر محققین گزارش شده است [۲۶ و ۲۷].

به منظور بررسی تأثیر هم‌زمان پارامترهای درز اتصال، دما و زمان لحیم‌کاری سخت روی استحکام برشی از روبه‌ها استفاده شده است. شکل ۵ الف تأثیر هم‌زمان درز اتصال و دما بر روی استحکام برشی با ثابت در نظر گرفتن زمان را به صورت روبه نشان می‌دهد [۲۸]. همان‌طور که مشاهده می‌شود با ثابت ماندن زمان افزایش درز اتصال باعث کاهش استحکام برشی و افزایش دما باعث افزایش استحکام برشی می‌شود. افزایش دما باعث اصلاح فازهای شکننده شده است.



شکل ۵- نمودارهای سه بعدی پاسخ تأثیر هم‌زمان درز اتصال دما و زمان فرآیند لحیم‌کاری سخت بر روی استحکام برشی اتصالات

همچنین شکل ۵ ب تأثیر هم‌زمان درز اتصال و زمان لحیم‌کاری سخت روی استحکام برشی با ثابت در نظر گرفتن دما را به صورت رویه نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با ثابت ماندن دما، افزایش درز اتصال باعث کاهش استحکام برشی و افزایش زمان باعث افزایش آن می‌شود. نمونه‌های تهیه شده در دمای ۱۰ دقیقه که حاوی حداکثر عناصر شکننده بوده و نمونه‌های لحیم‌کاری شده در دمای ۵۰ دقیقه که بدون عناصر شکننده می‌باشند، به ترتیب دارای حداقل و حداکثر استحکام برشی می‌باشند. وقوع فازهای شکننده مانند ترکیبات یوتکتیک و بین‌فلزی در ناحیه اتصال بر رفتار مکانیکی اتصال، به ویژه مقاومت برشی تأثیر منفی می‌گذارد. این ترکیبات شکننده به عنوان نقاطی برای تمرکز تنش عمل می‌کنند و وقوع بیشتر این فازها فضای بیشتری را برای تمرکز تنش فراهم می‌کند و استحکام را کاهش می‌دهد. در شکل ۵ پ تأثیر هم‌زمان دما و زمان لحیم‌کاری سخت روی استحکام برشی با ثابت در نظر گرفتن درز اتصال را به صورت رویه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با ثابت ماندن درز اتصال، افزایش دما و زمان باعث افزایش استحکام برشی شده است. افزایش دما باعث اصلاح فازهای شکننده موردنظر شده است.

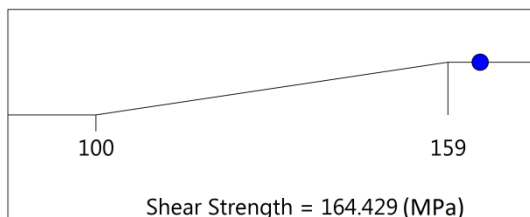
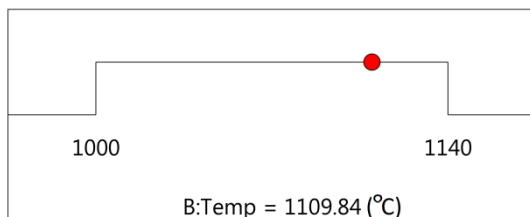
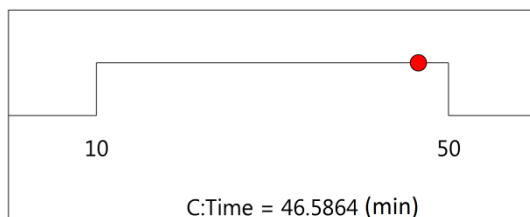
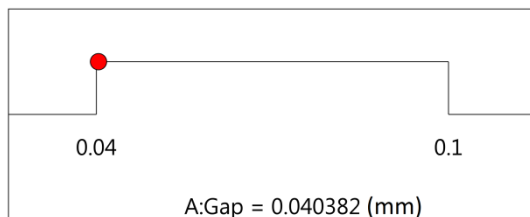
همچنین در بالاترین دمای مورد استفاده برای لحیم‌کاری نمونه‌ها در این تحقیق (۱۱۴۰ درجه سانتی‌گراد)، برخی از فازهای شکننده در درز اتصال باقی می‌مانند؛ بنابراین افزایش مقاومت برشی مشاهده شده در این قسمت از تحقیق کمتر از نتایج مربوط به افزایش زمان است. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش زمان باعث افزایش استحکام برشی شده است.

