



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

بررسی عددی و تجربی ریزساختار انجمادی در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپر آلیاژ Haynes230

میثم افتخاری^{۱*}، علی محمد کلاگر^۱، پوریا ریسی^۲

۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد و متالورژی، شرکت مهندسی مواد کاران، گروه مینا، تهران، ایران

۲- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، شرکت مهندسی مواد کاران، گروه مینا، تهران، ایران

* نویسنده مکاتبه کننده: Email: meisameftekhari@gmail.com

چکیده:

تاریخ دریافت: ۲۹ مرداد ۱۴۰۴

تاریخ بازنگری: ۱۲ مهر ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۳ مهر ۱۴۰۴

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای متداول‌ترین فرآیند جوشکاری برای اتصال ورق‌های فلزی است. در صنعت ساخت قطعات نیروگاهی، جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های سوپرآلیاژهای پایه نیکل که از قابلیت جوش‌پذیری پائینی برخوردار هستند، امری چالش برانگیز است. در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، سه متغیر شدت جریان الکتریکی، زمان جوشکاری و نیروی الکتروود، بیشترین اثر را در کیفیت اتصالات دارند. در این تحقیق به بررسی نقش و تاثیرات این سه متغیر در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپر آلیاژ پایه Haynes230 که در ساخت محفظه احتراق توربین گاز به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند، پرداخته شده است. به منظور ارزیابی کیفی نمونه‌های جوشکاری شده، آزمون‌های مخرب و غیرمخرب نظیر آزمون متالوگرافی شامل بررسی ریز ساختار نواحی سه گانه جوش به کمک میکروسکوپ های نوری و الکترونی، بازرسی با مایع نافذ جهت شناسایی ترک‌ها و حفرات، آزمون رادیوگرافی برای شناسایی عیوب داخلی ناحیه جوش، آزمون میکروسختی ویکرز، آزمون پیل برای ارزیابی استحکام جوش، آزمون کشش-برش در دمای محیط و بالا به منظور تعیین استحکام برشی نمونه‌های جوشکاری مقاومتی مطابق استاندارد مربوطه انجام شد. همچنین فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در نرم‌افزار ANSYS توسط یک مدل اجزا محدود کوپل مکانیکی، الکتریکی و حرارتی با استفاده از کد APDL شبیه‌سازی شد. در این راستا توزیع دمایی، شکل و اندازه دکمه جوش پیش‌بینی گردید و سپس به منظور صحت‌گذاری مدل المان و هندسه دکمه جوش به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید که مطابقت خوبی بین آنها مشاهده شد. بهترین پارامترهای فرآیند شامل جریان جوشکاری ۵۸۰۰ آمپر، زمان جوش ۹ سیکل و نیروی الکتروود ۵/۶ کیلونیوتن شناسایی شد که منجر به تشکیل دکمه جوشی با قطر ۵/۲ میلی‌متر (بیش از حداقل استاندارد GE معادل ۵/۰۸ میلی‌متر برای ورق ۱/۶ میلی‌متری) و استحکام برشی ۱۳/۴ کیلونیوتن در دمای محیط و ۳۳۹MPa در دمای ۶۴۹ درجه سانتیگراد شد.

واژه‌های کلیدی:

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای،

سوپرآلیاژ پایه نیکل،

Haynes230،

شبیه‌سازی عددی

ارجاع به این مقاله:

میثم افتخاری، علی محمد کلاگر، پوریا ریسی، بررسی عددی و تجربی ریزساختار انجمادی در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپرآلیاژ Haynes230، پژوهش‌نامه ریخته‌گری،

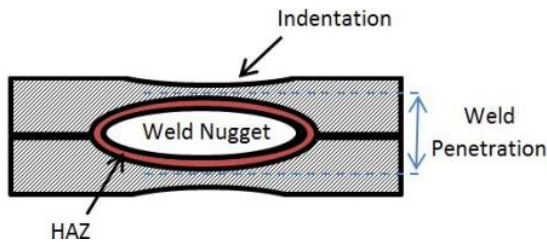
بهار و تابستان ۱۴۰۴، جلد ۹، شماره ۱، صفحات ۵۵-۷۱.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/frj.2025.542238.1209

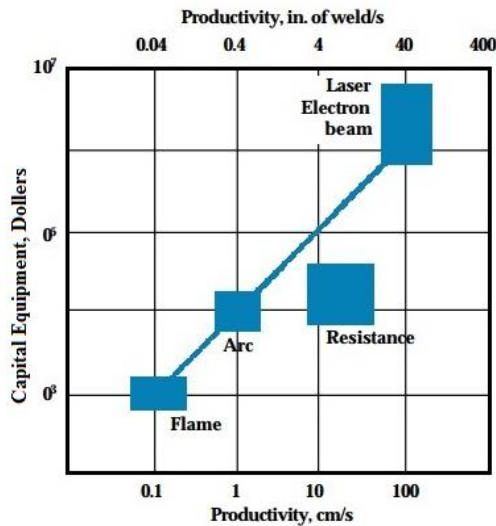
۱- مقدمه

جریان الکتریکی به قطعه کار استفاده می‌شود. به واسطه عبور جریان الکتریکی از فلز و مقاومت الکتریکی فصل مشترک، اتصال بین قطعات صورت می‌گیرد. در شکل (۱)، شماتیک جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌ها نشان داده شده است. جوشکاری مقاومتی در مقایسه با دیگر روش‌های جوشکاری مزایای زیادی

جوشکاری مقاومتی یک روش ذوبی برای اتصال دو یا چند قطعه به یکدیگر است. فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای متداول‌ترین فرآیند اتصال در ورق‌های فلزی است. در این روش از الکتروودهای استوانه‌ای با زاویه مخروطی و اندازه قطر مشخص برای انتقال



شکل ۲- شماتیک سطح مقطع عرضی مناطق مختلف جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای [۲]



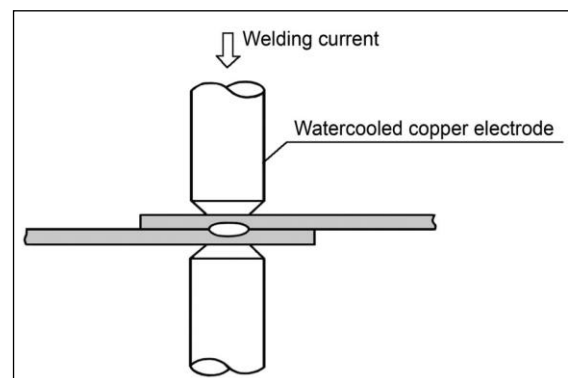
شکل ۳- بهره‌وری روش‌های مختلف جوشکاری در مقایسه با روش جوشکاری مقاومتی براساس میزان هزینه [۳].

جوشکاری مقاومتی به دلیل تمرکز حرارتی بالا و انجام فرآیند در زمان بسیار کوتاه بر روی ورق‌های سوپرآلیاژ چه در حالت محلول جامد و چه در حالت رسوب سخت، بسیار مورد توجه صنعت گران است. اگرچه استفاده از فلز پرکننده برای فرآیند جوشکاری روی سوپرآلیاژها جهت جلوگیری از ترکیبگی معمولاً ضروری است، اما فرآیند جوشکاری مقاومتی به عنوان یک فرآیند اتوژنیک^۴ می‌تواند برای جوشکاری سوپرآلیاژها بسیار کاربردی باشد. از طرف دیگر این فرآیند می‌تواند به خوبی برای جوشکاری فلزات غیرهمجنس که پیچیدگی بیشتری دارند، به کار رود [۶۵].

در سال‌های اخیر، چندین مطالعه در زمینه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپرآلیاژهای نیکل پایه انجام شده است. به عنوان مثال، Bemani و همکاران [۱۶] به بررسی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای در سوپرآلیاژ Nimonic 263 پرداختند. همچنین، Ashtiani و Zarandooz [۱۷] خواص ریزساختاری و مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای در سوپرآلیاژ IN625 را مطالعه کردند. علاوه بر این، Martín و همکاران [۱۸] تأثیر جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای و عملیات

دارد. از جمله می‌توان به سرعت بالا، عدم استفاده از فلز پرکننده، نبود گازهای خطرناک جوشکاری و قابلیت اتوماسیون ساده اشاره کرد. شماتیک مناطق مختلف جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در شکل (۲) نشان داده شده است. با اعمال جریان الکتریکی و اجرای سیکل جوشکاری مقاومتی، منطقه ذوب یا دکمه جوش در فصل مشترک قطعات ایجاد می‌شود. دکمه جوش^۱ در هر یک از قطعات به مقدار معینی نفوذ کرده است که تحت عنوان نفوذ جوش شناخته می‌شود. منطقه متأثر از حرارت^۲ نیز اطراف دکمه جوش، به دلیل اثر حرارت بر ریزساختار قطعه تشکیل می‌گردد [۱ و ۲].

شکل (۳)، میزان تولید یا بهره‌وری را برای روش‌های مختلف جوشکاری براساس هزینه تجهیزات در صنایع نیروگاهی و هوایی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، جوشکاری مقاومتی با هزینه نسبتاً پایین، بهره‌وری مناسبی را دارا است [۳]. شکل (۴) نمونه‌ای از سیکل عملیات جوش مقاومتی نقطه‌ای در یک جوش تک پالسه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، اتصال دو ورق در چهار مرحله تکمیل می‌گردد. در مرحله اول فشار لازم به قطعه وارد می‌شود. مدت زمان بین آغاز اعمال نیروی الکتروود روی قطعه کار تا شروع اعمال جریان الکتریکی زمان فشردگی^۳ نامیده می‌شود. سپس جریان الکتریکی در مدت زمان مشخص از قطعات عبور می‌کند. در مرحله سوم قطعات تا سرد شدن و منجمد شدن جوش تحت فشار قرار می‌گیرند و در نهایت نیروی الکتروودها از روی قطعه برداشته می‌شود. شیب‌های افزایش و کاهش شدت جریان الکتریکی متغیرهای دیگری هستند که برای کنترل بیشتر و افزایش کیفیت جوش روی کنترلر دستگاه قابل تنظیم هستند. همچنین برای برخی قطعات خاص می‌توان قبل و بعد از سیکل جوش، عملیات پیش‌گرم و پس‌گرم را با عبور جریان الکتریکی در مدت زمان مشخص اجرا نمود [۴].



