نشریه علوم و فناوری جوشکاری ایران، سال ششم، شماره1، بهار و تابستان1399، صفحه 65-57

بررسی تحولات ساختاری در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای فولاد پیشرفته استحکام بالای DP590

آرین قندی [1]، مرتضی شمعانیان [2]، محمد رضا سلمانی [3]*

1 – گروه مهندسی مواد، پردیس دانشگاه صنعتی اصفهان

2- دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

3 – اداره مهندسی و کیفیت خرید فلزات گروه خودروسازی سایپا

(دریافت مقاله: 1398/01/20 ؛ پذیرش مقاله: 1398/05/13)

چکیده

تحولات ساختاری و سختی در فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 به کمک میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی نمونه‌های جوشکاری‌شده مقاومتی نقطه‌ای بررسی شده است. نمودار سختی مقاطع جوش توسط ریزسختی‌سنجی تهیه و پیک دمایی و توزیع حرارت به کمک نرم افزار Abaqus شبیه‌سازی شد. نتایج نشان می‌دهد با توجه به دمای ایجادشده در هر منطقه دکمه جوش، منطقه تحت تاثیر حرارت و فلز پایه متفاوت دارای ریزساختار متفاوت هستند و این تفاوت بر سختی در مناطق مختلف تاثیرگذار است. حضور جزایر مارتنزیتی تمپرشده، با کسر حدود 44 درصد در زمینه فریت در فلز پایه، ساختار عمدتاً مارتنزیتی در دکمه جوش و ساختار مارتنزیتی به همراه نواحی پراکنده‌ای از فریت در منطقه تحت تاثیر حرارت مشاهده شد. نتایج آزمون ریزسختی‌سنجی نشان‌دهنده تفاوت سختی در مناطق مختلف بود و هم‌چنین مشاهده شد که سختی در منطقه تحت تاثیر حرارت و فلز جوش افزایش یافته است. میزان سختی اندازه‌گیری‌شده در منطقه دکمه جوش، فلز پایه و منطقه تحت تاثیر حرارت، به ترتیب، حدود 400، 200 و 450 ویکرز بود که با ساختارهای مشاهده شده مطابقت داشت.

کلمات کلیدی: فولادهای پیشرفته استحکام بالا DP590، جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای، ریزساختار، ریز سختی‌سنجی، شبیه‌سازی.

Investigation of structural changes in resistance spot welding of advanced high strength steel DP590

A. Ghandi[*1], M. Shamanian[2], M. R. Salmani[3]

1-College of Pardis, Materials Engineering Section, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
2-Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.
3- Ph. D, Eng. & Q. of Auto Steel Division, SAIPA Group, Tehran, Iran.

(Received 9 April 2019 ; Accepted 4 August 2019)

* نویسنده مسئول، پست الکترونیکی: Aryan.ghandi@gmail.com

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

Abstract

The structural and hardness developed in advanced high-strength steel DP590 have been investigated with the help of optical microscopy and scanning electron microscopy on resistance spot welded specimens. The hardness diagram of the weld sections was prepared by microhardness test and the temperature peak and heat distribution were simulated by menas of the Abaqus software. The results show that according to the temperature generated in each region of the weld nugget, the HAZ and base metals have different microstructures, and these difference affects the hardness of the regions. The presence of tempered martensite islands with a fraction of 44% in ferrite matrix in base metal, mainly martensitic structure in the nugget, and martensitic structure along with scattered areas of ferrite in the HAZ was observed. The results of the microhardness tests showed difference in hardness values of the regions, and also it was observed that the hardness values increased in the HAZ and weld zone. The hardness values measured in the nugget, base metal, and HAZ were around 400, 200, and 450 HV which were in accordance with the observed structures.

Keywords: Advanced high strength steel DP590, Spot resistance welding, Microstructure, Microhardness, Simulation.

1- مقدمه

توسعه فولادهای پیشرفته استحکام بالا در صنعت خودروسازی در گرو فهم بهتر متالورژی فیزیکی و مکانیکی این فولاد ها در طی جوشکاری مقاومتی است. جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی شامل برهمکنش‌های پیچیده‌ای بین ویژگی‌های متالورژیکی و فیزیکی مواد در حال جوشکاری می‌شود. درنتیجه برای حصول دکمه جوش[1] با خواص مکانیکی و اندازه مناسب، فهم دقیقی از فرآیند جوشکاری ضروری است. تلاش‌هایی در گذشته برای فهم دقیق اثر متغیرهای جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی بر روی خواص قطعات جوشکاری شده به این روش شده است که برای مثال می توان به بررسی زمان نگهداری بر روی ریزساختار و خواص مکانیکی جوش نقطه ای بین فولاد کم کربن و فولاد استحکام بالای پیشرفته DP590 اشاره نمود [1].

تحقیقات دیگری هم‌چون اثر تمپر چند پالسه روی جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی [2]، اثر مورفولوژی نوک الکترود بر روی کیفیت جوش فولاد دوفازی DP590 [3] و اثر جریان جوشکاری بر روی جوش فولادهای CP [4] انجام شده است. از نظر جوش‌پذیری و سیکل‌های حرارتی در فرآیندهای جوشکاری در فولادهایی با عناصر آلیاژی بالا می توان به این نکته اشاره نمود که جوشکاری باعث تغییرات شدید ریزساختاری در مناطق مختلف جوش می‌شود که بر عملکرد مکانیکی فولاد موثر است [5].

