

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

شبیه‌سازی المان محدود اثر جریان پالس دوم بر توزیع دما و اندازه دکه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد TRIP۱۱۰۰

حمید اشرفی^{۱*}، ایمان حاجیان نیا^۲

۱- استادیار، دانشکده مهندسی شیمی و مواد، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

۲- دکترای مهندسی مواد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

hashrafi@shahroodut.ac.ir*

مقاله پژوهشی

چکیده

اطلاعات مقاله

در این پژوهش به شبیه‌سازی اثر جریان پالس دوم جوشکاری بر توزیع دمایی و اندازه دکه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد استحکام بالای TRIP۱۱۰۰ به روش المان محدود پرداخته شد. در ادامه، اثر جریان پالس دوم بر اندازه و ریزساختار دکه جوش و همچنین خواص مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولاد ذکر شده به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. توزیع دمایی، ابعاد دکه جوش و سیکل‌های گرمایش و سرمایش آن حین جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای توسط شبیه‌سازی پیش‌بینی شدند. با توجه به سیکل‌های دمایی حاصل از شبیه‌سازی و نمودار استحاله در سرد شدن پیوسته فولاد، ریزساختار دکه جوش در تمام جریان‌های جوشکاری به صورت تمام مارتنزیتی پیش‌بینی شد. نتایج شبیه‌سازی مطابقت خوبی را با نتایج تجربی از خود نشان داد. مشاهده شد که با افزایش جریان پالس دوم، قطر دکه جوش به شکل لگاریتمی افزایش می‌یابد. همچنین، ریزساختار دکه جوش در تمام نمونه‌ها به صورت تمام مارتنزیتی بود. ارزیابی خواص مکانیکی نمونه‌های جوشکاری شده توسط آزمون کشش برشی نشان داد که بیشینه نیرو در این آزمون با افزایش قطر دکه جوش افزایش می‌یابد. با این وجود، انرژی شکست با افزایش قطر دکه جوش کاهش یافت.

دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۳

پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۴

کلید واژگان:

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای

فولاد TRIP

شبیه‌سازی

قطر دکه جوش

Finite Element Simulation of the Effect of the Second Pulse Current on Temperature Distribution and Nugget Size in Resistance Spot Welding of TRIP۱۱۰۰ Steel

Hamid Ashrafi^{1*}, Iman Hajiannia²

۱- Assistant Professor, Faculty of Chemical and Materials Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

۲- PhD in Materials Engineering, Department of Materials Science and Engineering, Technical and Vocational University (TVU),

Tehran, Iran.

* hashrafi@shahroodut.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Dor:

۲۰.۱۰.۰۱.۱.۲۴۲۳۲۲۲۶.۱۴۰۲.۱۷.۲.۵.۱

Keywords:

Resistant Spot Welding

TRIP Steel

Simulation

Weld Nugget Diameter

Abstract

In this study, simulation of the effect of the second pulse current on temperature distribution and nugget size of TRIP۱۱۰۰ steel during resistant spot welding was performed by finite element method. Then, the effect of the second pulse current on the weld nugget size, weld nugget microstructure and mechanical properties of the resistant spot welds of the above-mentioned steel was experimentally investigated. Temperature distribution, weld nugget dimensions and heating and cooling cycles during resistant spot welding were predicted by simulation. Based on the simulated thermal cycles and continuous cooling transformation diagram of the TRIP۱۱۰۰ steel, a fully martensitic microstructure was predicted for the weld nugget in all currents. A good agreement was obtained between the simulated and experimental results. It was observed that the nugget diameter logarithmically increases with increasing the second pulse current. Furthermore, the microstructure of weld nugget in all samples was fully martensitic. Assessment of the mechanical properties of the welded samples by shear tension test demonstrated that the maximum load increases with increasing the weld nugget diameter. Nevertheless, the fracture energy decreased with increasing the nugget diameter.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Hamid Ashrafi, Iman Hajiannia, Finite Element Simulation of the Effect of the Second Pulse Current on Temperature Distribution and Nugget Size in Resistance Spot Welding of TRIP۱۱۰۰ Steel, New Process in Material Engineering, ۲۰۲۳, ۱۷(۲), ۶۷-۷۸.

۱- مقدمه

جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به دلیل سهولت اتوماتیک شدن فرایند و راندمان بالای انرژی به‌طور گسترده در صنایع اتومبیل‌سازی و هوایی جهت ساخت بدنه‌های سبک و مستحکم مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. صنایع اتومبیل‌سازی در حال حاضر بر تولید خودروهایی سبک وزن و اقتصادی همراه با ایمنی بالا تمرکز کرده‌اند [۲]. در سال‌های اخیر فولادهای پیشرفته استحکام بالا مانند فولادهای دوفازی و فولادهای TRIP^۱ به‌عنوان راه‌حل جدیدی جهت کاهش مصرف سوخت، افزایش ایمنی خودرو و تولید خودروهایی اقتصادی مطرح شده‌اند [۳]. در بین این فولادها، فولادهای TRIP ترکیب فوق‌العاده‌ای از استحکام و انعطاف‌پذیری را فراهم می‌کنند. ریزساختار این فولادها عمدتاً شامل فریت، بینیت، مارتنزیت و مقداری آستنیت باقیمانده است. این آستنیت باقیمانده حین تغییر شکل به مارتنزیت تبدیل شده که سبب جذب انرژی بالا توسط این فولادها در حین تصادفات می‌شود [۴-۵].

با وجود نیاز صنعت خودرو به فولادهای پیشرفته استحکام بالا، جوش‌پذیری این فولادها هنوز به اندازه فولادهای متداول شناخته شده نیست. به همین دلیل در دهه گذشته تحقیقات زیادی در زمینه جوش‌پذیری و عملکرد مکانیکی جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولادهای پیشرفته استحکام بالا انجام شده است. خان و همکاران^۲ [۶] نشان دادند که استحکام کششی جوش‌های نقطه‌ای فولادهای پیشرفته استحکام بالا بیشتر از فولادهای استحکام بالای متداول است. ژانگ و همکاران^۳ [۷] نرم شدن منطقه متأثر از حرارت را در جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای غیرمشابه فولادهای دوفازی DP۶۰۰ و DP۷۸۰ شناسایی کرده و مشاهده کردند که شکست ابتدا از سمت فولاد DP۷۸۰ آغاز می‌شود. در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه جوشکاری مقاومتی پالسی و عملیات حرارتی پس از جوشکاری فولادهای TRIP نیز صورت گرفته است. به‌طور مثال، بالتازار هراندز و همکاران^۴ [۸] جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با دو پالس جریان را بر روی ورق فولاد TRIP۸۰۰ اعمال کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که

رفتار کششی برشی بهبود یافته است. سجادی نیکو و همکاران [۹] اثر سه نوع مختلف عملیات حرارتی پس از جوشکاری را بر جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولاد TRIP۷۰۰ مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که مطابق با سطح پالس اعمالی، خواص مکانیکی جوش توسط مکانیزم‌هایی از قبیل کاهش سختی در منطقه ذوب در اثر تمپر شدن مارتنزیت تأثیر می‌پذیرد. افتخاری میلانی و همکاران [۱۰] ریزساختار جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای تک پالس و دوپالس فولاد TRIP۹۸۰ را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آنان نشان داد که در پالس دوم و در جریان کمتر از پالس اول، اندازه دانه‌های آستنیت اولیه کوچک‌ترین مقدار را دارا هستند. علاوه بر این، اندازه دانه‌های آستنیت اولیه تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مکانیکی ساختار مارتنزیت لایه‌ای داشت.