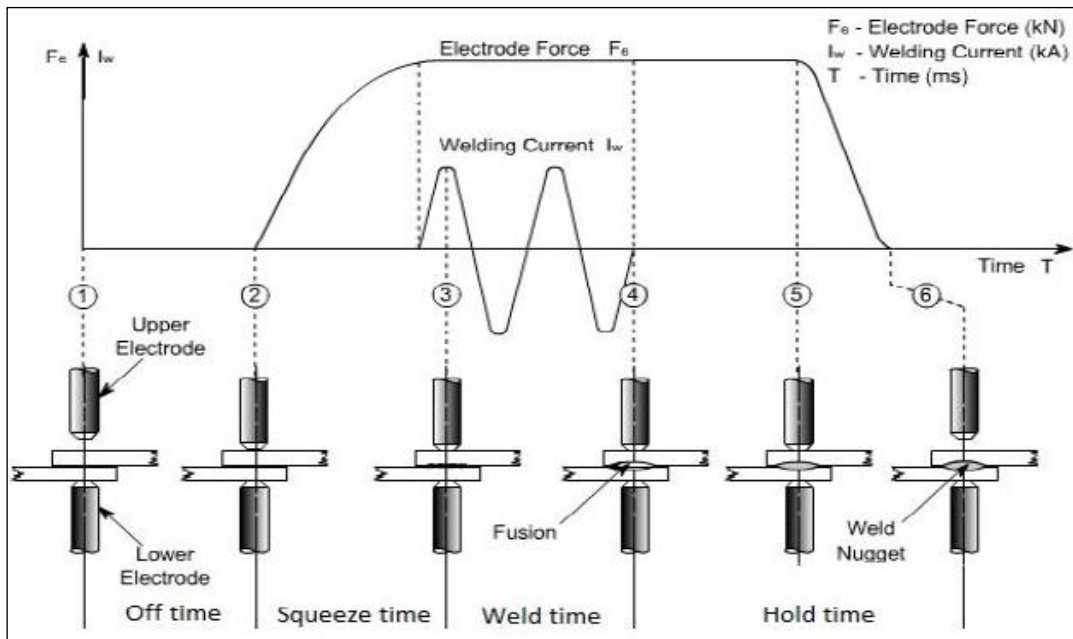
شکل ۱- شماتیک جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فلزی [۱]

³ Squeeze time

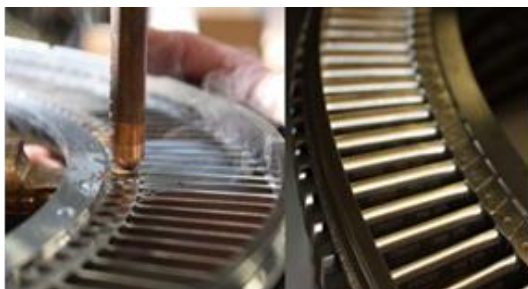
⁴ Autogenic

¹ Weld Nugget

² Heat Affected Zone



شکل ۴- سیکل عملیات جوش مقاومتی نقطه‌ای [۴].



الف



ب

شکل ۵- کاربرد جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای در ساخت قسمت‌های مختلف توربین گاز الف- کمپرسور هوا ب- لاینر محفظه احتراق توربین گاز [۷].

۲. مواد و روش تحقیق

در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سه متغیر شدت جریان الکتریکی، زمان جوشکاری و نیروی الکتروود بیشترین اثر را در کیفیت اتصال دارند. به همین دلیل در این تحقیق به بررسی رفتار و تاثیرات این سه متغیر در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپرآلیاژ پایه نیکل Haynes230 به ضخامت ۱/۶ میلی‌متر که ترکیب شیمیایی اسمی آن در جدول (۱) آمده است، پرداخته

حرارتی رسوب‌سختی را بر ظرفیت باربری برشی سوپرآلیاژ A286 بررسی نمودند. با این حال، تاکنون مطالعه جامعی در مورد جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپرآلیاژ Haynes 230 که به دلیل پایداری حرارتی بالا و کاربرد گسترده در محفظه‌های احتراق توربین‌های گازی اهمیت ویژه‌ای دارد، انجام نشده است.

با وجود مطالعات انجام‌شده در زمینه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپرآلیاژهای نیکل‌پایه مانند Nimonic 263 [۱۶]، IN625 [۱۷] و A286 [۱۸]، تاکنون پژوهش جامعی در مورد رفتار جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپرآلیاژ Haynes 230 که به دلیل پایداری حرارتی بالا، مقاومت عالی در برابر اکسیداسیون و کاربرد گسترده در قطعات بحرانی مانند محفظه‌های احتراق توربین‌های گازی و نازل‌ها (شکل ۵) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است انجام نشده است. به‌ویژه، ارتباط بین پارامترهای فرآیند (جریان جوشکاری، زمان جوش و نیروی الکتروود)، ریزساختار ناحیه جوش، تشکیل عیوب و خواص مکانیکی در این سوپرآلیاژ به‌صورت سیستماتیک بررسی نشده است.

هدف از این پژوهش، بررسی تجربی و عددی تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بر کیفیت جوش‌های سوپرآلیاژ Haynes 230 است. در این راستا، نمونه‌های جوشکاری‌شده تحت آزمون‌های ریزساختاری، سختی‌سنجی، آزمون‌های استحکامی (کشش-برش در دمای محیط و بالا) و آزمون‌های غیرمخرب قرار گرفته‌اند. همچنین، یک مدل عددی کوپل‌شده حرارتی-الکتریکی-مکانیکی در نرم‌افزار ANSYS توسعه داده شده تا هندسه ناحیه جوش و توزیع دما پیش‌بینی و با نتایج تجربی اعتبارسنجی گردد.

آزمون پیل یکی از آزمون‌های کارگاهی برای تعیین استحکام جوش‌های مقاومتی است. شماتیک این آزمون در شکل (۶) نشان داده شده است. در این آزمون ابتدا ورق‌ها با ابعاد مشخص بریده می‌شوند و با هم‌پوشانی مشخص، جوشکاری می‌شوند. سپس نمونه داخل گیره بسته شده و با استفاده از ابزار مخصوص کشیده می‌شود تا شکست در نمونه اتفاق بیفتد. در نهایت با توجه به مقطع شکست از کیفیت جوش اطلاعات کسب می‌گردد.

آزمون کشش-برش به منظور تعیین استحکام برشی نمونه‌های جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای انجام می‌شود. نقشه و ابعاد نمونه‌ها برای این آزمون در شکل (۷) نشان داده شده است. آزمون کشش-برش دمای بالا در دمای 649°C برای ورق سوپرآلیاژ Haynes230 انجام شده است.

در این تحقیق فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای توسط یک مدل اجزا محدود کوپل مکانیکی، الکتریکی و حرارتی در نرم‌افزار ANSYS و با استفاده از کد APDL شبیه‌سازی شد. جهت افزایش دقت، خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی مواد به صورت غیرخطی و وابسته به دما تعریف شد. در این راستا توزیع دمایی، شکل و اندازه دکمه جوش پیش‌بینی گردید و سپس به منظور صحت‌گذاری مدل المان، هندسه دکمه جوش به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.

می‌شود. بررسی متغیرها در سه سطح صورت گرفت و برای انجام و ادامه آزمون‌ها برای بررسی بیشتر از طرح بهینه‌سازی تاگوچی استفاده شد. تعداد و نحوه انتخاب متغیرها بر این اساس در جدول (۲) آمده است. لازم به ذکر است که مقادیر متغیرهای انتخاب شده با استفاده از مطالعات، شبیه‌سازی اولیه، تجربیات دیگر محققان و آزمایش‌های اولیه بر روی این مواد تعیین شد.

به منظور ارزیابی کیفی نمونه‌های جوشکاری شده آزمون‌های مخرب و غیرمخرب نظیر آزمون متالوگرافی شامل بررسی ریزساختار نواحی سه گانه جوش به کمک میکروسکوپ‌های نوری و الکترونی، بازدید چشمی ناحیه جوش مطابق استانداردهای GE [۸] و ISO [۹]، بازرسی با مایع نافذ جهت شناسایی ترک‌ها و حفراتی ریز سطحی مطابق استاندارد ASTM E1417 [۱۰]، آزمون رادیوگرافی برای شناسایی عیوب داخلی ناحیه جوش مطابق استاندارد ASTM E192 [۱۱]، آزمون میکروسختی ویکرز مطابق استاندارد ASTM E384-11 [۱۲]، آزمون پیل برای تعیین خواص مکانیکی استحکام جوش مطابق استاندارد GE و AWS D17-2 [۱۳] و آزمون کشش-برش در دماهای محیط و بالا مطابق استاندارد ASME Section IX [۱۴] و در نهایت به منظور ارزیابی استحکام برشی نمونه‌های جوشکاری مقاومتی مطابق استاندارد ASME Section IX انجام شده است.

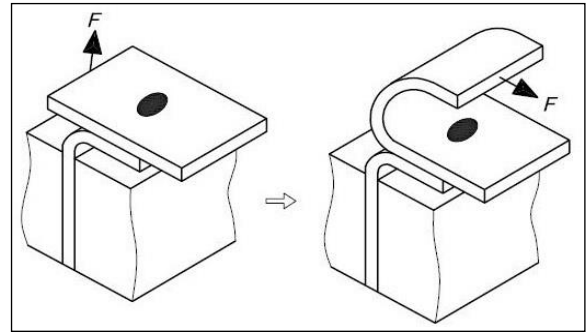
جدول ۱- ترکیب شیمیایی اسمی ورق سوپرآلیاژهای پایه نیکل Haynes230 مورد استفاده در این تحقیق بر حسب درصد وزنی

Ni	B	La	Ti	Al	W	Mn	Cu	Fe	Co	Mo	Cr	Si	C
باقیمانده	۰/۰۱۵	۰/۰۵	۰/۱	۰/۴	۱۴/۰	۰/۶	۰/۵	۳/۰	۵/۰	۲/۰	۲۲/۰	۰/۵	۰/۱

جدول ۲- نحوه انتخاب متغیرها براساس طرح تاگوچی برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های سوپر آلیاژ Haynes230

شماره نمونه	شدت جریان الکتریکی (آمپر)	زمان جوشکاری (سیکل)	نیرو اعمالی (کیلو نیوتن)	متالوگرافی	آزمون پیل	آزمون سختی	آزمون کشش-برش دمای محیط	آزمون کشش-برش دمای بالا
۱	۵۴۰۰	۷	۴/۹	✓	✓	-	✓	-
۲		۹	۵/۶	✓	✓	-	✓	-
۳		۱۱	۶/۳	✓	✓	-	✓	-
۴	۵۸۰۰	۷	۴/۹	✓	✓	-	✓	-
۵		۹	۵/۶	✓	✓	✓	✓	✓
۶		۱۱	۶/۳	✓	✓	-	✓	-
۷	۶۲۰۰	۷	۴/۹	✓	✓	-	✓	-
۸		۹	۵/۶	✓	✓	-	✓	-
۹		۱۱	۶/۳	✓	✓	-	✓	-

بودن شدت جریان الکتریکی و زمان جوشکاری موجب افزایش احتمال خروج مذاب و ایجاد حفره در نمونه‌ها می‌گردد. همچنین تشکیل حفره‌ها احتمالاً می‌تواند ناشی از سفتی^۲ پائین الکتروود دستگاه و یا عدم هم‌راستایی مناسب آن با ورق‌ها باشد. به منظور شناخت بهتر و درک مناسب از این عیوب، آزمون متالوگرافی با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد استفاده قرار گرفت که در ادامه به آن پرداخته می‌شود.



شکل ۶- شماتیک آزمون پیل برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپر آلیاژ Haynes230 [۱۳].

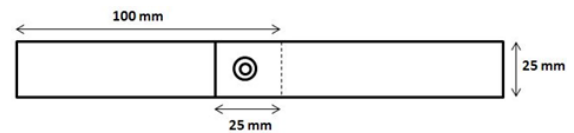


الف



ب

شکل ۸- تصویر ورق سوپر آلیاژ Haynes230 الف-پس از جوشکاری نقطه‌ای و ب-پس از بازرسی با مایع نافذ.