همانطور که اشاره شد اگرچه مطالعاتی در گذشته در این خصوص انجام شده است، ولی به طور کلی فهم دقیق متالورژی فیزیکی و مکانیکی موجود در جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی و روابط بین ویژگی ساختار و فرآیند برای جوشکاری نقطه‌ای مقاومتی فولادهای پیشرفته استحکام بالا محدود است. از طرفی بهبود دانش در رابطه با مشخصات ریزساختاری و رفتار مکانیکی پیش نیاز پیاده‌سازی فولادهای پیشرفته استحکام بالا درکاربردهای خودرویی است [6].

در پژوهش انجام‌شده سعی بر آن است که ارتباط بین خواص و ریزساختار برای ورق‌های فولادی پیشرفته استحکام بالا دوفازی در روش جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای به منظور استفاده در صنعت خودروسازی مشخص شود. در همین راستا به بررسی تحولات ریزساختاری فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 حین جوشکاری مقاومتی نقطه ای به کمک شبیه سازی پرداخته شده است.

2- مواد و روش انجام آزمایش

2-1- مواد اولیه

در این پژوهش از یک فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 با ضخامت 1/6 میلیمتر ساخت شرکت POSCO کره جنوبی با ترکیب شیمیایی ارائه‌شده در جدول‌های (1) و (2) استفاده شد. اطلاعات موجود در جدول (1) با استفاده از آنالیز کوانتومتری به دست آمده است.

1 -Weld Nugget

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

جدول1- ترکیب شیمیایی فولاد DP590 (درصد وزنی) توسط کوانتومتری

نوع فولاد	Cu	Ni	Mo	S	P	Mn	Si	C	Fe
DP590	0.038	< 0.005		0.005	0.024	1.87	0.321	0.0726	پایه

جدول2- ترکیب شیمیایی فولاد دوفازی DP590 طبق استاندارد [2].

Steel type	C	Fe	Mn	P	S
DP590	0.08	97	1.24	0.018	0.005

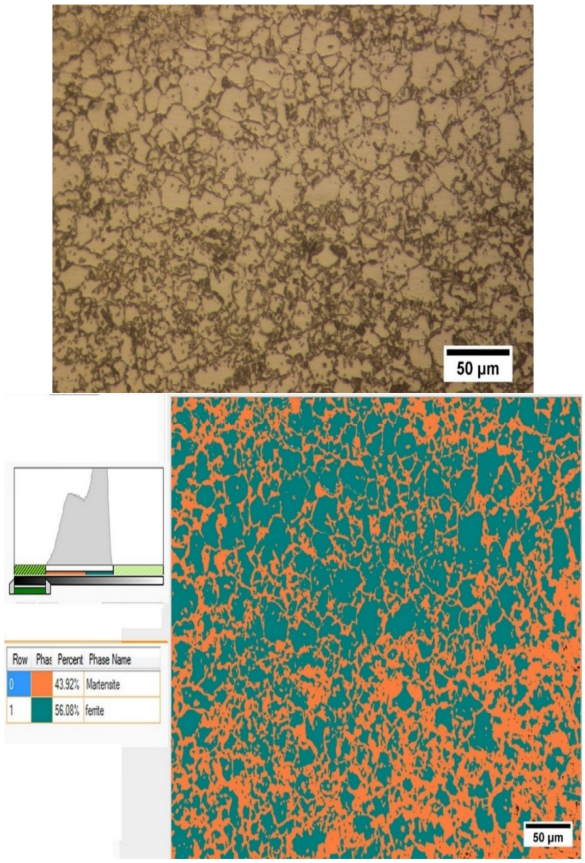
2-2- روش انجام پژوهش

عملیات جوشکاری ورق فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 با ضخامت 1/6 میلی متر توسط فرایند جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای با پارامتر جوشکاری طبق جدول (3) انجام شد. بررسی‌های ریزساختاری به وسیله میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی بر روی نمونه‌های جوشکاری‌شده انجام گرفت. بدین منظور ابتدا بر روی نمونه‌ها به کمک وایرکات برش‌کاری انجام شد و سپس نمونه ها مانت شدند. پس از سنباده‌زنی تا سنباده مش 1200 طبق استاندارد ASTM E3-17، نمونه‌ها توسط محلول سوسپانسیون آلومینا با اندازه 0/3 میکرون پولیش و با محلول اچ نایتال 4 درصد طبق استاندارد ASTM E407-2015 حکاکی شیمیایی شدند. نمودار سختی مقاطع جوش توسط ریزسختی‌سنجی ویکرز طبق استاندارد AWS D8-9M 2012 بر روی نمونه‌ها و با فاصله حدود 0/5 میلی‌متر انجام گرفت. آزمایش ریزسختی‌سنجی در امتداد فصل مشترک و 50 میکرومتر بالاتر و پایین‌تر از خط مرکز جوش و همچنین در راستای عمودی در مرکز جوش انجام شد. علاوه بر آن، بررسی دماهای ایجادشده در مناطق مختلف ناشی از جوشکاری به کمک نرم افزار Abaqus شبیه‌سازی شد.