ایجاد گرما با عبور جریان جوشکاری از قطعات کار حین جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای صورت می‌گیرد که این گرما با مقاومت قطعه کار، زمان و مجذور جریان عبوری رابطه مستقیم دارد [۱۱]. به دلیل زمان بسیار کوتاه جوشکاری، جریان جوشکاری اغلب به‌منظور ایجاد حرارت کافی در سطح کیلوآمپر انتخاب می‌شود. جریان جوشکاری عموماً به‌عنوان فاکتوری کلیدی در تعیین کیفیت جوش در نظر گرفته می‌شود. اسلانار و همکاران^۵ [۱۲] مشاهده کردند که جریان جوشکاری تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار شکست ورق‌های فولاد گالوانیزه کرومات‌شده دارد. جریان بالاتر همیشه انتخاب بهتری نبود. پورانوری و مرعشی [۱۳] نشان دادند که اندازه منطقه ذوب با افزایش جریان جوشکاری برای نقطه‌جوش‌های مقاومتی فولاد دوفازی DP۹۸۰ افزایش می‌یابد. حالت شکست از حالت فصل مشترکی به کندگی تبدیل شد و به‌طور هم‌زمان تمپر شدن مارتنزیت نیز افزایش یافت.

اگرچه بررسی‌های تجربی اطلاعات کاربردی مفیدی را فراهم می‌نمایند، اما پژوهش‌های تجربی زمان‌بر بوده و نیازمند صرف هزینه‌های زیادی هستند. علاوه بر این، تکنیک‌های انجام آزمون نیز با توجه به محدوده پارامترهای

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از یک ورق فولاد TRIP1100 با ضخامت ۱ میلی‌متر و ترکیب شیمیایی ارائه شده در جدول (۱) استفاده شد. جهت تعیین دماهای استحاله این فولاد و همچنین رسم نمودار استحاله در سرد شدن پیوسته، نرم‌افزار JmatPro مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌هایی از ورق فولاد اولیه با استفاده از گیوتین برقی تهیه شد و با پارامترهای مشخص شده در جدول (۲) تحت جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای پالسی با دو پالس جریان قرار گرفت. قبل از جوشکاری، ورق‌ها به صورت مکانیکی اکسیدزدایی شده و با استفاده از محلول استون چربی‌زدایی شدند تا از بروز عیب در جوش توسط آلودگی‌های سطحی جلوگیری شود. جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با الکتروود مسی آبگرد به قطر ۶ میلی‌متر و زاویه پخ ۴۵ درجه انجام شد.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی فولاد مورد استفاده در این پژوهش (درصد وزنی).

عنصر	درصد وزنی
کربن	۰/۱۸
منگنز	۲/۴۵
سیلیوم	۱/۱
گوگرد	۰/۰۳۶
فسفر	۰/۰۴۸
کروم	۰/۰۵۸
وانادیوم	۰/۰۲
نیکل	۰/۰۴
مس	۰/۰۸
آلومینیوم	۰/۰۱
آهن	بقیه

جدول (۲): پارامترهای جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای.

نیروی جوشکاری (کیلو نیوتن)	۳/۵
زمان فشار (سیکل)	۱۱
زمان نگهداری (سیکل)	۱۱
جریان پالس اول (کیلو آمپر)	۱۰
زمان جوشکاری (سیکل)	۱۱
جریان پالس دوم (کیلو آمپر)	۱۲، ۹، ۶

پس از جوشکاری، ماکروساختار و ریزساختار دکه جوش‌های ایجاد شده مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌ها به شکل طولی از مرکز دکه جوش مقطع زده شده، مانده شده و سپس تا سنباده ۲۵۰۰ سنباده‌زنی شدند. در ادامه

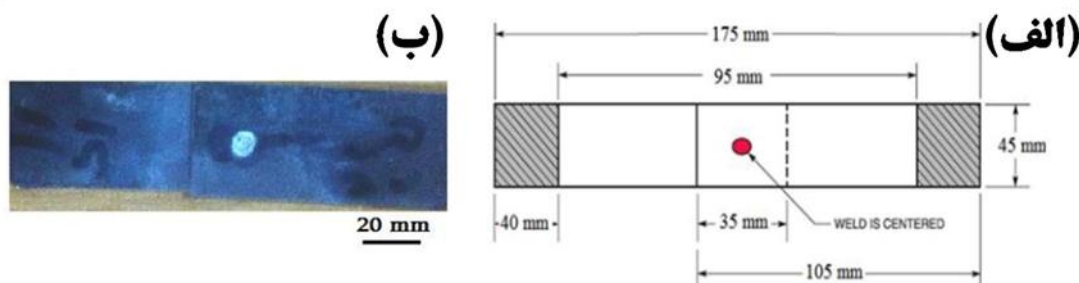
قابل‌دستیابی در هر تجهیز دارای محدودیت هستند. شبیه‌سازی عددی روشی جایگزین برای دستیابی به درک بهتر از مکانیزم‌های جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای است. یک شبیه‌سازی عددی مؤثر می‌تواند علاوه بر صرفه‌جویی در زمان و هزینه، به منظور بررسی اثر پارامترهای مختلف در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بدون هیچ محدودیتی مورد استفاده قرار گیرد [۱۴]. در سال‌های اخیر مطالعاتی در زمینه شبیه‌سازی عددی تولید حرارت و تشکیل دکه جوش در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای صورت گرفته است. ژانگ و همکاران [۱۵] توزیع دمایی حین جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای آلومینیم به فولاد استحکام بالا را شبیه‌سازی کرده و با استفاده از نتایج آن هندسه الکتروود را بهینه کردند. رضایی آشتیانی و زراندوز [۱۶] اثر شدت جریان، زمان جوشکاری و قطر نوک الکتروود بر توزیع دما و اندازه دکه جوش را در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای اینکونل ۶۲۵ مورد بررسی قرار دادند. وان و همکاران [۱۷] نیز اثر جریان جوشکاری بر اندازه دکه جوش را در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد DP۶۰۰ با استفاده از روش المان محدود مورد بررسی قرار دادند.