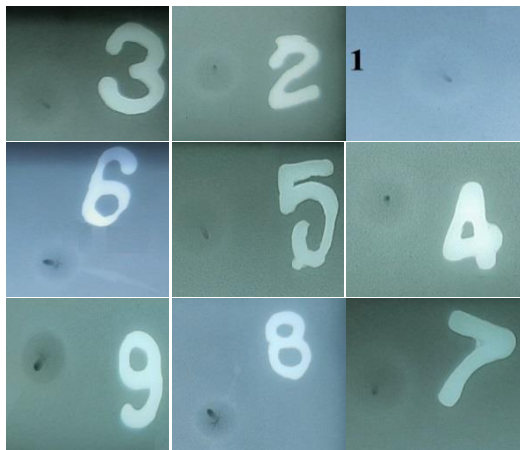
شکل ۷- شماتیک و ابعاد آزمون کشش-برش برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپر آلیاژ Haynes230 [۱۴].

۳. نتایج و بحث

۳-۱- بازرسی‌های غیر مخرب

پس از اجرای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، نمونه‌ها تحت بازرسی‌های غیر مخرب چشمی، مایع نافذ و رادیوگرافی قرار گرفتند. بازرسی چشمی جوش با بزرگنمایی ۶ تا ۱۰ برابر به منظور پیدا کردن عیوبی مثل ترک‌های سطحی، بیرون‌زدگی ذوب فلز^۱، پلیسه‌های سطحی، چسبیدن الکتروود به سطح فلز و فرو رفتگی بیش از حد ورق‌ها، انجام شد. همه نمونه‌ها دارای ظاهری مناسب، فاقد ترک و یا دیگر عیوب سطحی بودند. همچنین نمونه‌ها برای شناسایی ترک‌های سطحی ریز تحت بازرسی مایع نافذ قرار گرفتند و هیچگونه ترک و یا حفره سطحی مشاهده نشد. شکل (الف) تصاویر دکمه جوش پس از جوشکاری نقطه‌ای و شکل (ب) تصاویر نمونه پس از آزمون بازرسی با مایع نافذ را نشان می‌دهد.

شکل (۹) نیز تصاویر فیلم رادیوگرافی نمونه‌های جوشکاری مقاومتی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود که در نمونه‌ها، حفره داخلی با اندازه مختلف، وجود دارد. وجود عناصر آلیاژی مختلف در سوپر آلیاژها موجب افت جوش‌پذیری این مواد می‌گردد. مقاومت الکتریکی بالا و هدایت حرارتی پایین سوپر آلیاژها باعث افزایش نرخ رشد دکمه جوش می‌شود که این مساله احتمال بیرون‌زدگی مذاب را افزایش می‌دهد. با بررسی تصاویر رادیوگرافی مشاهده می‌شود که اندازه حفره داخلی در نمونه‌های شماره ۶، ۸ و ۹ افزایش یافته است. همچنین خروج مذاب در این نمونه‌ها، قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد بالا



شکل ۹- تصاویر رادیوگرافی دکمه جوش ورق سوپر آلیاژ Haynes230 پس از جوشکاری نقطه‌ای در شرایط مختلف.

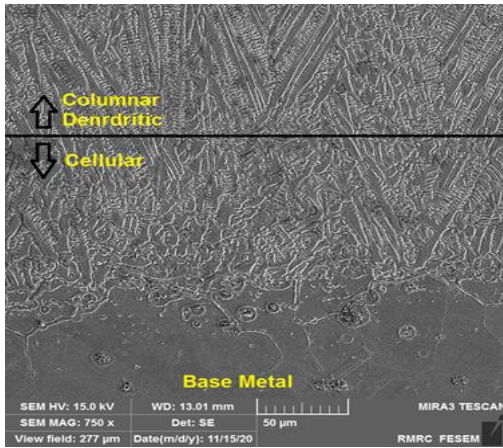
۳-۲- بازرسی‌های مخرب

۳-۲-۱- بررسی ریزساختار

تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار مناطق مختلف جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپر آلیاژ Haynes230 در شکل (۱۰) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود ناحیه اتصال به چهار منطقه ناحیه ذوب یا دکمه جوش، منطقه

² Stiffness

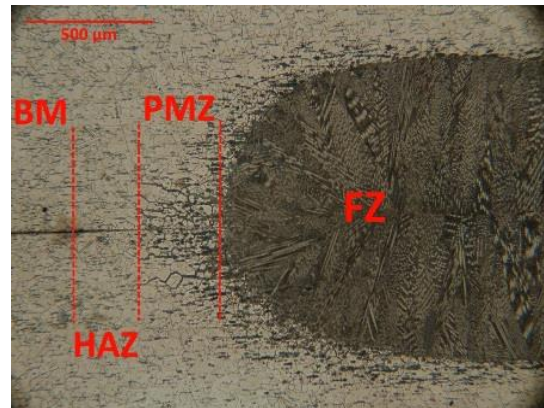
¹ Expulsion



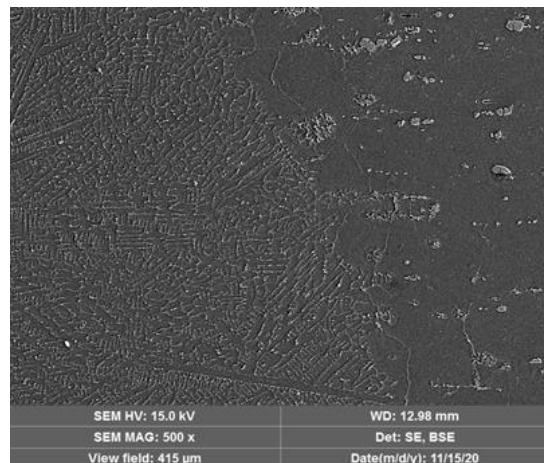
شکل ۱۲- تصویر ریزساختار ناحیه جوش نشان‌دهنده اختلاف مد انجماد در نواحی کناری و نواحی میانی در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپرآلیاژ Haynes230

به طور کلی مقادیر بالای گرادیان دمایی و نرخ رشد باعث ایجاد ساختار ریزتر و مقادیر پائین آن موجب تشکیل ساختار درشت‌تر می‌شود. ساختار سلولی در مقادیر بالاتر G/R و ساختار دندریتی ستونی در مقادیر پائین‌تر این نسبت تشکیل می‌شود. گولد^۱ [۱۵] اندازه بازوهای دندریتی اولیه را در جوشکاری مقاومتی مدل‌سازی کرد. او مشاهده کرد که در ابتدای انجماد و در نواحی نزدیک به فلز پایه مقادیر G و R بیشتر از انتهای انجماد و در مرکز دکه جوش است. به عبارت دیگر مقدار نسبت G/R با پیشرفت انجماد کاهش می‌یابد. این مساله در تحقیق بمانی^۲ و همکارانش [۱۶] بر روی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپرآلیاژ Nimonic263 مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که مد انجماد در نواحی نزدیک به فلز پایه به دلیل نسبت G/R بالاتر، سلولی و در نواحی مرکز دکه جوش به دندریتی ستونی تبدیل می‌شود. فاصله خط سالییدوس و لیکوئیدوس در دباگرام فازی موجب ایجاد ناحیه خمیری می‌شود. در این منطقه دما به اندازه ذوب کامل نمی‌رسد اما به دلیل نزدیکی به دمای ذوب منطقه خمیری را تشکیل می‌دهد. البته به دلیل سریع و غیر تعادلی بودن فرآیند، منطقه خمیری در همه نمونه‌ها مشاهده نمی‌شود. رسیدن به دمای نزدیک سالییدوس باعث تغییرات ساختاری در مناطق اطراف دکه جوش می‌شود. اندازه منطقه متأثر از حرارت در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به دلیل سریع بودن فرآیند و دانسیته بالا منبع حرارتی بسیار کوچک است. در برخی از منابع منطقه متأثر از حرارت خود به سه منطقه منطقه تبلور مجدد دانه ریز، منطقه تبلور مجدد دانه درشت و منطقه بازیابی تقسیم می‌شود. این تقسیم‌بندی براساس سختی این مناطق و مشاهدات ریزساختاری

خمیری، منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه تقسیم می‌شود. شکل (۱۱) نیز تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی این آلیاژ را در یکی از نمونه‌ها پس از جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای نشان می‌دهد. در این شکل اختلاف ریز ساختار در نواحی جوش و نواحی اطراف به خوبی مشاهده می‌گردد. ساختار دندریتی-ستونی جوشکاری مقاومتی ساختار غالب در منطقه دکه جوش نشان از ذوب و انجماد در این ناحیه دارد. نکته قابل توجه دیگر تفاوت مد انجماد در نواحی کناری جوش با مناطق مرکزی است. شکل (۱۲) تفاوت ساختار این دو منطقه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد نواحی کناری جوش ساختار سلولی و نواحی مرکزی ساختار دندریتی ستونی دارد. مد انجماد با توجه به مقادیر گرادیان دمایی (G) و نرخ رشد یا انجماد (R) و نسبت آنها تعیین می‌شود.



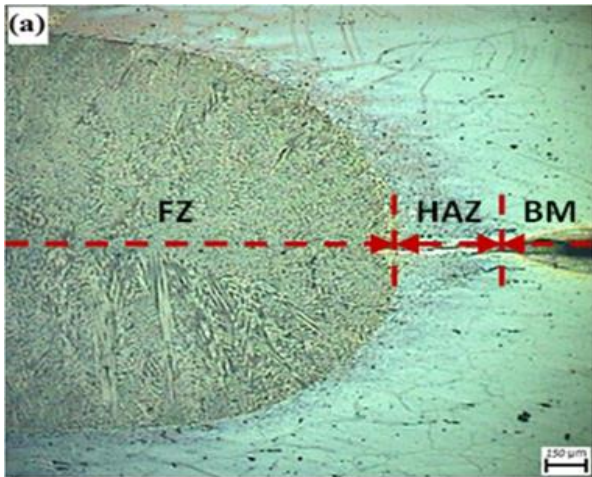
شکل ۱۰- تصویر میکروسکوپ نوری از ریزساختار دکه جوش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپرآلیاژ Haynes230. منطقه ذوب، PMZ: منطقه ذوب جزئی، HAZ: منطقه متأثر از حرارت، BM: فلز پایه.



شکل ۱۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی از ریزساختار فصل مشترک بین فلز پایه و فلز جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپرآلیاژ Haynes230

² Bemani

¹ Gould



شکل ۱۳- تصویر ریزساختار مناطق مختلف جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سوپرآلیاژ پایه نیکل IN625. تصاویر نواحی جوش (FZ)، متاثر از حرارت (HAZ) و فلز پایه (BM) [۱۷].

شکل (۱۵) تصاویر ریزساختار نمونه جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با دو شدت جریان ۵۴۰۰ و ۵۸۰۰ آمپر را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در نمونه با آمپر کمتر دکمه جوش به درستی شکل نگرفته است. در مقابل دکمه جوش مناسبی در نمونه با آمپر بالاتر تشکیل شده است. اندازه دکمه جوش با استفاده از ابزار آنالیز تصویری ImageJ برای نمونه با شدت جریان ۵۴۰۰ آمپر، ۴/۹ میلی‌متر اندازه‌گیری شد. شدت جریان الکتریکی یکی از مهمترین عوامل تشکیل شدن دکمه جوش در جوشکاری مقاومتی است.

در شکل (۱۶)، اثر شدت جریان الکتریکی بر ابعاد دکمه جوش نشان داده شده است. مطابق نمودار با افزایش جریان الکتریکی قطر و ارتفاع دکمه جوش افزایش می‌یابد. البته در شدت جریان‌های بالا میزان افزایش قطر و ارتفاع دکمه جوش کاهش می‌یابد. دلیل این مساله کاهش چگالی جریان است.