3- نتایج و بحث

3-1- بررسی‌های ریزساختاری

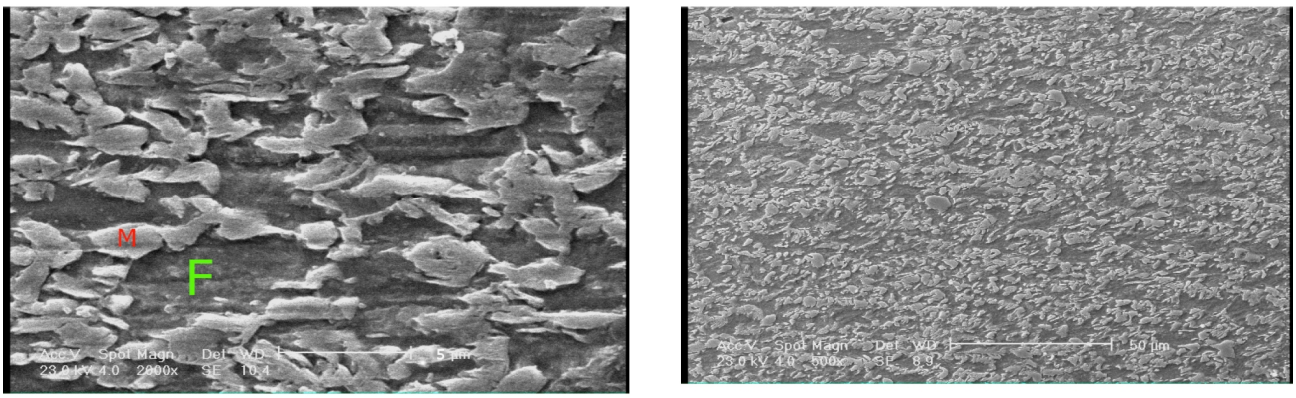
در شکل (1) تصاویر ریزساختاری فلز پایه فولاد پیشرفته استحکام بالا DP59 به دست آمده به وسیله میکروسکوپ نوری نشان داده شده است. این تصویر نشانگر وجود حدود 56 درصد حجمی فریت و 44 درصد حجمی مارتنزیت در فولاد مورد بررسی است.



شکل1- تصویر میکروسکپی از فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 شامل مارتزیت تمپر شده در زمینه فریت

در شکل (2) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ریزساختار فولاد DP590 نمایش داده شده است. ریزساختار نشان‌دهنده جزایر پراکنده مارتنزیت تمپرشده (فاز تیره-روشن)

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]



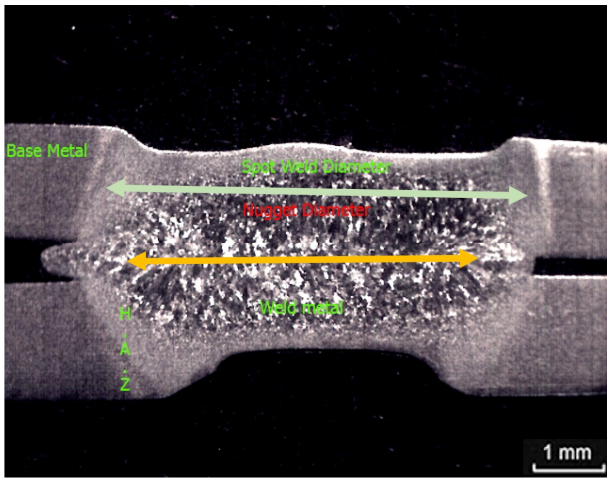
شکل2- تصویر میکروسکپی الکترونی روبشی از فولاد پیشرفته استحکام بالاDP590 در بزرگنمایی های مختلف ریزساختار نشان دهنده جزایر پراکنده مارتنزیت تمپر شده (فاز تیره روشن) در مرز دانه های زمینه فریت (فاز تیره)

در مرزدانه‌های زمینه فریت (فاز تیره) می‌باشد. ساختار فولادهای پیشرفته استحکام بالا دوفازی به صورت زمینه فاز نرم فریت است که جزیره‌های مارتنزیتی درآن پراکنده شده‌اند و هرچه مارتنزیت بیشتر باشد استحکام افزایش می‌یابد. از طرف دیگر افزایش فریت شکل‌پذیری را بهبود می‌بخشد. بنابراین درصد فازهای موجود باید به صورتی انتخاب شود که فولاد علاوه بر داشتن استحکام بالا، شکل‌پذیری قابل قبولی نیز دارا باشد. رفتار این فولادهای دوفازی به کسر حجمی فازها، مورفولوژی، اندازه دانه و مقدار کربن بستگی دارد [7].

ریزساختار اتصالات ایجاد شده در جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای از عوامل تأثیرگذار و تعیین‌کننده بر کیفیت جوش، خواص مکانیکی و عملکرد جوش ایجادشده می‌باشد [8]. با توجه به انجماد و توزیع حرارتی ایجادشده حین جوشکاری چندین ناحیه با ریزساختار های مختلف تشکیل می شود.

در شکل (3) منطقه ذوب، پهنای دکمه جوش، قطر اثر و منطقه تحت تاثیر حرارت نشان داده شده است. قطر دکمه جوش به حرارت ورودی ناشی از میزان جریان ورودی وابسته است. هم‌چنین میزان عمق نفوذ به حرارت ایجادشده در حین جوشکاری وابسته است که این حرارت ورودی با پارامترهای جوشکاری از قبیل جریان و فشار کنترل می شود. ریزساختار دکمه جوش به حرارت ورودی و سرعت سردشدن در حین جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای بستگی دارد [9].