مطالعات انجام شده در زمینه شبیه‌سازی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بر جوش‌های ایجاد شده به شکل تک پالس متمرکز بوده‌اند. با توجه به تمایل محققان به انجام جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با دوپالس جریان بر روی فولادهای مورد استفاده در صنعت خودرو به منظور بهبود خواص جوش حاصل، در این پژوهش، اثر جریان پالس دوم بر توزیع دمایی، هندسه دکه جوش و سیکل حرارتی حین جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای پالسی فولاد TRIP1100 به کمک شبیه‌سازی حرارتی بررسی شد و ریزساختار دکه جوش بر اساس نتایج به دست آمده پیش‌بینی شد. شبیه‌سازی حرارتی بر اساس معادله فوریه و به روش المان محدود انجام گرفت. در ادامه، اثر جریان پالس دوم بر هندسه دکه جوش، ریزساختار و رفتار مکانیکی به شکل تجربی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مورد مقایسه قرار گرفت.

ژول در قطعه ایجاد می‌شود، به صورت غیریکنواخت در قطعه در حال جوش توزیع می‌شود که منجر به توزیع دمای غیریکنواخت می‌شود. این توزیع دمایی را می‌توان با حل معادله دیفرانسیل جزئی زیر با شرایط مرزی مناسب به دست آورد [۱۹]:

$$\nabla(k \cdot \nabla T) + q = \rho C \frac{\partial U}{\partial t} \quad (1)$$

در این رابطه U انرژی داخلی، t زمان، ρ چگالی (۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای قطعات و ۸۹۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای الکترودها)، C گرمای ویژه و k ضریب انتقال حرارت هستند. گرمای ویژه و ضریب انتقال حرارت به دما وابسته بوده و در این پژوهش از مقادیر ارائه شده در مرجع [۲۰] در معادلات استفاده شد. Q سرعت تولید گرما بر واحد حجم در فصل مشترک ورق - ورق است که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود:



شکل (۱): (الف) و (ب) ابعاد و هندسه نمونه‌های آزمون کشش برشی جوش مقاومتی نقطه‌ای.

کلوین در کل قطعه در نظر گرفته شد. به دلیل اینکه سطح قطعه در تماس با هواست و انتقال حرارت از طریق همرفت صورت می‌گیرد، شرط مرزی دیگر شرط همرفت است که توسط رابطه زیر بیان می‌شود [۲۱]:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_a) \quad (4)$$

در این رابطه h ضریب انتقال حرارت، T دمای سطح قطعه و T_a دمای محیط (۳۰۰ کلوین) است. ضریب انتقال حرارت

نمونه‌ها توسط پودر آلومینای ۳۰۰ نانومتری پولیش شده و توسط محلول نایتال ۲٪ حکاکی شدند. ماکروساختار نمونه‌ها توسط استریومیکروسکوپ Olympus و ریزساختار آن‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی^۶ (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. خواص مکانیکی جوش‌های ایجاد شده توسط آزمون کشش برشی^۷ (TS) بر اساس استاندارد AWS D8.9 [۱۸] مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (۱) ابعاد نمونه‌های آزمون مکانیکی را نشان می‌دهد.

۲-۱- شبیه‌سازی المان محدود

اولین گام در شبیه‌سازی حرارتی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به منظور محاسبه توزیع دما در گستره قطعه و یا توزیع دما در هر لحظه در قطعه، انتخاب درست نوع معادله حرارت است. اگر توزیع دما در گستره قطعه مدنظر باشد حل حالت پایدار معادله حرارت انتخاب می‌شود و در صورتی که تغییرات دما در واحد زمان مدنظر باشد، حل حالت گذرا انتخاب خواهد شد. گرمایی که حین جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای طبق رابطه

$$q = RI^2 \quad (2)$$

که در آن R مقاومت الکتریکی و I شدت جریان می‌باشد. یکی از شرایط مرزی مورد نیاز برای شبیه‌سازی حرارتی، دمای اولیه قطعه می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0 \quad (3)$$

در رابطه بالا T دمای هر نقطه با مختصات (x, y, z) در زمان t و T_0 دمای اولیه قطعه است که در این پژوهش برابر ۳۰۰

شده و در برخی مواقع منجر به واگرایی مدل می‌شوند. مش‌بندی بهینه را می‌توان ریزترین مش‌بندی در نظر گرفت که دارای حداقل دقت مورد نیاز و کمترین زمان حل باشد. در این پژوهش ابعاد دکه جوش به‌دست آمده به‌صورت تجربی به‌عنوان معیار حساسیت مش‌بندی در نظر گرفته شد. برای مش‌بندی ابتدا از المان‌های درشت استفاده شد که زمان حل برای آن ۱۲ دقیقه بود؛ اما بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که نتایج از دقت کافی برخوردار نیستند. به‌منظور افزایش دقت، شبیه‌سازی با استفاده از المان‌های ریز نیز انجام شد که زمان محاسبات را به ۱۰۰ دقیقه افزایش داد، اما منجر به افزایش قابل توجه دقت محاسبات شد. در نهایت به‌منظور دستیابی به دقت قابل قبول، همگرایی مسئله و بهینه کردن زمان محاسبات، مطابق شکل (۲) در ورق‌ها که توزیع حرارت در آن‌ها مهم‌تر است از المان‌های ریز و در قسمت‌های دیگر از المان‌های درشت‌تر استفاده شد. نرخ رشد المان نیز برابر ۱/۱ در نظر گرفته شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- محاسبات ترمودینامیکی

شکل (۳) نمودار درصد وزنی تعادلی فازهای به‌دست آمده از محاسبات ترمودینامیکی توسط نرم‌افزار JmatPro را برحسب دما برای فولاد TRIP1100 نشان می‌دهد. طبق این نمودار، ساختار فولاد تا دمای حدود ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد از فریت و سمنتیت تشکیل شده است. در دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد (دمای A_1)، فولاد وارد ناحیه دوفازی فریت - آستنیت می‌شود و این ناحیه تا دمای ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد (دمای A_3) ادامه می‌یابد. در دمای ۸۲۰ درجه سانتی‌گراد فولاد وارد ناحیه تک‌فاز آستنیت می‌شود و آستنیت تا دمای ۱۴۲۵ درجه سانتی‌گراد (دمای سالیدوس) پایدار است. در این دما (سالیدوس) ذوب فولاد آغاز شده و با افزایش دما به ۱۴۹۰ درجه سانتی‌گراد (دمای لیکوئیدوس)، ذوب فولاد کامل می‌شود.