به عبارت دیگر با افزایش شدت جریان جوشکاری، اندازه دکمه جوش بزرگتر شده که این امر منجر به کاهش چگالی جریان می‌گردد. با توجه به معیار GE حداقل قطر و نفوذ جوش برای ورق با ضخامت ۱/۶ میلی‌متر به ترتیب ۵/۰۸ و ۰/۳۲ میلی‌متر است. نفوذ جوش در ۸۰ درصد قطر دکمه جوش اندازه‌گیری می‌گردد. مطابق نمودار شکل (۱۶-الف) همه نمونه‌ها دارای نفوذ جوش مناسب هستند. همچنین با توجه به نمودار شکل (۱۶-ب)، قطر دکمه جوش در شدت جریان ۵۴۰۰ کمتر از معیار استاندارد GE است.

صورت می‌گیرد. رسوب کاربیدها و ترکیبات بین‌فلزی مختلف در منطقه متأثر از حرارت ویژگی دیگر این نواحی است.

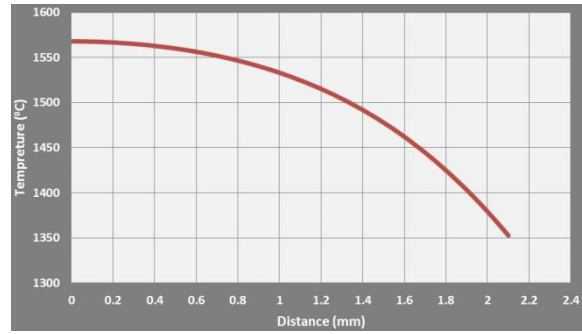
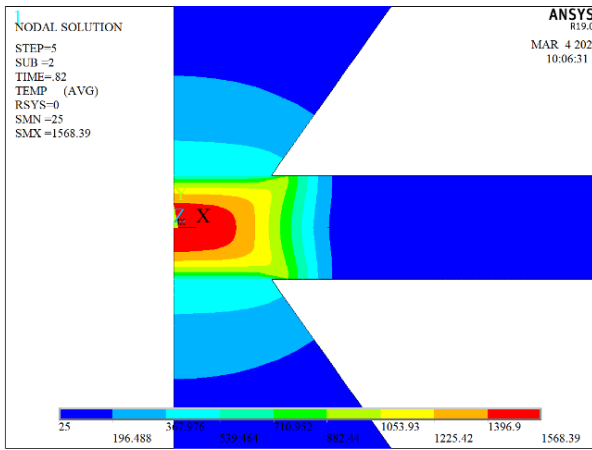
آشتیانی و همکارانش [۱۷] تفاوت ریزساختار در فلز پایه، منطقه متأثر از حرارت و دکمه جوش را در سوپر آلیاژ پایه نیکل IN625 نشان دادند. با توجه به شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که ریزساختار دکمه جوش، به صورت دندریت‌های ستونی رشد کرده است که نشان‌دهنده ذوب و انجماد در این منطقه است. در صورتی که ریزساختار فلز پایه دانه‌های نسبتاً درشت است که حاصل کار مکانیکی و عملیات حرارتی قبلی روی قطعه است. در منطقه متأثر از حرارت، ذوبی اتفاق نمی‌افتد اما به دلیل توزیع حرارت، می‌توان این منطقه را به سه قسمت تبلور مجدد با دانه ریز و درشت و منطقه بازیابی تقسیم کرد. همچنین آنها گزارش کردند که در برخی نمونه‌ها منطقه‌ای نزدیک به دکمه جوش وجود دارد که در این منطقه، ذوب جزئی اتفاق افتاده است. رسوب ترکیبات بین‌فلزی و وجود کاربیدهای مختلف در مناطق ذوب جزئی و متأثر از حرارت پدیده دیگری بود که نویسندگان این مقاله به آن اشاره کردند. به‌منظور شناسایی ماهیت فازهای تشکیل شده در نواحی ذوب جزئی و ناحیه متأثر از حرارت از آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس همراه با میکروسکوپ الکترونی روبشی استفاده شد. نتایج EDS نشان داد که فازهای رسوبی در این نواحی عمدتاً شامل کاربیدهای غنی از کروم (Cr_7C_3 و $Cr_{23}C_6$) و ترکیبات بین‌فلزی غنی از تنگستن و مولیبدن (مانند μ -phase یا Laves phase) هستند. این فازها عمدتاً در مرز دانه‌ها و در مجاورت ناحیه جوش مشاهده شدند که با کاهش مقاومت به شکست و سختی محلی همراه بود. وجود این فازهای شکننده، به‌ویژه در PMZ، می‌تواند یکی از دلایل اصلی شکست بین‌رویه‌ای (interfacial fracture) در آزمون‌های مکانیکی باشد.

در تحقیق دیگری که توسط مارتین^۱ و همکارانش [۱۸] روی سوپرآلیاژ رسوب سخت A286 انجام شد، تغییرات ریزساختاری پس از جوشکاری مقاومتی مورد بررسی قرار گرفت. تشکیل فاز η و حذف فاز γ' در دکمه جوش از جمله تغییرات ریزساختاری پس از جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ذکر شده است.

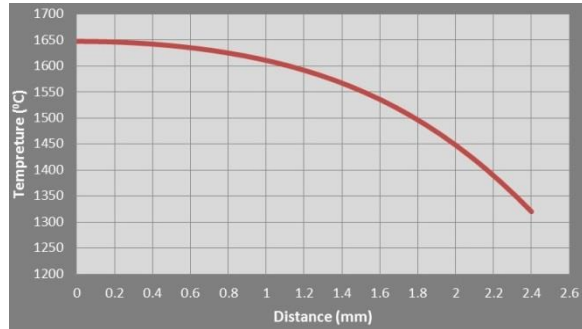
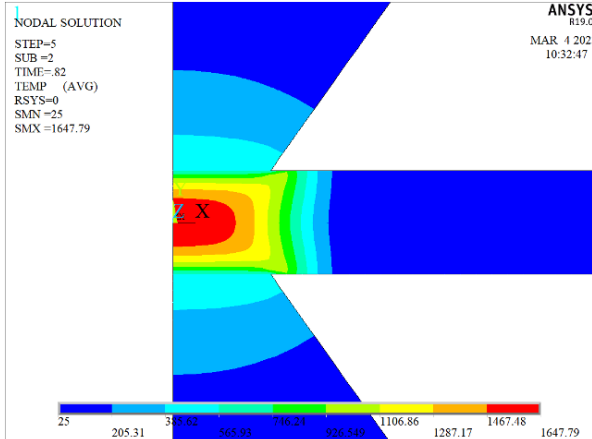
۲-۲-۲- بررسی اثر شدت جریان بر دکمه جوش

شکل (۱۴) اثر شدت جریان الکتریکی را بر هندسه دکمه جوش و دمای حداکثر پس از شبیه‌سازی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود ابعاد دکمه جوش و دمای حداکثر با افزایش جریان الکتریکی افزایش می‌یابد.

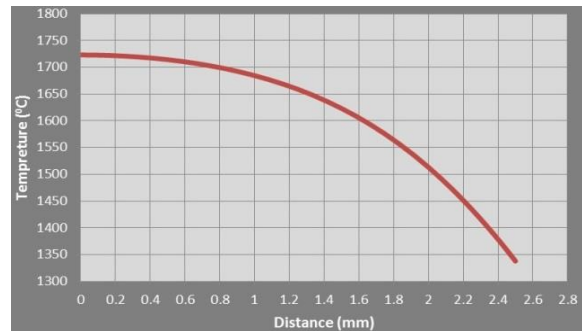
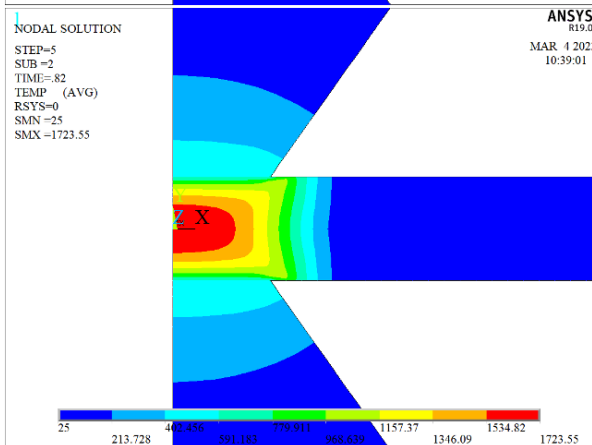
¹ Martin



الف



ب



ج

شکل ۱۴- کانتور دمایی در جوشکاری نقطه‌ای با شدت جریان‌های مختلف (الف) ۵۴۰۰، (ب) ۵۸۰۰، (ج) ۶۲۰۰.

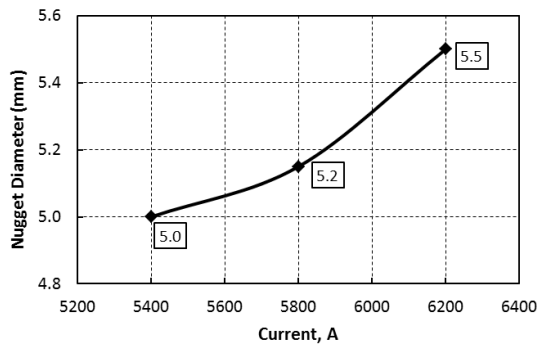


ب

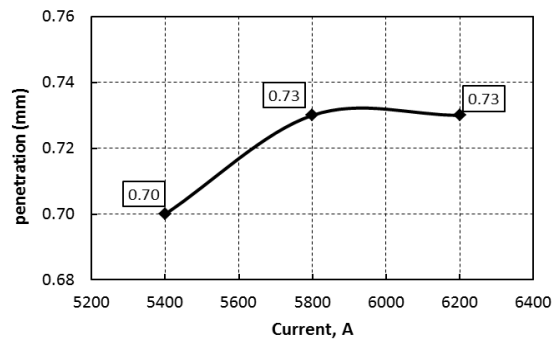


الف

شکل ۱۵- تصاویر ریزساختار جوشکاری نقطه‌ای در حالت‌های مختلف (الف) جریان ۵۴۰۰ و (ب) جریان ۵۸۰۰.

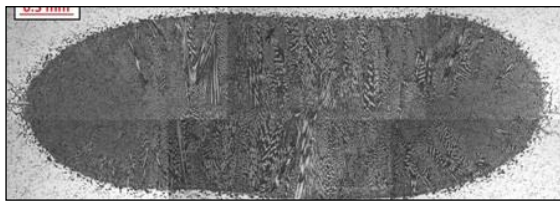


ب



الف

شکل ۱۶- نمودار اثر شدت جریان الکتریکی بر هندسه دکمه جوش (الف) قطر دکمه، (ب) نفوذ جوش (در زمان جوشکاری ۹ سیکل).



الف



ب



ج

شکل ۱۷- تصاویر ریزساختار دکمه جوش در نمونه‌های (الف) شماره ۲، (ب) شماره ۵، (ج) شماره ۸.

شکل (۱۷) ریز ساختار جوش را در نمونه‌های شماره ۲، ۵ و ۸ را نشان می‌دهد. افزایش ابعاد دکمه جوش ناشی از افزایش شدت جریان الکتریکی در تصاویر متالوگرافی نیز مشهود است. همچنین ساختار دندربیتی به دلیل نرخ بالای سرد شدن در دکمه جوش به وضوح مشاهده می‌گردد. خروج مذاب از دکمه جوش در شدت جریان و زمان جوش‌های بالا باعث ایجاد حفره و ترک در مرکز جوش می‌شود که این مساله می‌تواند باعث کاهش استحکام جوش شود. اثر حفرات و عیوب مختلف در استحکام اتصال بستگی به اندازه و محل عیب مورد نظر دارد. تاکنون گزارش‌هایی مبنی بر عدم اثر حفرات انقباضی در مرکز جوش بر استحکام اتصال از محققین مختلف منتشر شده است [۱۹ و ۲۰]. استاندارد GE برای جوش‌های مقاوم‌تی معیار پذیرش عیوب را به شکل زیر ارائه کرده است:

(الف) عیوب عمود بر سطح جوش داخل دکمه جوش نباید از ۱/۳ عمق نفوذ تجاوز کند.