در شکل (4) دمای مناطق مختلف جوش شامل دکمه جوش، منطقه تحت تاثیر حرارت و فلز پایه در حین جوشکاری مقاومتی فولاد DP590 به دست آمده به کمک شبیه‌سازی مشاهده می‌شود. نمودار CCT فولاد DP590 نیز برای ورقی با ضخامت 1/6 میلیمتر در شکل (5) مشاهده می شود.



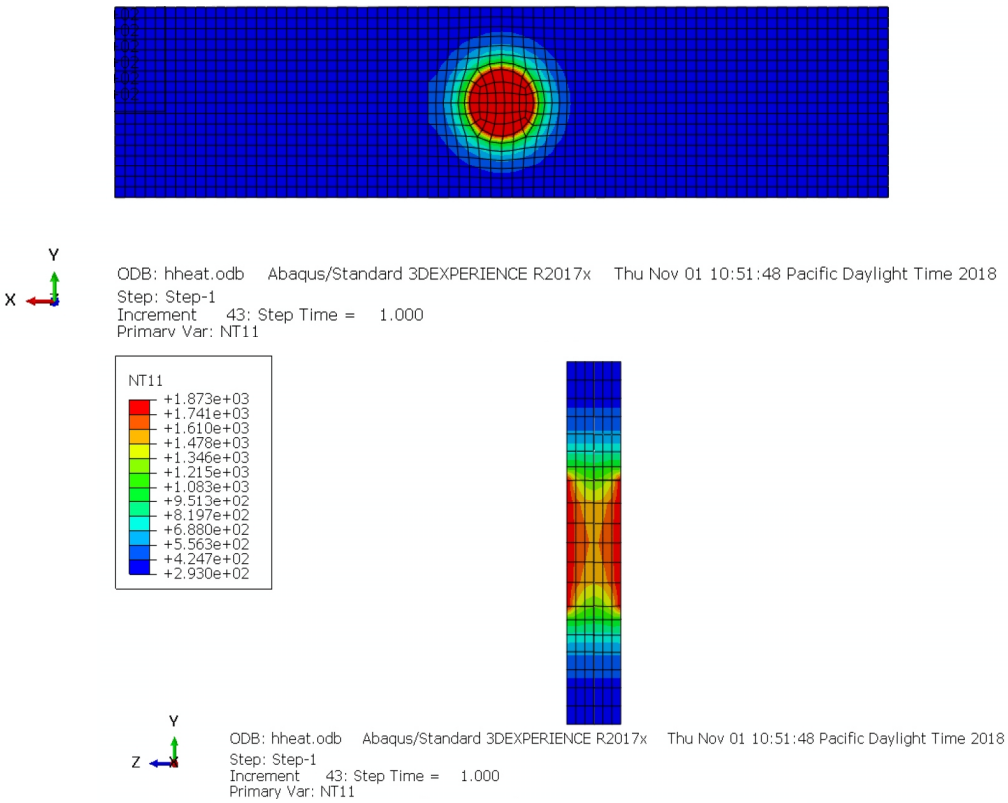
شکل3- قطر دکمه جوش و قطر اثر نمونه جوشکاری شده نقطه ای فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590

مطابق با شکل (4)، پیک دمایی با افزایش فاصله از مرکز جوش کاهش می‌یابد. بر این اساس چندین ناحیه با ریزساختار مختلف تشکیل می‌شود. ریزساختار در منطقه جوش به خاطر نرخ سرمایش بالا در استحاله آستنیت منجر به ساختاری تمام مارتنزیتی به صورت ورقه می‌شود. در منطقه تحت تاثیر حرارت به دلیل نرخ سرمایش بالا ساختار در نواحی منطقه جوش به صورت مارتنزیت بسیار ریز به همراه فریت خشن و جهت‌دار است. در نواحی نزدیک به فلز پایه ساختار مارتنزیتی به همراه درصد کمی فریت تشکیل شده است. با دورشدن از این منطقه، ساختار به فریت نرم و مارتنزیت تمپرشده تبدیل می‌شود. لازم

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

جدول3- پارامتر انتخابی جوشکاری مقاومتی نمونه ها

Squeeze time (cycles)	Weld time (cycles)	Hold time (cycles)	Weld current (kA)	Weld force (kN)	شماره نمونه	نوع فولاد
20	15	20	10	4.2	S	DP590 (thickness) 1.6 mm

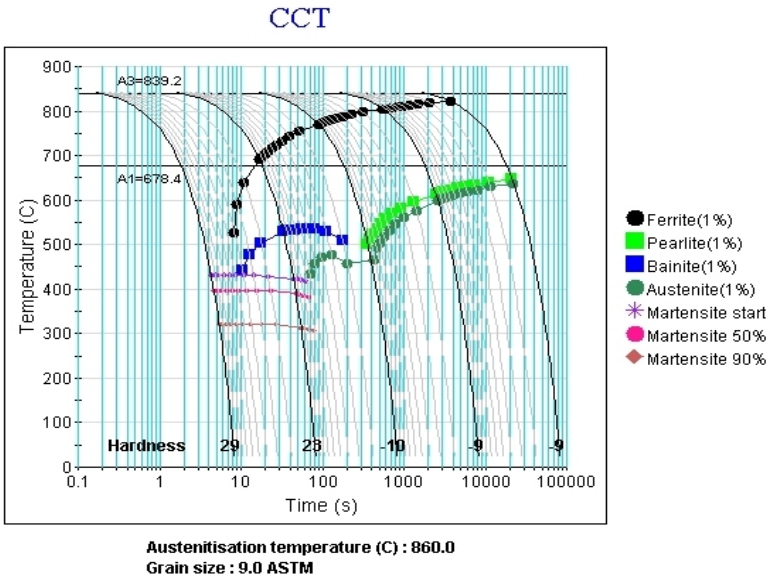


شکل 4- دما شبیه سازی شده در مناطق مختلف جوش به کمک شبیه سازی کمک نرم افزار Abaqus