برحسب دما برای فولادهای کربنی طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۲]:

$$h = \begin{cases} 0.68T \times 10^{-8} \quad (W / mm^2) & 0 < T < 500^\circ C \\ (0.23IT - 82.1) \times 10^6 \quad (W / mm^2) & T > 500^\circ C \end{cases} \quad (4)$$

علاوه بر انتقال حرارت به‌صورت همرفتی، انتقال حرارت از سطح فولاد به‌صورت تشعشعی نیز صورت می‌گیرد که این شرط مرزی نیز به‌صورت رابطه زیر نوشته می‌شود [۲۱]:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \varepsilon B (T^4 - T_0^4) \quad (5)$$

در رابطه بالا T دمای سطح، T_0 دمای محیط (۳۰۰ کلوین)، ε ضریب تشعشع و B ضریب استفان - بولتزمن ($5/67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^4$) هستند. ضریب تشعشع برای فولادهای کربنی تابع دما بوده و طبق روابط زیر محاسبه می‌شود [۲۳]:

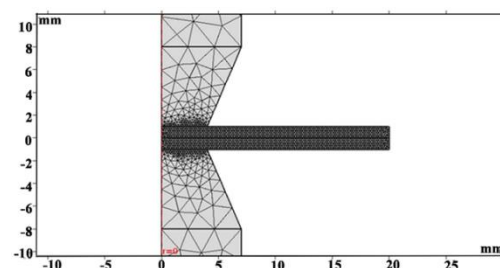
$$\begin{cases} T < 380^\circ C, & \varepsilon = 0.28 \\ 380^\circ C \leq T < 520^\circ C, & \varepsilon = 0.00304 - 0.888 \\ T \geq 520^\circ C, & \varepsilon = 0.69 \end{cases} \quad (6)$$

شبیه‌سازی به روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 15 انجام شد. جهت مدل‌سازی، از هندسه نشان داده شده در شکل (۲) استفاده شد. این هندسه در مختصات استوانه‌ای رسم گردید بدین‌صورت که فقط مقطعی از قطعات تحت جوشکاری شبیه‌سازی می‌شوند و با چرخاندن مقطع، هندسه مدل اصلی نمایان می‌گردد. مش‌بندی قطعات نیز به استفاده از المان‌های مثلثی PLANE67 صورت گرفت. در روش المان محدود نحوه مش‌بندی و اندازه المان‌ها تأثیر زیادی در همگرایی و دقت حل مسئله دارد. المان‌های درشت منتج به کاهش زمان حل و افزایش قابلیت همگرایی مدل می‌گردند ولی از طرف دیگر دقت حل مسئله را کاهش می‌دهند. المان‌های ریز نیز سبب طولانی شدن حل مسئله

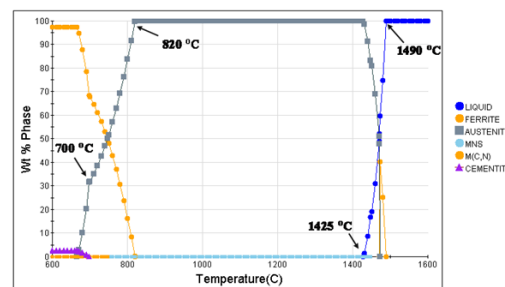
۲-۳- شبیه‌سازی حرارتی

ورودی جوشکاری سبب افزایش ابعاد دکمه جوش و منطقه متاثر از حرارت می‌شود؛ اما به دلیل زمان کوتاه جوشکاری و همچنین هدایت حرارتی بالای الکتروود مسی، امکان انتقال حرارت قابل توجهی به سمت فلز پایه وجود ندارد؛ بنابراین، دمای نواحی دور از دکمه جوش تغییری نخواهد داشت.

نکته دیگری که در پروفیل دمایی به دست آمده از شبیه‌سازی ملاحظه می‌شود این است که ایزوترم‌های دمایی شکل دکمه‌ای به خود می‌گیرند که این موضوع با نتایجی که قبلاً در مورد جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای مشاهده شده است تطابق دارد [۱۴]. علت ایجاد این شکل دکمه‌ای عبور جریان الکتریکی است که در نقاط گوشه‌ای الکتروودهای مسی تمرکز بیشتر شده و اجازه دسترسی و شار بیشتر به نقاط زیرین را نمی‌دهد. این در حالی است که نقاط میانی جوش شار بهتری را عبور می‌دهند و در نتیجه منطقه ذوب بزرگ‌تری را نیز ایجاد می‌کنند. از این رو، شکل منطقه جوش دکمه‌ای می‌گردد.

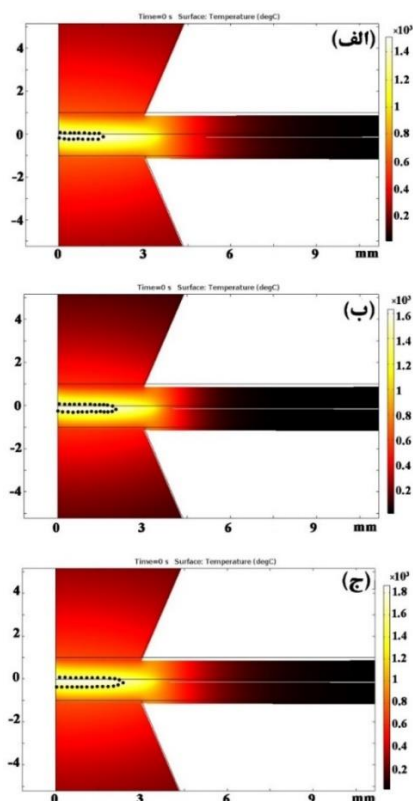


شکل (۲): هندسه مدل و مش‌بندی مورد استفاده.



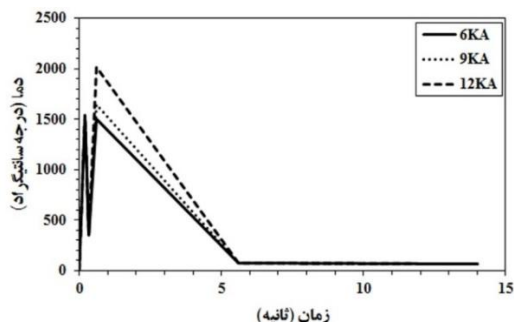
شکل (۳): درصد وزنی تعادلی فازها در فولاد TRIP۱۱۰۰ از دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد تا دمای ۱۶۰۰ درجه سانتی‌گراد.

شکل (۴) توزیع دمایی به دست آمده از شبیه‌سازی جوش مقاومتی را در مقطع عبوری از مرکز دکمه جوش برای نمونه‌های پالسی نشان می‌دهد. برای همه نمونه‌ها، همان‌طور که در مطالعات قبلی نیز مشاهده شده است [۱۴-۱۵] دما در فصل مشترک دو ورق بسیار بالاتر از دما در فصل مشترک الکتروود مسی - ورق است. دلیل این موضوع این است که مقاومت تماسی بین ورق‌های فولاد TRIP۱۱۰۰ بسیار بیشتر از مقاومت تماسی بین الکتروود مسی و ورق فولاد است. دمای ذوب فولاد TRIP۱۱۰۰ با توجه به نتایج ارائه شده در شکل (۳) برابر ۱۴۹۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد و بر اساس آن محدوده دکمه جوش با خط‌چین در پروفیل‌های دمایی مشخص شد. مشاهده می‌شود که با افزایش جریان پالس دوم جوشکاری، اندازه دکمه جوش و منطقه متاثر از حرارت افزایش می‌یابد، اما در دمای مناطق دورتر از دکمه جوش تغییری حاصل نمی‌شود. همچنین، همان‌طور که در نمودار شکل ۵ رسم شده است، حداکثر دمای دکمه جوش نیز با افزایش جریان پالس دوم جوشکاری به شکل خطی افزایش می‌یابد. طبق قانون ژول، با افزایش شدت جریان، حرارت ورودی جوشکاری افزایش می‌یابد.