افزایش زمان باعث نفوذ بیشتر عناصر فازهای ترد (سیلیکون و به خصوص بور) به فلز پایه شده است که لحیم‌کاری سخت توسط آلیاژ پایه نیکل‌عاری از بور توسط سایر محققین نیز گزارش شده است [۲۹]. با افزایش زمان، عناصر شکننده به خوبی به داخل فلز پایه نفوذ می‌کنند و می‌توان مقدار آن‌ها را به خوبی کنترل کرد و در اتصالات کوچک کاهش داد و در نتیجه استحکام برشی را افزایش می‌یابد.

۳. افزایش زمان لحیم‌کاری سخت باعث افزایش استحکام برشی شده است. افزایش زمان از ۱۰ تا ۵۰ دقیقه، استحکام برشی را ۲۷٪ افزایش داده است. افزایش زمان موجب نفوذ بیشتر عناصر تشکیل دهنده فازهای ترد (سیلسیم و بخصوص بور) به طرف فلز زمینه شده است که همین باعث جلوگیری از رشد ترک شده و خواص مکانیکی را بهبود می‌بخشد.

۴. با بهینه‌سازی به روش رویه پاسخ نتیجه گرفته شد که اتصالی با درز اتصال ۰/۰۴ میلی‌متر، دمای ۱۱۰۹/۸۴ درجه‌سانتیگراد و زمان ۴۶/۵۸ دقیقه دارای بیشترین استحکام برشی به مقدار ۱۶۴/۴۲۹ مگاپاسکال است.

۵. پیشنهاد می‌گردد، محققان آینده به بررسی استحکام اتصالات لحیم‌کاری شده در بارگذاری‌های ضربه‌ای و همچنین آزمون خمش بر روی نمونه‌ها بپردازند.



شکل ۶- نتایج بهینه‌سازی به کمک روش رویه پاسخ

۶- نتایج بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر لحیم‌کاری سخت اتصالات به روش رویه پاسخ

در این قسمت به بررسی بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر لحیم‌کاری سخت اتصالات به روش رویه پاسخ پرداخته شد. نتایج بهینه‌سازی به کمک روش رویه پاسخ در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به این شکل نتیجه می‌شود که اتصالی با درز اتصال ۰/۰۴ میلی‌متر، دمای ۱۱۰۹/۸۴ درجه‌سانتیگراد و زمان ۴۶/۵۸ دقیقه دارای بیشترین استحکام برشی به مقدار ۱۶۴/۴۲۹ مگاپاسکال است. با توجه به مقادیر پیش‌بینی شده در بهینه‌سازی و به منظور صحت‌گذاری برای ارزیابی دقت مدل ارائه شده تعداد سه عدد از نمونه با درز اتصال ۰/۰۴ میلی‌متر، دمای ۱۱۰۹/۸۴ درجه‌سانتیگراد و زمان ۴۶/۵۸ دقیقه ساخته شده و سپس مورد آزمایش کشش قرار گرفتند. جدول ۶ مقادیر پیش‌بینی شده را با نتایج حاصل از آزمایشات تجربی برای نمونه مورد نظر را به منظور صحت‌گذاری نشان می‌دهد. با توجه به این جدول خطا حدود ۱/۴۸ می‌باشد که با توجه به تجهیزات مورد استفاده در حد قابل قبولی است.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی شرایط بهینه در تأثیر پارامترهای دما، زمان و درز اتصال در اتصالات لحیم‌کاری سخت فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ با ماده پرکننده پایه نیکل BNi-2 روی استحکام برشی نمونه‌های لب روی لب به روش رویه پاسخ پرداخته شد. نتایج نشان داد:

۱. افزایش درز اتصال باعث کاهش استحکام برشی گردید، بطوریکه افزایش درز اتصال از ۰/۰۴ تا ۰/۱ میلی‌متر، باعث کاهش ۱۴ درصدی استحکام برشی گردید. با افزایش مقدار درز اتصال، به دلیل افزایش نسبت فازهای ترد در آلیاژ پرکننده واقع در درز اتصال، استحکام برشی بدست آمده کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته است.

۲. افزایش دمای لحیم‌کاری سخت باعث افزایش استحکام برشی شده است، بطوریکه افزایش دما از ۱۰۰۰°C تا ۱۱۴۰°C، باعث افزایش ۲۱ درصدی استحکام برشی شده است. افزایش دما باعث اصلاح فازهای موردنظر شده و کاهش فازهای ترد یوتکتیک باعث بهبود خواص مکانیکی شده است.

جدول ۶- نتایج آزمایشات صحه‌گذاری

خطا (%)	مقدار حاصل از آزمایشات تجربی	مقدار پیش‌بینی شده	استحکام برشی (MPa)
۱/۴۸	۱۶۲±۱/۴۸	۱۶۴/۴۲۹	

مراجع

- [۱۲] رضا سلطانی طاشی، سید علی اصغر اکبری موسوی (۱۳۸۹) شکست پذیری اتصال غیرمشابه لحیم کاری سخت تحت خلاء Ti-6Al-4V به فولاد زنگ‌نزن 316L با استه‌فاده از فلز پرکننده AgCuZn. یازدهمین کنفرانس ملی جوش و بازرسی، تهران.
- [13] Li Y, Feng J, Peng H (2009) Mechanical response of the TiAl/steel brazed joint under impact load. *J Mater Sci* 44: 3077–3081.
- [14] Yaning L, Xinting K, Jian W, Huiping T (2018) Bonding Characterization Between 316L and Porous Stainless Steel Pipes by Vacuum Brazing. *RARE METAL. MAT. ENG.* 47(2): 0474-0478.
- [15] Sudmeyer I, Hetteshheimer T, Rohde M (2010) On the shear strength of laser brazed SiC–steel joints: Effects of braze metal fillers and surface patterning. *Ceram. Int.* 36(3): 1083–1090.
- [۱۶] پژمان صارمی، مسعود کثیری (۱۳۹۵) بررسی شرایط بهینه لحیم کاری غیرهمجنس تیتانیوم خالص تجاری به فولاد زنگ‌نزن ۳۰۴ کم کربن با استفاده از پرکننده پایه نقره BAG-8. بیست و هشتمین نشریه مهندسی متالورژی و مواد.
- [17] Dong k, Kong J (2019) A high-strength vacuum-brazed TiAl/Ni joint at room temperature and high temperature with an amorphous foil Zr-Al-Ni-Co filler metal. *J. Manuf. Process.* 44: 389–396.
- [18] Du Y, Zhang J, Li J, Wang F, Ding Y, Xiong J, Guo W (2023) Microstructure evolution and mechanical properties of Ti2AlNb/TC17 joints brazed with Ti–Zr–Cu–Ni filler metal. *J. Vac.* 215: 112365.
- [19] American Welding Society: AWS C3.2 Standard Method for Evaluating the Strength of Brazed Joints, American Welding Society, Miami, FL, 2019, pp. 1–17.
- [20] Montgomery DC (2017) Design and analysis of experiments. John wiley & sons.
- [21] Eriksson L, Johansson E, Kettaneh-Wold N, Wikström C, Wold S (2000) Design of experiments. Principles and Applications, Learn ways AB, Stockholm.
- [22] Li Y, Feng J, Peng H, Hua Z (2009) Mechanical response of the TiAl/steel brazed joint under impact load. *J. Mater. Sci.* 44:3077-81.
- [23] Lugscheider E, Krappitz H (1986) The influence of brazing conditions on the impact strength of high-temperature brazed joints. *Weld. J.* 65(10): 261.
- [24] Cai YS, Liu RC, Zhu ZW, Cui YY, Yang R (2017) Effect of brazing temperature and brazing time on the microstructure and tensile strength of TiAl-based alloy joints with Ti-Zr-Cu-Ni amorphous alloy as filler metal. *Intermetallics* 91:35-44.