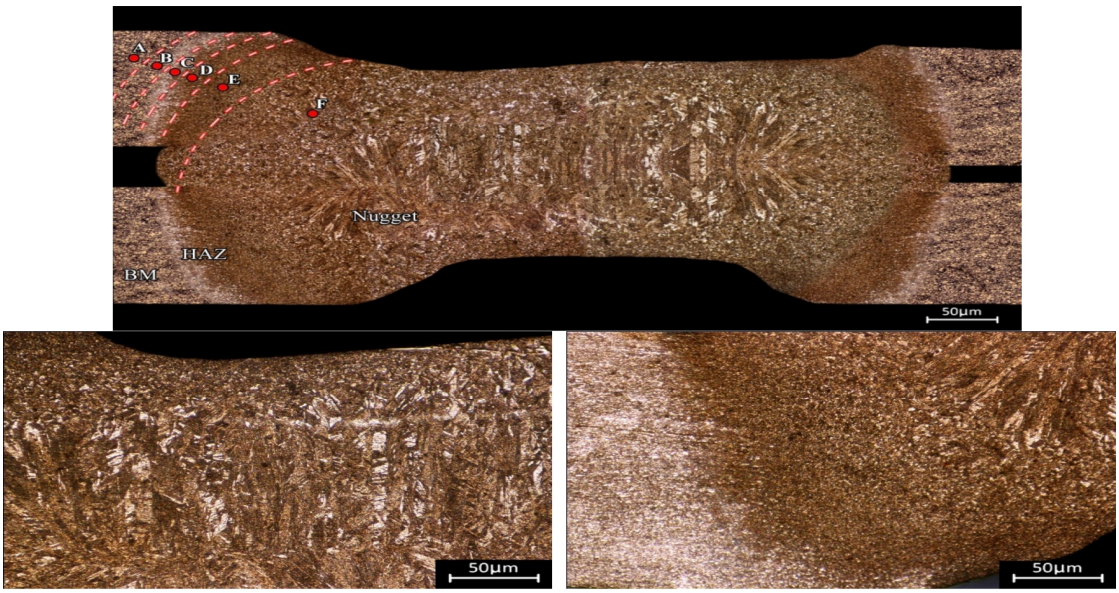
به ذکر است که دانه‌های مارتنزیتی در نواحی جوش درشت‌تر از دانه‌های مارتنزیتی در منطقه تحت تاثیر حرارت هست. مذاب در ناحیه دکمه جوش تحت فشار الکترود به سرعت به صورت فریت دلتا منجمد و سپس در حین سرد کردن به آستنیت تبدیل می‌شود. در ادامه این ساختار می‌تواند به ساختارهای متنوع مانند مارتنزیت یا فریت ویدمن اشتاتن تبدیل شود [10].

در شکل (6) شماتیک سطح مقطع جوش مقاومتی فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 و ریزساختار نواحی مختلف شامل منطقه جوش، منطقه تحت تاثیر حرارت و فلز پایه مشاهده می‌شود. همان‌طور که در شکل دیـــده می‌شود، منـطقـه منطقه تحت تاثیر حرارت شامل ساختار مارتنزیتی است که فاز فریت به صورت پراکنده در آن تشکیل شده است. منطقه نرم بعد از ناحیه تحت تاثیر حرارت شامل فریت دانه درشت و مارتنزیت تمپرشده است. در شکل (7) به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی دکمه جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت نشان داده شده است. تصاویر نشان می دهد که قسمت دکمه جوش عمدتاً مارتنزیت است و فلز پایه ساختار فریتی و مارتنزیتی دارد. منطقه تحت تاثیر حرارت بیشتر شامل مارتنزیت و درصد بسیار کمی فریت است و منطقه نرم بعد از جوشکاری شامل فریت و مارتنزیت تمپر شده هست.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]



شکل 5- نمودار CCT فولاد DP590 به کمک نرم افزار شبیه سازیس JMat



الف

ب

شکل6- ساختار میکروسکوپی نمونه جوشکاری شده DP590 اچ شده توسط نایتال 4 درصد
الف) ساختار منطقه تحت تاثیر حرارت شامل ساختار عمدتا مارتنزیتی به همراه مقادیر کم فریت
و ب) ساختار منطقه جوش شامل ساختار عمدتا مارتنزیتی

در شکل (8) طرح‌واره‌ای از سطح مقطع جوش مقاومتی فولاد دوفازی نشان داده شده است. پیک دمایی با فاصله از مرکز جوش به تدریج کاهش می‌یابد. بر این اساس چندین ناحیه در منطقه تحت تاثیر حرارت تشکیل می‌شود. در این حالت منطقه تحت تاثیر حرارت به 3 قسمت تقسیم‌بندی می شود:

1-ناحیه فوق بحرانی متأثر از حرارت[1] (UCHAZ). این منطقه حداکثر در دمای بالای Ac3 مشاهده می‌شود که خود به دو منطقه تقسیم‌بندی می‌شود:

الف: ناحیه متأثر از حرارت درشت دانه[2]. در این منطقه دانه‌های درشت منطقه تحت تاثیر حرارت مشاهده می‌شود. (منطقه E در شکل (6)).