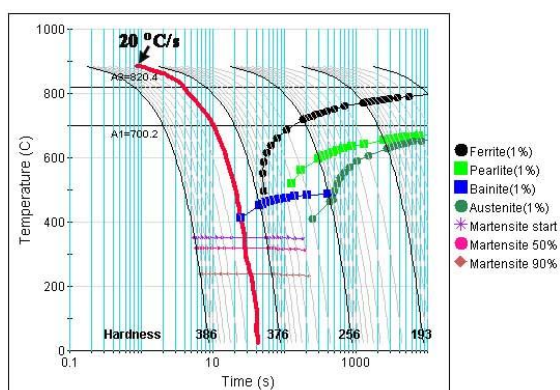


شکل (۴): توزیع دمایی به دست آمده از شبیه‌سازی در نمونه‌های جوشکاری شده با جریان پالس دوم (الف) ۶ کیلوآمپر، (ب) ۹ کیلوآمپر، (ج) ۱۲ کیلوآمپر. خط‌چین‌ها محدوده دکمه جوش را نشان می‌دهند.

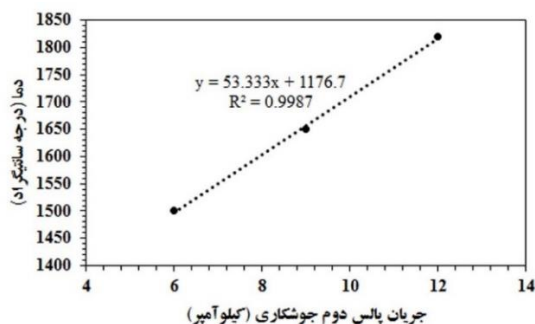
سانتی‌گراد بر ثانیه است که بسیار کمتر از نرخ سرد شدن به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی نمونه‌هاست؛ بنابراین انتظار می‌رود ساختاری تمام مارتنزیتی در دکه جوش همه نمونه‌ها حاصل شود.



شکل (۶): نمودارهای گرم و سرد شدن مرکز دکه جوش در نمونه‌های مختلف.

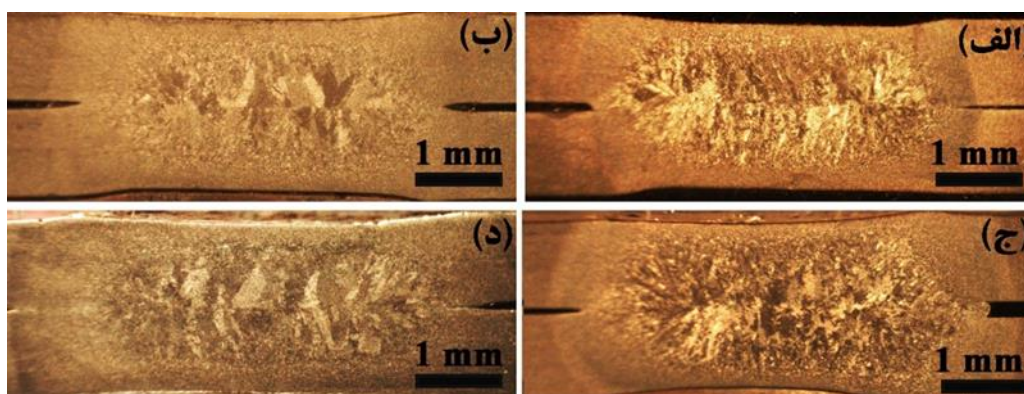


شکل (۷): نمودار استحاله در سرد شدن پیوسته فولاد TRIP1100.



شکل (۵): حداکثر دمای دکه جوش بر حسب شدت جریان جوشکاری.

سیکل گرم و سرد شدن مرکز دکه جوش در نمونه‌های جوشکاری شده با دوپالس در شکل (۶) ارائه شده است. در این سیکل‌های دمایی، پیک اول مربوط به جریان پالس اول و پیک دوم مربوط به جریان پالس دوم است. مشاهده می‌شود که با افزایش جریان پالس دوم، نرخ سرد شدن جوش افزایش می‌یابد. همچنین، نرخ سرد شدن بسیار بالایی برای هر سه نمونه مشاهده می‌شود (بیشتر از ۲۷۵ درجه سانتی‌گراد بر ثانیه). دلیل نرخ سرد شدن بسیار بالا در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای کوچک بودن سطح دکه جوش در مقایسه با ابعاد کلی ورق است که سبب جذب سریع حرارت به اطراف و سرد شدن سریع دکه جوش می‌شود. با توجه به ترکیب شیمیایی فولاد TRIP1100، نمودار استحاله در سرد شدن پیوسته این فولاد با استفاده از نرم‌افزار JmatPro رسم شد. با توجه به این نمودار (شکل ۷)، حداقل سرعت سرد شدن برای حصول ساختاری تمام مارتنزیتی حدود ۲۰ درجه



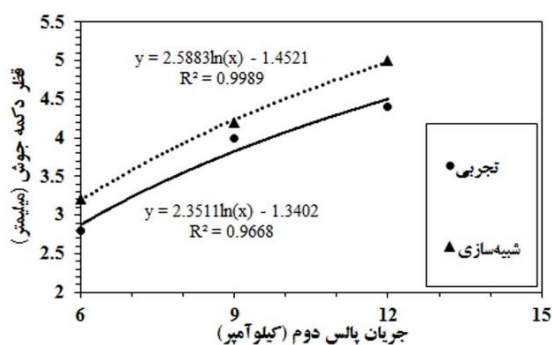
شکل (۸): ماکروساختار جوش‌های مقاومتی نقطه‌ای فولاد TRIP1100، جوش تک پالس با جریان ۱۰ کیلوآمپر، (ب)، (ج) و (د) جوش دوپالسی با جریان پالس دوم به ترتیب ۶ کیلوآمپر، ۹ کیلوآمپر و ۱۲ کیلوآمپر.

۳-۳- بررسی ماکروسکوپی نقطه جوش‌ها

شکل (۸) ماکروساختار مقطع جوش‌های ایجاد شده با پارامترهای مختلف را نشان می‌دهد. در همه نمونه‌ها ساختار ریختگی درشت با دانه‌های ستونی کشیده شده به موازات الکترودها دیده می‌شوند. به دلیل خنک شدن الکترودهای مسی با سیستم آبگرد و هدایت حرارتی بالای مس، انتقال حرارت در حین جوشکاری عمدتاً از طریق الکترودهای مسی صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه دانه‌های ستونی حین انجماد در جهت بیشترین گرادیان دمایی رشد می‌کنند، بنابراین دانه‌های ستونی ایجاد شده در جهت موازی با الکترودهای مسی کشیده می‌شوند. پالس اول جوشکاری سبب تشکیل دکه جوش اولیه شده که در اثر پالس دوم ذوب و انجماد مجدد رخ می‌دهد. دکه جوش ثانویه می‌تواند کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از دکه جوش اولیه باشد. با توجه به ابعاد ناحیه درشت دانه، مشاهده می‌شود که در نمونه جوشکاری شده با جریان پالس دوم ۶ کیلوآمپر (شکل ۸-ب)، دکه جوش ایجاد شده در پالس دوم کوچک‌تر از دکه جوش پالس اول (شکل ۸-الف) است و سبب می‌شود بخشی از ساختار ستونی دکه جوش پالس اول در اثر حرارت پالس دوم ریزتر شود. همچنین، مشاهده می‌شود که با افزایش جریان پالس دوم جوشکاری، قطر دکه جوش افزایش می‌یابد.