(ب) عیوب داخل دکمه جوش در جهت موازی با سطح جوش نباید بزرگتر از ۴۰ درصد دکمه جوش باشند.

(ج) عیوبی که از داخل دکمه جوش به خارج از دکمه راه پیدا کردند مورد قبول نیستند.

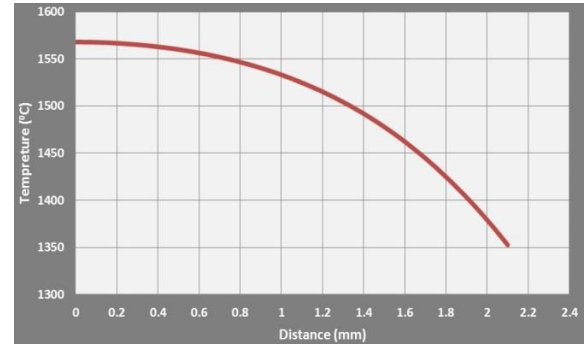
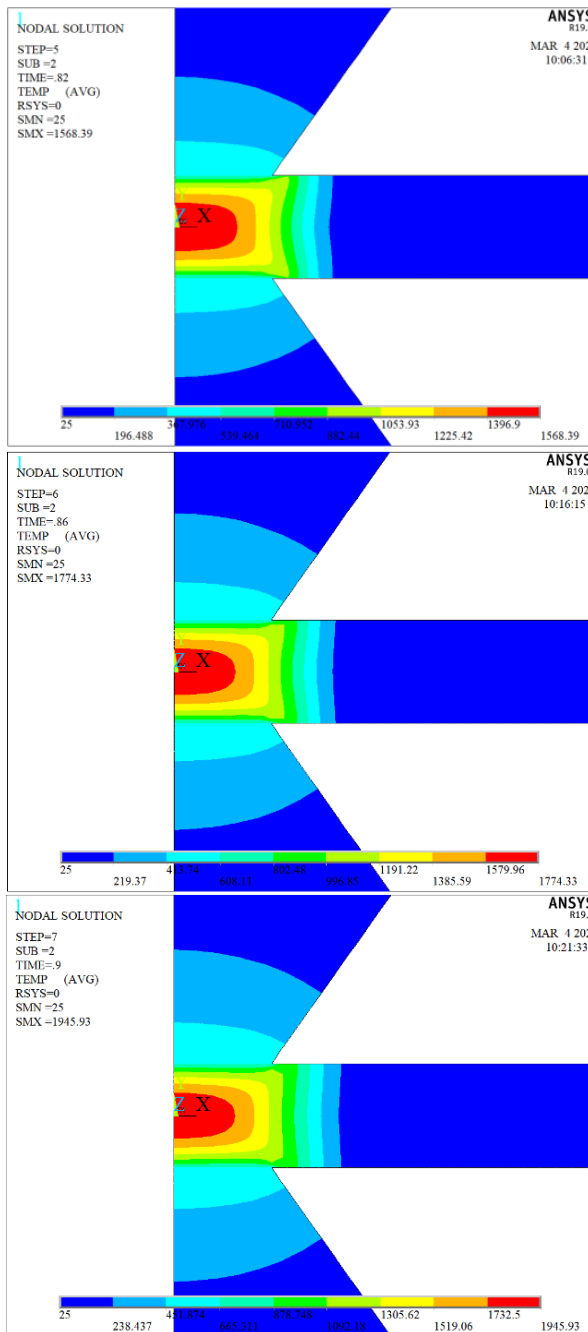
وجود حفره در مرکز دکمه جوش می‌تواند ناشی از افزایش حرارت ورودی و به دنبال آن بیرون‌زدگی مذاب اتفاق بیفتد. همچنین سفتی پائین دستگاه، عدم همراستایی مناسب الکتروود با ورق‌ها و یا وجود آلودگی در فصل مشترک قطعات باعث ایجاد عیوب مختلف در دکمه جوش می‌گردد.

مطابق معیار منطقه‌ای که وجود عیب در آن مورد تأیید است، در تصویر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود عیوب نمونه شماره ۵ در منطقه مذکور قرار دارد، اما در نمونه شماره ۸ بعضی از عیوب از منطقه مورد تأیید خارج شده است. لذا مطابق استاندارد GE نمونه شماره ۵ تأیید و نمونه شماره ۸ مورد تأیید نمی‌باشد.

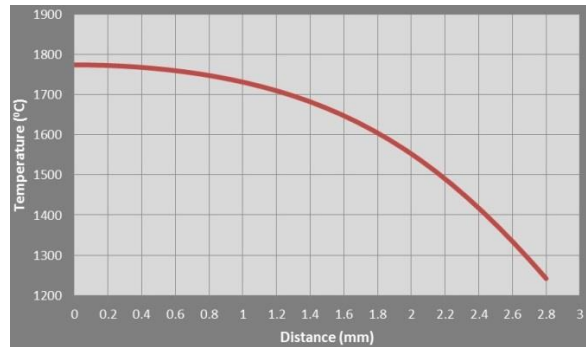
۳-۲-۳- بررسی اثر زمان جوشکاری بر دکمه جوش

شکل (۱۸) اثر زمان جوشکاری بر هندسه دکمه جوش و دمای حداکثر پس از شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. مطابق تصاویر مشاهده می‌شود که افزایش زمان جوشکاری باعث افزایش ابعاد دکمه جوش و افزایش دمای حداکثر می‌گردد.

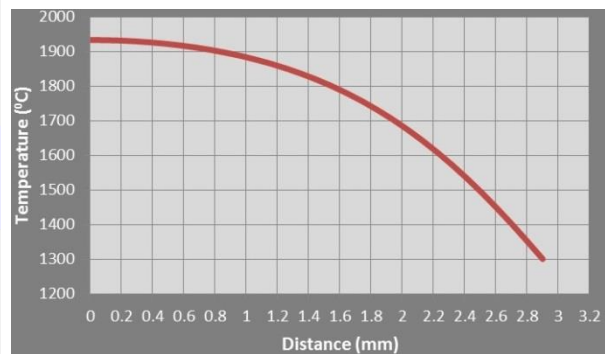
شکل (۱۹) اثر زمان جوشکاری بر قطر و ارتفاع دکمه جوش را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش زمان جوشکاری سبب افزایش قطر و نفوذ دکمه جوش می‌شود. البته با افزایش بیشتر زمان جوشکاری، نرخ رشد ابعاد دکمه جوش کاهش می‌یابد. با افزایش زمان جوشکاری، گرمای تولید شده افزایش می‌یابد ولی از طرفی فرصت انتقال حرارت نیز افزایش می‌یابد. به عبارتی حرارت فرصت بیشتری برای فرار کردن از قطعه دارد.



الف

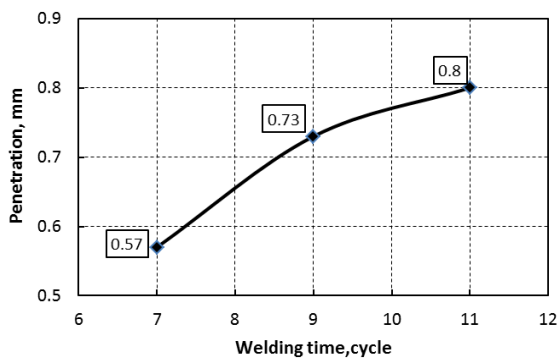


ب

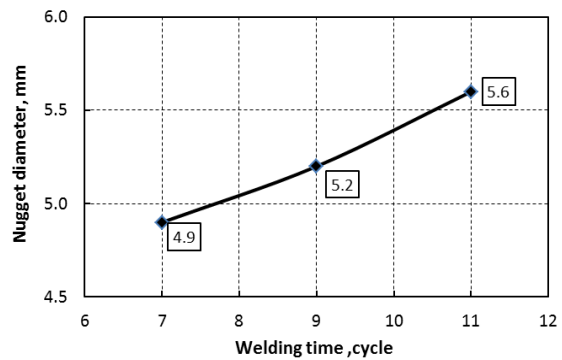


ج

شکل ۱۸- کانتور دمایی در سیکل‌های مختلف جوشکاری نقطه‌ای (الف) سیکل ۷، (ب) سیکل ۹، (ج) سیکل ۱۱.



ب



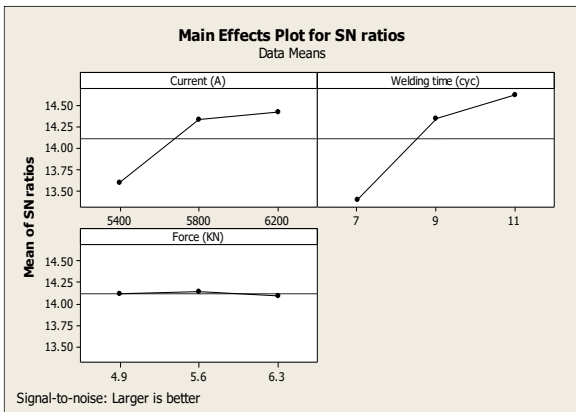
الف

شکل ۱۹- نمودار تاثیر زمان جوشکاری بر هندسه دکمه جوش (الف) قطر دکمه، (ب) نفوذ جوش.

همانطور که اشاره شد، جهت ارزیابی هر یک از متغیرها بر دکمه جوش، از سیستم بهینه‌سازی و ارزیابی تاگوچی بهره گرفته شد. شکل (۲۱) نتایج حاصل از این بررسی را نشان می‌دهد. برای بررسی کارایی و اثر هر متغیر، نسبت سیگنال به نویز بکار رفته است. این نسبت انحراف یک متغیر از مقدار بهینه آن می‌باشد. هرچه این عدد مثبت‌تر باشد آن سطح مطلوب‌تر خواهد بود [۲۱]. با توجه به اینکه هدف اصلی این پژوهش، دستیابی به حداقل عیوب دکمه جوش مطابق با استاندارد GE مثلاً معیار بهینه‌سازی بر اساس نزدیکی به مقدار مجاز تعریف شده است. اگرچه در تحلیل Taguchi از معیار Larger is Better برای سادگی محاسبات استفاده شده، اما در تفسیر نتایج، تنها آن دسته از نمونه‌ها که ضمن رعایت معیار GE، فاقد نقص (مانند expulsion یا ترک) بوده‌اند، به‌عنوان شرایط بهینه در نظر گرفته شده‌اند. فرمول محاسبه نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای این نوع منطقی به صورت رابطه (۱) است.

$$S/N = -10 \cdot \log (\Sigma (1/Y^2)/n) \quad (1)$$

مقادیر متوسط نسبت سیگنال به نویز (S/N) برای سه متغیر شدت جریان الکتریکی، زمان جوشکاری و نیروی الکتروود در شکل (۲۱) آمده است. همچنین مطابق جدول (۳)، زمان جوشکاری و شدت جریان الکتریکی به ترتیب بالاترین اثر را داشته و نیروی الکتروود کمترین اثر را بر ابعاد دکمه جوش دارد.