ب: دانه‌های ریز منطقه تحت تاثیر حرارت (منطقه D در شکل (6)).

رشد این دانه‌ها به وسیله بیشینه دما و زمان در حرارت‌دهی در

1 -Upercritical HAZ

2 - Coarse grain HAZ

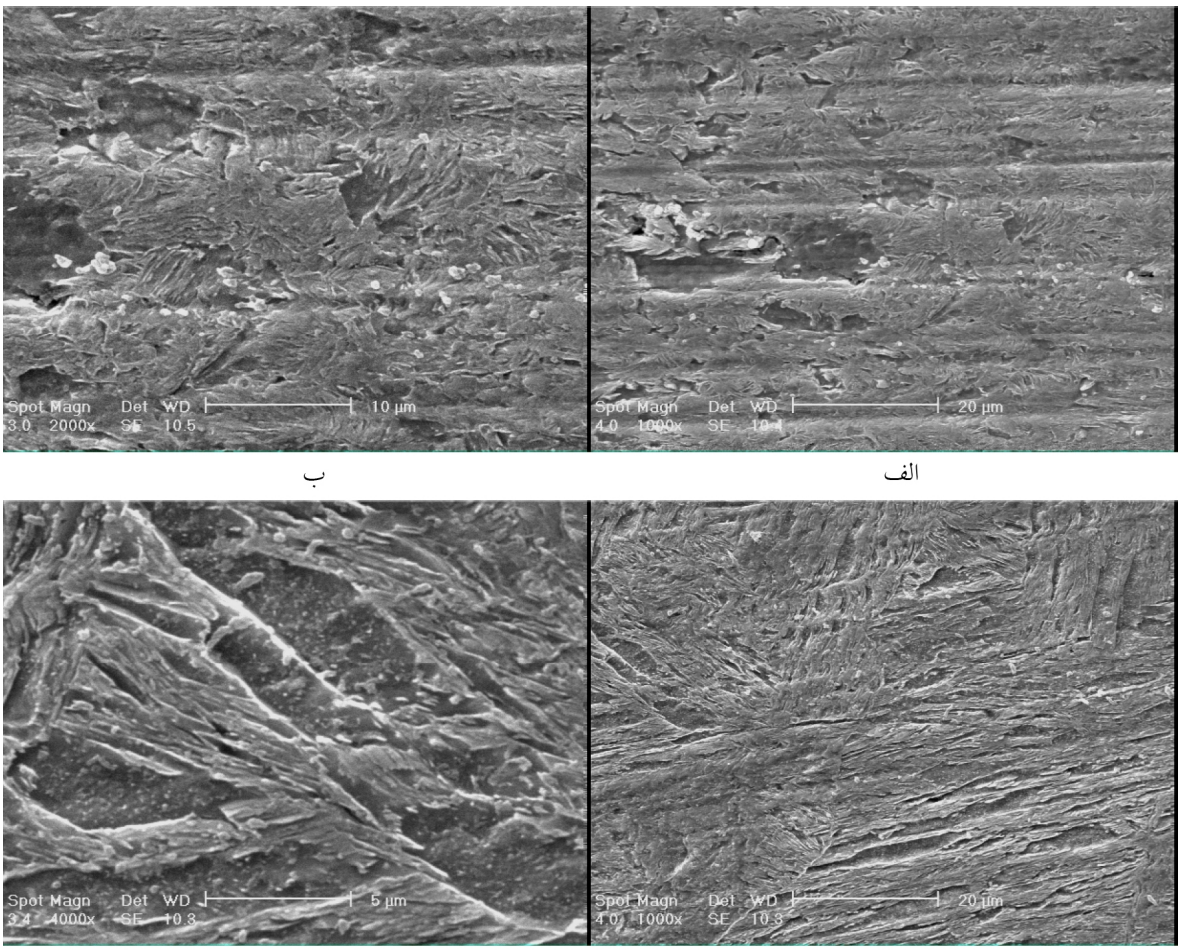
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

ناحیه آستنیت تعیین می‌شود. در منطقه درشت دانه در کنار منطقه ذوب، هم سرعت سردکردن بالا و هم دانه‌های بزرگ آستنیت همراه با تشکیل آستنیت غنی از کربن احتمال تشکیل مارتنزیت را بالا می برد.

به علت سرعت بالای سردشدن و وجود مارتنزیت سوزنی[1] نسبت به مارتنزیت‌های منطقه ذوب، سختی ناحیه متأثر از حرارت درشت دانه برابر و یا حتی بیشتر از سختی منطقه ذوب است.

2-ناحیه متأثر از حرارت بین بحرانی[2] (ICHAZ): در این محدوده حداکثر دما در محدوده بین Ac_1 و Ac_3 است و ریزساختار فلز پایه به فریت و آستنیت در حرارت ایجادشده تغییرشکل می‌یابد. با توجه به میزان سرعت سردکردن آستنیت، مارتنزیت و یا فریت می‌تواند تشکیل شود. در فولادهای DP590، این منطقه معمولا شامل فریت و مارتنزیت است و هرچه حداکثر دما یا پیک دما در این منطقه بیشتر باشد، درحین سریع سرد کردن، درصد مارتنزیت افزایش می‌یابد (منطقه C در شکل (6)).