به‌منظور مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی حرارتی و نتایج تجربی، قطر دکه جوش‌های به‌دست آمده اندازه‌گیری شد و نتایج حاصل همراه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی در نمودار ارائه شده در شکل ۹ برحسب جریان پالس دوم جوشکاری ترسیم شدند. تطابق خوبی بین نتایج حاصل از شبیه‌سازی و نتایج تجربی (اختلاف کمتر از ۱۵ درصد) دیده می‌شود که نشان‌دهنده دقت بالای شبیه‌سازی انجام شده در پیش‌بینی هندسه نقطه جوش است. علاوه بر این، مشاهده می‌شود که در محدوده جریان مورد بررسی، قطر دکه جوش با افزایش جریان جوشکاری به شکل لگاریتمی افزایش می‌یابد. این

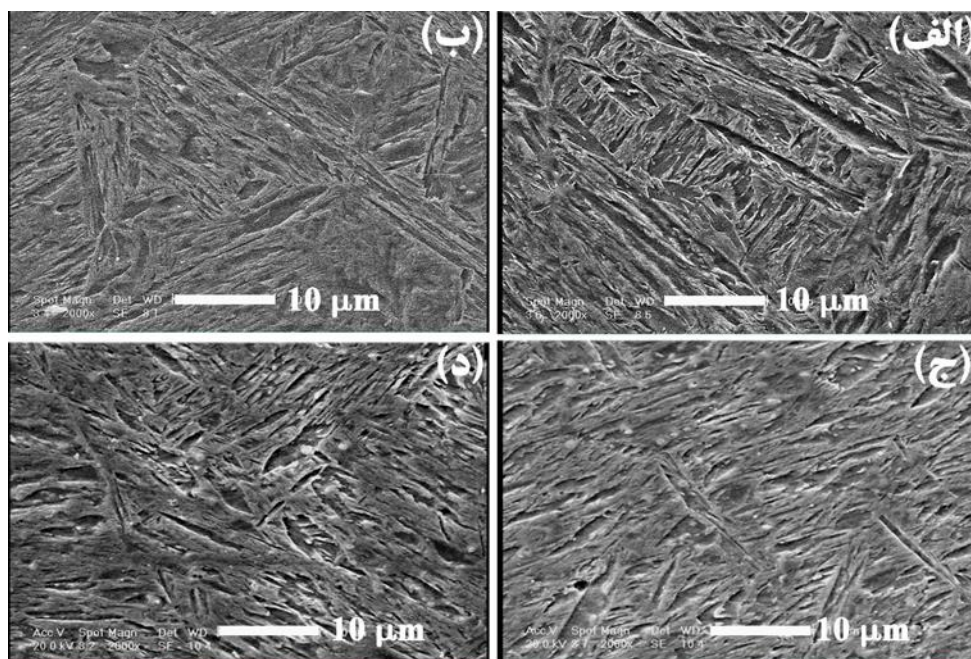
بدان معنی است که قطر دکه جوش در جریان‌های بالاتر تقریباً ثابت و مستقل از شدت جریان خواهد بود. ماریا و گایدن^[۲۴] با بررسی جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای تک پالس فولاد DP۶۰۰ یافتند که قطر دکه جوش با افزایش جریان جوشکاری در اندازه‌ای کمی بیشتر از ۶ میلی‌متر پایدار می‌شود. نتایج مشابهی توسط ژانگ و همکاران [۲۵] در مورد جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای غیرمشابه ورق‌های فولاد دوفازی با ضخامت متفاوت نیز گزارش شده است.



شکل (۹): قطر دکه جوش برحسب جریان پالس دوم جوشکاری.

۳-۴- بررسی ریزساختاری دکه جوش

شکل (۱۰) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار مرکز دکه جوش در نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که ریزساختار تمام نمونه‌ها کاملاً مارتزیتی است که با نتایج پیش‌بینی شده از شبیه‌سازی کاملاً همخوانی دارد. به دلیل سرعت سرد شدن بسیار بالا در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، عمدتاً ساختارهای مارتزیتی در دکه جوش فولادهای پیشرفته استحکام بالا مشاهده می‌شوند که منجر به سختی بسیار بالا در این ناحیه می‌شود [۲۶-۲۷]. به علت پایین بودن درصد کربن فولاد، مارتزیت تشکیل شده از نوع تیغه‌ای است. به دلیل منگنز نسبتاً بالای فولاد، این احتمال وجود دارد که بین لایه‌ها یا بسته‌های مارتزیتی، نواحی بسیار نازکی از آستنیت باقیمانده نیز وجود داشته باشد.

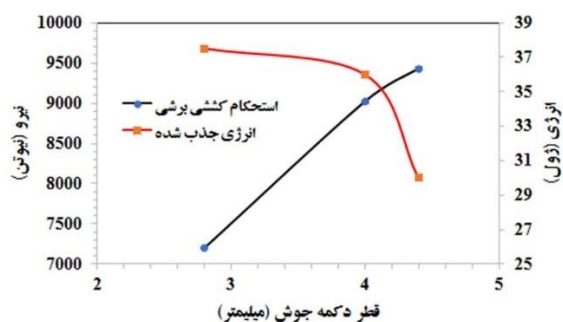


شکل (۱۰): ریزساختار مرکز دکه جوش در نمونه‌های مختلف، (الف) جوش تک پالس با جریان ۱۰ کیلوآمپر، (ب)، (ج) و (د) جوش دوپالسی با جریان پالس دوم به ترتیب ۶ کیلوآمپر، ۹ کیلوآمپر و ۱۲ کیلوآمپر.

جدول (۳): خواص مکانیکی به دست آمده از آزمون‌های کشش برشی و

کشش متقاطع برای نمونه‌های مختلف

انرژی شکست (ژول)	استحکام کششی برشی (نیوتن)	نمونه
۱۶±۰/۵	۷۵۵۰±۱۵	تک پالس ۱۰ کیلوآمپر
۳۷/۵±۱	۷۲۰۰±۱۵	دوپالس ۶ کیلوآمپر
۳۶±۱	۹۰۲۰±۲۰	دوپالس ۹ کیلوآمپر
۳۰±۰/۸	۹۴۳۰±۲۵	دوپالس ۱۲ کیلوآمپر



شکل (۱۱): تغییرات استحکام کششی برشی و انرژی شکست بر حسب قطر دکه جوش.