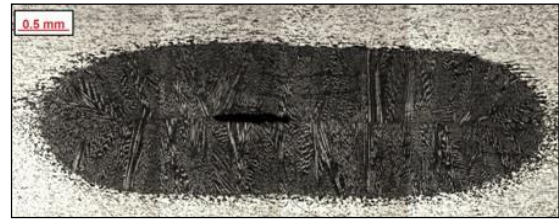


شکل ۲۱- مقادیر متوسط نسبت سیگنال به نویز (اندازه دکمه).

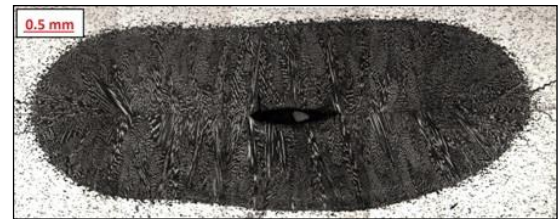
جدول ۳- جدول پاسخ نسبت سیگنال به نویز

سطح	شدت جریان (آمپر)	زمان جوشکاری (سیکل)	نیروی الکتروود (کیلو نیوتن)
۱	۱۳/۶	۱۳/۴	۱۴/۱
۲	۱۴/۳	۱۴/۳	۱۴/۱
۳	۱۴/۴	۱۴/۶	۱۴/۱
Delta	۰/۸۳	۱/۲	۰/۰۵
Rank	۲	۱	۳

ریز ساختار جوش نمونه‌های شماره ۴، ۵ و ۶ در شکل (۲۰) نشان داده شده است. همانطور که مشخص است با افزایش زمان جوشکاری هم ابعاد جوش و هم میزان عیوب در دکمه جوش افزایش می‌یابد. با توجه به منطقه مورد تأیید استاندارد GE، نمونه‌های شماره ۴ و ۵ تأیید و نمونه شماره ۶ تأیید نخواهد شد. همچنین با توجه به معیار GE برای حداقل اندازه دکمه جوش، تنها نمونه شماره ۵ مورد تأیید قرار می‌گیرد.



الف



ب



ج

شکل ۲۰- تصاویر ریزساختار دکمه جوش در نمونه‌های مختلف (الف) شماره ۴، (ب) شماره ۵، (ج) شماره ۶.

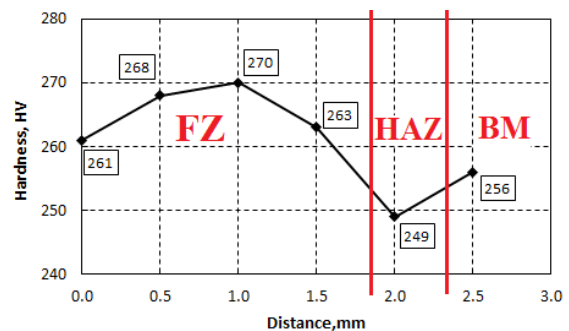
۳-۲-۴- بررسی اثر نیروی الکتروود بر دکمه جوش

شبیه‌سازی اثر فشار بر دکمه جوش نشان داد که نیروی الکتروود اثر چندانی بر نتایج ندارد. البته لازم به ذکر است که نیروی الکتروود در شکل گرفتن و سالم بودن دکمه جوش بسیار اثر گذار است. نیروی الکتروود بر پدیده بیرون‌زدگی مذاب اثر زیادی دارد. در واقع در صورتی که نیروی الکتروود به اندازه کافی نباشد نیروی مذاب بر نیروی الکتروود غلبه کرده و از دکمه جوش خارج می‌گردد. همچنین در صورتی که نیروی الکتروود بسیار بالا در نظر گرفته شود میزان فرو رفتگی در سطح کار افزایش می‌یابد. البته به نظر می‌رسد نیروهای در نظر گرفته شده در این تحقیق در بازه مناسب بوده و اثر مخربی در تشکیل دکمه جوش و سطح قطعه کار نداشته است.

۳-۲-۵- بررسی نتایج آزمون میکروسختی

شکل (۲۲)، تغییرات میزان میکروسختی در نواحی مختلف دکمه جوش تا فلز پایه شده نمونه جوشکاری شده شماره ۵ را نشان می‌دهد. میانگین میکروسختی در مناطق دکمه جوش، منطقه متأثر از حرارت و فلز پایه به ترتیب ۲۶۶، ۲۴۹ و ۲۵۴ ویکرز می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود برخلاف فولادهای کربنی که پس از جوشکاری مقاومتی تغییرات سختی زیادی در آنها اتفاق می‌افتد، در سوپرآلیاژها این مساله وجود ندارد و حداکثر اختلاف سختی در مناطق مختلف حدود ۶ درصد است. افزایش جزئی سختی در منطقه دکمه جوش نیز ناشی از ریز شدن ساختار و تشکیل کاربیدهای MC در مناطق بین دندریتی است. همچنین با توجه به شکل مشاهده می‌شود که سختی مرکز دکمه جوش مقداری از سختی مناطق کناری دکمه جوش کمتر است. این مساله نیز ناشی از اختلاف ساختار در مناطق مرکزی و کناری دکمه جوش است. همانطور که اشاره شد ساختار در مناطق نزدیک به مرکز دکمه جوش ساختاری سلولی دارد و در مرکز جوش ساختار به دندریتی ستونی تبدیل می‌شود. موضوع دیگری که در نتایج میکروسختی قابل مشاهده است، کاهش سختی در ناحیه متأثر از حرارت ناشی از افزایش جزئی اندازه دانه است.

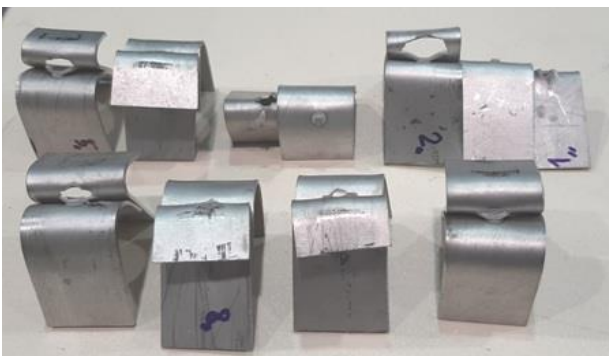
با وجود تشکیل کاربیدهای غنی از کروم و مقادیر جزئی از ترکیبات بین‌فلزی در نواحی HAZ و PMZ تغییرات سختی در سراسر ناحیه جوش محدود بوده است. این رفتار با ساختار متالورژیکی Haynes 230 سازگار است؛ چرا که این سوپرآلیاژ عمدتاً از طریق تقویت در محلول جامد (با عناصر Cr و Mo, W) سخت می‌شود و فاقد عناصر اصلی تشکیل‌دهنده فازهای رسوبی سخت‌کننده (مانند Al و Ti در مقادیر بالا) است. بنابراین، فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای منجر به تغییرات چندانی در مکانیزم سختی نشده و پروفیل سختی عمدتاً تحت تأثیر ریزدانه‌شدگی و تغییرات جزئی در توزیع کاربیدها قرار گرفته است.



شکل ۲۲- نمودار تغییرات میزان میکروسختی در مناطق مختلف جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپرآلیاژ Haynes230.

۳-۲-۶- بررسی نتایج آزمون پیل

آزمون پیل به منظور بررسی کیفی خواص مکانیکی نمونه‌های جوش نقطه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. این آزمون صرفاً یک آزمون کیفی است. به عبارت دیگر پراکندگی نسبتاً بالا، وابستگی آزمون به نحوه کلمپ نمونه و جنس فلز پایه موجب شده است که نتوان به تنهایی از این آزمون برای پیش‌بینی خواص مکانیکی اتصال استفاده کرد. شکل (۲۳) تصاویر نمونه‌هایی که با شدت جریان مختلف جوشکاری شده‌اند را پس از آزمون پیل نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود این نمونه‌ها همگی دچار شکست محیطی^۱ شده و هیچ نشانه‌ای از شکست در ناحیه فصل مشترک^۲ وجود ندارد. شکست محیطی نشان از تشکیل دکمه جوش دارد. این مساله نشان می‌دهد که متغیرهای در نظر گرفته شده برای جوشکاری ورق با این ضخامت برای این آزمون مناسب نمی‌باشد. آلیاژها با استحکام و سختی بالا مانند سوپرآلیاژهای پایه نیکلی معمولاً در آزمون پیل دچار شکست محیطی می‌شوند. در واقع می‌توان گفت آزمون پیل می‌تواند متغیرهای الکتریکی نامناسب را تشخیص دهد اما در مورد اطمینان از صحت متغیرهای الکتریکی باید از ابزارهای دیگر مانند متالوگرافی و یا آزمون کشش-برش، استفاده کرد.



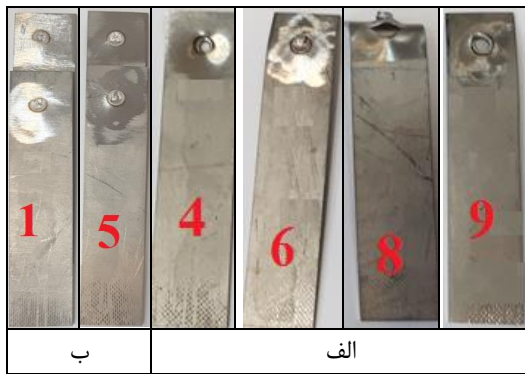
شکل ۲۳- تصاویر شکست نمونه‌ها پس از انجام آزمون پیل در شدت جریان مختلف (زمان جوشکاری: ۹ سیکل و نیروی الکتروود: ۴/۹ کیلونیوتن).

۳-۲-۷- بررسی نتایج آزمون کشش-برش

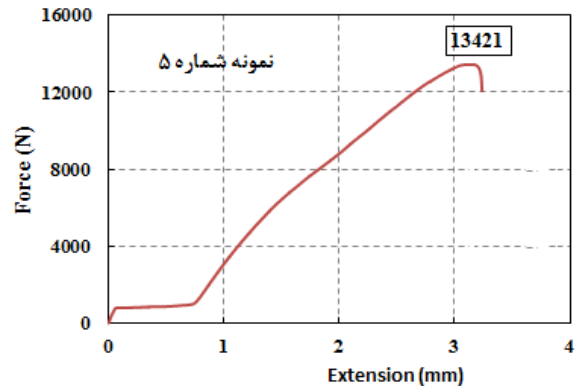
آزمون کشش-برش دمای محیط برای اندازه‌گیری و مقایسه خواص مکانیکی اتصال ورق‌های سوپرآلیاژ Haynes230 که در شرایط مختلف جوشکاری شده‌اند، برای نمونه‌های شماره ۱ تا ۹، انجام شده است. برای نمونه تصویر نمودار نیرو-جابجایی دمای محیط نمونه شماره ۵ در شکل (۲۴) نشان داده شده است.

² Interfacial

¹ Pull-out



شکل ۲۵- تصاویر مدهای شکست پس از انجام آزمون کشش-برش نمونه‌های مختلف در دمای محیط (الف) شکست محیطی، (ب) شکست فصل مشترکی.



شکل ۲۴- تصویر نمودار نیرو-جابجایی نمونه شماره ۵.