3-ناحیه متأثر از حرارت تحت بحرانی (SC HAZ)[3]: در این منطقه حداکثر دما زیر خط Ac_1 است که در این منطقه یک ساختار شبه‌پایداری از مارتنزیت و فریت به همراه کاربیدهای



ب الف

د ج

شکل7- ساختار نمونه جوشکاری شده DP590 توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی
الف) و ب) مربوط به منطقه تحت تاثیر حرارت ، ج) و د) مربوط به منطقه جوش می باشد.

1 - Lath martensite

2 - Intercritical HAZ

3 -Subcritical HAZ

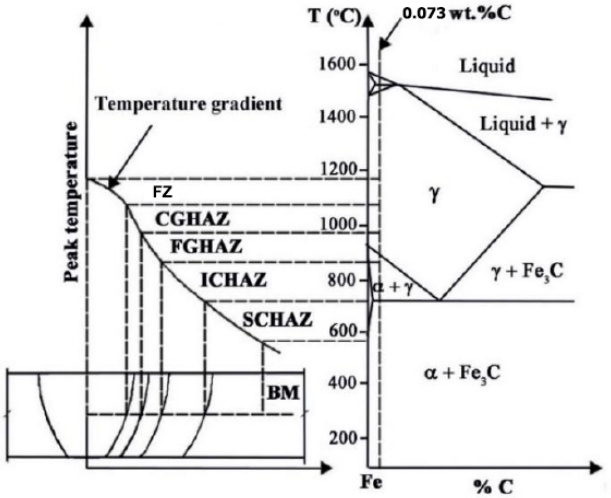
[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]

درشت کربن وجود دارد که این امر باعث کاهش سختی خواهد شد (منطقه B در شکل (6)).

3-2- ریزسختی‌سنجی

فولادهای پیشرفته استحکام بالا DP590 به دلیل دارابودن عناصر آلیاژی از قابلیت سخت‌شدن بالاتری نسبت به فولادهای کم کربن برخوردارند. هنگامی که این فولادها جوشکاری مقاومتی نقطه‌ای می‌شوند، تحت اثرپذیری از اثر کوینچ‌کردن الکترودها که در تماس با سطح ورقه‌ها هستند، جوشی با ساختار ترد مارتنزیتی ایجاد می‌شود [11]. سخت‌شدن جوش و منطقه تحت تاثیر حرارت به طور عمده متأثر از ترکیب فلز مورد استفاده است. کربن به شدت بر سخت شدن مارتنزیت اثرگذار است. آلیاژهای که سختی‌پذیری فولاد را افزایش می‌دهند، مانند منگنز، منجر به افزایش قابل توجه سختی فولادهای استحکام بالا می‌شوند. نمودار سختی جوش در شکل (9) نشان داده شده است. نمودار نشان می‌دهد که نمونه به 4 قسمت فلز پایه، منطقه نرم[1]، ناحیه متأثر از حرارت و دکمه جوش تقسیم‌بندی می‌شود. یک پیک بین دکمه جوش و ناحیه متأثر از حرارت وجود دارد که می‌تواند به تاریخچه حرارتی این منطقه و اندازه دانه‌های کوچکتر نسبت به دکمه جوش مرتبط شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، سختی مناطق متفاوت است به صورتی که در منطقه نزدیک دکمه جوش، سختی بیشتراز مناطق دورتر از دکمه جوش است. منطقه‌ای دیگر بین فلز پایه و منطقه تحت تاثیر حرارت وجود دارد که به منطقه نرم معروف است و حدود 200 ویکرز سختی دارد. سختی فلز پایه نیز 210 ویکرز است. هم‌چنین سختی دکمه جوش نیز حدود 460 ویکرز هست که دلیل بیشتربودن سختی دکمه جوش نسبت به قسمت‌های دیگر وجود مارتنزیت بیشتر در ساختار است. سختی در منطقه فلز پایه به این دلیل از سایر مناطق کمتر است که شامل زمینه‌ای از فریت نرم می‌باشد. در منطقه تحت تاثیر حرارت هم مقدار ناچیزی فریت وجود دارد اما این فریت به فریت خشن تبدیل شده است؛ بنابراین سختی در این ناحیه بالاتر است.

1 -Soft Zone



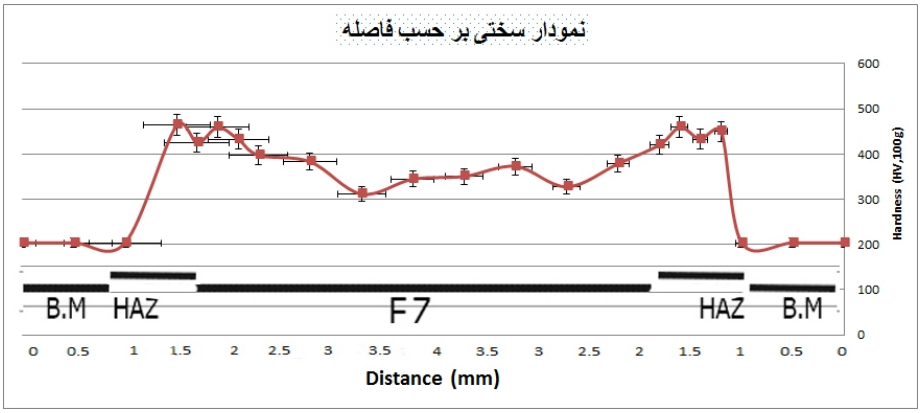
شکل8- شماتیک نواحی نمودار تعادلی آهن کربن و ارتباط آن با سطح مقطع جوش فولاد های دو فازی