شکل (۱۱) همچنین نشان می‌دهد که با افزایش قطر دکه جوش، انرژی شکست کاهش می‌یابد. در جوش مقاومتی نقطه‌ای، درز اتصال به‌عنوان یک شیار عمل کرده و می‌تواند شرایط تنش و کرنش سه بعدی را در دکه جوش ایجاد

۳-۵- ارزیابی رفتار مکانیکی

نتایج حاصل از آزمون کشش برشی برای نمونه‌های مختلف در جدول (۳) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که بیشترین نیروی شکست در نمونه دوپالسی با جریان ۱۲ کیلوآمپر وجود دارد. همچنین، انرژی شکست در همه نمونه‌های دوپالسی بیشتر از نمونه تک پالس است. علاوه بر این با افزایش جریان پالس دوم، انرژی شکست کاهش می‌یابد. دلیل افزایش انرژی شکست در جوش‌های دوپالسی نسبت به جوش تک پالس می‌تواند به ریز شدن ساختار پالس اول در کناره‌های دکه جوش در اثر پالس دوم مربوط باشد. به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات خواص مکانیکی نمونه‌های دوپالسی با قطر دکه جوش، نمودار پیشینه نیروی شکست و انرژی شکست بر حسب قطر دکه جوش در شکل (۱۱) رسم شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش قطر دکه جوش، پیشینه نیروی شکست به‌طور خطی افزایش می‌یابد. این افزایش به این دلیل است که با افزایش قطر دکه جوش، مساحت سطح اتصال دو ورق در فصل مشترک افزایش یافته و استحکام اتصال و در نتیجه پیشینه نیروی شکست افزایش می‌یابد [۲۸].

شدند. اندازه دکمه جوش به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و ریزساختار پیش‌بینی شده با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر بودند:

- قطر دکمه جوش با افزایش جریان پالس دوم جوشکاری به شکل لگاریتمی افزایش می‌یابد. همچنین، قطر دکمه جوش پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی اختلاف کمی (کمتر از ۱۵٪) با مقادیر اندازه‌گیری شده به‌صورت تجربی داشت.
- ریزساختار دکمه جوش در تمامی نمونه‌ها به شکل تمام مارتزیتی بود که با نتایج پیش‌بینی شده توسط شبیه‌سازی مطابقت داشت.
- بیشترین نیروی شکست در آزمون کشش برشی با افزایش قطر دکمه جوش به‌طور خطی افزایش می‌یابد. همچنین، انرژی شکست با افزایش قطر دکمه جوش کاهش می‌یابد.

۵- مراجع

[۱] T. Jagadeesha & T. J. S. Jothi, "Studies on the influence of process parameters on the aisi ۳۱۶۱ resistance spot-welded specimens", Int J Adv Manuf Technol, vol. ۹۳, pp. ۷۳-۸۸, ۲۰۱۷.

[۲] M. Tamizi, M. Pouranvari & M. Movahedi, "Welding metallurgy of martensitic advanced high strength steels during resistance spot welding", Sci Technol Weld J, vol. ۲۲, pp. ۳۲۷-۳۳, ۲۰۱۷.

[۳] H. Ashrafi, M. Shamanian, R. Emadi & M. A. Sarmadi, "Comparison of microstructure and tensile properties of dual phase steel welded using friction stir welding and gas tungsten arc welding", steel research int. vol. ۸۹, pp. ۱۷۰۰-۴۲, ۲۰۱۸.

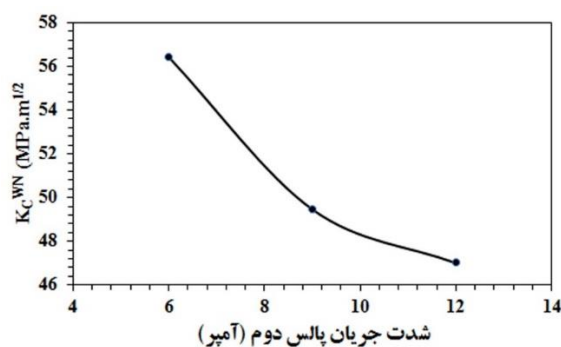
[۴] S. S. Nayak, V. H. B. Hernandez, Y. Okita & Y. Zhou, "Microstructure-hardness relationship in the fusion zone of trip steel welds", Mater. Sci. Eng. A, vol. ۵۵۱, pp. ۷۳-۸۱, ۲۰۱۲.

[۵] A. Kozłowska, A. Grajcar, K. Radwański, J. Opara, K. Matus & P. M. Nuckowski, "Microstructure and temperature-dependent mechanical behavior of hot-rolled TRIP-assisted microalloyed steel", Mater. Charact. vol. ۱۸۶, pp. ۱۱۱۸۰-۴, ۲۰۲۲.

کند. در حین آزمون کشش برشی، بیشینه فاکتور تمرکز تنش معادل (K_{eq}^{TS}) در مجاورت دکمه جوش از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۹]:

$$K_{eq}^{TS} = 0.694 \frac{P}{d \sqrt{t}} \quad (۷)$$

در اینجا P ، t و d به ترتیب بیشینه نیرو، ضخامت ورق و قطر دکمه جوش هستند. با در نظر گرفتن این نکته که K_{eq}^{TS} معادل با فاکتور تمرکز تنش بحرانی دکمه جوش (K_C^{WN}) است، مقدار (K_C^{WN}) می‌تواند از رابطه (۷) محاسبه شود که در واقع همان چقرمگی شکست دکمه جوش است که با نسبت بیشینه نیرو به قطر دکمه جوش رابطه مستقیم دارد. شکل (۱۲) نشان می‌دهد که با افزایش جریان پالس دوم، مقدار (K_C^{WN}) کاهش می‌یابد که این تغییرات با تغییرات انرژی شکست جوش نیز همخوانی دارد. این کاهش در مقدار (K_C^{WN}) به بیرون‌زدگی مذاب و اثرگذاری الکتروود بر سطح دکمه جوش در اثر افزایش شدت جریان نسبت داده شده است [۳۰].