- [25] Zaharinie T, Yusof F, Hamdi M, Ariga T, Moshwan R (2014) Effect of brazing temperature on the shear strength of Inconel 600 joint. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 73: 1133-40.
- [۱] محمود شاکری و ابوالفضل درویزه (۱۳۷۶) مکانیک ضربه، جلد اول. انتشارات دانشگاه گیلان.
- [2] Zamani P, Farhangdoost K (2020) On the Influence of riveting process parameters on fatigue life of riveted lap joint. *J. Appl. Comput. Mech.* 6(2):248-58.
- [3] Kemmenoe DJ, Theisen EA, Baker SP (2022) Strength of 444 stainless steel single-lap joints brazed with Ni-based metallic glass foils for corrosive environments. *Metall. Mater. Trans. A* 53(4):1407-18.
- [4] Haran-Nogueira A, Kasaei MM, Akhavan-Safar A, Carbas RJ, Marques EA, da Silva LF (2023) Failure analysis of hybrid bonded-hole hemmed joints for dissimilar materials. *Thin-Walled Struct.* 189:110907.
- [5] Chaturvedi M (2020) Welding and joining of aerospace materials. Woodhead publishing.
- [6] Minea AA (2016) Book Review: Introduction to Brazing Technology. The Annals of " Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII: Welding Equipment and Technology 27:5.
- [7] Way M, Willingham J, Goodall R (2020) Brazing filler metals. *Int. Mater. Rev.* 65(5):257-285.
- [8] Klotz UE, Liu C, Khalid FA, Elsener HR (2008) Influence of brazing parameters and alloy composition on interface morphology of brazed diamond. *Mater. Sci. Eng.* 495(1-2): 265-270.
- [9] Kamal A, Shukla AK, Shinde VM, Rajasekhar BV (2023) Microstructure and mechanical properties of C/SiC-niobium alloy (C103) joint brazed with TiCuAg alloy for aerospace applications. *Ceram. Int.*
- [10] Hongjie H, Guangmin Sh, Mingcan L, and Yingjun J (2018) Dynamic behaviors of 0Cr18Ni0Ti temperatures stainless steel welded joints at elevated and high strain rates. *RARE METAL. MAT. ENG.* 47(8): 2290-2297.
- [11] Davoodi Jamaloei A, Khorram A, Jafari A (2017) Characterization of microstructure and mechanical properties of dissimilar TLP bonding between IN718/IN600 with BNi-2 interlayer. *J. Manuf. Process.* 29: 447–457.

- [28] Fazeli I, Emami MR, Rashidi A (2021) Investigation and optimization of the behavior of heat transfer and flow of MWCNT-CuO hybrid nanofluid in a brazed plate heat exchanger using response surface methodology. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 122:105175.
- [۲۹] سید عمادالدین حسینی و مصطفی امیرجان (۱۳۹۸) طراحی، تحلیل و مقایسه آلیاژ بریزینگ پایه نیکل عاری از بور، هشتمین کنفرانس بین المللی مواد و متالوژی.
- [26] Lee YW, Kim JH, Song YS, Seok CS (2007) Mechanical strength and microstructural characterization of SUS304 brazed joints with BNi-2 filler metal: influence of brazing temperature and time. *Solid State Phenomena* 124: 1673-6.
- [27] Kawakatsu I, Osawa T, Saito H (1979) Brazed joint strength of stainless steel with nickel base filler metals. *J. JPN. I. MET. MATER.* 43(11): 1001-7.