جدول ۴- مقادیر نیروی برشی حداکثر برای نمونه‌های جوشکاری شده در شرایط مختلف

شماره نمونه	نیروی برشی حداکثر (نیوتن)	مد شکست
۱	۱۲۰۶۶	فصل مشترک
۲	۱۲۱۷۰	فصل مشترک
۳	۱۳۵۴۳	فصل مشترک
۴	۱۲۸۷۵	فصل مشترک
۵	۱۳۴۲۱	فصل مشترک
۶	۱۳۶۶۰	محیطی
۷	۱۳۰۷۲	فصل مشترک
۸	۱۳۴۴۰	فصل مشترک
۹	۱۴۴۳۳	محیطی

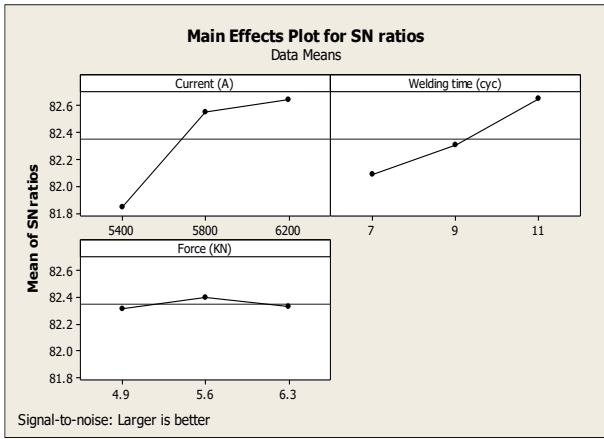
جدول ۵- الزامات نیروی برشی برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپرآلیاژ Haynes230

Ultimate Strength 620 MPa to 1034 Mpa, N per spot weld		ضخامت اسمی ورق (میلیمتر)
میانگین	حداقل	
۵۸۲۵	۴۷۳۵	۰/۱
۷۰۵۰	۵۷۱۵	۱/۱
۸۲۵۰	۶۶۹۵	۱/۳
۹۷۲۰	۷۸۷۵	۱/۴
۱۱۵۴۵	۹۳۸۵	۱/۶

با توجه به عدم وجود داده‌های کافی نیروی برشی حداکثر برای جوش مقاومتی نقطه‌ای در دماهای بالا، می‌توان استحکام برشی حداکثر ورق را با استحکام برشی جوش نقطه‌ای آن مقایسه نمود. استحکام کششی نهایی ورق سوپرآلیاژ Haynes230 در دمای ۶۴۹ °C، ۶۶۸ مگاپاسکال است. با ساده‌سازی می‌توان استحکام برشی نهایی را طبق رابطه (۲) محاسبه نمود [۲۲]:

مقادیر نیروی برشی حداکثر برای تمامی نمونه‌های جوشکاری شده در جدول (۴) آمده است. با توجه به این جدول، نمونه‌های شماره ۶ و ۹ دارای بیشترین نیروی برشی حداکثر در بین نمونه‌ها هستند. مطابق شکل (۲۵)، با بررسی سطح شکست در نمونه‌های کشش-برش دو نوع مد شکست مشاهده شده است. در نمونه‌های شماره ۶ و ۹ شکست محیطی و در باقی نمونه‌ها، شکست فصل مشترک رخ داده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در شکست محیطی نیروی بیشتری صرف شکست نمونه می‌گردد. در بررسی مد شکست نمونه‌های آزمون کشش-برش در شدت جریان‌های مختلف نیز نشان داد که افزایش شدت جریان الکتریکی باعث تبدیل مد شکست از ناحیه فصل مشترک به شکست محیطی می‌گردد. علت این امر را افزایش اندازه دکمه جوش در اثر افزایش شدت جریان عنوان کردند. همچنین در این نمونه‌ها اندازه دکمه جوش به بیشترین مقدار در بین نمونه‌ها رسیده است. لذا می‌توان چنین استدلال نمود که اندازه دکمه جوش در نیروی برشی حداکثر و مد شکست اثرگذار است. از طرفی در این نمونه‌ها بیشترین میزان عیوب در دکمه جوش بوجود آمده است، به نحوی که مطابق استاندارد GE این دو نمونه در بازه مورد تأیید قرار نگرفتند. در نتیجه می‌توان چنین استدلال نمود که اثر اندازه دکمه جوش بر افزایش نیروی برشی حداکثر بر کاهش آن ناشی از حضور عیوب مختلف در دکمه جوش غلبه می‌کند. البته همانطور که قبلاً نیز بیان شد برخی از مقالات اثر وجود عیب را بر استحکام اتصال بررسی کردند و گزارش‌های مختلفی مبنی بر اثر ناچیز عیوب دکمه جوش در استحکام اتصال منتشر شده است.

با توجه به استاندارد AWS D17-2 برای جوشکاری مقاومتی، حداقل نیروی برشی در آزمون کشش-برش مطابق جدول (۵) آمده است. با مقایسه نتایج آزمون کشش-برش نمونه‌ها با حداقل نیروی برشی در جدول (۵) نتیجه می‌شود که تمامی نمونه‌ها در بازه مورد تأیید استاندارد فوق، قرار می‌گیرند.



شکل ۲۷- مقادیر متوسط نسبت سیگنال به نویز S/N (نیروی شکست).

۳-۲-۸- صحنه‌گذاری و اعتبارسنجی مدل

در این تحقیق شبیه‌سازی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با استفاده از نرم افزار ANSYS-APDL انجام شد. شکل (۲۸) توزیع دمایی و اندازه دکمه جوش را در پایان زمان جوشکاری نشان می‌دهد. با توجه به اینکه دمای ذوب کامل آلیاژ Haynes230، ۱۳۷۱°C است، نقاطی که در محدوده دمایی بالاتر از این دما قرار می‌گیرند دکمه جوش را تشکیل می‌دهند. از طرفی چون المان مورد استفاده متقارن است، می‌توان نمای مدل را از دو بعدی به سه بعدی تغییر داد. با اعمال این دستور، دکمه جوش مطابق شکل (۲۹) به دست می‌آید.

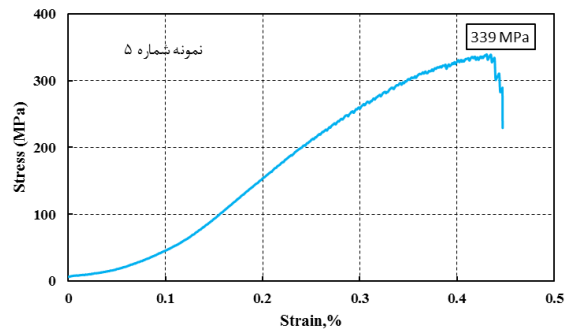
جدول (۷) اندازه دکمه جوش را در حالت شبیه‌سازی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است مطابقت نسبتاً مناسبی بین نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی وجود دارد. البته لازم به ذکر است که خطا نیز چه در آزمون تجربی و چه در شبیه‌سازی عددی وجود دارد. از جمله این خطاها می‌توان به خطای اپراتور و دستگاه، خطا در اندازه‌گیری دکمه در حالت تجربی، خطا در مفروضات شبیه‌سازی مانند خواص مواد اشاره کرد. نکته دیگر برهم‌کنش خطاهاست که ممکن است در راستای هم سبب تشدید و اگرایی و یا در تضاد با هم سبب همگرایی گردد. در نهایت با اندازه‌گیری خطای نسبی در نمونه‌های مختلف، میانگین خطای نسبی در حدود ۴ درصد محاسبه شد که قابل قبول می‌باشد.

در شکل (۳۰) نمودار دما بر حسب فاصله برای نمونه شماره ۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود دمای مرکز دکمه جوش بیشترین مقدار را داراست. با دور شدن از مرکز نمونه دما کاهش می‌یابد تا جایی که دیگر ذوبی اتفاق نمی‌افتد. با استفاده از این نمودار می‌توان اندازه دکمه جوش را محاسبه نمود.

(۲) استحکام کششی $\times 0.5 =$ استحکام برشی نهایی

در نتیجه می‌توان حداکثر استحکام برشی ورق سوپر آلیاژ Haynes230 را در دمای ۶۴۹°C، ۳۳۴ مگاپاسکال تخمین زد. با توجه به نتایج آزمون کشش-برش در این دما برای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای و همچنین با در نظر گرفتن قطر دکمه جوش ۵ میلی‌متر برای نمونه شماره ۵، نمودار تنش-کرنش مطابق شکل (۲۶) به دست می‌آید. همانطور که مشاهده می‌شود استحکام برشی نهایی نمونه جوشکاری شده از استحکام برشی سوپرآلیاژ بالاتر به دست آمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در دمای مذکور، جوش نقطه‌ای ایجاد شده توانایی تحمل تنش‌های برشی در حد فلز پایه را دارد.

نتایج بهینه‌سازی روش تاگوچی مطابق جدول (۶) و شکل (۲۷) از سه متغیر انتخابی، به ترتیب شدت جریان الکتریکی، زمان جوشکاری و نیروی الکتروود بیشترین اثر را بر مقدار نیروی شکست دارند.

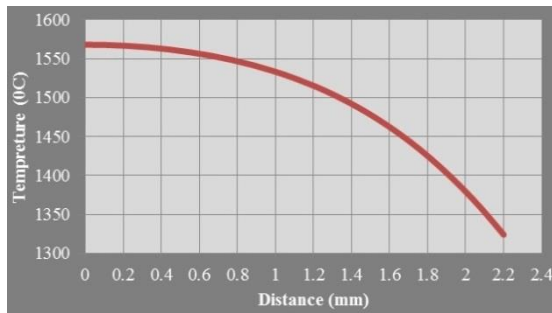


شکل ۲۶- نمودار تنش-کرنش نمونه شماره ۵ از جنس سوپرآلیاژ Haynes230 در دمای ۶۴۹°C.

جدول ۶- رده‌بندی اثر متغیرهای فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق

سوپرآلیاژ Haynes230

سطح	شدت جریان (الکتریکی آمپر)	زمان جوشکاری (سیکل)	نیروی الکتروود (کیلو نیوتن)
۱	۸۱/۸	۸۲/۱	۸۲/۳
۲	۸۲/۶	۸۲/۳	۸۲/۴
۳	۸۲/۷	۸۲/۷	۸۲/۳
Delta	۰/۸	۰/۶	۰/۰۸
Rank	۱	۲	۳

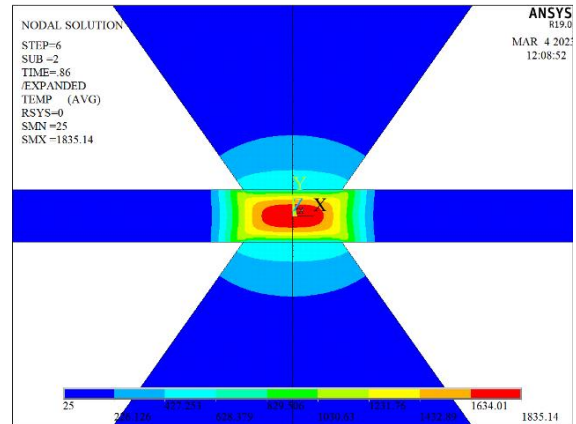


شکل ۳۰- نمودار دما بر حسب فاصله از مرکز دکمه جوش در جوشکاری ورق سوپرآلیاژ Haynes230 نمونه شماره ۱.