شکل (۱۲): تغییرات فاکتور تمرکز تنش بحرانی دکمه جوش (K_C^{WN}) بر حسب شدت جریان پالس دوم جوشکاری.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، اثر جریان پالس دوم جوشکاری بر اندازه دکمه جوش، ریزساختار و رفتار مکانیکی در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای ورق‌های فولاد TRIP۱۱۰۰ به شکل تجربی مورد بررسی قرار گرفت. توزیع دما و سیکل‌های گرمایش و سرمایش حین جوشکاری به روش المان محدود شبیه‌سازی

- sheets.", Metall Mater Trans A, vol. ۴۶, pp. ۴۰۹۵-۴۱۰۵, ۲۰۱۵.
- [۱۷] X. Wan, Y. Wang & P. Zhang, "Modelling the effect of welding current on resistance spot welding of DP۶۰۰ steel", J. Mater. Proc. Technol., vol. ۲۱۴, pp. ۲۷۲۳-۲۷۲۹, ۲۰۱۴.
- [۱۸] A. W. S. D^۹M, "Test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel materials", American Welding Society, ۲۰۱۲.
- [۱۹] H. Eisazadeh, M. Hamed & A. Halvae, "New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method", Mater. Des., vol. ۳۱, pp. ۱۴۹-۱۵۷, ۲۰۱۰.
- [۲۰] Handbook Committee, ASM Handbook, volume ۶: Welding, brazing, and soldering, ASM International, ۱۹۹۳.
- [۲۱] A. R. Darvazi & M. Iranmanesh, "Thermal modeling of friction stir welding of stainless steel ۳۰۴L", Int J Adv Manuf Technol, vol. ۷۵, pp. ۱۲۹۹-۱۳۰۷, ۲۰۱۴.
- [۲۲] M. Iranmanesh & A. R. Darvazi, "Analytical and numerical simulation of temperature field and residual stresses of butt weld in steel plates used in ship manufacturing", Asian J Appl Sci, vol. ۱, pp. ۷۰-۷۸, ۲۰۰۸.
- [۲۳] H. Sadiq, M. B. Wong, J. Tashan, R. Al-Mahaidi & X. L. Zhao, "Determination of steel emissivity for the temperature prediction of structural steel members in fire", Journal of Materials in Civil Engineering, vol. ۲۵, pp. ۱۶۷-۱۷۳, ۲۰۱۳.
- [۲۴] M. Marya & X. Q. Gayden, "Development of requirements for resistance spot welding dual-phase (DP۶۰۰) steels part ۱—the causes of interfacial fracture", Weld J, vol. ۸۴, pp. ۱۷۲-۱۸۲, ۲۰۰۵.
- [۲۵] H. Zhang, X. Qiu, Y. Bai, F. Xing, H. Yu & Y. Shi, "Resistance spot welding macro characteristics of the dissimilar thickness dual phase steels", Mater. Des., vol. ۶۳, pp. ۱۵۱-۱۵۸, ۲۰۱۴.
- [۲۶] V. H. Baltazar Hernandez, M. L. Kuntz, M. I. Khan & Y. Zhou, "Influence of microstructure and weld size on the mechanical behaviour of dissimilar austenitic-martensitic resistance spot welds", Sci Technol Weld J, vol. ۱۳, pp. ۷۶۹-۷۷۶, ۲۰۰۸.
- [۲۷] A. Ramazani, K. Mukherjee, A. Abdurakhmanov, M. Abbasi & U. Prahl, "Characterization of microstructure and mechanical properties of resistance spot welded advanced high strength steels", Mater. Trans. vol. ۴۹, pp. ۱۶۲۹-۱۶۳۷, ۲۰۰۸.
- [۲۸] H. Zhang, A. Wei, X. Qiu & J. Chen, "Microstructure and mechanical properties of resistance spot welded dissimilar thickness DP۷۸۰/DP۶۰۰ dual-phase steel joints", Mater. Des. vol. ۵۴, pp. ۴۴۳-۴۴۹, ۲۰۱۴.
- [۲۹] V. H. Baltazar Hernandez, Y. Okita & Y. Zhou, "Second pulse current in resistance spot welded trip steel - effects on the microstructure and mechanical behavior", Welding Journal, vol. ۹۱, pp. ۲۷۸-۲۸۵, ۲۰۱۲.
- [۳۰] S. Sajjadi-Nikoo, M. Pournavari, A. Abedi & A. A. Ghaderi, "In situ postweld heat treatment of transformation induced plasticity steel resistance spot welds", Sci. Technol. Weld. Join. vol. ۲۳, pp. ۷۱-۷۸, ۲۰۱۸.
- [۳۱] P. Eftekhari Milani, E. M. Van Der Aa, M. J. M. Hermans & I. M. Richardson, "Microstructural characterisation of double pulse resistance spot welded advanced high strength steel", Sci. Technol. Weld. Join. vol. ۲۲, pp. ۵۴۵-۵۵۴, ۲۰۱۷.
- [۳۲] A. D. Kraus & A. B. Cohen, "Thermal analysis and control of electronic equipment", McGraw-Hill, New York (NY), ۱۹۸۳.
- [۳۳] S. Aslanlar, A. Ogur, U. Ozsarac, E. Ilhan & Z. Demir, "Effect of welding current on mechanical properties of galvanized chromided steel sheets in electrical resistance spot welding", Mater. Des. vol. ۲۸, pp. ۲-۷, ۲۰۰۷.
- [۳۴] M. Pournavari & S. P. H. Marashi, "On failure mode of resistance spot welded DP۹۸۰ advanced high strength steel", Can. Metall. Q. vol. ۵۱, pp. ۴۴۷-۴۵۵, ۲۰۱۲.
- [۳۵] M. Vigneshkumar, P. A. Varthanan & Y. M. A. Raj, "Finite element-based parametric studies of nugget diameter and temperature distribution in the resistance spot welding of AISI ۳۰۴ and AISI ۳۱۶L sheets", Trans Indian Inst Met, vol. ۷۲, pp. ۴۲۹-۴۳۸, ۲۰۱۹.
- [۳۶] W. Zhang, D. Sun, L. Han & Y. Li, "Optimised design of electrode morphology for novel dissimilar resistance spot welding of aluminium alloy and galvanised high strength steel", Mater. Des., vol. ۸۵, pp. ۴۶۱-۴۷۰, ۲۰۱۵.
- [۳۷] H. R. Rezaei Ashtiani & R. Zarandooz, "The influence of welding parameters on the nugget formation of resistance spot welding of Inconel ۶۲۵

۶- پی‌نوشت

- [۱] Transformation Induced Plasticity
- [۲] Khan et al
- [۳] Zhang et al
- [۴] Baltazar Hernandez et al
- [۵] Aslanlar et al
- [۶] Scanning Electron Microscopy
- [۷] Shear-Tension
- [۸] Marya & Gayden
- properties of resistance spot welded DP⁶⁰⁰ steel", *Metals*, vol. ۵, pp. ۱۷۰۴-۱۷۱۶, ۲۰۱۵.
- [۲۸] M. Pouranvari & S. P. H. Marashi, "Failure mode transition in AHSS resistance spot welds. Part I. Controlling factors", *Mater. Sci. Eng. A*, vol. ۵۲۸, pp. ۸۳۳۷-۸۳۴۳, ۲۰۱۱.
- [۲۹] S. Zhang, "Stress intensities at spot welds", *Int. J. Fract.*, vol. ۸۸, pp. ۱۶۷-۱۸۵, ۱۹۷۷.
- [۳۰] M. Pouranvari, S. M. Mousavizadeh, S. P. H. Marashi, M. Goodarzi & M. Ghorbani, "Influence of fusion zone size and failure mode on mechanical performance of dissimilar resistance spot welds of AISI ۱۰۰۸ low carbon steel and DP⁶⁰⁰ advanced high strength steel", *Mater. Des.*, vol. ۳۲, pp. ۱۳۹۰-۱۳۹۸, ۲۰۱۱.