این ناحیه سختی بالاتری نسبت به منطقه جوش نیز دارد که عواملی مانند کاهش اندازه دانه و مقدار تنش باقی‌مانده می‌تواند از دلایل افزایش سختی در این ناحیه باشد. هم‌چنین، از دلایل کمتربودن سختی در منطقه جوش نسبت به منطقه تحت تاثیر حرارت می‌توان به مقدار کربن در دکمه جوش اشاره نمود. سختی مارتنزیت به میزان کربن وابسته است و از آن‌جاکه در حین انجماد احتمال نفوذ کربن در مناطق تحت تاثیر حرارت بیشتر است، می تواند از عوامل دیگر افزایش سختی در این ناحیه باشد. از آن‌جایی‌که دانه‌های مارتنزیت در ناحیه تحت تاثیر حرارت ریزتر است، بنابراین سختی ناحیه مذکور بیشتر می‌شود. در ناحیه فلز جوش ساختار عمدتاً مارتنزیت ورقه‌ای شکل باعث افزایش سختی شده است. در شکل (9) مناطق مختلف و نمودار سختی نشان داده شده است.

4- نتیجه گیری

- ریزساختار فلز پایه فولاد پیشرفته استحکام بالا DP590 شامل حدود 44 درصد مارتنزیت تمپرشده در زمینه فریتی است. ریزساختار فلز جوش مارتنزیتی است و در منطقه تحت تاثیر حرارت ساختار عمدتاً مارتنزیتی به همراه نواحی پراکنده‌ای از فریت هست.

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]



شکل9- نمودار سختی بر حسب فاصله میلی متر مربوط به نمونه جوشکاری شده

- با توجه به نتایج شبیه‌سازی، مشاهده می‌شود که استحاله آستنیت به مارتنزیت در مناطق تحت تاثیر حرارت و دکمه جوش که حداکثر دما در این مناطق بالای خط Ac1 است، اتفاق می افتد و در فلز پایه استحاله‌ای صورت نمی گیرد.

- با توجه به دمای مربوط به مناطق ما بین فلز پایه و منطقه تحت تاثیر حرارت مشاهده می شود که حداکثر دما در این منطقه زیر خط Ac1 است. در این منطقه یک ساختار شبه پایداری از مارتنزیت به همراه فریت درشت دانه وجود دارد. این امر باعث کاهش سختی شد.

- سختی در منطقه دکمه جوش در حدود 400 ویکرز، در فلز پایه در حدود 200 ویکرز و در منطقه تحت تاثیر حرارت در حدود 450 ویکرز اندازه‌گیری شد که این نتایج با مشاهدات ریزساختاری مطابقت داشت.

منابع

[1] X. Yuan, Ci Li, J.Chen., X. Li ., X. Liang., X. Pan, " Resistance spot welding of dissimilar DP600 and DC54D steels" Journal of Materials Processing Technology 239 31–41, 2017

[2] B. Wang, L. Hua, X. Wang, and J. Li, "Effects of multi-pulse tempering on resistance spot welding of DP590 steel," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 86, pp. 2927-2935, 2016.

[3] B. Wang, L. Hua, X. Wang, Y. Song, and Y. Liu, "Effects of electrode tip morphology on resistance spot welding quality of DP590 dual-phase steel," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 83, pp. 1917-1926, 2016.

[4] H. Long, Y. Hu, X. Jin, J. Shao, and H. Zhu, "Effect of holding time on microstructure and mechanical properties of resistance spot welds between low carbon steel and advanced high strength steel," Computational Materials Science, vol. 117, pp. 556-563, 2016.

[5] J. P. Kong, T. K. Han, K. G. Chin, B. G. Park, and C. Y. Kang, "Effect of boron content and welding current on the mechanical properties of electrical resistance spot welds in complex-phase steels," Materials & Design (1980-2015), vol. 54, pp. 598-609, 2014.

[6] M. Pouranvari, S. P. H. Marashi," Critical review of automotive steels spot welding: process, structure and properties", Science and Technology of Welding and Joining VOL 18 NO 5 , 2013

[7] Y. J. Chao, J. Ward, and R. G. Sands, "Charpy impact energy, fracture toughness and ductile–brittle transition temperature of dual-phase 590 Steel," Materials & design, vol. 28, pp. 551-557, 2007.

[8] B. K. Zuidema, "Bridging the design–manufacturing–materials data gap: material properties for optimum design and manufacturing performance in light vehicle steel-intensive body structures," JOM, vol. 64, pp. 1039-1047, 2012.

[9] D. K. Matlock, J. G. Speer, E. De Moor, and P. J. Gibbs, "Recent developments in advanced high strength sheet steels for automotive applications: an overview," Jestech, vol. 15, pp. 1-12, 2012.

[10] D.W. Zhao, Y.X. Wanga, L. Zhang, P. Zhang," Effects of electrode force on microstructure and mechanical behavior of the resistance spot welded DP600 joint", Materials and Design 50, 72-77, 2013

[11] S.Dancette, D.Fabrègue, V.Massardier, J.Merlin, T.Dupuy, M.Bouzekri "Experimental and modeling investigation of the failure resistance of Advanced High Strength Steels spot welds", Engineering Fracture Mechanics 78 , 2259-2272, 2011

[Downloaded from jwsti.iut.ac.ir on 2025-07-19]