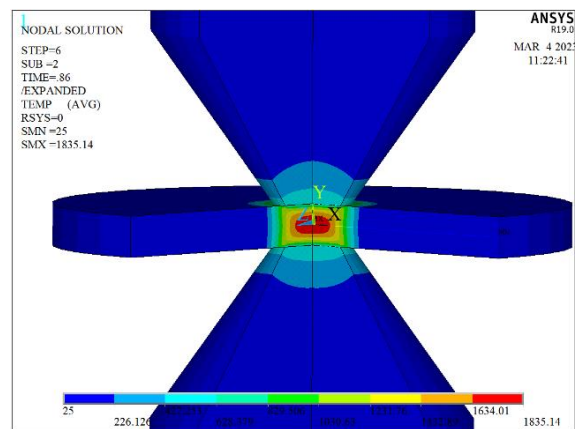
۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی متغیرهای موثر بر کیفیت اتصال در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپرآلیاژ پایه نیکل Haynes230 پرداخته شد و نتایج به شرح زیر به دست آمد:

۱. در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای زمان ثابت، با افزایش شدت جریان الکتریکی اندازه دکمه جوش افزایش می‌یابد. از سوی دیگر افزایش بیش از حد شدت جریان الکتریکی منجر به بیرون‌زدگی مذاب و ایجاد عیب در قطعه می‌گردد.
۲. در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با شدت جریان ثابت، با افزایش زمان جوشکاری، اندازه دکمه جوش افزایش می‌یابد. افزایش بیش از حد زمان جوشکاری نیز بر اتصال قطعات اثر مخرب دارد.
۳. افزایش شدت جریان الکتریکی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای سبب افزایش اندازه حفره انقباضی می‌گردد. این حفرات به خاطر خروج مذاب از دکمه جوش حفره درون دکمه ایجاد می‌شود که اثر این حفرات بر خواص مکانیکی ناچیز است.
۴. با افزایش شدت جریان الکتریکی و زمان در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، نیروی کششی-برشی نیز افزایش می‌یابد. همچنین بررسی مد شکست نمونه‌های آزمون کشش-برش در شدت جریان‌های مختلف نیز نشان می‌دهد که افزایش شدت جریان الکتریکی موجب افزایش اندازه دکمه جوش شده و به دنبال آن مد شکست از فصل مشترکی به محیطی تغییر می‌یابد.
۵. بر اساس یافته‌های تجربی و تحلیل آماری Taguchi، بهینه‌ترین پارامترهای فرآیند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای برای ورق ۱/۶ میلی‌متری سوپرآلیاژ Haynes 230 عبارت‌اند از: جریان جوشکاری ۵۸۰۰ آمپر، زمان جوش ۹ سیکل و نیروی الکتروود ۵/۶ کیلونیوتن. در این شرایط، قطر دکمه جوش ۵/۲ میلی‌متر به دست آمد. همچنین، استحکام برشی نمونه جوشکاری شده در دمای محیط ۱۳/۴ KN و در دمای ۶۴۹ درجه سانتیگراد برابر با ۳۳۹ MPa اندازه‌گیری شد.



شکل ۲۸- توزیع دمایی پس از جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق سوپر آلیاژ Haynes230 نمونه شماره ۱.



شکل ۲۹- نمای سه بعدی دکمه جوش در جوشکاری نقطه‌ای ورق سوپرآلیاژ Haynes230 نمونه شماره ۱.

جدول ۷- مقادیر اندازه دکمه جوش در دو حالت شبیه‌سازی و

آزمایشگاهی برای ورق سوپرآلیاژ Haynes230

شماره نمونه	نتایج شبیه‌سازی	نتایج آزمایشگاهی	میزان انحراف (درصد)
۱	۴/۰	۴/۳	۷
۲	۵/۰	۵/۰	۰
۳	۵/۵	۵/۲	۶
۴	۴/۵	۴/۹	۸
۵	۵/۳	۵/۲	۲
۶	۵/۸	۵/۶	۴
۷	۴/۸	۴/۹	۲
۸	۵/۵	۵/۵	۰
۹	۶/۰	۵/۶	۷

- welds between low carbon steel and advanced high strength steel, Computational Materials Science, 2016, 17, 556-563.
- [3] Mendez P.F., Eagar T.W., Welding processes for aeronautics, *Advance Materials and Processes*, 2001, 159(5) 39-43.
- [4] Brijesh M., Desai M., Optimization of process parameters for resistance spot welding process of austenitic SS304 using response surface method—a review, *International Journal for Technological Research in Engineering*, 2014.
- [5] Donachie M. J., Donachie S. J., *Superalloys: A Technical Guide*. ASM International, 2002.
- [6] Lippold J.C., Kiser S.D., DuPont J.N., *Welding metallurgy and weldability of nickel-base alloys*, John Wiley & Sons, 2011.
- [7] <https://www.Aerospacewelding.com>.
- [8] P8R-AG1 REV. B, Resistance welding (spot, seam and projection), 1974.
- [9] ISO 16338, *Welding for aerospace – applications Resistance spot and seam welding*, 2013.
- [10] ASTM E1417/E1417M, *Standard Practice for Liquid Penetrant Testing*, 2021.
- [11] ASTM E192-20, *Standard Reference Radiographs of Investment Steel Castings for Aerospace Applications*, 2021.
- [12] ASTM E384-11, *Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials*, 2012.
- [13] AWS D17.2/D17.2M-, *Specification for resistance welding for aerospace applications*. 2019.
- [14] ASME Section IX, *BPVC Section IX-Welding, Brazing, and Fusing Qualifications*, 2021.
- [15] Gould J., Workman D., Fracture morphologies of resistance spot welds exhibiting hold time sensitivity behavior in Proc, *Sheet Metal Welding Conference VIII*, 1998.
- [16] Bemani M., Pournavari M., Resistance spot welding of Nimonic263 nickel-based superalloy: microstructure and mechanical properties, *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 25(1) 28–36.
- [17] Ashtiani H. R., Zarandooz R., Microstructural and mechanical properties of resistance spot weld of IN625 super alloy, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 84(1-4) 607-619.
- [18] Martín O., Tiedra P. De, San-Juan M., Combined effect of resistance spot welding and precipitation hardening on tensile shear load bearing capacity of A286 superalloy. *Materials Science and Engineering A*, 2017, 688, 309-314.
- [19] Ma C., Chen D., et al., Microstructure and fracture characteristics of spot-welded DP600 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 485(1-2) 334-346.
- [20] Zhang H., Expulsion and its influence on weld quality. *Welding Journal*, 1999, 373-s.
- [21] Shafee S., Naik B., Sammaiah K., Resistance spot weld quality characteristics improvement by Taguchi method, *Materials Today: Proceedings*, 2015, 2(4-5) 2595-2604.
- [22] Oberg E., Jones F., *Machinery's Handbook*. Industrial Press, 27th Edition, 2004.

۶. در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای نیروی الکتروود اثر ناچیزی بر اندازه دکمه جوش دارد ولی نیروی الکتروود در شکل گرفتن و رسیدن به دکمه جوش سالم، بسیار موثر است. در صورتی که نیروی الکتروود به اندازه کافی نباشد، نیروی مذاب بر نیروی الکتروود غلبه کرده و از دکمه جوش خارج می‌گردد. همچنین در صورتی که نیروی الکتروود بسیار بالا در نظر گرفته شود، میزان فرو رفتگی در سطح کار افزایش می‌یابد.
۷. در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اختلاف مقادیر میکروسختی بین مناطق مختلف جوش نظیر ناحیه دکمه جوش، ناحیه متأثر از حرارت و فلز پایه، ناچیز می‌باشد. افزایش میکروسختی سختی در ناحیه دکمه جوش ناشی از ریز شدن ساختار و کاهش جزئی سختی در منطقه متأثر از حرارت به علت درشت شدن ساختار است.
۸. استحکام برشی نهایی نمونه جوشکاری شده از استحکام برشی سوپرآلیاژ بالاتر به دست آمده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در دمای مذکور، جوش نقطه‌ای ایجاد شده توانایی تحمل تنش‌های برشی در حد ورق پایه را دارد.
۹. نتایج شبیه سازی با نرم‌افزار اجزا محدود ANSYS با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد و مطابقت خوبی بین نتایج مشاهده شد. با اندازه‌گیری خطای نسبی در نمونه‌های مختلف جوشکاری شده مشاهده شد که میانگین خطای نسبی در حدود ۴ درصد است. بنابراین می‌توان از مدل نرم‌افزاری بدون انجام تحقیقات پرهزینه و زمان‌بر آزمایشگاهی برای پیش‌بینی فرآیند استفاده نمود.

تقدیر و تشکر

به این وسیله از کلیه همکاران در گروه مپنا و شرکت مهندسی موادکاران که به نحوی ما را در انجام این تحقیق یاری نموده‌اند، کمال تشکر و سپاس‌گزاری به عمل می‌آید.

مراجع

- [1] Agashe S., Zhang H., Selection of schedules based on heat balance in resistance spot welding, *Welding Journal*, 2003, 82(7) 179S-183S.
- [2] Long H., Jin X., Shao J., Zhu H., Effect of holding time on microstructure and mechanical properties of resistance spot



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Numerical and Experimental Investigation of Solidification Microstructure in Resistance Spot Welding of Haynes 230 Superalloy

Meisam Eftekhari^{1*}, Ali Mohammad Kolagar¹, Pouria Raaisi²

1. MSc, Material Science and Engineering, MavadKaran Engineering Company, Mapna Group, Tehran, Iran.

2. M.Sc, Mechanical Engineering, MavadKaran Engineering Company, Mapna Group, Tehran, Iran.

* Corresponding author: meisameftekhari@gmail.com

Paper history:

Receive Date: 20 August 2025

Revise Date: 04 October 2025

Accept Date: 05 October 2025

Abstract:

Resistance spot welding is the most common welding process for joining metal sheets. In the power plant parts manufacturing industry, spot welding of nickel-based superalloy sheets, which have low weldability, is a challenging task. In resistance spot welding, three parameters of current intensity, welding time and electrode force have the greatest effect on the quality of the joints. In this research, the role and effects of these three variables in resistance spot welding of Haynes230 nickel-based superalloy sheet, which is widely used in the construction of gas turbine combustion chambers, have been investigated. In order to evaluate the quality of the welded samples, destructive and non-destructive tests such as metallographic tests, including the examination of the microstructure of weld areas by optical and electron microscopes, inspection of the weld area by penetrating liquid to identify surface cracks and Holes, radiography test to identify the internal defects of the weld area, microhardness test, Peel test to evaluate the weld strength, tension-shear test at ambient and high temperature to determine the shear strength of welds were performed. Also, the resistance spot welding process was simulated in ANSYS software by a finite element model of mechanical, electrical and thermal coupling using APDL code. In this regard, the temperature distribution, shape and size of the weld button were predicted and then, in order to validate, the element model and the geometry of the weld button obtained from the simulation results were compared with the experimental results, and a good match was observed between them. The optimal process parameters were identified as a welding current of 5800 A, welding time of 9 cycles, and electrode force of 5.6 kN, which resulted in a weld nugget with a diameter of 5.2 mm—exceeding the GE standard minimum of 5.08 mm for 1.6-mm-thick sheets and achieved a shear strength of 13.4 kN at room temperature and 339 MPa at 649°C.

Keywords:

Resistance Spot Welding,
Ni-Based Superalloy,
Haynes230,
Numerical simulation.

Please cite this article using:

Meisam Eftekhari, Ali Mohammad Kolagar, Pouria Raaisi, Numerical and Experimental Investigation of Solidification Microstructure in Resistance Spot Welding of Haynes 230 Superalloy, in Persian, Founding Research Journal, 2025, 9(1) 55-71.

DOI: 10.22034/frj.2025.542238.1209

Journal homepage: www.foundingjournal.ir